

Rahmenecken aus Holz mit eingeklebten Gewindestangen

Peter Lippert

Mitteilungen

Rahmenecken aus Holz mit eingeklebten Gewindestangen

Von der Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktors
der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

vorgelegt von
Peter Lippert
aus München

Hauptberichter: Professorin Dr.-Ing. U. Kuhlmann
Mitberichter: Professor Dr.-Ing. H. W. Reinhardt

Tag der mündlichen Prüfung: 01.08.2002

Institut für Konstruktion und Entwurf der Universität Stuttgart

2002

Mitteilungen des Instituts für Konstruktion und Entwurf; Nr. 2002-4

Peter Lippert Rahmenecken aus Holz mit eingeklebten Gewindestangen

Herausgeber Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann
Pfaffenwaldring 7
70569 Stuttgart
Telefon: (0711) 685 6245
Telefax: (0711) 685 6236

Redaktion Dr.-Ing. Hans-Peter Günther

Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Konstruktion und Entwurf der Universität Stuttgart entstanden.

Frau Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann, Institut für Konstruktion und Entwurf der Universität Stuttgart, danke ich herzlich für die Unterstützung bei der Durchführung der Versuche und der Erstellung der Arbeit, die Übernahme des Hauptberichts sowie für die Finanzierung der Versuche.

Herrn Prof. Dr.-Ing. H.-W. Reinhardt danke ich für die Durchsicht der Arbeit und die Übernahme des Mitberichts.

Herr Dr. Simon Aicher, Otto Graf Institut der Universität Stuttgart, gab die Anregung zu dieser Arbeit. Ich möchte ihm für die Unterstützung und die guten Ratschläge danken. Ohne ihn hätten die Versuche nicht durchgeführt werden können.

Bedanken möchte ich mich auch bei den Mitarbeitern des Otto-Graf-Instituts für die Mithilfe bei der Vorbereitung und Durchführung der Versuche, allen voran Herrn Andreas Bäder.

Ein weiterer Dank gilt meinen Kollegen und Kolleginnen, den wissenschaftlichen Hilfskräften sowie den Verfassern der von mir betreuten Diplomarbeiten des Instituts für Konstruktion und Entwurf der Universität Stuttgart für die Anregungen und die gute Zusammenarbeit.

Meinen persönlichen Dank aussprechen möchte ich Jürgen Fries und Jörg Schänzlin für die fruchtbaren Diskussionen und Thomas Kohlhammer für die Unterstützung bei den Versuchen und die Erstellung der Zeichnungen.

Ein ganz besonderer Dank gilt meiner Freundin, meiner Familie und meinem Freundeskreis für ihre Unterstützung und ihr Entgegenkommen, sowie der großen Geduld, Toleranz und Rücksichtnahme während der intensiven Arbeitsphasen.

Stuttgart, im Oktober 2001

Peter Lippert

Kurzdarstellung

Rahmenecken mit eingeklebten Gewindestangen bieten im Vergleich zu herkömmlichen Rahmeneckverbindungen Vorteile im Hinblick auf Tragfähigkeit, Herstellung, Montage und Transport.

Zur Umsetzung dieser Vorteile wird auf der Basis existierender Verbindungen mit eingeklebten Gewindestangen ein neuer Verbindungstyp entworfen, der einfach zu erstellen und schnell zu montieren ist. Er ermöglicht eine effiziente, rationale Fertigung und Errichtung von Tragwerken, da die Rahmenelemente einzeln auf die Baustelle transportiert und dort mittels stahlbaumäßiger Verbindungen schnell zusammengefügt werden können.

Der Kraftfluß in dieser Verbindung wird untersucht und durch ein mechanisches Modell erfaßt. Für die Berechnung erforderliche Annahmen werden anhand von FE-Berechnungen festgelegt. Bauteilversuche an zwei Rahmenecken bestätigen die getroffenen Annahmen und das entwickelte mechanische Modell.

Wird die Rahmenecke ausschließlich durch schließendes Moment belastet, kann die Druckkraft durch Kontakt übertragen werden. Eine Erhöhung des Querschnittes im Eckbereich durch Anordnung einer Voute verbunden mit einer Verstärkung des Druckbereiches kann die Querschnittsausnutzung der Rahmeneckverbindung auf 100% der Momententragfähigkeit des Rahmenquerschnittes steigern.

Wird der durch eine Voute erhöhte Querschnitt durch ein öffnendes Moment belastet, erfolgt die Zugkrafteinleitung in den Querschnitt entlang des Voutenrandes, schräg zur Faser. Aus der Aufteilung der Kraft in Zug parallel und rechtwinklig der Faserrichtung resultiert unmittelbar Querzugversagen. Bei der Übertragung öffnender oder wechselnder Momente muß daher auf eine Voute verzichtet werden.

Für den Nachweis des Holzquerschnittes am Ende der Gewindestangen ist die Kenntnis der Spannungsverteilung im Holz notwendig. Diese wird auf der Basis einer Parameterstudie mit einem dreidimensionalen numerischen Modell berechnet. Zur einfachen Anwendung wird die Lastausbreitung in Abhängigkeit verschiedener geometrischer Parameter und Materialkennwerte als Winkel zur Gewindestangenachse angegeben.

Eingeklebte Gewindestangen können mit der in Arbeit befindlichen Neufassung der DIN 1052 eingesetzt werden. Ihre Verwendung wird die Optimierung bestehender wie auch die Entwicklung neuer Verbindungen ermöglichen und damit dem Holzbau weiteren Auftrieb geben.

Abstract

Frame corners with glued-in steel rods have many advantages compared to conventional frame corners with respect to load bearing capacity, manufacturing, erection and transport.

In order to utilize these advantages a new type of frame corner design based on existing connections with glued-in steel rods has been developed. The new frame corner is easy to manufacture and can be rapidly erected. Framed structures can be erected efficiently, as the frame members are transported separately to the construction site, where they are easily joined by steel connections.

The load path in this connection is examined and modelled with a mechanical model. Assumptions necessary for the modelling of the connection are gained through finite element calculations. Full scale tests of two frame corners verify the assumptions made and the developed mechanical model.

If the frame corner is loaded by a closing moment only, the compression force can be transferred through contact. A heightening of the frame corner with a haunch combined with a strengthening of the compression zone may enlarge the load bearing capacity of the connection up to 100% of the moment carrying capacity of the frame members.

If the heightened cross section is loaded by an opening moment, the tensile force is introduced into the cross section parallel to the edge of the haunch, at an angle to the grain. As the tensile force is divided into forces parallel and perpendicular to the grain, loading by an opening moment results in tension failure perpendicular to the grain. Thus, if the frame corner is loaded by opening moments, a haunch has to be avoided.

To design the timber cross section at the end of the glued-in rods, the stress distribution at this point must be known. The stress distribution is calculated with a model based on a parametric study with a three-dimensional numerical model. For easy application the load distribution is expressed as an angle to the rod axis, dependent on various geometric and material parameters.

With the finalization of the new German code DIN 1052 glued-in rods may be easily used. This enables the optimization of existing connections as well as the development of new connections, contributing to the advancement of timber construction.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	i
Kurzdarstellung	iii
Abstract	iv
1 Einleitung	1
1.1 Anforderungen an Verbindungen	1
1.2 Lastausbreitung	1
1.3 Rahmenecken	3
1.4 Zielsetzung und Abgrenzung	5
1.5 Übersicht	6
2 Verbindungen mit eingeklebten Gewindestangen	9
2.1 Allgemeines	9
2.2 Eingeklebte Gewindestangen	9
2.2.1 Allgemeines	9
2.2.2 Tragverhalten	11
2.2.2.1 Achsialbeanspruchung	11
2.2.2.2 Querbeanspruchung	13
2.2.3 Bemessung	14
2.2.3.1 Achsialbeanspruchung	14
2.2.3.2 Querbeanspruchung	22
2.2.3.3 Kombinierte Beanspruchung	23
2.2.4 Einfluß des Klimas und der Lasteinwirkungsdauer	24
2.2.5 Verschiebungsmodul	25
2.2.5.1 Achsialbeanspruchung	25
2.2.5.2 Querbeanspruchung	26
2.3 Stöße mit nachträglich vergossenen Gewindestangen	26
2.4 Stöße mit nachträglich verschweißten Gewindestangen	27
2.5 Stöße mit nachträglich verschraubten Gewindestangen	28
2.6 Einfluß der Quell- und Schwindverformung	32
2.7 Wirtschaftlichkeit	33
2.8 Zusammenfassung	34

3	Lastausbreitung bei eingeklebten Gewindestangen	37
3.1	Experimentelle Untersuchungen	37
3.1.1	Versuchskörper	37
3.1.1.1	Allgemeines	37
3.1.1.2	Abmessungen	37
3.1.1.3	Holzgüte	40
3.1.1.4	Stabilität	41
3.1.1.5	Gewindestangen	41
3.1.2	Versuchsdurchführung	42
3.1.3	Versuchsauswertung	43
3.1.3.1	Versagensursache	43
3.1.3.2	Traglasten	43
3.1.3.3	Last-Verformungs-Verhalten	44
3.1.3.4	Hauptdehnungsrichtungen	47
3.1.4	Zusammenfassung	47
3.2	Numerische Untersuchungen	49
3.2.1	Allgemeines	49
3.2.2	Werkstoffparameter	49
3.2.3	Modellierung	52
3.2.3.1	Allgemeines	52
3.2.3.2	Modell 1	53
3.2.3.3	Modell 2	53
3.2.3.4	Modell 3	54
3.2.3.5	Bewertung	55
3.2.4	Parameterstudie	65
3.2.4.1	Allgemeines	65
3.2.4.2	Herleitung des Lastausbreitungswinkels	66
3.2.4.3	Darstellung der Ergebnisse	66
3.2.4.4	Kraft-Faserwinkel	67
3.2.4.5	Körperabmessungen	70
3.2.4.6	Gewindestangenschlankheit	75
3.2.4.7	Werkstoffparameter	78
3.2.4.8	Schlußfolgerung	85
3.3	Berechnungsvorschlag	86
3.3.1	Berechnung des Lastausbreitungswinkels	86
3.3.2	Gültigkeit	87
3.4	Zusammenfassung	88
4	Tragverhalten gewinkelter Verbindungen	89
4.1	Allgemeines	89
4.2	Schnittgrößenumlenkung	90
4.3	Abtragung der Umlenkkraft	91
4.4	Schnittgrößenkombination	94
4.5	Kraftverlauf in den Bauteilen	95

4.5.1	Allgemeines	95
4.5.2	Moment und Normalkraft	96
4.5.3	Querkraft	96
4.5.4	Kraftverlauf in der Rahmenecke	96
4.5.5	Einfluß der Voute	98
4.6	Zusammenfassung	99
5	Experimentelle Untersuchung der Rahmeneckverbindung	101
5.1	Allgemeines	101
5.2	Konstruktion der Versuchskörper	102
5.2.1	Schließendes Moment	102
5.2.2	Öffnendes Moment	102
5.2.3	Voute	103
5.2.4	Ausbildung der Versuchskörper	104
5.2.4.1	Versuchskörper 1	104
5.2.4.2	Versuchskörper 2	104
5.2.5	Gewindestangen	106
5.2.5.1	Abstände und Durchmesser	106
5.2.5.2	Verstärkung des Hirnholzes	106
5.2.6	Stahlteile	107
5.2.6.1	Allgemeines	107
5.2.6.2	Stahlteil an der äußeren Ecke	109
5.2.6.3	Stahlteil an der inneren Ecke	111
5.3	Tragfähigkeiten	113
5.3.1	Holzquerschnitt	113
5.3.2	Gewindestangen	114
5.3.2.1	Allgemeines	114
5.3.2.2	Querschnitt	114
5.3.2.3	Verklebung	115
5.4	Meßwerterfassung	116
5.5	Versuchsdurchführung	119
5.5.1	Allgemeines	119
5.5.2	Versuchskörper 1	119
5.5.3	Versuchskörper 2	120
5.6	Versuchsauswertung	123
5.6.1	Traglasten	123
5.6.2	Steifigkeit	126
5.6.3	Druckzonenhöhe	127
5.6.4	Verstärkung des Einleitungsbereichs der Gewindestangen	130
5.6.5	Verformung des Stahlteils	131
5.6.6	Last-Verformungs-Verhalten	133
5.6.6.1	Körper 1	133
5.6.6.2	Körper 2	133
5.6.6.3	Körper 2 - öffnendes Moment	135

5.6.6.4	Vergleich der Last-Verformungskurven	136
5.6.7	Zusammenfassung	136
6	Mechanisches Modell der Rahmeneckverbindung	139
6.1	Allgemeines	139
6.2	Annahmen der Modellbildung	140
6.2.1	Allgemeines	140
6.2.2	Zugkraftaufnahme durch Gewindestangen	141
6.2.3	Druckkraftaufnahme durch Kontakt	142
6.2.4	Verstärkung der Druckzone	144
6.2.5	Aufnahme der Umlenkraft	146
6.2.6	Voute	147
6.3	Kraftaufteilung mit Kontakt bei schließendem Moment	147
6.4	Kraftaufteilung mit Kontakt bei öffnendem Moment	153
6.5	Kraftaufteilung ohne Kontakt für wechselndes Moment	156
6.6	Kraftaufteilung bei den Versuchskörpern	159
6.6.1	Versuchskörper 1	159
6.6.2	Versuchskörper 2 - schließendes Moment	164
6.6.3	Versuchskörper 2 - öffnendes Moment	168
6.7	Zusammenfassung	168
7	Zusammenfassung und Ausblick	171
7.1	Zusammenfassung	171
7.2	Ausblick	172
8	Literaturverzeichnis	175
9	Bezeichnungen	181
9.1	Formelzeichen und Symbole	181
9.2	Indizes	182
A	Bemessungsvorschläge für eingeklebte Gewindestangen	185
A.1	Achsisbeanspruchung	185
A.2	Querbeanspruchung	190
B	Dehnmeßrosetten	193
C	Vergleich der Meß- und Rechenwerte	195

1 Einleitung

1.1 Anforderungen an Verbindungen

Verbindungen bestimmen maßgeblich die Erscheinung von Holztragwerken, zumal wenn durch sie die Abmessungen der einzelnen Tragelemente festgelegt werden. Aufgrund der endlichen Abmessungen des stabförmigen Werkstoffes Holz und der nicht beliebig kleinen Biegeradien von Brettschichtholz sind in Holztragwerken zahlreiche Verbindungen vorhanden. Erforderlich sind daher leistungsfähige Anschlüsse, die den Querschnitt möglichst zu 100% ausnutzen.

Verbindungen sollten rationell zu fertigen sein. Die Vorfertigung der Verbindung im Werk ermöglicht den schnellen Zusammenbau auf der Baustelle. Zur schnellen Vorfertigung soll die Verbindung dabei nur aus wenigen Bauteilen bestehen, die hoch belastbar sein müssen.

Weitere von einer Verbindung geforderte Eigenschaften sind ein hoher Brandwiderstand, der sich durch die Anordnung der Verbindungsmittel im Holzquerschnitt realisieren läßt, gleichbleibende mechanische Eigenschaften mit geringen Kriecheinflüssen auch unter Wechselbeanspruchung und – in manchen Bereichen – eine optisch ansprechende Gestaltung.

Die erwähnten Anforderungen können alle von Verbindungen mit eingeklebten Gewindestangen, die hohe Lasten konzentriert in den Querschnitt einleiten, erfüllt werden.

1.2 Lastausbreitung

a) Allgemeines

Bei einem Kontaktstoß wird die Kraft gleichmäßig über die gesamte Querschnittsfläche verteilt übertragen, siehe Abbildung 1.1(a). Die lokale Spannungsverteilung ändert sich, wenn die Kraft konzentriert in den Querschnitt eingeleitet wird. Der Faserverbundwerkstoff Holz erreicht seine maximale Beanspruchbarkeit parallel zur Faser. In diesem Fall wird die Kraft entlang der Fasern abgetragen, eine Weiterleitung in benachbarte Fasern findet aufgrund der Schubweichheit des Holzes nur allmählich statt. Am Ort der Lasteinleitung weist die Spannungsverteilung eine Spitze auf, zu den Querschnittsrändern fällt die Spannung ab, siehe Abbildung 1.1(b).

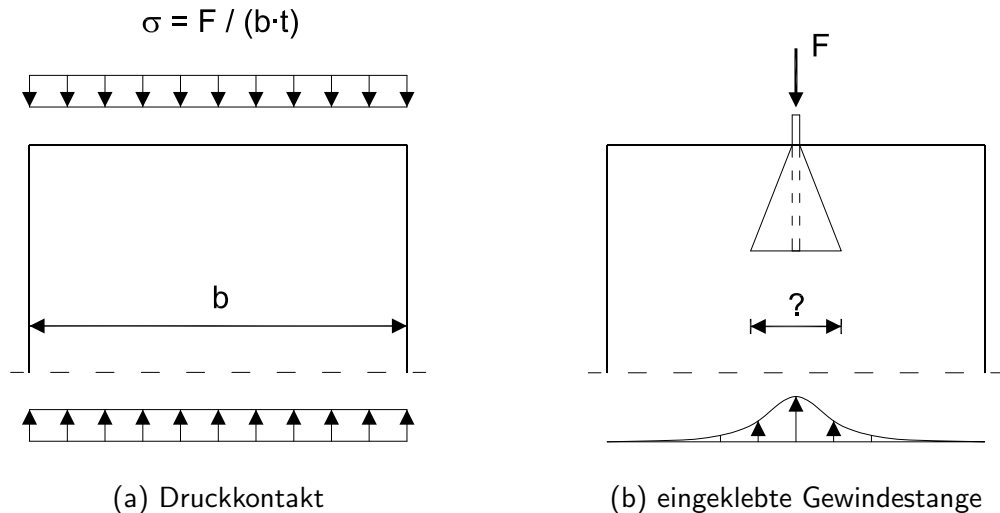


Abbildung 1.1: Krafteinleitung in einen Querschnitt

Die Form der Spannungsverteilung hängt dabei von mehreren Faktoren wie der Faserrichtung und den Steifigkeiten ab. Ein wesentlicher Faktor ist die Orientierung der Faserrichtung. Wird die Kraft rechtwinklig zur Faser eingeleitet, wirken die quer zur Last orientierten Holzfasern wie Seile, die die Kraft aufnehmen und verteilen. Die Ausbreitung einer Last im Holzquerschnitt ist bei Einleitung rechtwinklig zur Faser folglich höher als bei Einleitung parallel zur Faser, wie FISCHER (2000) in seiner Diplomarbeit feststellt.

b) Problemstellung

Zur Spannungsermittlung und Querschnittsbemessung im Verbindungsbereich muß eine Fläche bekannt sein, über die die Kraft in der Verbindung übertragen wird. Im Fall des Kontaktstoßes ist dies die Kontaktfläche, siehe Abbildung 1.1(a). Im Fall von Verbindungen mit konzentrierter Lasteinleitung ist die anzusetzende Fläche nicht unmittelbar ersichtlich, siehe Abbildung 1.1(b). Es gibt bisher nur Ansätze, die für die Spannungsermittlung eine pauschale Fläche um ein Verbindungsmittel oder eine Verbindungsmittelgruppe definieren, RIBERHOLT (1986), DIN V ENV 1995-2 (1997), E DIN 1052 (1999). Diese Fläche ist unabhängig von der Lasteinleitungslänge und vom Winkel zwischen Kraft und Faser. Das reale Tragverhalten wird von diesen Regelungen nicht genau genug abgeschätzt.

In seiner Diplomarbeit hat PROTHMANN (1999) den Fall einer Rahmenecke mit eingeklebten Gewindestangen betrachtet, siehe Abbildung 1.2. Er kommt zu dem Ergebnis, daß mit dem Ansatz einer pauschalen Fläche der Spannungsnachweis im Holz am Ende der im Winkel zur Faser eingeklebten Gewindestangen zur Abtragung der Umlenkraft nicht möglich ist. Die Lastverteilung bei diesen Stangen ist höher als bei parallel der Faser eingeklebten Stangen, es wird jedoch in beiden Fällen die gleiche pauschale Fläche pro Stange für den Nachweis angesetzt. Da die Beanspruchbarkeit des Holzes im Winkel zur Faser geringer ist als parallel zur Faser und die Stangen gleich belastet sind, gelingt der Nachweis des Holzquerschnitts am Ende von hochbelasteten Stangen nicht.

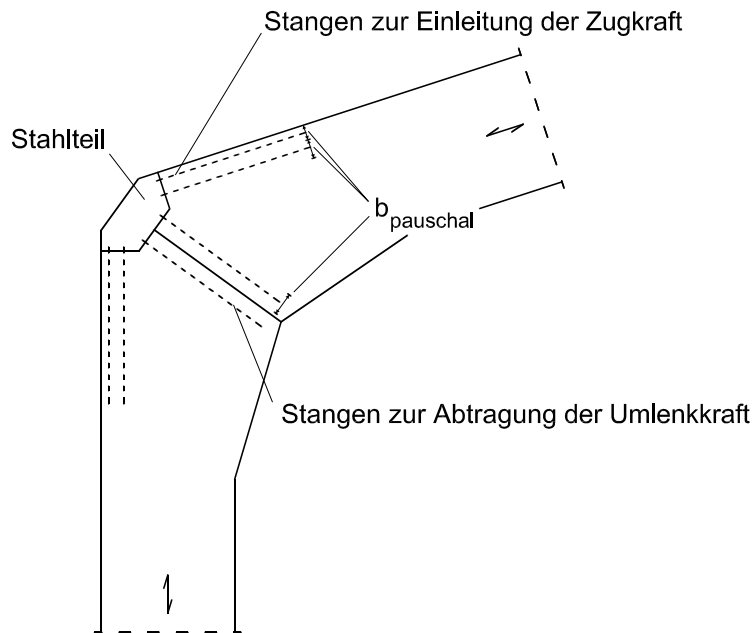


Abbildung 1.2: Rahmenecke mit Stahlteil nach [PROTHMANN \(1999\)](#)

Die Ermittlung der Lastausbreitung unter Berücksichtigung des realen Tragverhaltens würde die Bemessung der Verbindung mit konzentrierter Lasteinleitung ermöglichen. Die Ermittlung der Lastausbreitung setzt jedoch die Kenntnis der Spannungsverteilung im Querschnitt voraus.

1.3 Rahmenecken

Gängige Rahmeneckverbindungen im Holzbau sind die Keilzinkung, Dübelkreise oder Schlitzblechverbindungen mit Stabdübeln, siehe [Abbildung 1.3](#). Die Verklebung von Keilzinkungen erfordert konstante Umgebungsbedingungen, die auf der Baustelle nur mit großem Aufwand eingehalten werden können. Werden die Keilzinkungen im Werk hergestellt, ist bei großen Rahmen der Transport zur Baustelle nur noch schwer oder gar nicht mehr möglich. Zudem stellt die Keilzinkung eine Schwächung des Querschnitts an der höchstbelasteten Stelle dar. Verbindungen, die sich auf der Baustelle fertigen lassen, wie der Dübelkreis oder die Schlitzblechverbindung, erfordern einen hohen Montageaufwand. Für den Dübelkreis müssen zudem entweder Riegel oder Stiel zweiteilig ausgeführt werden.

Ein weiterer Nachteil ist die Querdehnungsbehinderung bei hohen Holzquerschnitten. Verbindungen mit Stahlblechen, die über die Trägerhöhe durchgehen, behindern die freie Querverformung des Holzes bei Feuchteschwankungen. Gleiches gilt für die gegenseitige Verformungsbehinderung von Stiel und Riegel bei Rahmenecken mit Dübelkreisen. Die Folge sind Risse, die sich negativ auf die Dauerhaftigkeit und unter Umständen auch auf die Tragfähigkeit auswirken, siehe [Abbildung 1.3\(c\)](#).

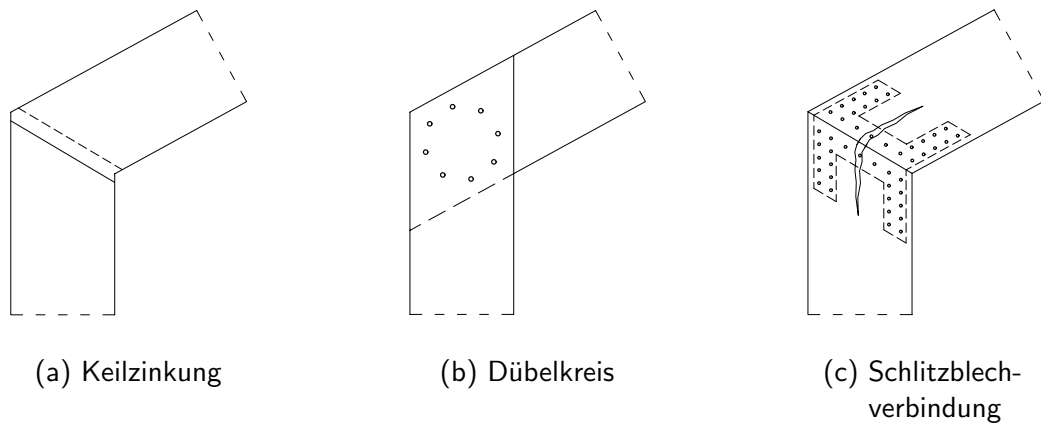


Abbildung 1.3: Gängige Ausführungen von Rahmenecken im Holzbau

Abbildung 1.4 zeigt eine neu entwickelte Rahmeneckverbindung unter Verwendung eingeklebter Gewindestangen, die die erwähnten Nachteile nicht aufweist. Über die einfach einzubringenden Gewindestangen lassen sich hohe Kräfte übertragen. Ein weiterer Vorteil ist, daß die Anschlüsse durch das metrische Gewinde der Stangen schraubbar werden. So kann man stahlbaummäßige Verbindungen einsetzen, die eine schnelle Montage garantieren und mit denen Toleranzabweichungen aufgefangen werden können.

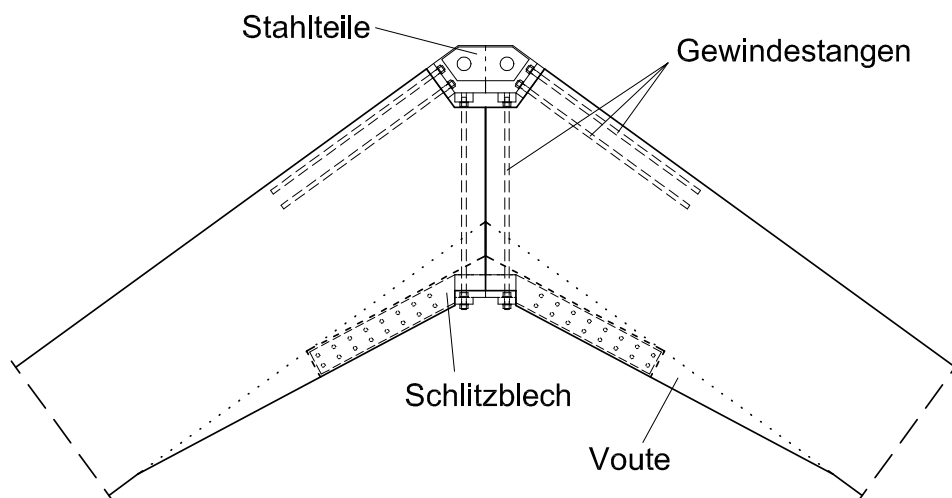


Abbildung 1.4: Entwickelte Rahmeneckverbindung mit eingeklebten Gewindestangen

Da die Verklebung der Gewindestangen – analog zur Herstellung einer Keilzinkung – eine ausreichende Verarbeitungstemperatur erfordert, sollte die Herstellung im Werk erfolgen. Die einzelnen Bauteile werden dort vorgefertigt, mit den stählernen Anschlußbauteilen versehen und auf die Baustelle transportiert, wo sie nur noch verbunden werden müssen.

Die bei Rahmenecken zwangsläufig entstehende Umlenkraft wird durch parallel zu dieser Kraft, schräg zur Faser, eingeklebte Gewindestangen aufgenommen. Diese Gewindestangen

dienen gleichzeitig als risseverteilende Bewehrung, die das Entstehen eines großen Risses infolge Schwindverformungen im Träger verhindern.

1.4 Zielsetzung und Abgrenzung

a) Lastausbreitung

Es soll ein Vorschlag zur Berechnung der am Ende eingeklebter Gewindestangen auftretenden Spannung entwickelt werden. Hierzu wird die Spannungsverteilung am Ende eingeklebter Gewindestangen berechnet und mit der maximalen Spannung eine mittragende Breite b_m ermittelt, siehe Abbildung 1.5. Über die Länge der Gewindestange kann ein Lastausbreitungswinkel bestimmt werden, der sich zur Ermittlung der Spannung am Ende eingeklebter Gewindestangen einsetzen läßt.

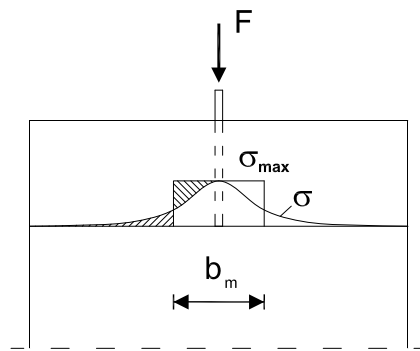
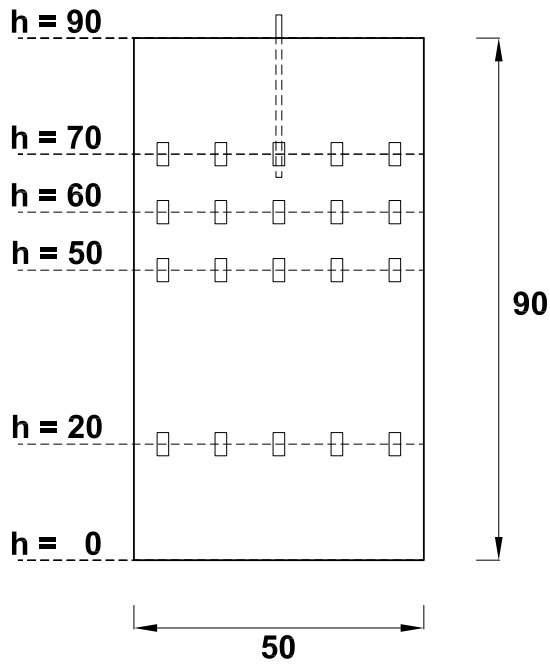


Abbildung 1.5: Ermittlung der mitwirkenden Breite

Der Vorschlag wird aus einer Parameterstudie abgeleitet, die den Einfluß der Abmessungen des Holzkörpers (Breite, Höhe, Dicke), der Gewindestangen (Einklebelänge, Durchmesser) und des Faserwinkels klärt. Hierzu wird ein Modell zur Berechnung mit Finiten Elementen entwickelt, das auf der Grundlage einer geometrischen Diskretisierung die Berechnung der Spannungsverteilung am Ende der Gewindestange mit der Finite-Elemente-Methode ermöglicht. Aus der Spannungsverteilung wird der Lastausbreitungswinkel berechnet.

Zur Verifizierung des Modells werden bei Versuchen an 12 Versuchskörpern mit unterschiedlicher Orientierung der Faserrichtung zur Belastungsrichtung die Dehnungen an der Körperoberfläche gemessen. Abbildung 1.6 zeigt einen Versuchskörper mit der Position der Dehnungsmessungen.

Der Vorschlag zur Berechnung der Lastausbreitung gilt nur für eingeklebte Gewindestangen. Er kann aufgrund der Art der Lastabtragung nicht auf andere Verbindungsmittel wie beispielsweise Stabdübel angewandt werden. Ebenso sind unterschiedliche Arten der Lastweiterleitung zu unterscheiden, beispielsweise in Krafrichtung und quer zur Krafrichtung. Hierzu sind weitere Untersuchungen erforderlich.



(a) Geplante Positionen



(b) Bei Versuchskörper D67.5-1 gewählte Positionen

Abbildung 1.6: Versuchskörper mit Position der Dehnungsmessungen

b) Rahmenecken

Nach der Ermittlung der Lastausbreitung soll das Tragverhalten des in Abbildung 1.4 auf Seite 4 dargestellten Rahmeneckentyps zur vereinfachten Bemessung durch ein mechanisches Modell abgebildet werden. Zur Berechnung der Kraftaufteilung notwendige Annahmen werden anhand einer FE-Berechnung festgelegt, die wie das mechanische Modell durch Bauteilversuche verifiziert wird.

Das Modell zur Ermittlung der Kraftaufteilung gilt nur für den in dieser Arbeit entwickelten Rahmeneckentyp.

1.5 Übersicht

Im Zuge der Entwicklung der Rahmeneckverbindung mit eingeklebten Gewindestangen ergeben sich zwei Schwerpunkte der Arbeit. Zuerst wird die Lastausbreitung bei Verwendung eingeklebter Gewindestangen untersucht und ein Vorschlag zu ihrer Ermittlung entworfen. Danach wird das Tragverhaltens des entwickelten Rahmeneckentyps untersucht und in einem mechanischen Modell abgebildet.

Kapitel 2 erläutert das Tragverhalten und die Bemessung eingeklebter Gewindestangen und gibt einen Überblick über verschiedene Formen von Verbindungen mit eingeklebten Gewindestangen.

Kapitel 3 untersucht die Lastausbreitung bei Verwendung eingeklebter Gewindestangen. Mit einem anhand von Versuchsergebnissen verifizierten Modell zur Berechnung mit Finiten Elementen wird eine Parameterstudie zur Erfassung verschiedener Einflüsse durchgeführt.

Kapitel 4 beschreibt das Tragverhalten von gewinkelten Verbindungen wie Rahmenecken und geht auf Besonderheiten des in dieser Arbeit behandelten Rahmeneckentyps ein.

Kapitel 5 enthält die experimentellen Untersuchungen an zwei Rahmenecken in Bauteilabmessungen. Einer der Versuchskörper wurde mit schließendem, der andere mit öffnendem und schließendem Moment getestet.

Kapitel 6 behandelt Modelle zur Aufteilung der Schnittgrößen auf die inneren Kräfte für verschiedene Beanspruchungen und Ausbildungen des untersuchten Rahmeneckentyps.

Kapitel 7 faßt die Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf weitere Entwicklungsmöglichkeiten.

2 Verbindungen mit eingeklebten Gewindestangen

2.1 Allgemeines

Die bisher entwickelten Verbindungen mit eingeklebten Verbindungsmitteln lassen sich nach der Art der Verbindung der einzelnen Querschnittsteile in folgende Gruppen einteilen:

- Verbindungen, bei denen die Stangen in beide Querschnitte eingelegt und nachträglich durch Verguß verbunden werden. Diese Ausführung ist in Abschnitt [2.3](#) beschrieben.
- Verbindungen, bei denen die Stangen in den Querschnitt eingeklebt und danach mit Stahlteilen verschweißt werden. Diese vor allem in Rußland angewandte Methode ist in Abschnitt [2.4](#) dargestellt.
- Verbindungen, bei denen die Stangen in den Querschnitt eingeklebt und dann mit Stahlteilen verschraubt werden. Diese Verbindungsart ist in Abschnitt [2.5](#) beschrieben.

Der Einsatz all dieser Verbindungen wäre ohne die genaue Erforschung des in Abschnitt [2.2](#) erläuterten Tragverhaltens eingeklebter Gewindestangen und der Weiterentwicklung der Klebetechnik nicht möglich. In [E DIN 1052 \(1999\)](#) und [DIN V ENV 1995-2 \(1997\)](#) ist die Anwendung eingeklebter Gewindestangen geregelt.

2.2 Eingeklebte Gewindestangen

2.2.1 Allgemeines

Eingeklebte Gewindestangen stellen eine steife, hochtragfähige Möglichkeit der Kraftübertragung dar, die zur **Einleitung** hoher externer Kräfte oder zur **Verstärkung** von Holzquerschnitten eingesetzt werden kann. [Abbildung 2.1](#) enthält einige Anwendungsbeispiele.

Die Lasteinleitung durch eingeklebte Gewindestangen mit metrischem Gewinde ermöglicht die Vorfertigung von Einzelbauteilen im Werk, die einfach auf die Baustelle transportiert werden

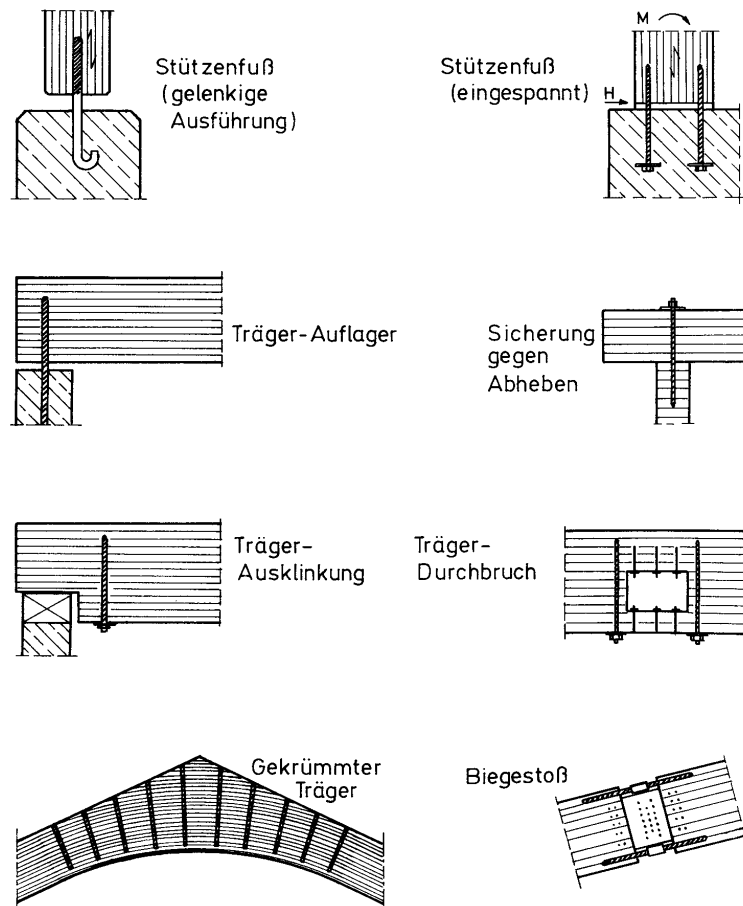


Abbildung 2.1: Anwendungsbeispiele eingeklebter Gewindestangen nach [MÖHLER UND HEMMER \(1981\)](#)

können und dort durch geschraubte Verbindungen zum Gesamtbauteil verbunden werden. Wenn die aus dem Bauteil herausstehenden Enden der Gewindestangen bei der Montage der Anschlußbauteile stören, kann man auf die Gewindestangen Gewindebuchsen aufschrauben und mit einkleben, siehe auch [GAUNT \(1998\)](#). Man erhält damit einen oberflächenbündigen Anschlußpunkt zur Befestigung von Bauteilen mit Schrauben.

Werden Gewindestangen zur Einleitung von Auflagerlasten eingesetzt, verringern sich die erforderlichen Auflagerlängen erheblich, da die Kraft nicht mehr durch Kontaktpressung in das Holz übertragen werden muß. 1972 wurde dies beispielsweise für Überdachungen im Messezentrum in Nürnberg eingesetzt, siehe [KARLSRUHE \(1972\)](#).

Verstärkt man Holzbauteile durch Gewindestangen kann man in Analogie zum Stahlbeton von bewehrten Holzbauteilen sprechen. Einsatzmöglichkeiten sind unter anderem die Verstärkung der Firstbereiche gekrümmter Brettschichtholzbinder und die Verstärkung ausgeklinkter Träger oder Durchbrüche. Den Gewindestangen wird die aufzunehmende Querkraft zugewiesen, so daß der Holzquerschnitt entlastet wird und kleiner dimensioniert werden kann, siehe [BLASS UND STECK \(1999\)](#).

Nachteile geklebter Verbindungen sind die aufwendige Herstellung der Verklebung, die Aushärtezeit, während der die Verbindung nicht belastet werden darf, das spröde Versagen der Klebefuge und deren Feuchte- und Hitzeempfindlichkeit.

2.2.2 Tragverhalten

2.2.2.1 Achsialbeanspruchung

Achsial beanspruchte, eingeklebte Gewindestangen wirken wie zug- oder druckbeanspruchte Holzschrauben, haben jedoch eine höhere Tragfähigkeit und Steifigkeit, da sie die Kraft gleichmäßig über Schub in das Holz einleiten. Gewindestangen können unter einem beliebigen Winkel zu den Holzfasern eingeklebt werden, auch in das Stirnholz.

Bei Einleitung von Achsialkräften über die Stange in das Holz entstehen in Abhängigkeit von den Steifigkeiten der verbundenen Querschnitte am Anfang und am Ende der Stange Haftspannungsspitzen. [GEROLD \(1992\)](#) gibt eine Übersicht auf Basis der Theorie nach [VOLKERSEN \(1953\)](#), siehe Abbildung 2.2. Werden Bauteile gleicher Dehnsteifigkeit $E \cdot A$ verbunden, sind die Spannungsspitzen an beiden Querschnittsenden gleich groß, bei der Verbindung von Bauteilen unterschiedlicher Dehnsteifigkeit ist der Schubspannungsverlauf asymmetrisch.

Die Steifigkeit der Verbindung (des Klebstoffes) beeinflusst die Haftspannungsverteilung. Bei der Verwendung dehnsteifer GEWI-Stähle, die mit Resorcinharz (geringe Steifigkeit) eingeklebt werden, sind die Haftspannungen über die Einklebelänge nach [EHLBECK UND SIEBERT \(1987\)](#) nahezu konstant. Werden die GEWI-Stähle dagegen mit Polyurethanklebstoff (hohe Steifigkeit) eingeklebt, ergibt sich eine Haftspannungsspitze im Bereich des Eintritts der Stangen in den Holzquerschnitt. Mit steigender Belastung wächst die Spannung an, bis die Klebefuge im Bereich der Haftspannungsspitze versagt und eine Spannungsumlagerung zum inneren Bereich der Verklebung stattfindet. Das endgültige Versagen der Klebefuge erfolgt nach dem „Reißverschlußprinzip“.

Die Haftlänge beeinflusst ebenfalls die Haftspannungsverteilung. Bei einer kleinen Haftlänge ist die Haftspannung nahezu gleichmäßig verteilt. Bei großen Haftlängen wirkt der mittlere Teil der Gewindestangen kaum noch bei der Kraftübertragung mit. Nach [EHLBECK UND SIEBERT \(1987\)](#) ist dies ab einer Schlankheit der Gewindestange von $\lambda = 40$ der Fall. Der größte Teil der Kraft wird über eine Länge eingebracht, die dem 20-fachen Außendurchmesser entspricht.

Der Winkel zwischen Stange und Faser hat nach den Ergebnissen von Auszugversuchen von [KANGAS \(1994\)](#) keinen Einfluß auf die Tragfähigkeit. Dies kann nach eigenen Versuchen für Druckbelastung schräg zur Faser nicht bestätigt werden, siehe Abschnitt 3.1.3.2 auf Seite 43.

Die Lasteinleitung über Schub in der Mantelfläche der Gewindestange vermeidet die Beanspruchung des Holzes durch lokal hohe Lochleibungsdrücke. Das Holz kann die vergleichsweise geringen Schubspannungen dauerhaft aufnehmen. [EHLBECK U. A. \(1992\)](#) konnten bei Langzeitversuchen keine Kriecheinflüsse beobachten.

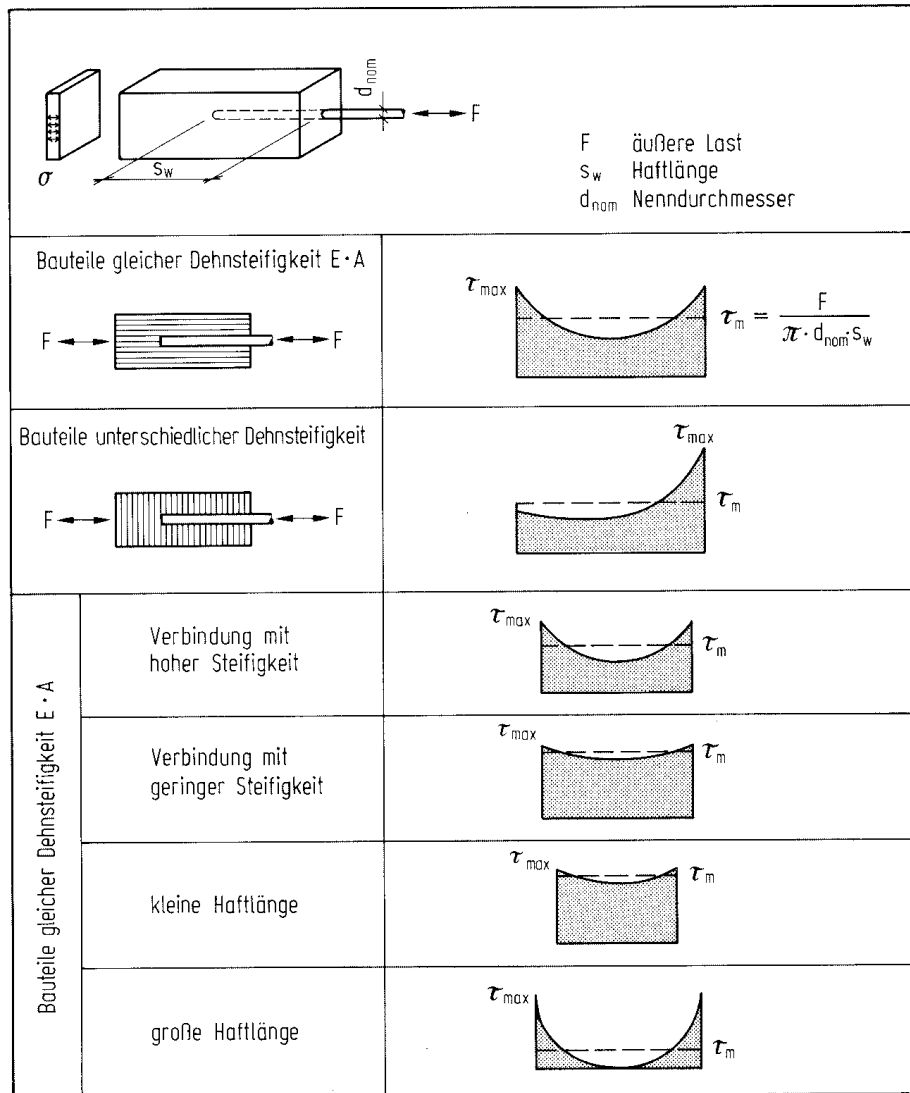


Abbildung 2.2: Haftspannungsverlauf in der Klebefuge nach GEROLD (1992)

Aus demselben Grund bleibt die Steifigkeit achsial belasteter, eingeklebter Gewindestangen bei Wechselbeanspruchung erhalten, siehe [BALLERINI U. A. \(1994\)](#). Lochleibungsverbindungen werden dagegen mit steigender Lastwechselzahl weicher, da die hohen Lochleibungsdrücke zu bleibenden Verformungen im Holz führen und die Verbindung Spiel bekommt.

Die Tragfähigkeit einer Gruppe von Stangen ist nach [DENG \(1997\)](#) gleich der Summe der Tragfähigkeiten der einzelnen Stangen. [GAUNT \(1998\)](#) und [DIN V ENV 1995-2 \(1997\)](#), A.1 (4), geben demgegenüber an, daß die Tragfähigkeit einer Gruppe von eingeklebten Stäben, die zusammenwirken, geringer ist als die Summe der Tragfähigkeiten der einzelnen eingeklebten Stäbe. Zur Klärung der Tragfähigkeit einer Gewindestangengruppe sind weitere Untersuchungen erforderlich.

Eine Verbindung mit achsial belasteten eingeklebten Gewindestangen kann auf folgende Arten versagen:

- Die Stange versagt. Maßgebend sind hierfür der Querschnitt und die Stahlgüte der Gewindestange. Hochfeste Gewindestangen versagen spröde, sie können keine Duktilität in die Verbindung bringen.
- Der Klebstoff versagt. Dabei kann entweder die Kohäsion, also der innere Zusammenhalt, oder die Adhäsion, also die Haftung des Klebstoffes am Holz ungenügend sein. Die Verbindung zwischen Klebstoff und Gewindestange entsteht durch Formschluß.
- Das Holz um die Gewindestange versagt auf Schub. In diesem Fall wird die Gewindestange mit dem Klebstoff und daran haftenden Holzfasern aus dem Loch gezogen. Die Bemessung für diesen und den vorigen Fall wird in Abschnitt [2.2.3](#) erläutert.
- Das Holz um die Gewindestange spaltet infolge Ringzugwirkung durch die Lasteinleitung auf. [MOERS \(1981\)](#) stellt dies anschaulich anhand der Spannungstrajektorien dar. [BLASS UND LASKEWITZ \(1999\)](#) haben eine Versuchsreihe mit variierenden Achs- und Randabständen eingeklebter Gewindestangen durchgeführt, auf deren Basis sie Mindestabstände angegeben. Das Einhalten dieser Mindestabstände soll ein Spaltversagen vor dem Erreichen der Belastbarkeit der Verklebung ausschließen, siehe auch Abschnitt [2.2.3.1](#) auf der nächsten Seite.
- Der Holzquerschnitt am Ende der Gewindestange versagt infolge örtlich hoher Normalspannungen durch die konzentrierte Lasteinleitung. Die Höhe der Spannung wird von der Lastausbreitung beeinflusst, die vom Winkel zur Faser abhängt. Bestehende Ansätze zur Ermittlung der Lastausbreitung werden in Abschnitt [2.2.3.1](#) dargestellt.

2.2.2.2 Querbeanspruchung

Rechtwinklig zur Stangenachse belastete Gewindestangen wirken als stiftförmige Verbindungsmittel, wie beispielsweise Stabdübel. Sie werden auf Abscheren und Biegung beansprucht und übertragen die Kraft durch hohe lokale Lochleibungsdrücke in das Holz. Die

Traglast ist etwas höher als bei konventionellen Verbindungsmitteln, da der Klebstoff den Hohlraum zwischen Gewindestange und Holz vollkommen ausfüllt und dadurch für eine perfekte Passung sorgt.

Durch die Verstärkung der Stirnfläche des Holzes mit aufgeklebtem Baufurniersperrholz kann die Traglast im Schnitt um 10 % erhöht werden, wie [RIBERHOLT \(1986\)](#) bei Untersuchungen an faserparallel eingeklebten, querbelasteten Gewindestangen herausfand. Die Erhöhung der Traglast wurde bei einem geringen Randabstand von 1.5d erreicht.

Eine Verbindung mit quer belasteten eingeklebten Gewindestangen kann auf folgende Arten versagen, die auch kombiniert auftreten können:

- Die Lochleibungsfestigkeit des Holzes wird überschritten. In diesem Fall zerquetscht die Gewindestange das in Belastungsrichtung vor ihr liegende Holz.
- Das Holz vor der Gewindestange spaltet aufgrund der Querkzugwirkung auf, die von der Krafteinleitung verursacht wird. Die Gewindestange verliert die Auflagerung. Das Einhalten von Mindestabständen soll ein Spaltversagen vor dem Erreichen der Belastbarkeit der Verbindung ausschließen.
- Im Querschnitt der Stange bilden sich ein oder mehrere Fließgelenke. Maßgebend sind hierfür der Querschnitt und die Stahlgüte der Gewindestange.

Diese Versagensarten werden durch die Bemessung der Gewindestangen als stiftförmige Verbindungsmittel erfaßt.

2.2.3 Bemessung

2.2.3.1 Achsialbeanspruchung

a) Haftfestigkeit

Die Bemessung der Verklebung schließt den Nachweis der Klebefuge und des umgebenden Holzes ein, gewünscht ist das Versagen des umgebenden Holzes auf Schub. Die von der Verklebung einer Gewindestange aufnehmbare Kraft berechnet sich als Produkt der Stangen- oder Klebefugenoberfläche und der Haftfestigkeit des Klebstoffes:

$$F = \pi \cdot d \cdot l \cdot f_v \quad (2.1)$$

mit: d ansetzbarer Durchmesser
 l ansetzbare Länge der Gewindestange
 f_v Haftfestigkeit des Klebstoffes
 = τ_m in [Abbildung 2.2](#)

Da der Ansatz der in Abbildung 2.2 auf Seite 12 gezeigten Haftspannungsverteilung zu aufwendig wäre, wird für die Bemessung die über die Stangenlänge gemittelte Haftspannung verwendet und als Haftfestigkeit bezeichnet. Zur rechnerischen Ermittlung der Haftfestigkeit existieren mehrere Bemessungsvorschläge, die in Anhang A.1 auf Seite 185 kurz dargestellt werden. Sie unterscheiden sich im Ansatz der Haftspannung, des Durchmessers und der wirksamen Länge. In Tabelle 2.1 sind die angesetzten Abmessungen zusammengestellt, siehe auch Abbildung 2.3.

Tabelle 2.1: Zur Ermittlung der Klebfugenkraft angesetzte Durchmesser und Längen

Parameter	Durchmesser ¹⁾	Länge ²⁾
MÖHLER UND HEMMER (1981)	d_g	l_g
GEROLD (1992)	d_g	l_g
DIN V ENV 1995-2 (1997)	$\min(d_h; 1.25 \cdot d_g)$	l_g
KANGAS (1994)	d_h	$l_{g,ef}$
RIBERHOLT (1986)	$\max(d_g; d_h)$	l_g
BLASS U. A. (1996)	d_g	l_g
E DIN 1052 (1999)	d_g	l_g
AICHER (2001a)	d_h	l_g

¹⁾ d_g = Nenndurchmesser der Gewindestange, d_h = Lochdurchmesser
²⁾ l_g = Einklebelänge, $l_{g,ef}$ = effektive Einklebelänge

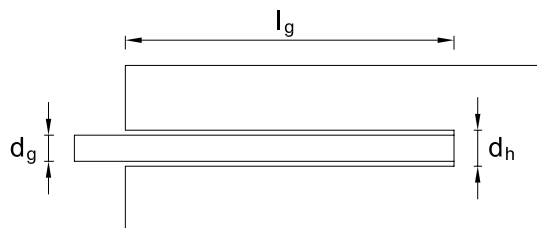


Abbildung 2.3: Abmessungen an einer eingeklebten Gewindestange

Die Bemessungsvorschläge wurden auf der Grundlage von Versuchen aufgestellt. Aufgrund der untersuchten Abmessungen ergeben sich Grenzen für den Gültigkeitsbereich, die in Tabelle 2.2 dargestellt sind. In Tabelle 2.3 sind die von den einzelnen Bemessungsvorschlägen bei der Ermittlung der Haftfestigkeit berücksichtigten Parameter zusammengestellt.

In den beiden folgenden Diagrammen sind die nach den erwähnten Bemessungsvorschlägen für einen Gewindestangendurchmesser von $d = 10$ mm errechneten Haftfestigkeiten über die Einklebelänge aufgetragen. Die Haftspannungsverteilung weist mit steigender Einklebelänge und damit steigender Schlankheit $\lambda = l_g/d_g$ der Gewindestange einen zunehmend ungleichmäßigeren Verlauf auf, siehe auch Abbildung 2.2 auf Seite 12, die gemittelte Haftspannung und damit die Haftfestigkeit nimmt ab. Ein größerer Stangendurchmesser führt zu einer größeren Klebfugenfläche, die sich ebenfalls abmindernd auf die Haftfestigkeit auswirkt.

Tabelle 2.2: Gültigkeitsbereich der Bemessungsvorschläge

	Mindesteinklebelänge	Maximale Einklebelänge
Möhler / Hemmer	$10 \cdot d_g$	$20 \cdot d_g$
Gerold	$8 \cdot d_g$	$20 \cdot d_g^{1)}$; $40 \cdot d_g^{2)}$
DIN V ENV 1995-2	$\max(0.4 \cdot d_g^2; 8 \cdot d_g)$	-
Riberholt	$\max(d_g^2; 160 \text{ mm})$	500 mm
Blass u. a.	d_g^2	-
E DIN 1052	$\max(0.5 \cdot d_g^2; 10 \cdot d_g)$	1000 mm
1) Stangen rechtwinklig zur Faser eingeklebt		
2) Stangen faserparallel eingeklebt		

Tabelle 2.3: Berücksichtigte Parameter bei der Ermittlung der Haftfestigkeit

Parameter Formelzeichen	Stangen- durchmesser d_g	Loch- durchmesser d_h	Einklebe- länge l_g	Roh- dichte ρ	Feuchte- änderung Δu	Klebstoff- art -
Möhler / Hemmer	●	-	-	-	-	-
Gerold	●	-	●	●	●	●
Kangas	●	-	●	-	-	-
DIN V ENV 1995-2	●	●	-	●	-	-
Riberholt	-	-	●	●	-	●
Blass u. a.	-	-	●	●	-	-
E DIN 1052	-	-	●	-	-	-
Aicher	-	●	●	-	-	●

Abbildung 2.4 enthält die Vorschläge, die einen linearen Verlauf der Haftfestigkeit ansetzen. Der Vorschlag nach [MÖHLER UND HEMMER \(1981\)](#) berücksichtigt lediglich grob den Einfluß des Stangendurchmesser, eine Abhängigkeit von der Einklebelänge ist nicht vorhanden. Der Vorschlag wurde zum Vergleich mit den anderen Vorschlägen mit dem Faktor $\gamma_F \cdot \gamma_M / k_{mod} = 1.3 \cdot 1.5 / 0.9 = 2.17$ von zulässigen auf charakteristische Werte umgerechnet. Der in [DIN V ENV 1995-2 \(1997\)](#) angegebene Vorschlag läßt den Einfluß der Einklebelänge ebenfalls unberücksichtigt, wodurch er gerade bei großen Einklebelängen eine im Vergleich zu den Bemessungsvorschlägen von [RIBERHOLT \(1986\)](#), [BLASS U. A. \(1996\)](#) und [AICHER \(2001a\)](#) um den Faktor 2 bis 3 zu hohe Haftspannung errechnet, die oberhalb der Ergebnisse von Auszugsversuchen liegt.

In den Bemessungsvorschlägen von [GEROLD \(1992\)](#) und [KANGAS \(1994\)](#) ist die Abhängigkeit der Haftspannung von der Einklebelänge durch eine lineare Beziehung berücksichtigt. Bei größeren Einklebelängen werden negative Haftspannungen berechnet. Um unlogische Ergebnisse zu vermeiden, gibt Gerold Anwendungsgrenzen der Einklebelänge an.

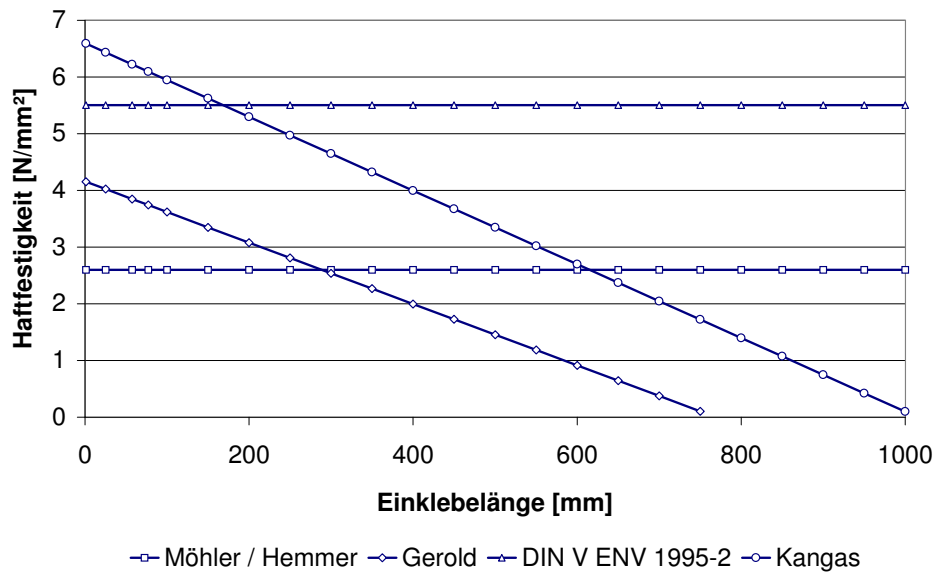


Abbildung 2.4: Bemessungsvorschläge mit linearem Verlauf der Haftfestigkeit

Ein nichtlinearer Verlauf der Haftfestigkeit nähert die existierenden Versuchsergebnisse besser an als die Bemessungsvorschläge mit linearem Verlauf. In [Abbildung 2.5](#) sind die Bemessungsvorschläge mit nichtlinearem Haftfestigkeitsverlauf dargestellt. Allen Vorschlägen gemein ist eine konstante, maximale Haftfestigkeit bei geringen Einklebelängen, die in einen hyperbolischen Verlauf bei größeren Einklebelängen übergeht. [RIBERHOLT \(1986\)](#) unterscheidet zwischen spröden und nachgiebigen Klebstoffen, aufgrund deren unterschiedlichem Verformungsvermögen unterschiedliche Haftspannungsverläufe entstehen, aus denen unterschiedliche Haftfestigkeiten resultieren. Auf Riberholts Vorschlag für spröden Klebstoff baut der Vorschlag von [BLASS U. A. \(1996\)](#) auf, die auf die Unterscheidung verschiedener Klebstoffeigenschaften verzichten. Aufgrund eigener Versuche mit kurzen Einklebelängen setzen sie die maximale Haftfestigkeit niedriger an als Riberholt. Für die [E DIN 1052 \(1999\)](#) wurde die Haftfestigkeitsverteilung dieses Bemessungsvorschlags durch eine trilineare Beziehung angenähert (nicht im Diagramm dargestellt).

Der auf einem bruchmechanischen Ansatz beruhende Bemessungsvorschlag von [AICHER \(2001a\)](#) wurde anhand zahlreicher Versuchsergebnisse verifiziert. Gut zu erkennen ist die Auswirkung der Nachgiebigkeit verschiedener Klebstoffarten auf die Haftfestigkeit. Während bei spröden Klebstoffen die Haftfestigkeit mit steigender Einklebelänge rapide abfällt, nimmt sie bei nachgiebigen Klebstoffen nur langsam ab.

Der letztgenannte Vorschlag von Aicher zeigt eine recht genaue Abbildung des aus zahlreichen Versuchen erkennbaren Verlaufs der Haftfestigkeit in der Klebefuge eingeklebter Gewindestangen unter Achsialbelastung, siehe [AICHER \(2001a\)](#). Er ermöglicht die wirtschaftliche Bemessung der Klebefuge und verdeutlicht den großen Einfluß des Klebstoffs auf die Bemessung von Gewindestangen.

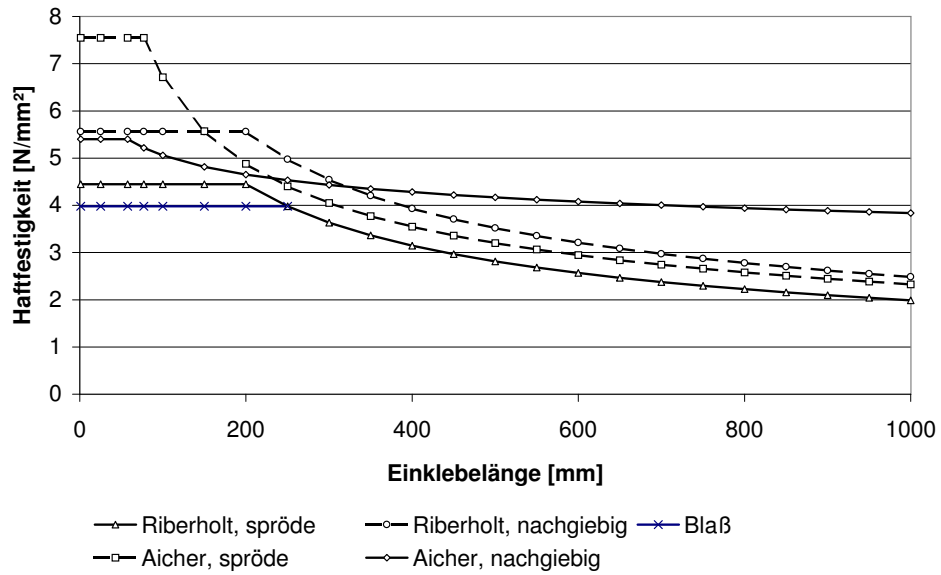


Abbildung 2.5: Bemessungsvorschläge mit nichtlinearem Verlauf der Haftfestigkeit

b) Rand- und Achsabstände

Die bei der Belastung von Gewindestangen auftretende Ringzugwirkung muß vom umgebenden Holz aufgenommen werden. Die Rand- und Achsabstände der Gewindestangen bestimmen den zur Aufnahme der Ringzugwirkung zur Verfügung stehenden Holzquerschnitt. Werden die Abstände zu gering gewählt, spaltet das Holz auf, bevor die Festigkeit der Klebefuge erreicht wird. Die in den Bemessungsvorschlägen angegebenen Mindestabstände sind in Tabelle 2.4 zusammengestellt.

Tabelle 2.4: Mindestabstände achsialbeanspruchter eingeklebter Gewindestangen

Stangenorientierung Abstand	parallel zur Faser		rechtwinklig zur Faser		
	AA	RA	AA	SRA	HA
MÖHLER UND HEMMER (1981)	3d _g	4d _g	3d _g ; 5d _g	4d _g	-
DIN V ENV 1995-2 (1997)	4d _g	2.5d _g	4d _g	2.5d _g	2.5d _g
RIBERHOLT (1986) ¹⁾	2d _g	1.5d _g	2d _g	2.5d _g	2d _g
RIBERHOLT (1986) ²⁾	4d _g	2.5d _g	4d _g	2d _g	4d _g
BLASS UND LASKEWITZ (1999)	5d _g	2.5d _g	-	-	-
E DIN 1052 (1999)	5d _g	2.5d _g	4d _g	2.5d _g	4d _g

AA: Achsabstand, RA: Randabstand
 SRA: seitlicher Randabstand, HA: Abstand zum Hirnholz
 d_g: Nenndurchmesser der Gewindestange
 1) Klebstoff haftet an Stangen
 2) Klebstoff haftet nicht an Stangen

BLASS UND LASKEWITZ (1999) geben eine Beziehung für die mittlere Haftfestigkeit in Abhängigkeit vom Achs- beziehungsweise Randabstand der Stangen an, siehe Gleichung (2.2).

$$f_v = 0.7 \cdot \frac{a}{d_g} + 3.7 \quad [\text{N/mm}^2] \quad (2.2)$$

mit: $1 \leq a/d_g \leq 2.5$

aAbstand der Gewindestange zum Rand oder halber Abstand der Gewindestangen untereinander, siehe Abbildung 2.6

d_gDurchmesser der Gewindestange

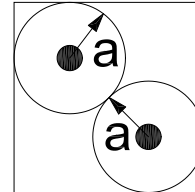


Abbildung 2.6: Kreisradius als Randbeziehungsweise halber Achsabstand um eingeklebte Gewindestangen

Aus Gleichung (2.2) läßt sich eine Beziehung zur Abminderung der mittleren Schubspannung bei Unterschreitung der Mindestabstände herleiten:

$$\chi = 0.128 \cdot \frac{a}{d_g} + 0.679 \leq 1. \quad (2.3)$$

c) Holzquerschnitt am Ende der Gewindestange

Die Ausbreitung der eingeleiteten Last im Holzquerschnitt ist ein bestimmender Faktor für die Tragfähigkeit der Verbindung. Bei Verbindungsmitteln wie eingeklebten Gewindestangen, die hohe Lasten konzentriert in den Querschnitt einleiten, herrschen am Ende der Verbindungsmittel Spannungskonzentrationen, die das Versagen des Holzquerschnitts verursachen können, wie DENG (1997) mit den von ihm durchgeführten Auszugsversuchen an eingeklebten Gewindestangen bestätigt. 6% der Prüfkörper mit geringer Holzfeuchte bzw. 17% der Prüfkörper mit hoher Holzfeuchte versagten durch Zugbruch am Gewindestangenende.

Werden mehrere Gewindestangen in einer Momentenverbindung gruppiert angeordnet, so kann auch der zugbeanspruchte Teil des Querschnitts ausbrechen, wie GAUNT (1998) bei Versuchen an momentenbelasteten Biegestößen beobachtet hat. AICHER U. A. (1997) berichten vom Auszug des kompletten Stangenblocks einer Verbindung aus dem Holz.

Das Ausbrechen eines Teilquerschnitts wird von RACHER (1995) als Blockscherversagen beschrieben. Die Kraft in der Verbindung wird durch Zugspannungen in einer Fläche S_t und Schubspannungen in einer dazu rechtwinkligen Fläche S_c in den Holzquerschnitt übertragen, siehe Abbildung 2.7. Das Versagen wird durch den Bruch in einer der beiden Flächen eingeleitet, danach folgt das Versagen in der anderen Fläche. Aufgrund des spröden Versagens des Holzes dürfen die Tragfähigkeiten beider Bruchebenen nicht addiert werden. Sie sind getrennt zu ermitteln, die höhere Tragfähigkeit ist der Bemessungswert.

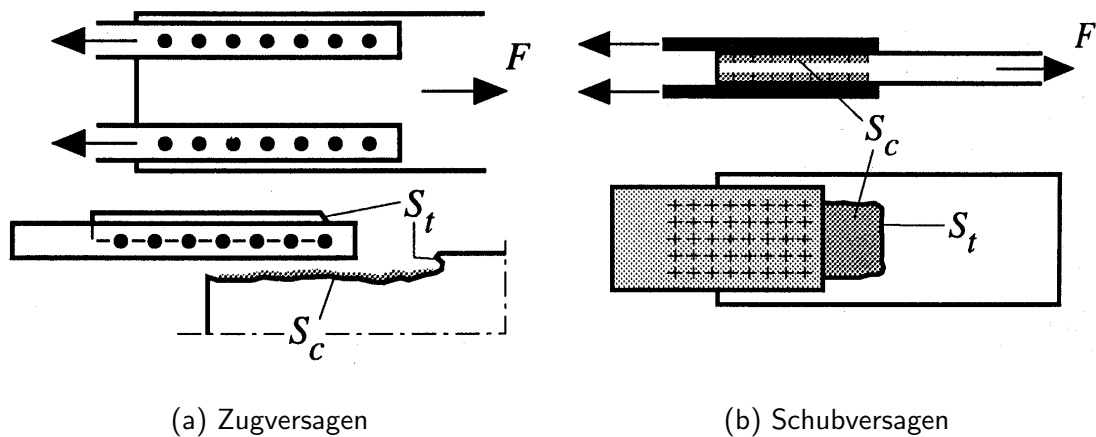


Abbildung 2.7: Komponenten des Blockscherversagens aus RACHER (1995)

Das Versagen des Querschnitts tritt dann ein, wenn die maximal aufnehmbare Spannung überschritten wird. Es existiert jedoch bislang kein Modell zur wirklichkeitsnahen rechnerischen Erfassung der in der Bruchebene am Ende der Gewindestange auftretenden Spannungsverteilung, wie sie in Abbildung 1.5 auf Seite 5 dargestellt ist.

KANGAS (1994) und RIBERHOLT (1986) verwenden für den Nachweis des Holzquerschnitts eine effektive Fläche am Ende der Gewindestange, siehe Abbildung 2.8(a). DIN V ENV 1995-2 (1997) und E DIN 1052 (1999) greifen diesen Vorschlag auf, siehe Abbildung 2.8(b). Diese Vorschläge berücksichtigen weder die Länge der Lasteinleitung, noch den Einfluß des Winkels zwischen Kraft und Faserrichtung auf die Lastausbreitung.

PROTHMANN (1999), BANZHAF (1998) und SCHICK (1999) haben in ihren Diplomarbeiten den Vorschlag von RIBERHOLT (1986) zum Nachweis des Holzquerschnitts am Ende der Gewindestangen benutzt. Sie identifizierten das Holzversagen am Ende der Gewindestangen als maßgebend für die Bemessung von Gewindestangengruppen. In der Arbeit von Prothmann, der auch im Winkel zur Faser eingeklebte Gewindestangen untersuchte, siehe Abbildung 1.2 auf Seite 3, wird dies besonders deutlich. Die Ausbreitung einer Last ist bei Einleitung im Winkel zur Faser höher als bei Einleitung parallel zur Faser, wie FISCHER (2000) in seiner Diplomarbeit festgestellt hat. Ein Nachweis mit einer vom Einleitungswinkel unabhängigen Fläche läßt diesen Sachverhalt außer acht.

Für andere Bemessungssituationen existieren Untersuchungen, die einen Lastausbreitungswinkel angeben. DRÖGE UND JÄGER (1965) haben Knotenplatten aus Buchensperrholz für genagelte Fachwerkverbindungen untersucht. Sie geben einen Winkel an, der die Ausbreitung der Last über die Länge der Lasteinleitung beschreibt. Aus der Auswertung der von ihnen durchgeführten Zugversuche schließen sie bei Orientierung des Deckfurniers parallel zur Kraft auf einen Lastausbreitungswinkel von 15° . Bei einem Einbau der Sperrholzplatte mit unter 45° zur Kraft orientiertem Deckfurnier, geben sie einen auf 30° gesteigerten Lastausbreitungswinkel an.

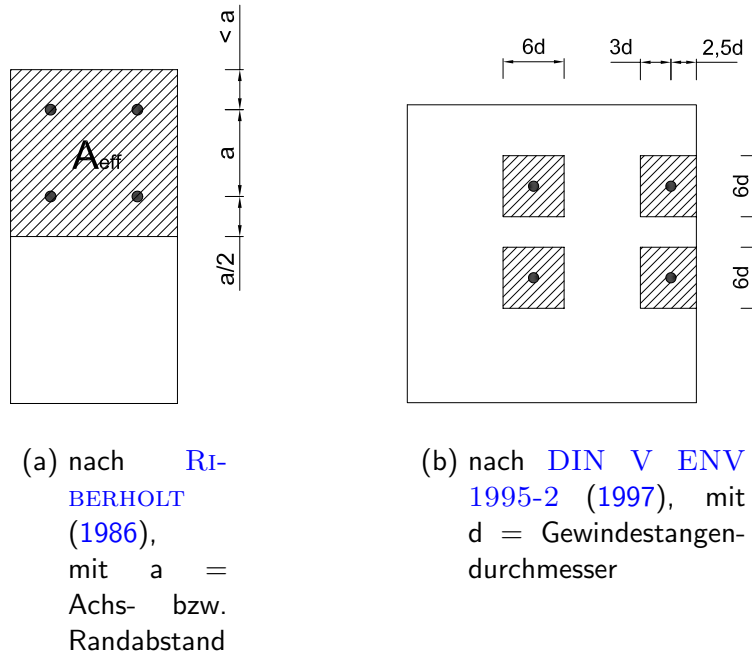


Abbildung 2.8: Effektive Fläche zum Nachweis des Holzquerschnitts

Auch in [DIN 1074 \(1991\)](#) und [DIN V ENV 1995-2 \(1997\)](#) werden Lastausbreitungswinkel angegeben. Für die Verteilung einer rechtwinklig zur Faser auf die Oberfläche wirkenden Radlast bei Bohlenbelägen beträgt dieser Winkel 45° . [DIN V ENV 1995-2 \(1997\)](#) gibt zusätzlich für Sperrholz einen Lastausbreitungswinkel von 30° an.

Beim Versuch, aus weiteren Bemessungsgleichungen Lastausbreitungswinkel zu ermitteln, zeigt sich eine große Bandbreite der Werte. [EHLBECK U. A. \(1991\)](#) beschreiben ein Modell für einen einheitlichen Quersugnachweis für Anschlüsse mit mechanischen Verbindungsmitteln. Die wirkende Quersugspannung wird mit einer effektiven Fläche berechnet, in die eine effektive Anschlußtiefe und -breite eingehen. Aus der empirisch in Abhängigkeit mehrerer Faktoren berechneten Anschlußbreite kann man Lastausbreitungswinkel von 0° bis 47° ermitteln.

[AICHER U. A. \(1998\)](#) haben die gegenseitige Beeinflussung faserparallel in gegenüberliegenden Stirnseiten eines Stabes eingeklebter Gewindestangen untersucht. Mit einer FE-Rechnung haben sie den erforderlichen Abstand zwischen den Stangenenden ermittelt, der gerade ausreicht, um eine gegenseitige Beeinflussung auszuschließen. Abstände, die kleiner als die Einleimlänge der Stangen sind, führen zu einer deutlichen Änderung der Normal- und Schubspannungsverläufe im Holz und entlang der Stangen, während Abstände ab der zweifachen Einleimlänge keinen Einfluß erkennen lassen. Unter der Annahme, daß bei einem Abstand der Stangenenden vom Zweifachen der Einleimlänge ($l_m = 2 \cdot l_e$) die Normalspannung im Holzquerschnitt gleichmäßig verteilt ist, kann man mit den in der Berechnung verwendeten Größen des Körperdurchmessers $D = 7.5 \cdot d$ und der Einleimlänge $l_e = 10 \cdot d$ auf einen

Lastausbreitungswinkel von $\phi = \arctan((D/2)/l_m) = \arctan(((7.5 \cdot d)/2)/(20 \cdot d)) = \arctan(3.75/20) = 10.6^\circ$ schließen.

Im Stahlbau wird die Lastausbreitung bei Kontakt nach [DIN 18800 \(1990\)](#) im elastischen Fall zu 45° beidseitig der Achse der Kraft angenommen. Im plastischen Fall steigt dieser Lastausbreitungswinkel auf $68,2^\circ$, entsprechend einem Verhältnis von 1:2,5, siehe [Abbildung 2.9](#).

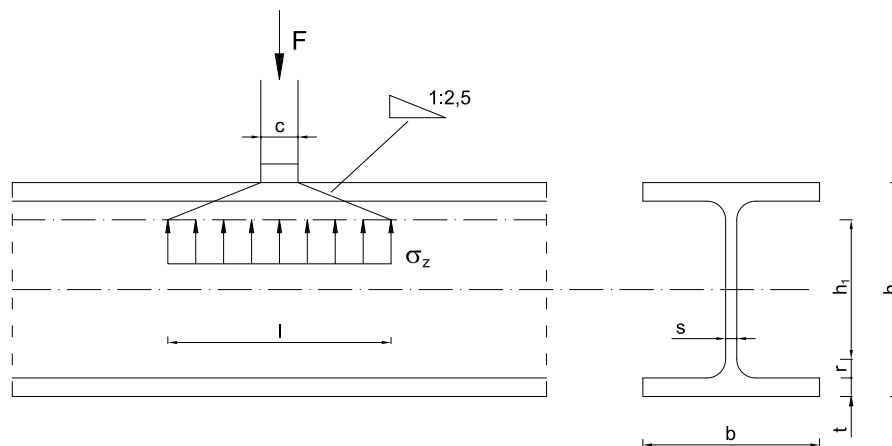


Abbildung 2.9: Elastische Lastausbreitung in Stahl; Trägerkreuzung, Winkel = 68.2° nach [DIN 18800 \(1990\)](#)

Die Lastausbreitung ist ein Modell zur Berechnung wirklichkeitsnaher, maximaler Spannungen, die zum Versagen des Querschnittes führen können. Da bisher keine Untersuchungen vorliegen, die diese Thematik im Holzbau systematisch erfassen, besteht die Notwendigkeit eigener Untersuchungen, um Verbindungen mit eingeklebten Gewindestangen sicher und wirtschaftlich bemessen zu können.

2.2.3.2 Querbeanspruchung

[MÖHLER UND HEMMER \(1981\)](#) und [RIBERHOLT \(1986\)](#) geben für die Bemessung querbeanspruchter Gewindestangen eigene Bemessungsvorschläge an. Eine allgemeinere Vorgehensweise enthalten [DIN V ENV 1995-2 \(1997\)](#) und [E DIN 1052 \(1999\)](#), die querbelastete eingeklebte Gewindestangen wie querbeanspruchte, stiftförmige Verbindungsmittel auf der Grundlage der Theorie von [JOHANSEN \(1949\)](#) bemessen.

Die Bemessungsvorschläge sind in [Anhang A.2](#) auf Seite [190](#) kurz zusammengefasst. Die in den Bemessungsvorschlägen angesetzten Abstände sind in [Tabelle 2.5](#) zusammengestellt.

Tabelle 2.5: Mindestabstände querbeanspruchter eingeklebter Gewindestangen

Abstand	AP	AS	RAB	RAS	RAU
Stangen parallel zur Faser eingeklebt					
MÖHLER UND HEMMER (1981)	-	3d _g	4d _g	4d _g	4d _g
RIBERHOLT (1988) ¹⁾	-	2d _g	4d _g	2d _g	2d _g
RIBERHOLT (1988) ²⁾	-	4d _g	4d _g	2.8d _g	2.8d _g
RIBERHOLT (1988) ¹⁾³⁾	-	2d _g	3d _g	1.5d _g	1.5d _g
RIBERHOLT (1988) ²⁾³⁾	-	2d _g	3d _g	2.5d _g	2.5d _g
E DIN 1052 (1999)	-	5d _g	4d _g	2.5d _g	2.5d _g
Stangen rechtwinklig zur Faser eingeklebt					
MÖHLER UND HEMMER (1981)	3d _g	3d _g	-	4d _g	4d _g
E DIN 1052 (1999) ⁴⁾	7d _g	3d _g	7d _g	3d _g	3d _g
E DIN 1052 (1999) ⁵⁾	3d _g	3d _g	4d _g	7d _g	3d _g
AP: Achsabstand in Faserrichtung, AS: Achsabstand rechtwinklig zur Faserrichtung, RAU: Abstand zum unbelasteten Rand, RAS: Abstand zum Seitenrand (rechtwinklig zur Krafrichtung), RAB: Abstand zum belasteten Rand d _g : Nenndurchmesser der Gewindestange 1) Klebstoff haftet an Stangen 2) Klebstoff haftet nicht an Stangen 3) Stirnholz verstärkt durch aufgeklebte Sperrholzplatten 4) Belastung parallel zur Faser ⁶⁾ 5) Belastung rechtwinklig zur Faser ⁶⁾ 6) Randabstände für Zwischenwinkel nach E DIN 1052 (1999)					

2.2.3.3 Kombinierte Beanspruchung

Die Interaktion zwischen Quer- und Achsialbeanspruchung von eingeklebten Gewindestangen kann nach DIN V ENV 1995-2 (1997) und E DIN 1052 (1999) wie folgt berücksichtigt werden:

$$\left(\frac{F_{ax}}{R_{ax}}\right)^2 + \left(\frac{F_v}{R_v}\right)^2 \leq 1. \quad (2.4)$$

mit: F_{ax} Achsialbelastung der Gewindestange
 R_{ax} von der Gewindestange aufnehmbare Achsialkraft
 F_v Querbeltung der Gewindestange
 R_v von der Gewindestange aufnehmbare Querkraft

2.2.4 Einfluß des Klimas und der Lasteinwirkungsdauer

a) Temperatur

Bei zu hoher Temperatur verliert der Klebstoff seine Festigkeit. Nach GAUNT (1998) ist dies für Epoxydharz ab etwa 50°C der Fall. AICHER (2001b) führte Traglastversuche an Versuchskörpern durch, die bei 50°C erwärmt wurden. Bei Verklebung der Stangen mit Resorcinharz- und Polyurethanklebstoffen verringerte sich die Traglast gegenüber Verbindungen, die bei 20°C und 65% relativer Luftfeuchte gelagert wurden. Die Tragfähigkeit der mit Epoxydharz verklebten Gewindestangen stieg dagegen durch das zusätzliche Aushärten des Klebstoffs während der unbelasteten Heißlagerung an.

In Dauerstandversuchen im trockenen Wechselklima bei 25°C bis 55°C durch zeigte sich, daß auch die Traglast der mit Epoxydharz verklebten Stangen bei hohen Temperaturen geringer ist. Die Stangen versagten mit allen drei Klebstoffen nach kurzer Zeit, nachdem sie mit 80% der Kurzzeitfestigkeit bei 50°C belastet wurden. Die Traglast der Stangen verringert sich vor allem durch den Temperatureinfluß, der Einfluß des Belastungsniveaus und der Lasteinwirkungsdauer ist demgegenüber eher gering.

b) Feuchtigkeit

DENG (1997) fand in seinen Untersuchungen an mit Epoxydharz eingeklebten Gewindestangen einen starken Einfluß der Feuchtigkeit auf die Tragfähigkeit der Gewindestangen. Er schlägt vor, bis 18% Holzfeuchte die volle Tragfähigkeit zu verwenden. Ab 25% Holzfeuchte soll die Tragfähigkeit auf 75% der Tragfähigkeit bei geringer Holzfeuchte abgemindert werden. Für den Bereich zwischen 18% und 25% macht Deng keine Angabe.

AICHER (2001b) untersuchte die Traglast von Stangen, die mit 85% relativer Luftfeuchte klimatisiert wurden. Bei Verklebung der Stangen mit Resorcinharz- und Polyurethanklebstoff verringerte sich die Traglast gegenüber Verbindungen, die bei 20°C und 65% relativer Luftfeuchte gelagert wurden. Die Tragfähigkeit der mit Epoxydharz verklebten Gewindestangen stieg dagegen im Gegensatz zu den Ergebnissen von DENG (1997) leicht an. Dauerstandversuche bei dieser Luftfeuchte mit einer Belastung von 60% bzw. 70% der Kurzzeitfestigkeit zeigten für die mit Resorcinharz- und Polyurethanklebstoff verklebten Stangen einen deutlichen Einfluß der höheren Feuchtigkeit. Die Versuchskörper versagten kurze Zeit, nachdem die Last aufgebracht wurde.

c) Wechselklima (Feuchtigkeit und Temperatur)

EHLBECK U. A. (1992) und HOLLINSKY (1992) untersuchten unbeanspruchte, eingeklebte Gewindestangen unter wechselnder Klimabeanspruchung. Die infolge der Holzfeuchtigkeitsänderungen hervorgerufenen Schwind- und Quellverformungen des Holzes verursachen gegenüber der starren Stange Schubspannungen in der Klebefuge. Die Auswirkung auf die Bemessung ist im Vorschlag von Gerold durch die Spannung $\tau_{\Delta u}$ berücksichtigt, siehe Anhang A.1.2 auf Seite 185. HOLLINSKY (1992) hat zusätzlich die Feuchteverteilung über den Querschnitt gemessen. Danach dauerte es einige Wochen, bis sich eine gleichbleibende Feuchteverteilung in den 6 cm dicken Körpern einstellte. Die Holzfeuchtigkeitsänderung im

Bereich der Gewindestangen war dabei nur halb so hoch wie an der Oberfläche, die Gewindestangen wurden nicht so hoch beansprucht, wie die Holzfeuchtigkeitsänderung an der Oberfläche vermuten ließ.

Nach der Klimabeanspruchung wurde die Traglast der eingeklebten Gewindestangen ermittelt. Eine Reduzierung der Bindefestigkeiten infolge der wechselnden Klimabeanspruchungen konnte nicht festgestellt werden. Bei den von Hollinsky ebenfalls geprüften, eingeklebten Glasfaserstäben fiel die Traglast infolge Klimaeinwirkung ab, da der Verbund zwischen Stab und Klebstoff teilweise zerstört war.

EHLBECK UND EHRHARDT (1994) haben die Traglast der von EHLBECK U. A. (1992) beschriebenen Langzeitversuchskörper nach sechs Jahren Belastung unter wechselnder Klimabeanspruchung ermittelt. Sie konnten keinen Abfall der Traglast durch die Langzeitbelastung feststellen. Die Ergebnisse wurden aus der Auswertung weniger Versuchskörper gewonnen, bei denen die mittleren Haftspannungen im Langzeitversuch nur 20 bis 30% der Kurzzeitfestigkeit betragen haben.

d) Zusammenfassung

Die hohe Traglast eingeklebter Gewindestangen im Normklima 20°C/65%rH wird sowohl durch hohe Temperaturen als auch durch Feuchtigkeit abgemindert. Die Untersuchungen von AICHER (2001b) stellen einen ersten Ansatz dar, diese Effekte der Bemessung zugänglich zu machen. Vor dem Einsatz eingeklebter Gewindestangen unter beliebigen klimatischen Randbedingungen müssen jedoch weitere Untersuchungen erfolgen.

2.2.5 Verschiebungsmodul

2.2.5.1 Achsialbeanspruchung

Nach DIN V ENV 1995-2 (1997) beträgt der Kurzzeitverschiebungsmodul eines eingeklebten, parallel der Achse belasteten Stabes

$$K_{ser} = 0.005 \cdot d^{1.8} \cdot \rho_k^{1.5}. \quad (2.5)$$

mit: dDurchmesser des Stabs [mm]
 ρ_kcharakteristische Dichte des Holzes [kg/m³]

Der Wert ist nicht von der Stangenlänge abhängig. Für die in den Versuchen verwendeten Gewindestangen M12 ergibt sich mit $\rho_k = 410 \text{ kg/m}^3$ (BS14h) ein Verschiebungsmodul von

$$K_{ser} = 0.005 \cdot 12^{1.8} \cdot 410^{1.5} = 3636.4 \text{ N/mm}. \quad (2.6)$$

Umgerechnet auf die Stangenoberfläche ergibt sich ein Wert von

$$k_{ser} = 3636.4 / (12 \cdot \pi \cdot 240) = 0.4 \text{ N/mm}^3 \quad (2.7)$$

Nach [EHLBECK U. A. \(1992\)](#) beträgt die Steifigkeit bezogen auf die Stangenoberfläche bei einer Last entsprechend der halben Traglast zwischen 4,3 und 8,9 N/mm³ und ist damit erheblich höher. Zum Verschiebungsmodul bei Achsialbeanspruchung siehe auch Abschnitt [3.1.3.3](#) auf Seite [44](#).

2.2.5.2 Querbeanspruchung

[DIN V ENV 1995-2 \(1997\)](#) gibt als Wert des Kurzzeitverschiebungsmoduls für rechtwinklig zur Faser eingebaute Stäbe

$$K_{ser} = 0.05 \cdot d \cdot \rho_k^{1.5} \quad (2.8)$$

mit: d wirksamer Durchmesser des Stabs [mm]
 ρ_k charakteristische Dichte des Holzes [kg/m³]

an. Für faserparallel eingebaute Stäbe gilt

$$K_{ser} = 0.01 \cdot d \cdot \rho_k^{1.5}. \quad (2.9)$$

2.3 Stöße mit nachträglich vergossenen Gewindestangen

Bei dieser Verbindungsausführung legt man Gewindestangen in die Bauteile ein, die durch den anschließenden Verguß kraftschlüssig verbunden werden. Erfolgt der Verguß im Werk, besteht bei größeren Bauteilen ein Transportproblem. Werden die Stangen auf der Baustelle vergossen, ist darauf zu achten, daß die zur Ausführung der Verklebung erforderlichen Umgebungsbedingungen geschaffen werden.

[CENCI UND PEDRAGLIO \(1998\)](#) beschreiben den „L'Aquilone di Chicco“, die Überdachung einer Kantine in Norditalien. Das Tragwerk besteht aus einem Trägerrost aus Brettschichtholz. Die Knotenpunkte sind unter Verwendung eingeklebter Gewindestangen hergestellt. Hierzu werden die kreuzenden Träger jeweils zur Hälfte ausgenommen, so daß sie ineinander gefügt werden können. Um die Kontinuität der Träger sicherzustellen, wird der entfernte Teil durch Gewindestangen „ersetzt“, die in eingefräste Nuten passen. Die Brettschichtholzträger werden in Abschnitten zur Baustelle transportiert und dort durch den Verguß der Nuten mit Epoxydharz zum fertigen Trägerrost verbunden.

[UNGER \(1995\)](#) behandelt in seiner Dissertation Rahmenecken, bei denen die Bauteile stumpf gestoßen werden. Die Verbindung erfolgt durch in beide Bauteile eingeklebte Gewindestangen, siehe Abbildung [2.11](#). Ein Problem hierbei ist die hohe Schubbelastung des Querschnitts im Bereich zwischen den Gewindestangen, siehe Abbildung [4.3](#).



Abbildung 2.10: Knoten im Trägerrost nach [BALLERINI U. A. \(1994\)](#)

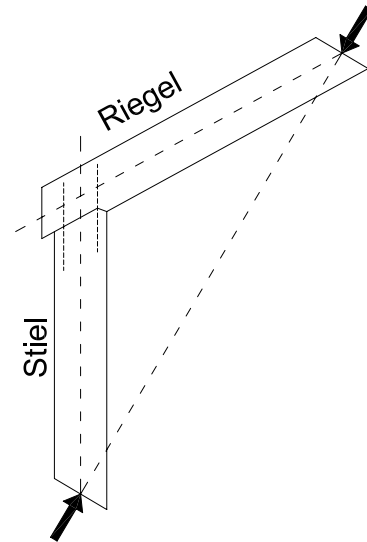


Abbildung 2.11: Rahmenecke nach [UNGER \(1995\)](#)

2.4 Stöße mit nachträglich verschweißten Gewindestangen

Bei dieser Stoßausbildung werden die Gewindestangen von der schmalen Außenseite des Querschnitts schräg in das Holz eingeklebt, siehe Abbildung 2.12. Sie werden sowohl axial als auch auf Abscheren beansprucht.

Die seitlich aus dem Holz herausstehenden Gewindestangenenden werden an Stahllaschen angeschweißt, die stahlbaumäßig verbunden werden. Dadurch können die Bauteile geteilt transportiert und auf der Baustelle zusammengefügt werden.

Das Schweißen hat nur einen geringen Einfluß auf die Traglast der Verklebung. Schon in geringer Entfernung von der Schweißnaht ist die Klebefuge nach Untersuchungen von [KANGAS \(1994\)](#) unbeeinträchtigt.

Die Traglast kann gesteigert werden, indem mehrere Stangen hintereinander angeordnet werden. Die Stangen binden sehr tief in den Querschnitt ein und verteilen dadurch die Last sehr gleichmäßig auf den ganzen Holzquerschnitt.

Nach [TURKOWSKY \(1990\)](#), [ZUBAREV \(1990\)](#) und [SLAVIK U. A. \(1993\)](#) wurden solche Verbindungen in Rußland häufig angewandt. Ein Beispiel einer solchen Anwendung ist das in Abbildung 2.13 dargestellte, 42 m weit gespannte Dach einer Eislaufhalle.

Am Technical Research Centre of Finland (VTT) wurde die Idee der schräg eingeklebten Gewindestangen von [KANGAS \(1994\)](#) weiterentwickelt. Die Gewindestangen werden so eingeklebt, daß sie paarweise wie ein V-förmiger Bock angeordnet sind, siehe Abbildung 2.14(a).

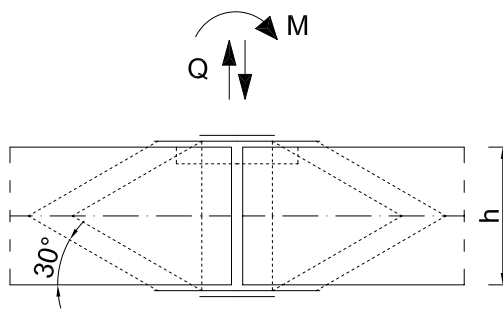


Abbildung 2.12: Verbindung mit schräg eingeklebten Gewindestangen nach [TURKOWSKY \(1990\)](#)

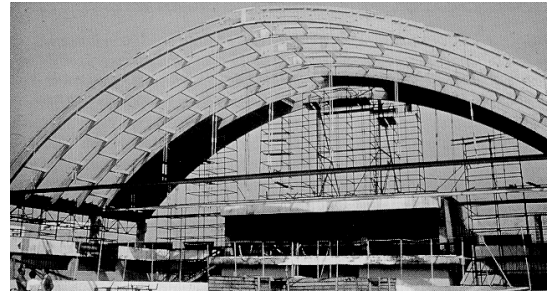
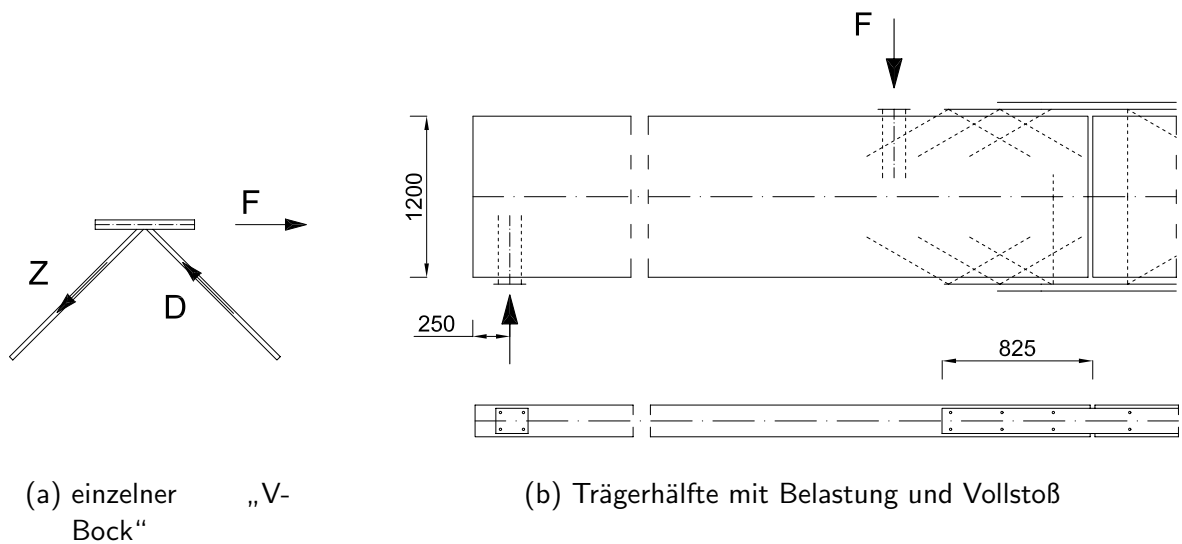


Abbildung 2.13: Überdachung einer Eislaufhalle nach [TURKOWSKY \(1990\)](#)



(a) einzelner „V-Bock“

(b) Trägerhälfte mit Belastung und Vollstoß

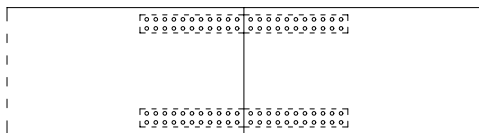
Abbildung 2.14: Verbindung mit „V-Bock“ nach [KANGAS \(1994\)](#)

Durch die fachwerkartige Tragwirkung ist die Verbindung sehr steif. Bei mehreren Versuchen mit Vollstößen von 1,2 m hohen Brett-schichtholzträgern, siehe [Abbildung 2.14\(b\)](#), wurde die Tragfähigkeit des Brett-schichtholzes erreicht.

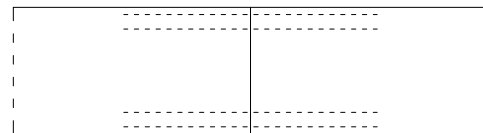
2.5 Stöße mit nachträglich verschraubten Gewindestangen

Verbindungen mit nachträglich verschraubten Gewindestangen folgen gewohnten Konstruktionsprinzipien, wie aus [Abbildung 2.15](#) ersichtlich ist. Es werden lediglich herkömmliche Bau-

teile, beispielsweise eingeschlitzte Bleche mit Stabdübeln, durch eingeklebte Gewindestangen ersetzt. Die Montage erfolgt durch Verschraubung der Gewindestangen mit Muttern. Im Gegensatz zu den in Abschnitt 2.4 vorgestellten Verbindungen sind keine Schweißkenntnisse erforderlich. Um einen möglichst großen inneren Hebelarm zur Aufteilung des inneren Moments in Normkräfte zu erhalten werden die Gewindestangen beginnend an der Außenseite des Querschnitts angeordnet.



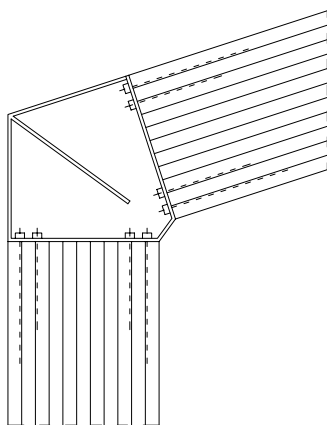
(a) Verbindung mit Schlitzblechen und Stabdübeln



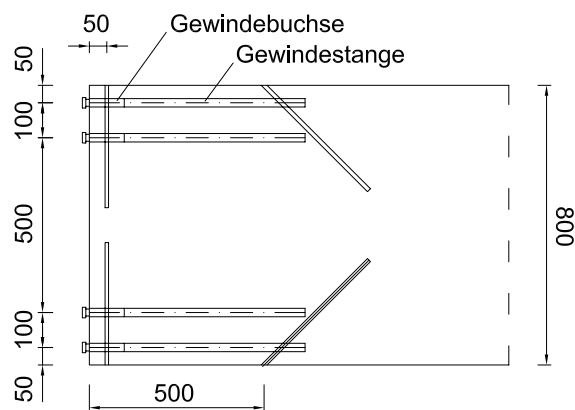
(b) Verbindung mit eingeklebten Gewindestangen

Abbildung 2.15: Herkömmliche und neue Verbindung

BUCHANAN UND FAIRWEATHER (1992) stellen eine Verbindung vor, bei der die Holzbauteile gerade abgeschnitten und an Stahlteile angeschlossen werden, die die Kraftübertragung bei positiver und negativer Biegebeanspruchung sicherstellen. Allerdings sind die erforderlichen Stahlteile groß und schwer, siehe Abbildung 2.16(a). Zudem wird die Querdehnung des Holzes durch das starre Stahlteil behindert. GAUNT (1998) beschreibt die Entwicklung von Verbindungen dieser Art für Bauten bei den olympischen Spielen in Sydney, siehe Abbildung 2.16(b).



(a) Verbindung nach
BUCHANAN UND
FAIRWEATHER
(1992)



(b) Verbindung nach GAUNT (1998)

Abbildung 2.16: Verbindungen mit großen Stahlteilen

Einfacher zu handhaben sind kleinere Stahlteile, die nicht den kompletten Stoßbereich einnehmen sondern nur die Gewindestangen verbinden. Diese Art der Verbindung wurde von [RIBERHOLT \(1986\)](#) entwickelt, siehe [Abbildung 2.17](#). Da die Verbindung nur einseitig zugfest ist, kann nur ein schließendes Moment aufgenommen werden. Das Fehlen eines durchgehenden Stahlteils ermöglicht die freie Querverformung des Holzes bei Feuchteänderungen.

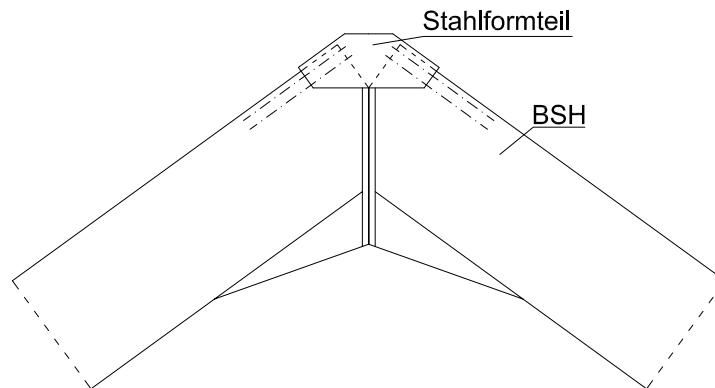


Abbildung 2.17: Rahmenecke mit Stahlteil nach [RIBERHOLT \(1986\)](#)

Die Größe des Stahlteils in der von Riberholt entwickelten Verbindung wird durch die erforderliche Fläche zur Aufnahme der Umlenkkräfte bestimmt. [AICHER U. A. \(1997\)](#) haben diese Idee weiterverfolgt und konnten durch Verstärkung des Bereiches zur Aufnahme der Umlenkkräfte mittels BFU-Aufleimer oder Gewindestangen das Stahlteil weiter verkleinern, siehe [Abbildung 2.18](#) und [2.19](#).

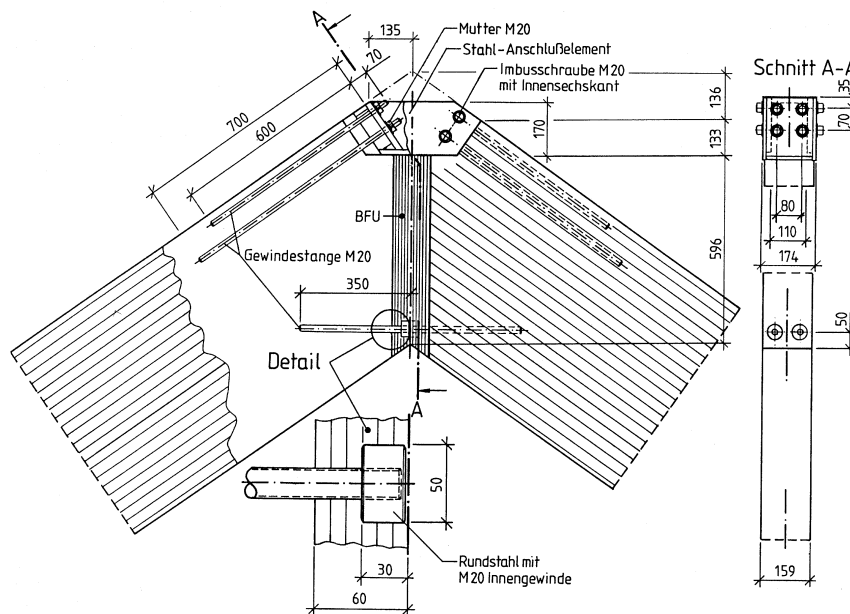


Abbildung 2.18: Rahmenecke mit aufgeklebter BFU-Verstärkung nach [AICHER U. A. \(1997\)](#)

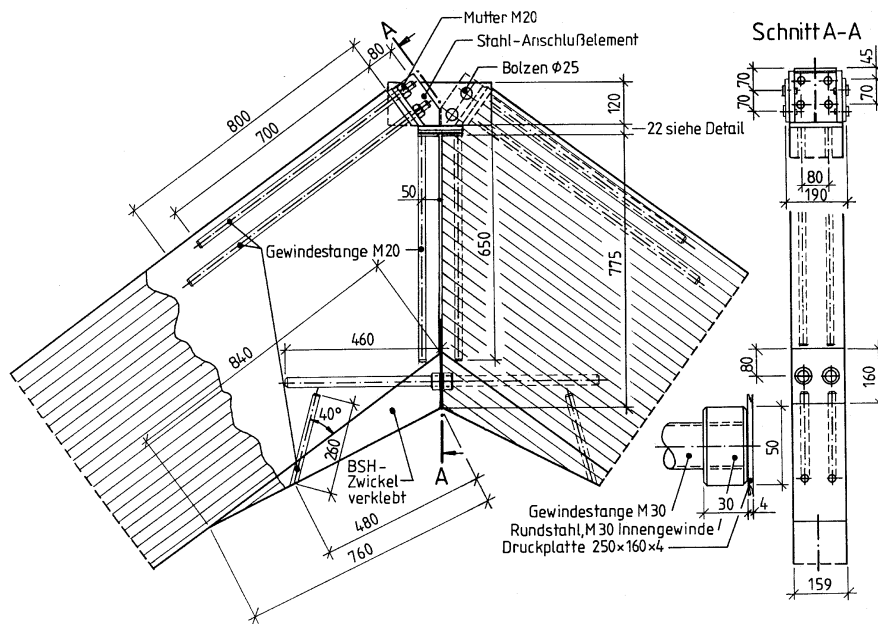


Abbildung 2.19: Rahmenecke mit eingeklebten Gewindestangen nach [AICHER U. A. \(1997\)](#)

Die BFU-Aufleimer spalten durch die Dehnungsbehinderung bei der Einleitung der Umlenkraft auf und können die Schubkraft nicht mehr in den Querschnitt einleiten. Die Herstellung der Verklebung ist mit einem hohen Aufwand verbunden. Die Faserrichtung der Deckfurniere der BFU-Aufleimer ist in Richtung des Gehrungsschnitts orientiert. Die Druckkraft aus der Momentenbeanspruchung muß quer zur Faser übertragen werden, der Druckbereich ist dadurch geschwächt. Zur Verstärkung müssen zusätzliche Gewindestangen eingeklebt werden, siehe Abbildung 2.18.

Die Verstärkung mit Gewindestangen vermeidet diese Nachteile. Allerdings ist kein sofortiger Kraftschluß der Gewindestangen zur Abtragung der Umlenkraft mit dem Stahlteil vorhanden, siehe Abbildung 2.19. Infolgedessen wurde der Querschnitt an der einspringenden Ecke im Versuch von [AICHER U. A. \(1997\)](#) durch hohe Querpressungen belastet, die zu erheblichen Eindrückungen führten.

Durch eine zugfeste Auslegung der Verbindung an der Innenecke kann die Rahmenecke öffnende Moment aufnehmen. Diese Verbindung kann dann als biegesteifer Firststoß verwendet werden. [SCHICK \(1999\)](#) hat in seiner Diplomarbeit einen Firststoß entworfen, bei dem die Umlenkraft über ein Schlitzblech zur Oberkante des Trägers geleitet und dort über Kontakt wieder in den Querschnitt eingeleitet wird, siehe Abbildung 2.20. Dieser effektive Anschluß weist allerdings hinsichtlich seines Langzeitverhaltens Schwächen auf. Bei Schwindverformungen verringert sich die Trägerhöhe, die Länge des Stahlschwertes bleibt jedoch konstant. Dem Stahlschwert und damit der Umlenkraft aus den Gewindestangen wird das Auflager auf der Trägersoberkante entzogen. Die Umlenkraft wird direkt in den Holzquerschnitt eingeleitet, der dadurch im Bereich des Zugstangenanschlusses aufreißt.

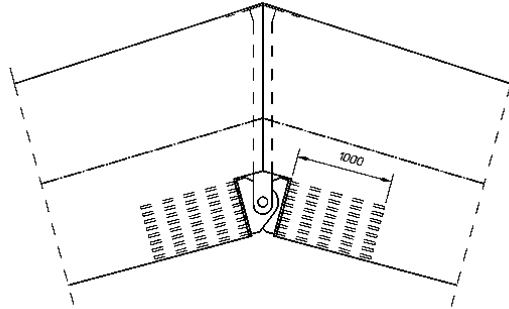


Abbildung 2.20: Möglicher Firststoß nach [SCHICK \(1999\)](#)

2.6 Einfluß der Quell- und Schwindverformung

Änderungen im Feuchtigkeitsgehalt des Holzes gehen mit einer Volumenänderung einher. Diese Quell- und Schwindverformungen beanspruchen den Holzquerschnitt nicht, solange sie zwangsfrei ablaufen können. Wird die freie Verformung der Querschnitte jedoch durch über die Querschnittshöhe reichende Ein- oder Anbauten behindert, bauen sich Zwängungsspannungen auf, deren Größe von der Höhe der Holzfeuchteänderung und der Größe des Bereichs der Dehnungsbehinderung abhängen. Überschreiten die Zwängungsspannungen die aufnehmbare Querspannung im Träger, so reißt dieser auf. Nach [RACHER \(1995\)](#) ist dies ab etwa einem Meter Querschnittshöhe der Fall. Risse begünstigen das Eindringen von Schädlingen und Feuchtigkeit, sie wirken sich dadurch nachteilig auf die Dauerhaftigkeit aus. Da über Risse keine Kräfte übertragen werden können, vermindern sie auch die Tragfähigkeit des Querschnittes.

Die freie Verformbarkeit ist nur bei geraden Stößen gegeben, bei denen man die Verbindungsteile für die Zug- und Druckübertragung trennen kann. Bei abgewinkelten Verbindungen ist die Umlenkkraft kurzzuschließen, so daß eine Behinderung der Querverformung entsteht.

Durch den Einbau von Hölzern, die bereits bei der Herstellung auf die zu erwartende Ausgleichsfeuchte getrocknet werden, kann man die zu erwartenden Schwind- oder Quellverformungen minimieren. In [DIN 1052 \(1996\)](#) ist die zu erwartende Ausgleichsfeuchte mit einer Genauigkeit von $\pm 3\%$ für geschlossene oder überdeckte offene Bauwerke und einer Genauigkeit von $\pm 6\%$ für allseitig der Witterung ausgesetzte Bauteile angegeben. Die Ausgleichsfeuchte kann also nicht exakt vorhergesagt werden. Die Konstruktion muß dementsprechend unempfindlich gegenüber den auftretenden Schwindverformungen sein.

Das Problem kann durch Gewindestangen gelöst werden, die zur Abtragung der Umlenkkraft in den Querschnitt eingeklebt werden. Diese Gewindestangen wirken zusätzlich als Bewehrung und verhindern so die Entstehung großer Schwindrisse bei Quell- und Schwindverformungen des Holzes, analog zur Bewehrung im Stahlbetonbau. [JACOB \(1997\)](#) beschreibt die Anwendung dieser Methode bei Rahmenecken mit durchgehenden, eingeschlitzten Stahlblechen, siehe Abbildung [2.21](#).

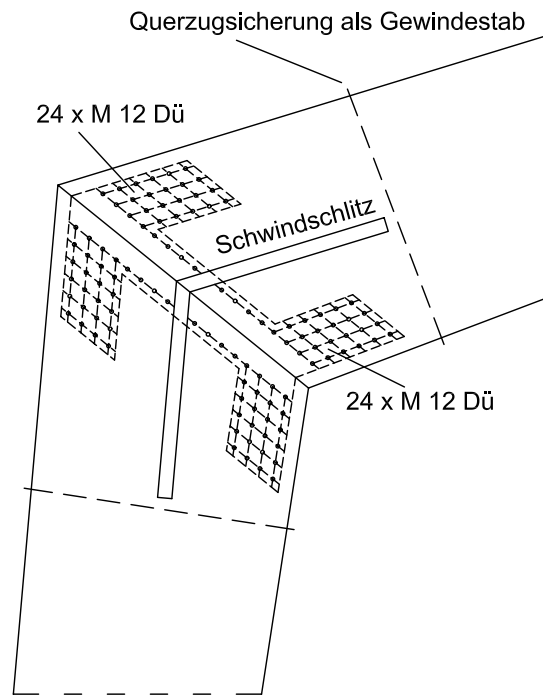


Abbildung 2.21: Rahmenecke mit eingeschlitzten Stahlblechen und Schwindschlitz nach [JACOBS \(1997\)](#)

2.7 Wirtschaftlichkeit

[PROTHMANN \(1999\)](#) und [SCHICK \(1999\)](#) haben in ihren Diplomarbeiten die Wirtschaftlichkeit von Verbindungen mit eingeklebten Gewindestangen anhand der Material- und Herstellungskosten untersucht. Transport- und Montagekosten sind in den Vergleichen nicht berücksichtigt. Die angesetzten Kosten sind Anhaltswerte.

[PROTHMANN \(1999\)](#) berücksichtigte verschiedene Ausführungsvarianten für den 31.7 m weit gespannten Zweigelenrahmen eines Hallentragwerks. Verglichen werden eine keilgezinkte Rahmenecke, ein Stabdübelkreis, eine Schlitzblechverbindung und eine Verbindung mit eingeklebten Gewindestangen. Die ermittelten Preise für einen Zweigelenrahmen, bei dem im Firstbereich der Querzugnachweis nicht maßgebend ist, sind in Tabelle 2.6 zusammengestellt.

Tabelle 2.6: Preise für einen Zweigelenrahmen

Eckverbindung	Preis [DM]
Keilzinkung	25598
Dübelkreis	25172
Schlitzblech	30423
Gewindestangen	26440

Die Ausführung des Firstbereiches hat einen erheblichen Einfluß auf die Kosten. Der Rahmenriegel folgt der Dachneigung und ist im Firstbereich gekrümmt. Die Querkzugbeanspruchung aus der Momentenumlenkung darf bei unverstärkter Ausführung des Firstbereiches die zulässige Spannung nicht übersteigen, es sind große Querschnitte erforderlich. Durch die Verstärkung des Firstbereiches mit eingeklebten Gewindestangen ergeben sich erhebliche Holz- und damit Kosteneinsparungen. Die Einsparungen sind umso größer, je geringer die Steifigkeit der Rahmeneckverbindung ist, da bei einer weichen Rahmeneckverbindung eine Umlagerung des Momentes von der Rahmenecke in den Riegelquerschnitt stattfindet und der Firstquerschnitt zusätzlich belastet wird.

[SCHICK \(1999\)](#) vergleicht einfeldrige Satteldachträger mit verschiedenen Ausführungen des Firstpunktes. Er stellt einen am First gestoßenen Satteldachbinder einem im Firstbereich unverstärkten und einem im Firstbereich durch Gewindestangen verstärkten, durchgehenden Träger gegenüber. Der Binder mit verstärktem Firstbereich ist bei allen Spannweiten der günstigste. Ab einer gewissen Länge ist er jedoch nicht mehr transportabel, so daß die teilbare Variante mit Firststoß zur Anwendung kommen muß.

Die Untersuchungen zeigen, daß Verbindungen mit eingeklebten Gewindestangen wirtschaftlich herzustellen sind. Ein wesentlicher Punkt ist die Wahl des richtigen Gewindestangendurchmessers. Die Anzahl der Gewindestangen muß in einem vernünftigen Verhältnis zu ihrer Tragkraft stehen. Die Diplomarbeit von [KOHLHAMMER \(2001\)](#) zeigt, daß kleine Gewindestangendurchmesser durch die hohe Stangenanzahl beim Einbau hohe Lohnkosten verursachen. Ab einem Durchmesser von 27 mm steigen dagegen die Preise der Gewindestangen überproportional an, so daß hier die Materialkosten stark ansteigen. Der Bereich günstiger Gewindestangendurchmesser liegt für den untersuchten Holzquerschnitt von 16·70 cm² zwischen 18 und 24 mm.

2.8 Zusammenfassung

a) Eingeklebte Gewindestangen

Eingeklebte Gewindestangen stellen bei achsialer Belastung eine steife und außerordentlich tragfähige Möglichkeit der Lasteinleitung in Holzquerschnitte dar. Die Lasteinleitung erfolgt gleichmäßig durch Schubspannungen in der Klebefuge. Es entstehen keine hohen Lochleibungsspannungen, die Verbindung kriecht nicht und behält ihre Steifigkeit auch bei wechselnder Belastung – sie „leiert nicht aus“. Werden Gewindestangen quer belastet, verhalten sie sich wie herkömmliche, stiftförmige Verbindungsmittel.

Die Tragfähigkeiten eingeklebter Gewindestangen können anhand genormter Bemessungsvorschläge ermittelt werden. Die Haftfestigkeit achsial belasteter, eingeklebter Gewindestangen wird durch Bemessungsvorschläge, die einen nichtlinearen Zusammenhang der Haftfestigkeit mit der Einklebelänge annehmen, in guter Übereinstimmung mit Versuchsergebnissen bestimmt. Quer belastete eingeklebte Gewindestangen übertragen die Last durch Lochleibung und können nach den Bemessungsvorschlägen für stiftförmige Verbindungsmittel in [DIN V ENV 1995-2 \(1997\)](#) und [E DIN 1052 \(1999\)](#) bemessen werden.

Die Einhaltung der zu den Bemessungsvorschlägen angegebenen Mindestabstände vermeidet das Spaltversagens des Holzes bei Achsialbelastung der Gewindestange, bzw. das Spalt- oder Schubversagens des Holzes bei Querbelastung der Gewindestange.

Der Nachweis des Holzquerschnitts am Ende der Gewindestange basiert auf der pauschalen Annahme einer zur Spannungsermittlung ansetzbaren Fläche. Diese Annahme läßt das orthotrope Materialverhalten des Holzes außer acht und liegt für Gewindestangen, die im Winkel zur Faser eingeklebt werden, stark auf der sicheren Seite. Um die wirtschaftliche Verwendung von eingeklebten Gewindestangen auch für diese Fälle zu ermöglichen, sind Untersuchungen erforderlich.

b) Verbindungen mit eingeklebten Gewindestangen

Aufbauend auf den bisherigen Untersuchungen soll eine anwendbare Rahmeneckverbindung entwickelt werden, die eine möglichst rationelle Vorfertigung mit hoher Tragfähigkeit und einfachem Transport verbindet.

Große Bauteile lassen sich nur geteilt einfach transportieren. Auf der Baustelle müssen sie zum Gesamtbauteil verbunden werden. Geklebte Verbindungen sind unter genau definierten Umgebungsbedingungen herzustellen. Da diese auf der Baustelle nur schwer realisierbar sind, scheidet Ausführungen mit Baustellenverklebungen aus. Verbindungen, bei denen geschweißt werden muß, sind für einfache holzverarbeitende Betriebe ungeeignet und scheidet deshalb ebenfalls aus.

Die Ausführung mit parallel der Faser eingeklebten Gewindestangen ist einfach zu fertigen und zeichnet sich durch eine hohe Tragfähigkeit aus, wie bereits von [AICHER U. A. \(1997\)](#) gezeigt wurde. Aus diesem Grund wird die in Abschnitt 2.5 vorgestellte Verbindung mit einer eingeklebten Gewindestange zur Abtragung der Umlenkkraft weiterentwickelt.

3 Lastausbreitung bei eingeklebten Gewindestangen

3.1 Experimentelle Untersuchungen

3.1.1 Versuchskörper

3.1.1.1 Allgemeines

Zur Untersuchung der Lastausbreitung axial belasteter Gewindestangen sind Versuche an insgesamt 12 Versuchskörpern durchgeführt worden, siehe Abbildung 3.1 auf der nächsten Seite. Die Versuche wurden am Otto-Graf-Institut der Universität Stuttgart durchgeführt.

Im Rahmen der Versuche wurden in 6 Konfigurationen je 2 Körper geprüft. Die Lastausbreitung wurde unter Zug- und Druckbeanspruchung in verschiedenen Winkeln zur Faser untersucht. Betrachtet wurde ein Kraft-Faserwinkel von 0° , der den Fall der Lasteinleitung in Anschlüssen durch eingeklebte Gewindestangen darstellt, sowie Kraft-Faserwinkel von 45° , 67.5° und 90° , die den Bereich der Auflagerverstärkungen, Querlasteinleitungen und Kraftumlenkungen abdecken. Winkel zwischen 0° und 45° wurden als nicht praxisrelevant erachtet und daher nicht experimentell untersucht.

Die Last wurde an einer Stirnseite der Körper durch eingeklebte Gewindestangen eingeleitet, an der gegenüberliegenden Seite war der Körper flächig gelagert. Die Gewindestangen wurden zentrisch, bei den Körpern Z0E exzentrisch – 8.5 cm vom Rand entfernt – eingeklebt, siehe Abbildung 3.2. Zur Überprüfung der Machbarkeit wurden Vorversuche mit vier Versuchskörpern durchgeführt. Die Konfigurationen sind in Tabelle 3.1 zusammengestellt.

3.1.1.2 Abmessungen

Die Abmessungen der Prüfkörper betragen $50 \cdot 90 \cdot 8$ cm ($b \cdot h \cdot t$), siehe Abbildung 3.2. Sie wurden durch den freien Raum innerhalb des Prüfrahmens bestimmt. Die Versuchskörper nutzten die maximale Höhe aus, um die Lastausbreitung in einem großen Bereich beurteilen zu können.



Abbildung 3.1: Versuchskörper in Prüfmaschine

Tabelle 3.1: Konfiguration der Versuchskörper

Bezeichnung	Anzahl	Druck / Zug	Winkel Stange / Faser [°]
-	-	-	-
V1–V4	4	D	0
D0	2	D	0
D45	2	D	45
D67.5	2	D	67.5
D90	2	D	90
Z0	2	Z	0
Z0E	2	Z	0

Die Versuchskörper waren dünn, um an der Oberfläche die von der Lasteinleitung verursachten Dehnungen messen zu können. Bei einer Gewindestangendicke von 12 mm beträgt der erforderliche Randabstand nach [E DIN 1052 \(1999\)](#) $2.5 \cdot 12 = 30$ mm, die erforderliche Dicke ist somit 60 mm. Um eine ausreichende Sicherheit gegen Stabilitätsversagen zu haben, wurde eine Dicke von 80 mm gewählt, siehe Abschnitt [3.1.1.4](#) auf Seite [41](#). In Vorversuchen mit Körperdicken von 80 und 100 mm hatte sich gezeigt, daß diese Dicken ausreichen, um ein Aufspalten des Holzes um die Gewindestange zu verhindern.

Um eine eindeutige örtliche Zuordnung von Rechenwerten und Meßwerten zu gewährleisten, wurde für die Körper ein einheitliches Koordinatensystem eingeführt, siehe [Abbildung 3.3](#) auf der nächsten Seite. Der Ursprung liegt im Schwerpunkt des Querschnitts in der Ebene der Auflagerung.

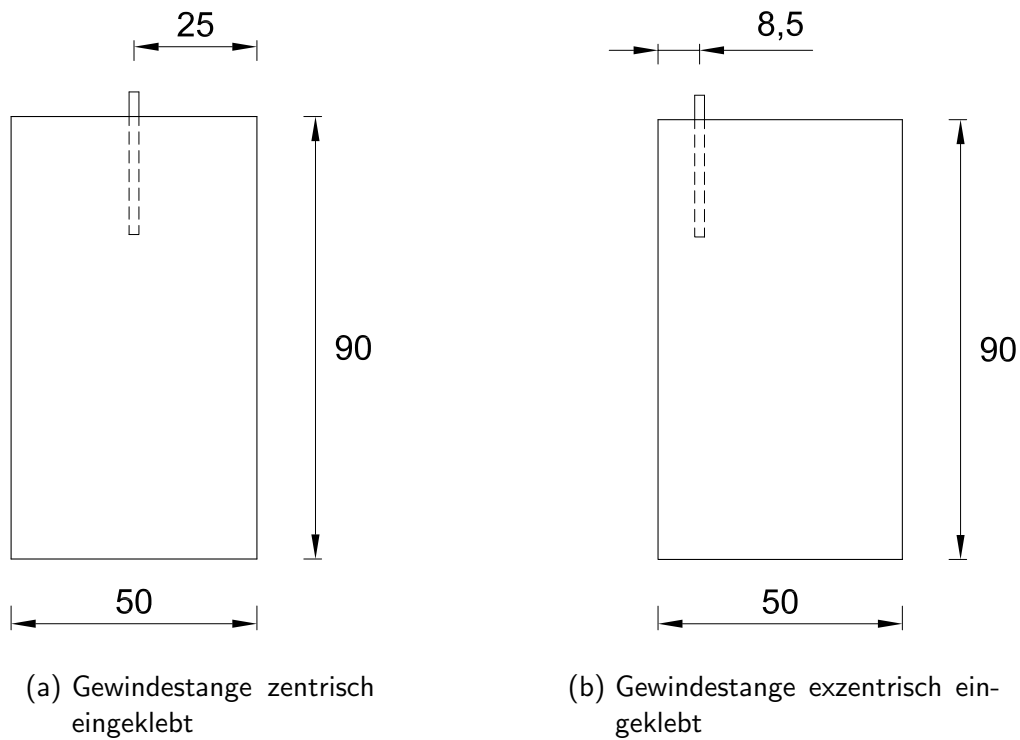


Abbildung 3.2: Anordnung der Gewindestange bei den Versuchskörpern

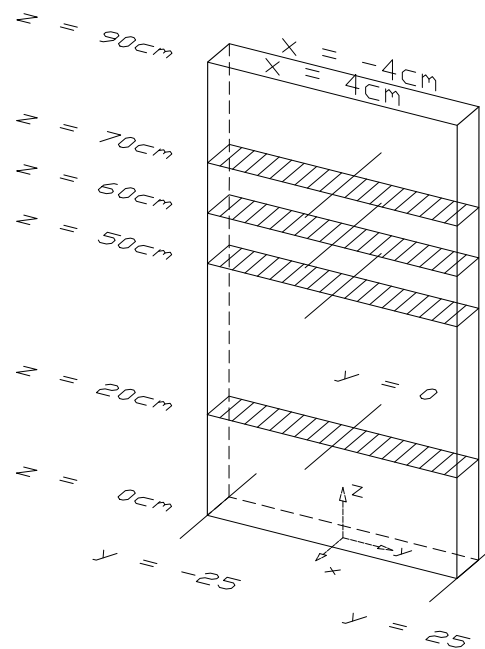


Abbildung 3.3: Raster zur Anordnung der Dehnmeßstreifen

3.1.1.3 Holzgüte

Die Prüfkörper für die Vorversuche bestanden aus Brettschichtholz der Festigkeitsklasse BS11, die Versuchskörper entsprachen der Festigkeitsklasse BS14h. Bis zum Versuch wurden die Körper bei 20°C und 65% relativer Luftfeuchte aufbewahrt, die Holzfeuchte betrug 12%.

Die Elastizitätsmoduln der Körper werden aus der Rohdichte berechnet. Der Faktor zur Umrechnung wird mit den in [DIN V ENV 1995-2 \(1997\)](#) für die Dichte und den Elastizitätsmodul angegebenen Werten hergeleitet, siehe Gleichung (3.1). Die Werte der Versuchskörper sind in Tabelle 3.2 zusammengestellt.

$$f_{\rho \rightarrow E_{\parallel}} = \frac{E_{0,mean}}{\rho_{mean}} = \frac{12500}{410/0.85} = 25.915 \cdot \frac{N \cdot m^3}{mm^2 \cdot kg} \quad (3.1)$$

Tabelle 3.2: Daten der Versuchskörper

Versuch	Winkel [°]	Güte -	Höhe [cm]	Breite [cm]	Dicke [cm]	Gewicht [kg]	Dichte ¹⁾ [kg/m ³]	E-Modul [N/mm ²]
Stangen parallel zur Faser								
D 0-1	0	BS14	90	50	8	16.19	450	11660
D 0-2	0	BS14	90	50	8	18.15	505	13070
Z 0-1	0	BS14	102	50	8	17.27	445	11520
Z 0-2	0	BS14	102	50	8	17.16	442	11450
Z 0E-1	0	BS14	102	50	8	19.66	509	13190
Z 0E-2	0	BS14	102	50	8	19.78	508	13170
Mittelwert							476	12340
Stangen im Winkel zur Faser								
D 45-1	45	BS14	90	50	8	16.85	468	12130
D 45-2	45	BS14	90	50	8	16.96	471	12210
D 67,5-1	67.5	BS14	90	50	8	16.98	472	12220
D 67,5-2	67.5	BS14	90	50	8	16.96	472	12210
D 90-1	90	BS14	90	50	8	17.26	480	12430
D 90-2	90	BS14	90	50	8	17.05	474	12280
Mittelwert							473	12250
Vorversuche, Stangen parallel zur Faser								
V1	0	BS11	100	50	8	-	-	
V2	0	BS11	100	50	8	-	-	
V3	0	BS11	100	50	10	-	-	
V4	0	BS11	120	50	10	-	-	
¹⁾ $\rho_k = 410 \text{ kg/m}^3$ nach E DIN 1052 (1999) $\rho_{mean} = \rho_k / (5/6) = 492 \text{ kg/m}^3$								

3.1.1.4 Stabilität

Die Versuchskörper sind lediglich an den Stellen der Auflagerung und der Lasteinleitung in die Gewindestange gehalten worden, um die Dehnungsmessung an der Oberfläche nicht zu beeinträchtigen. Die Körper sind damit Knickstäbe gemäß Eulerfall 2 mit einer Knicklänge entsprechend der Körperhöhe von 90 cm. Die Knicklast der Versuchskörper hängt von der Neigung der Faserrichtung ab. Bei Lasteinleitung parallel der Faser beträgt der rechnerische Elastizitätsmodul $E_{\parallel} = 12000 \text{ N/mm}^2$ nach [DIN 1052 \(1996\)](#). Bei Lasteinleitung quer zur Faser (D90) ist der Elastizitätsmodul $E_{\perp} = 400 \text{ N/mm}^2$.

Das Trägheitsmoment um die schwache Achse beträgt

$$I = \frac{b \cdot t^2}{12} = \frac{50 \cdot 8^3}{12} = 2133.3 \text{ cm}^4. \quad (3.2)$$

Die Knicklast für den Fall D0 ist gleich

$$P_{ki} = \frac{\pi^2 \cdot EI}{s_k^2} = \frac{\pi^2 \cdot 1200 \cdot 2133.3}{90^2} = 3119.3 \text{ kN}, \quad (3.3)$$

für den Fall D90 beträgt sie

$$P_{ki} = \frac{\pi^2 \cdot EI}{s_k^2} = \frac{\pi^2 \cdot 40 \cdot 2133.3}{90^2} = 104.0 \text{ kN}. \quad (3.4)$$

Die Knicklast ist für den Fall D90 damit doppelt so hoch wie die erwartete mittlere Versagenslast der Gewindestangen, siehe Abschnitt [3.1.1.5](#).

3.1.1.5 Gewindestangen

Die Maximallast der Prüfmaschine von 100 kN und die Dicke der Versuchskörper beschränkten den maximal verwendbaren Gewindestangendurchmesser. Zur Anwendung kamen Gewindestangen M12, Festigkeitsklasse 8.8. Sie wurden mit Epoxydharz (Wevo-Spezialharz EP 20 VP/1, Härter B 20/1) mit einer Einklebelänge von 240 mm ($\lambda = 20$) in den Querschnitt eingeklebt. Der Bohrlochdurchmesser betrug 13 mm.

Nach [AICHER \(2001a\)](#) ist die mittlere von der Verklebung aufnehmbare Kraft mit einem angenommenen Variationskoeffizient von 12%

$$F_{g,m} = \pi \cdot 13 \cdot 240 \cdot \frac{4.5}{0.8} \cdot 10^{-3} = 54.7 \text{ kN}, \quad (3.5)$$

$$\text{mit: } f_{v,k} = 60 \cdot 13^{-0.49} \cdot \left(\frac{240}{13}\right)^{-0.46} = 4.46 \text{ N/mm}^2 < 7.55 \text{ N/mm}^2. \quad (3.6)$$

Die charakteristische Last, ab der eine Gewindestange M12, 8.8 fließt, beträgt

$$F_{y,b,k} = A_{sp} \cdot f_{y,b,k} = 84.3 \cdot 640 \cdot 10^{-3} = 54.0 \text{ kN}. \quad (3.7)$$

Die charakteristische Bruchlast beträgt mit

$$\sigma_{R,k} = \min \begin{cases} \sigma_{1,R,k} = f_{y,b,k}/1.1 = 640/1.1 = 582 \text{ N/mm}^2 \\ \sigma_{2,R,k} = f_{u,b,k}/1.25 = 800/1.25 = 640 \text{ N/mm}^2 \end{cases} \quad (3.8)$$

$$F_{u,b,k} = A_{sp} \cdot \sigma_{R,k} = 84.3 \cdot 582 \cdot 10^{-3} = 49.1 \text{ kN}. \quad (3.9)$$

Nach dem Einbringen wurden die Gewindestangen in ihrer Lage fixiert. Das Epoxidharz härtete in der Klimakammer unter konstanten Umgebungsbedingungen von 20°C und 65% relativer Luftfeuchte aus.

3.1.2 Versuchsdurchführung

Die Prüfmaschine, mit der die Versuche durchgeführt wurden, ist in Abbildung 3.1 auf Seite 38 abgebildet. Die maximal aufbringbare Last beträgt 100 kN. Die Maschine ist weggesteuert, die minimal einstellbare Belastungsgeschwindigkeit beträgt 0.3 mm/min. Eine ausführliche Beschreibung der Versuche ist in [KUHLMANN UND LIPPERT \(2002a\)](#) enthalten.

Die Versuchskörper D45, D67.5 und D90 verformten sich unter Belastung um ihre schwache Achse. Am Prüfrahen wurden Querhölzer angebracht, gegen die man die Körper mit Zwingen festspannen konnte, um ein Stabilitätsversagen bei zu großer Biegeverformung zu vermeiden.

Die Biegeverformung der Versuchskörper wird durch den Verlauf der Meßwerte der Wegnehmer bestätigt. Bei Belastungsbeginn liefen bei allen Körpern die gemessenen Werte des vorderen und hinteren Wegnehmers auseinander. Die Kraftmeßdose verkippte relativ zum Körper, bis ein kraftschlüssiger Gleichgewichtszustand erreicht war. Bei den Körpern D0 und Z0 liefen die Kurven nach kurzem parallel, der Körper kippte nicht weiter. Bei den Körpern mit schräg zur Faser eingeklebten Gewindestangen liefen die Meßwerte der Wegnehmer teilweise weiter auseinander. Dies resultierte aus der Biegeverformung der Körper, aufgrund derer sich die Achse der Körper gegenüber der Senkrechten und gegenüber der Lasteinleitung geneigt hat.

3.1.3 Versuchsauswertung

3.1.3.1 Versagensursache

Bei den Körpern mit parallel der Faser eingeklebten Gewindestangen versagte immer die Klebefuge. Das Versagen fand schlagartig statt. Die Körper mit im Winkel zur Faser eingeklebten Gewindestangen wiesen ein anderes Versagen auf. Sie verformten sich unter Belastung aus der Ebene der Lasteinleitung heraus, das Versagen der Klebefuge wurde nicht in allen Fällen erreicht. Teilweise plastizierte die Gewindestange, teilweise mußte der Versuch abgebrochen werden, da die Verformungen aus der Ebene so groß wurden, daß die Körper auszuknicken drohten. Die Versagensursachen der Körper sind in Tabelle 3.3 zusammengestellt.

Tabelle 3.3: Versagensursachen

Stangen parallel der Faser						
	D0-1	D0-2	Z0-1	Z0-2	Z0E-1	Z0E-2
Versagen der Klebefuge	x	x	x	x	x	x
Stabilitätsversagen						
Stangenversagen						
Stangen im Winkel zur Faser						
	D45-1	D45-2	D67.5-1	D67.5-2	D90-1	D90-2
Versagen der Klebefuge		x		x		x
Stabilitätsversagen					x	
Stangenversagen	x		x		x	

3.1.3.2 Traglasten

Bei den Traglasten der einzelnen Versuche zeigt sich ein klarer Unterschied zwischen den parallel zur Faser und den im Winkel zur Faser eingeklebten Gewindestangen, siehe Abbildung 3.4 und Tabelle 3.4. Die Traglast der parallel der Faser eingeklebten Stangen beträgt im Mittel 41.92 kN, unter Einbeziehung der Vorversuche steigt die mittlere Traglast für parallel zur Faser eingeklebte Gewindestangen auf 43.46 kN. Dies ist geringer als die nach [AICHER \(2001a\)](#) errechnete mittlere Traglast von 54.7 kN, siehe Abschnitt 3.1.1.5 auf Seite 41. Dieser Unterschied läßt sich auf die Verwendung von Epoxydharz, dessen Haltbarkeitsdatum überschritten war, zurückführen. Der Klebstoff erreichte nicht mehr seine Endfestigkeit. Die Traglast der im Winkel zur Faser eingeklebten Stangen beträgt im Mittel 73.71 kN. Im Vergleich zu den parallel der Faser eingeklebten Stangen entspricht dies einer Erhöhung der mittleren Traglast um den Faktor

$$73.71/43.46 = 1.696 \approx +70\%.$$

Da die hohe Traglast der im Winkel zur Faser eingeklebten Stangen nicht erwartet wurde, hat in einigen Fällen nicht die Klebefuge sondern die Stange versagt, siehe Tabelle 3.3. Eine

mögliche Erklärung für den Anstieg der Traglast ist, daß die quer zur Stange orientierten Holzfasern den Ringzug direkt aufnehmen, Querkzugversagen ist damit nur noch in einer Richtung – in Dickenrichtung des Versuchskörpers – möglich. Zudem haben sich die Versuchskörper etwas aus der Belastungsebene heraus verformt. Die Last wurde schräg zur Längsachse der Versuchskörper eingeleitet. Die Lastübertragung von den Gewindestangen in den Holzquerschnitt erfolgte nicht mehr nur durch Schub-, sondern auch durch Druckspannungen. Zur genauen Ermittlung des Einflusses des Einklebewinkels auf die Traglast von Gewindestangen sind weitere Untersuchungen erforderlich.

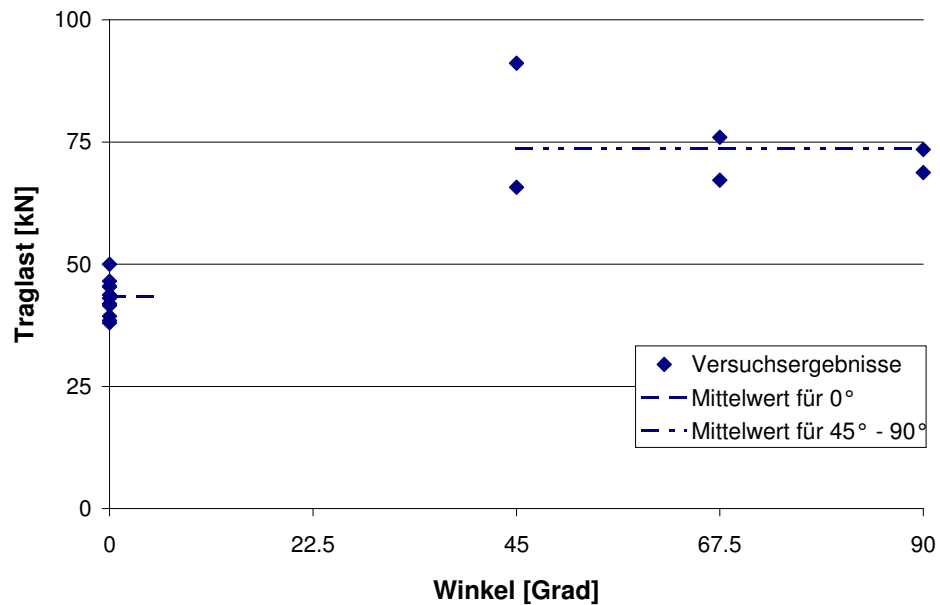


Abbildung 3.4: Traglast in Abhängigkeit des Winkels zur Faser

Alle Körper haben nach Erreichen der Traglast noch eine gewisse Resttragfähigkeit, bedingt durch die Reibwirkung in der Bruchfläche. Bei Druckbeanspruchung addiert sich zur Mantelreibung der Spitzendruck der Gewindestange.

Der größte Teil der Kraft wird jedoch über die Mantelfläche der Gewindestange übertragen. Die Gewindestangenspitze überträgt rechnerisch bei Druckbelastung parallel der Faser eine mittlere Druckkraft von $1/0.8 \cdot f_{c,0,k} \cdot A_{Spitze} = 1.25 \cdot 29 \text{ N/mm}^2 \cdot 60 \text{ mm}^2 \cdot \pi = 4.10 \text{ kN}$, mit $f_{c,0,k}$ nach [E DIN 1052 \(1999\)](#). Im Verhältnis zur Traglast der Gewindestangen ist dieser Anteil gering.

3.1.3.3 Last-Verformungs-Verhalten

Die Verschiebung wurde zwischen Gewindestange und Holz gemessen. Die Last-Verformungskurven weisen zum Zeitpunkt des Versagens der Klebefuge Sprünge auf. Die elastische Verformung der Versuchskörper geht auf Null zurück, die Gewindestangen werden dadurch weiter aus dem Körper herausgezogen oder in den Körper hineingedrückt. Vergleicht man

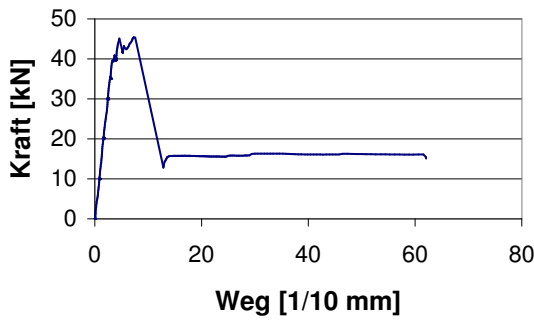
Tabelle 3.4: Traglasten der Versuchskörper

Versuch	Winkel [°]	Güte -	Traglast [kN]	Dichte [kg/m ³]	E-Modul [N/mm ²]
Stangen parallel zur Faser					
D 0-1	0	BS14	45.40	450	11660
D 0-2	0	BS14	38.47	505	13070
Z 0-1	0	BS14	39.35	445	11520
Z 0-2	0	BS14	43.74	442	11450
Z 0E-1	0	BS14	43.02	509	13190
Z 0E-2	0	BS14	41.56	508	13170
Mittelwerte			41.92	476	12340
Stangen im Winkel zur Faser					
D 45-1	45	BS14	65.74	468	12130
D 45-2	45	BS14	91.11	471	12210
D 67,5-1	67.5	BS14	67.21	472	12220
D 67,5-2	67.5	BS14	75.95	472	12210
D 90-1	90	BS14	68.76	480	12430
D 90-2	90	BS14	73.49	474	12280
Mittelwerte			73.71	473	12250
Vorversuche, Stangen parallel zur Faser					
V1	0	BS11	38.00	-	
V2	0	BS11	50.00	-	
V3	0	BS11	46.50	-	
V4	0	BS11	45.50	-	
Mittelwert			45.00		

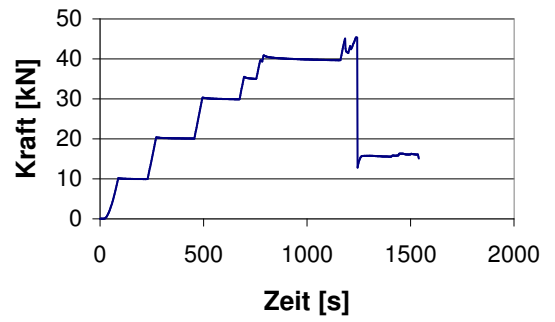
die Last-Verformungs- und Last-Zeit-Kurven ist dies offensichtlich, siehe Abbildung 3.5 und 3.6.

Nahe der Traglast verhielten sich die Verbindungen unterschiedlich. Während bei den parallel der Faser eingeklebten Gewindestangen die Klebefuge schlagartig versagte, bildete die Last-Verformungs-Linie bei den Verbindungen mit schräg zur Faser eingeklebten Gewindestangen ein Plateau aus. Die Verbindung wurde weicher, die Gewindestange bildete ein Fließgelenk aus. In den meisten Fällen blieb die Klebefuge intakt. Weitere Untersuchungen müssen klären, ob dies auch bei Gewindestangen höherer Güte und Körpern ohne Stabilitätserscheinungen auftritt.

Die abgebildeten Diagramme zeigen, daß die Orientierung der Gewindestangen zur Faserrichtung keinen erkennbaren Einfluß auf die Steifigkeit der Verbindung hat. In Tabelle 3.5 sind die berechneten Sekantensteifigkeiten der in den Versuchen verwendeten Gewindestangen für zwei Kraftbereiche, in denen die Kraft-Verformungs-Linien weitgehend linear verlaufen, angegeben.

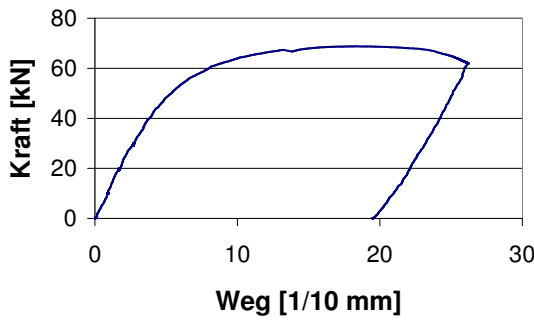


(a) Kraft-Verformungs-Linie

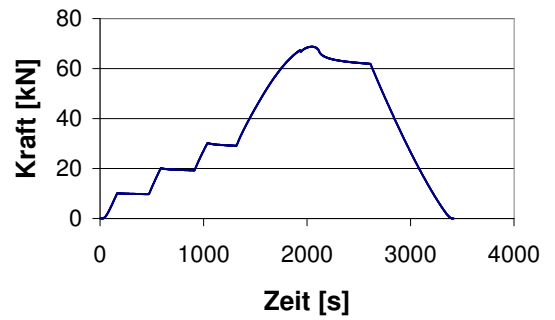


(b) Kraft-Zeit-Linie

Abbildung 3.5: Körper D0-1



(a) Kraft-Verformungs-Linie



(b) Kraft-Zeit-Linie

Abbildung 3.6: Körper D90-1

Tabelle 3.5: Steifigkeiten der Gewindestangen in [kN/cm] für einen Kraftbereich von 10 – 20 kN

Einzelwerte			
D0-1	134.2	D45-1	128.2
D0-2	89.0	D45-2	120.6
Z0-1	108.9	D675-1	93.6
Z0-2	131.6	D675-2	119.4
Z0E-1	126.0	D90-1	119.3
Z0E-2	136.7	D90-2	157.4
Mittelwert			
			122.2

Bezieht man die Steifigkeit auf die Klebfugenoberfläche ergibt sich ein Wert von

$$C = \frac{122.16}{24 \cdot 1.3 \cdot \pi} = 1.25 \text{ kN/cm}^3 = 1.25 \text{ N/mm}^3 \quad (3.10)$$

Bekannte Werte der Steifigkeit liegen im Bereich von $0.4 - 8,9 \text{ N/mm}^3$, siehe Abschnitt 2.2.5 auf Seite 25. Zwischen diesen Grenzwerten liegt ein Faktor von 22. Die Steifigkeit eingeklebter Gewindestangen wird für die Berechnung von Verschiebungen bei Anschlüssen benötigt und sollte durch weitere Untersuchungen geklärt werden.

3.1.3.4 Hauptdehnungsrichtungen

Aus den gemessenen Dehnungen der Dehnmeßrosetten werden mit der in Anhang B auf Seite 193 beschriebenen Umrechnung die Hauptdehnungsrichtungen bestimmt. Die Hauptdehnungsrichtungen blieben an den meisten Meßstellen über den Versuchsverlauf konstant.

Unter der Lasteinleitung bildet sich ein Druck- bzw. Zugkegel aus, dessen Öffnungswinkel sich mit der Neigung der Kraft zur Faserrichtung ändert. Dies ist auch an den in Abbildung 3.7 auf der nächsten Seite abgebildeten Hauptdehnungsrichtungen erkennbar. In jeder Abbildung ist die Faserrichtung des Körpers in der linken unteren Ecke mit angegeben.

Bei den Körpern D0, Z0 und Z0E zeigen die Hauptdehnungsrichtungen schräg nach außen, die Last breitet sich im Bereich der Meßpunkte noch weiter aus, siehe die Abbildungen 3.7(a), 3.7(e) und 3.7(f). Bei den Körpern D90 verteilt sich die Last dagegen wesentlich schneller, sie hat sich an den Meßstellen schon weitgehend ausgebreitet. Die Hauptdehnungsrichtung an den Meßstellen entspricht der Belastungsrichtung, siehe Abbildung 3.7(d).

Die Richtung des Druck- beziehungsweise Zugkegels folgt der Faserrichtung, wie aus den Hauptdehnungsrichtungen der Körper D45 in Abbildung 3.7(b) zu sehen ist. Lediglich im unteren rechten Bereich, wo die Faser am Querschnittsrand abgeschnitten ist und keine Kraft mehr weiterleiten kann, verläuft die Hauptdehnungsrichtung in Richtung Auflager.

Bei den Körpern D67.5 erkennt man, daß sich ab einem bestimmten Winkel die Last nicht mehr in Faserrichtung, sondern rechtwinklig zur Faserrichtung ausbreitet, siehe Abbildung 3.7(c). Die Neigung der Fasern zur Krafrichtung ist so groß, daß die Kraft nicht mehr entlang der Fasern sondern quer zur Faserrichtung weitergeleitet wird. FISCHER (2000) bestätigt diese Tatsache in seiner Diplomarbeit, in der er umfangreiche FE-Untersuchungen zu den Versuchskörpern durchgeführt hat.

3.1.4 Zusammenfassung

Um die Ergebnisse des mechanischen Modells und der FE-Berechnungen zu verifizieren, wurden Lastausbreitungsversuche an 12 Versuchskörpern in 6 Konfigurationen durchgeführt. An

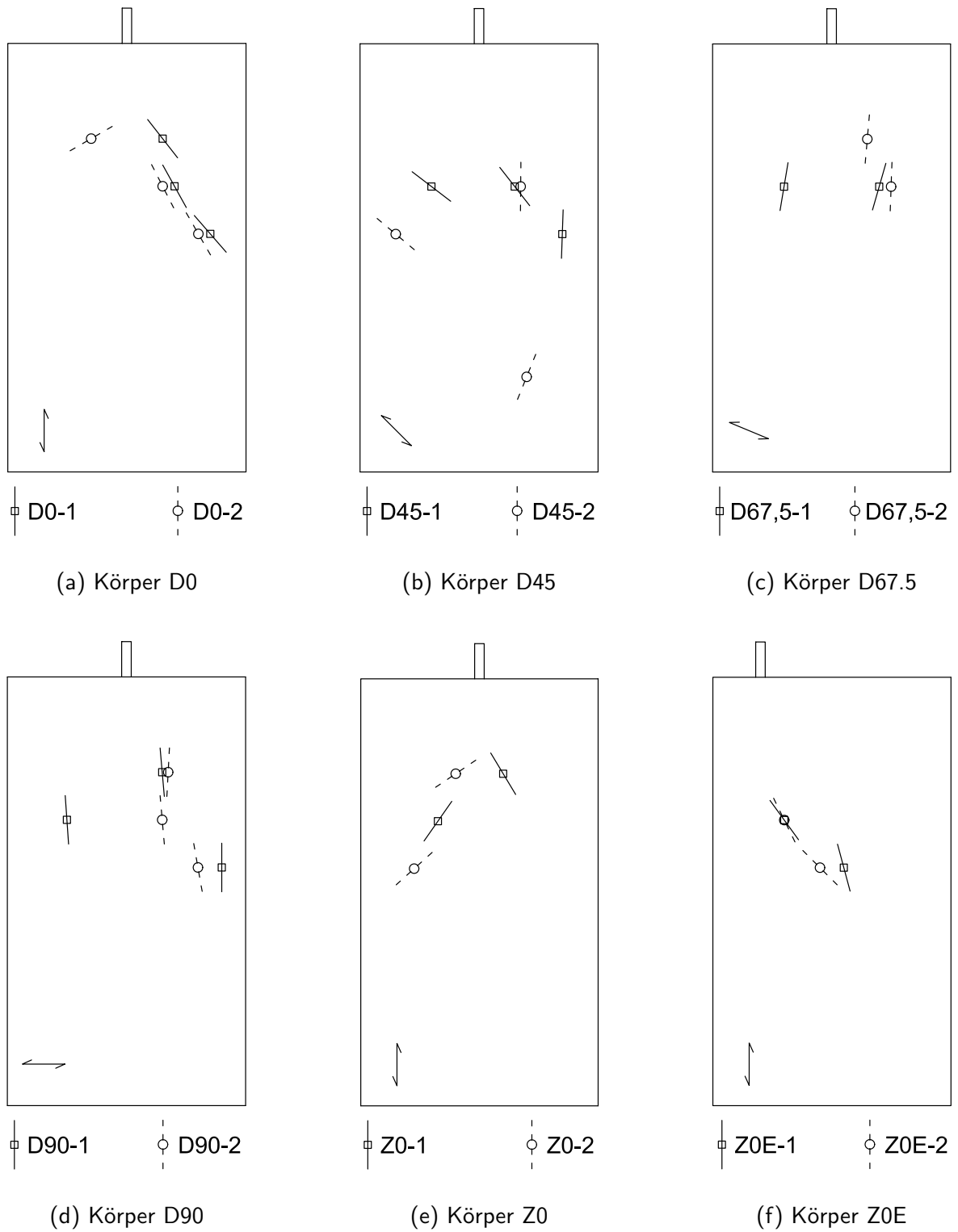


Abbildung 3.7: Hauptdehnungen

der Holzoberfläche wurden Dehnungsmessungen durchgeführt, aus denen auf die Dehnungs- und damit auf die Spannungsverteilung im Querschnitt geschlossen werden kann.

Die Traglasten der im Winkel zur Faser eingeklebten Gewindestangen lag dabei im Mittel 70% über der Traglast faserparallel eingeklebter Gewindestangen.

Die gemessenen Dehnungen zeigen, daß sich die Last quer zur Faser schneller ausbreitet, als parallel zur Faser. Die Steifigkeit eingeklebter Gewindestangen ist unabhängig vom Winkel, unter dem die Gewindestangen eingeklebt werden.

3.2 Numerische Untersuchungen

3.2.1 Allgemeines

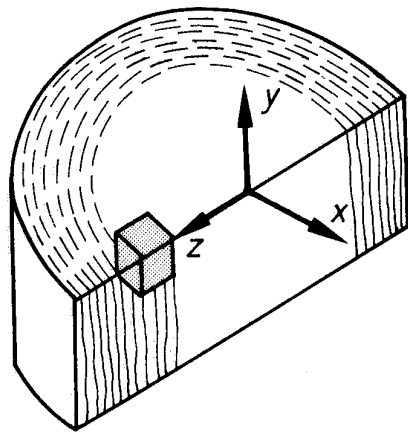
Zur Untersuchung der Auswirkungen verschiedener Parameter auf die Lastausbreitung bei achsial belasteten, eingeklebten Gewindestangen werden linear-elastische Berechnungen mit dem Finite-Elemente-Programm ANSYS durchgeführt. Nach der Ermittlung der Werkstoffparameter werden verschiedene dreidimensionale Modelle der Versuchskörper erstellt, die die räumliche Wirkung der Lastausbreitung erfassen. Anhand eines Vergleichs der mit den Modellen berechneten Ergebnisse mit den Versuchsergebnissen wird eine sinnvolle Modellierung für die Parameterstudie gewählt.

3.2.2 Werkstoffparameter

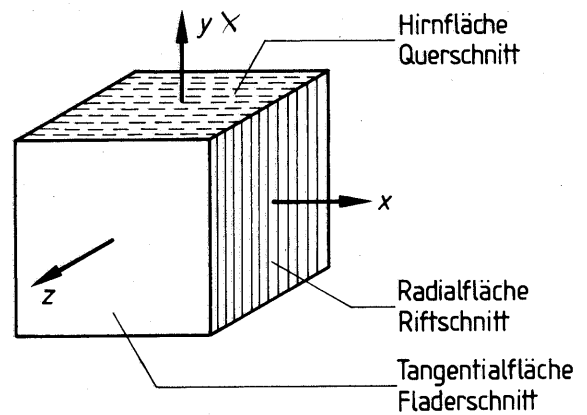
Holz ist ein inhomogener Werkstoff aus parallelen Fasern, die in Wuchsrichtung des Baumes orientiert sind. Seine mechanischen Eigenschaften werden durch die Dichte, die aufgrund des natürlichen Wachstums schwankt, und die Holzfeuchte festgelegt, siehe auch [NEUHAUS \(1981\)](#).

In einem Schnitt rechtwinklig zur Wuchsrichtung des Baumes erkennt man die in der Schnittfläche radial um das Zentrum verlaufenden Jahrringe, siehe auch [Abbildung 3.8\(a\)](#). Betrachtet man einen Würfel endlicher Abmessung, der aus dem Stamm herausgeschnitten wird, so kann man drei anatomische Hauptrichtungen unterscheiden, denen sich näherungsweise drei zueinander rechtwinklige Hauptachsen zuordnen lassen, siehe [NEUHAUS \(1994\)](#) und [Abbildung 3.8\(b\)](#):

- tangential – rechtwinklig zur Faserrichtung und tangential zu den Jahrringen; diese Richtung wird mit x , 1 oder t bezeichnet,
- longitudinal – parallel zur Faserrichtung; diese Richtung wird mit y , 2, oder l bezeichnet und



(a) Schnitt durch einen Baumstamm



(b) Holzwürfel mit rhombischer Symmetrie

Abbildung 3.8: Hauptachsen des Holzes nach [NEUHAUS \(1994\)](#)

- radial – rechtwinklig zur Faserrichtung und rechtwinklig zu den Jahrringen; diese Richtung wird mit z , r oder r bezeichnet.

Die Eigenschaften des Holzes in Richtung dieser Hauptachsen sind unterschiedlich, es ist anisotrop. Die Anisotropie mit drei zueinander rechtwinkligen Hauptachsen wird „rhombische Anisotropie“ genannt, die durch das in Gleichung (3.11) angegebene Elastizitätsgesetz abgebildet wird, siehe [NEUHAUS \(1994\)](#).

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_x &= s_{11} \cdot \sigma_x + s_{12} \cdot \sigma_y + s_{13} \cdot \sigma_z \\
 \varepsilon_y &= s_{21} \cdot \sigma_x + s_{22} \cdot \sigma_y + s_{23} \cdot \sigma_z \\
 \varepsilon_z &= s_{31} \cdot \sigma_x + s_{32} \cdot \sigma_y + s_{33} \cdot \sigma_z \\
 \gamma_{yz} &= s_{44} \cdot \tau_{yz} \\
 \gamma_{zx} &= s_{55} \cdot \tau_{zx} \\
 \gamma_{xy} &= s_{66} \cdot \tau_{xy}
 \end{aligned}
 \tag{3.11}$$

Die Elastizitätszahlen s_{ii} mit $i = 1, 2, 3$ werden als **Dehnungszahlen**, die s_{ii} mit $i = 4, 5, 6$ als **Gleitzahlen** und die s_{ik} mit $i, k = 1, 2, 3$ und $i \neq k$ als **Querdehnungszahlen** bezeichnet ([NEUHAUS 1994](#)). Der erste Index bezeichnet die Verformungsrichtung, der zweite die Richtung der Spannung. Das Gleichungssystem muß bezüglich der Diagonalen symmetrisch sein, es gilt $s_{ik} = s_{ki}$.

Die Elastizitäts-, Schub- und Torsionsmoduln sind die Kehrwerte der Elastizitätszahlen s_{ii} .

Mit y als Achse der Faserrichtung gilt nach NEUHAUS (1994)

$$\begin{aligned}
 E_l &= E_{22} = 1/s_{22} && \text{Elastizitätsmodul in Faserrichtung} \\
 E_t &= E_{11} = 1/s_{11} && \text{Elastizitätsmodul in Tangentialrichtung} \\
 E_r &= E_{33} = 1/s_{33} && \text{Elastizitätsmodul in Radialrichtung} \\
 G_{lr} &= G_{23} = 1/s_{44} && \text{Schubmodul der Radialfläche} \\
 G_{rt} &= G_{31} = 1/s_{55} && \text{Schubmodul der Hirnfläche} \\
 G_{lt} &= G_{21} = 1/s_{66} && \text{Schubmodul der Tangentialfläche}
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

Die Querdehnrzahlen s_{ik} sind die Quotienten aus Querdehnfaktoren und den zugehörigen Elastizitätsmoduln:

$$\begin{aligned}
 s_{12} &= \frac{\nu_{12}}{E_{22}} & s_{13} &= \frac{\nu_{13}}{E_{33}} & s_{23} &= \frac{\nu_{23}}{E_{33}} \\
 s_{21} &= \frac{\nu_{21}}{E_{11}} & s_{31} &= \frac{\nu_{31}}{E_{11}} & s_{32} &= \frac{\nu_{32}}{E_{22}}
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

Nach KOLLMANN (1951) und KEYLWERTH (1951) ist die Bedingung $s_{ik} = s_{ki}$ für die Querdehnrzahlen erfüllt. Nach NEUHAUS (1981) ist dies im allgemeinen nicht der Fall. In Tabelle 3.6 sind die in den zitierten Werken aufgeführten Querdehnrzahlen für Fichtenholz mit der zugehörigen Holzfeuchtigkeit u zusammengestellt. Man erkennt, daß die Werte für $u = 9.8\%$ gut übereinstimmen. Ebenso erkennt man die von NEUHAUS (1981) angegebene Abhängigkeit von der Holzfeuchtigkeit.

Tabelle 3.6: Querdehnrzahlen in $[10^{-3} \cdot \text{mm}^2/\text{N}]$

	u [%]	$-s_{12}$	$-s_{13}$	$-s_{32}$	$-s_{21}$	$-s_{31}$	$-s_{23}$
Neuhaus	12	0.046	0.733	0.034	0.084	0.740	0.068
Neuhaus	9.8	0.034	0.598	0.029	0.077	0.618	0.062
Keylwerth	9.8	0.033	0.600	0.027	-	-	-
Kollmann	9.8	0.033	0.621	0.027	-	-	-

Aus der Bedingung $s_{ik} = s_{ki}$ ergibt sich der Zusammenhang der Querdehnrzahlen, siehe Gleichung (3.14) und SAS IP (1999). Zur Berechnung werden nur die Querdehnrzahlen ν_{12} , ν_{13} und ν_{23} als Eingabewerte benötigt, die korrespondierenden Werte werden aus diesen Werten und den Elastizitätsmoduln ermittelt.

$$\frac{\nu_{21}}{E_{11}} = \frac{\nu_{12}}{E_{22}}; \quad \frac{\nu_{31}}{E_{11}} = \frac{\nu_{13}}{E_{33}} \quad \text{und} \quad \frac{\nu_{32}}{E_{22}} = \frac{\nu_{23}}{E_{33}}. \tag{3.14}$$

NEUHAUS (1994), KOLLMANN (1951) und KEYLWERTH (1951) geben Querdehnrzahlen an, die für Fichtenholz in Tabelle 3.7 zusammengestellt sind. Nach Kollmann sind die Querdehnrzahlen konstant („poissonsche Konstanten“), dies gilt nach Neuhaus nur bei konstanter Holzfeuchtigkeit.

Tabelle 3.7: Querdehnfaktoren

	u [%]	ν_{12}	ν_{13}	ν_{32}	ν_{21}	ν_{31}	ν_{23}
Neuhaus	12	0.55	0.60	0.41	0.035	0.31	0.056
Neuhaus	9.8	0.41	0.49	0.35	0.014	0.25	0.024
Keylwerth	9.8	0.33	0.48	0.27	0.015	0.27	0.022
Kollmann	9.8	0.53	0.42	0.43	0.013	0.24	0.019

Die in Tabelle 3.7 angegebenen Querdehnfaktoren gelten für dreidimensional orientiertes Holz. Bei Brettschichtholz kann vereinfachend zwischen der Orientierung in Faserrichtung und rechtwinklig zur Faserrichtung unterschieden werden. Die Werkstoffkennwerte in radialer und tangentialer Richtung werden gemittelt, so daß die Bedingungen in Gleichung (3.14) erfüllt sind. Nach E DIN 1052 (1999) und KOLLMANN (1951) ergeben sich die folgenden Kennwerte, die ungefähr den mittleren Werten der Versuchskörper entsprechen, siehe Tabelle 3.2 auf Seite 40:

$$\begin{aligned}
 E_{x(11)} &= 420N/mm^2 & G_{xy(12)} &= 780N/mm^2 & \nu_{xy(12)} &= 0.413 \\
 E_{y(22)} &= 12500N/mm^2 & G_{xz(13)} &= 40N/mm^2 & \nu_{xz(13)} &= 0.261 \\
 E_{z(33)} &= 420N/mm^2 & G_{yz(23)} &= 780N/mm^2 & \nu_{yz(23)} &= 0.011
 \end{aligned} \tag{3.15}$$

Für den isotropen Werkstoff Stahl sind die Werte in allen Richtungen identisch:

$$\begin{aligned}
 E_{x(11)} &= 210000N/mm^2 & G_{xy(12)} &= 8100N/mm^2 & \nu_{xy(12)} &= 0.3 \\
 E_{y(22)} &= 210000N/mm^2 & G_{xz(13)} &= 8100N/mm^2 & \nu_{xz(13)} &= 0.3 \\
 E_{z(33)} &= 210000N/mm^2 & G_{yz(23)} &= 8100N/mm^2 & \nu_{yz(23)} &= 0.3
 \end{aligned} \tag{3.16}$$

3.2.3 Modellierung

3.2.3.1 Allgemeines

Bei faserigen, orthotropen Werkstoffen wie Holz soll nach RAMM UND KEMMLER (2001) die Vernetzung in Richtung der Fasern erfolgen, um eine genaue Lösung zu erhalten. Ist dies nicht möglich, muß das Modell ausreichend fein vernetzt werden.

Im Modell werden wie im Versuch verschiedene Orientierungen der Faser zu den Längskanten untersucht. Eine Vernetzung parallel der Faserrichtung wäre nur für die Fälle D0, Z0 und D90 möglich. Um auch die Fälle D45 und D67.5 genau erfassen zu können, sind die Modelle dementsprechend fein zu vernetzen. Die Berücksichtigung der Faserrichtung erfolgt durch Drehung des Elementkoordinatensystems in die Richtung der Hauptachsen des Holzes.

Unter Ausnutzung der Symmetrie in Dickenrichtung wird der halbe Körper modelliert. In Breitenrichtung ist der Körper nur für die Fälle mittiger Belastung und parallel sowie rechtwinklig zur Faser eingeklebter Gewindestangen symmetrisch. In den anderen Fällen ist die

Dehnungsverteilung in Querrichtung aufgrund der Faserneigung oder den ausmittig eingeklebten Gewindestangen asymmetrisch.

Die Klebstoffschicht zwischen Gewindestange und Holz wird nicht abgebildet. Bei Modell 1 und 2 würde die Abbildung der Klebstoffschicht viele kleine Elemente erfordern und dadurch die Gesamtzahl der im Programm zur Verfügung stehenden Knoten überschreiten. Bei Modell 3 kann der Einfluß der Steifigkeit der Klebefuge erfaßt werden, indem die Balkenelemente durch Federelemente nachgiebig mit dem Körper verbunden werden. Allerdings steigt durch die nichtlineare Berechnung der Rechenaufwand stark an. Zudem fehlen Vergleichswerte im Körperinneren, letztlich kann eine Kontrolle nur durch einen Vergleich der Gewindestangendehnung mit den von [DENG \(1997\)](#) im Rahmen seiner Dissertation gemessenen Werten erfolgen.

3.2.3.2 Modell 1

Modell 1 bildet Körper und Gewindestange als Volumen ab. Die Vernetzung erfolgt mit Elementen des Typs Solid72 – vierknotigen Tetraederelementen mit linearer Ansatzfunktion – und Solid92 – der 10-knotigen Ausführung des Elementes Solid72, die quadratische Ansatzfunktionen verwendet.

Elemente mit quadratischen Ansatzfunktionen ermöglichen es, gröber zu vernetzen, ohne an Genauigkeit gegenüber einer feinen Vernetzung mit Elementen, die lineare Ansatzfunktionen verwenden, zu verlieren. Bei gleicher Netzfeinheit kann die Genauigkeit der Lösung erhöht werden. Der Rechenaufwand für Elemente mit quadratischen Ansatzfunktionen ist jedoch höher.

Die Vernetzung des Modells 1 erfordert durch die unregelmäßige Form vergleichsweise viele Elemente, vor allem im Bereich der Gewindestange mit ihren im Verhältnis zur Körpergröße geringen Abmessungen. Dies verlängert die Rechenzeit und ist aufgrund der im Programm zur Verfügung stehenden Knotenanzahl nicht beliebig verfeinerbar.

Es werden vier Varianten dieses Modells berechnet:

- Variante 1-1: grobe Vernetzung mit Solid72, siehe Abbildung [3.9\(a\)](#)
- Variante 1-2: wie Variante 1-1, jedoch mit Elementen des Typs Solid92 vernetzt
- Variante 1-3: feine Vernetzung mit Solid72, siehe Abbildung [3.9\(b\)](#)
- Variante 1-4: wie Variante 1-3, jedoch mit Elementen des Typs Solid92 vernetzt

3.2.3.3 Modell 2

Modell 2 entspricht Modell 1, jedoch wird am Ende der Gewindestange ein Abreißen der Klebstoffschicht durch eine dünne Elementlage mit geringem Elastizitätsmodul simuliert,

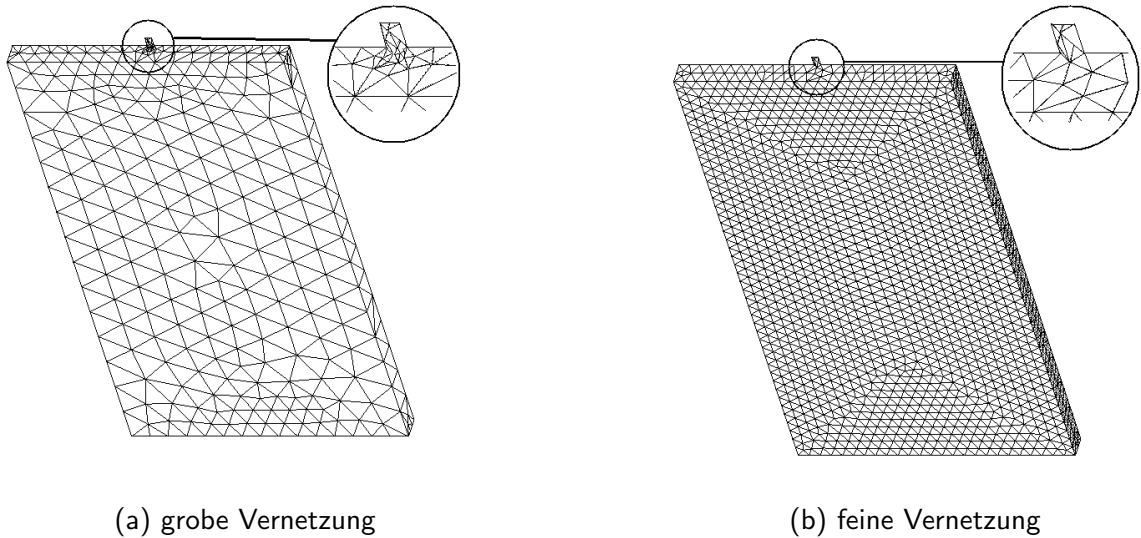


Abbildung 3.9: Modell 1 – Vernetzung mit Tetraederelementen

siehe Abbildung 3.10. Das Abreißen der Klebstoffschicht tritt nur bei Zugbeanspruchung auf. Druckbeanspruchung kann vom Klebstoff übertragen werden.

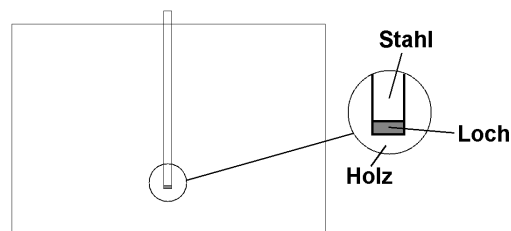


Abbildung 3.10: Modell 2 – Loch am Ende der Gewindestange (grau unterlegt)

3.2.3.4 Modell 3

Bei Modell 3 wird die Gewindestange durch Balkenelemente abgebildet. Der Körper kann dadurch mit rechteckigen Elementen vernetzt werden, so daß sich eine Reduktion der benötigten Elementanzahl im Vergleich zu Modell 1 und 2 ergibt.

Für die Vernetzung werden Elemente mit quadratischen Ansatzfunktionen (Solid95 und Beam189) verwendet. Für eine Variante kommen Elemente mit linearen Ansatzfunktionen (Solid45 und Beam4) zum Einsatz.

Es werden vier Varianten dieses Modells berechnet:

- Variante 3-1: Grobe Vernetzung mit Solid95 und Beam189 (1 Elementteilung über die

Dicke, 20 Elementteilungen über die Breite), siehe Abbildung 3.11(a).

- Variante 3-2: Feine Vernetzung mit Solid95 und Beam189 (4 Elementteilungen über die Dicke, 20 Elementteilungen über die Breite, mit einer Netzverfeinerung zur Stange hin), siehe Abbildung 3.11(b).
- Variante 3-3: Wie Variante 3-2, mit einer zusätzlichen Netzverfeinerung im Bereich der Stangenenden, siehe Abbildung 3.12.
- Variante 3-4: Wie Variante 3-2, jedoch mit Elementen mit linearen Ansatzfunktionen (Solid45 und Beam4) vernetzt.

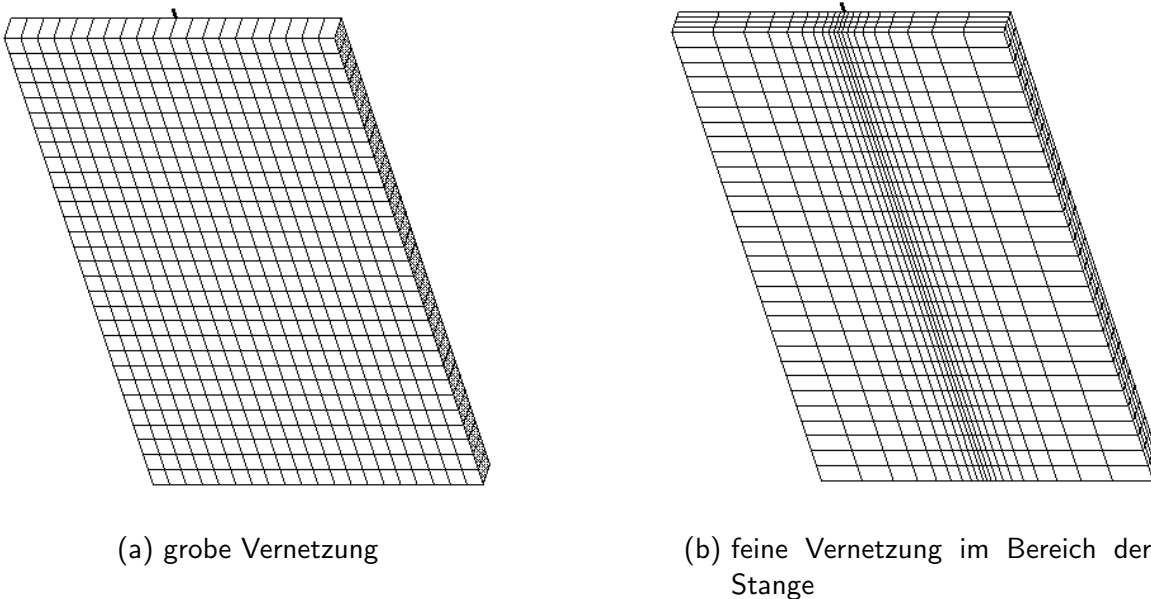


Abbildung 3.11: Modell 3 – Vernetzung mit rechteckigen Elementen

3.2.3.5 Bewertung

a) Allgemeines

Die von den verschiedenen Modellen berechneten Dehnungen an der Oberfläche der Modelle sind recht ähnlich. Sie geben ein allgemeines Bild der Lastausbreitung unter verschiedenen Randbedingungen, sind aber nicht zu einer Quantifizierung des Lastausbreitungswinkels geeignet, da aus der Dehnungsverteilung an der Oberfläche nicht auf die Größe der Dehnungen im Körperinneren geschlossen werden kann.

Im Mittelschnitt des Körpers am Ende der Gewindestange gibt es große Unterschiede der mit den verschiedenen Modellen berechneten Dehnungen. Beispielsweise verursacht die örtlich

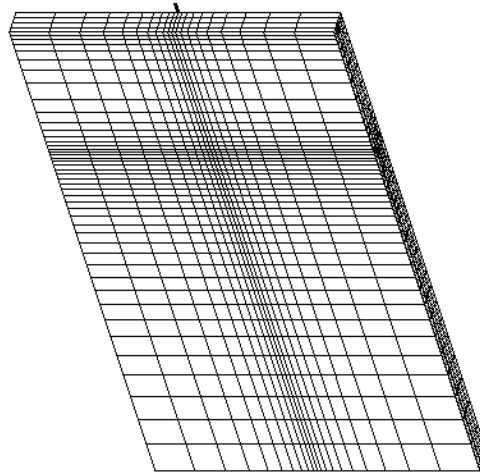


Abbildung 3.12: Modell 3 – Netzverfeinerung im Bereich der Stangenenden

konzentrierte Einleitung der Last durch die Balkenelemente im Bereich der Stange einen sehr hohen Spannungsgradienten im Vergleich zur Modellierung der Stange mit Volumenelementen. Durch einen Vergleich der Modelle untereinander und mit anderen Untersuchungen wird das zutreffende Modell ermittelt.

b) Vergleich der Modelle

b1) Modell 1

Bei der Abbildung der Berechnungsergebnisse auf Pfade werden die Daten an Pfadpunkten, die nicht mit einem Knoten zusammenfallen, zwischen verschiedenen Knoten interpoliert. Das unregelmäßige Tetraedernetz erschwert hierbei eine exakte Abbildung der Daten, es ergeben sich Ungenauigkeiten infolge der Interpolation, vor allem bei den grob vernetzten Varianten 1-1 und 1-2, die sich in Asymmetrien in symmetrischen Dehnungsverläufen bemerkbar machen, siehe [Abbildung 3.13](#). Mit steigender Netzfeinheit stellt sich die erwartete Symmetrie im Ergebnis ein, es steigt allerdings auch die Rechendauer. Die besten Ergebnisse sind erwartungsgemäß mit Variante 1-4 (feine Vernetzung durch Elemente mit quadratischen Ansatzfunktionen) zu erzielen. Zum Vergleich ist das Ergebnis der Variante 3-2 mit angegeben.

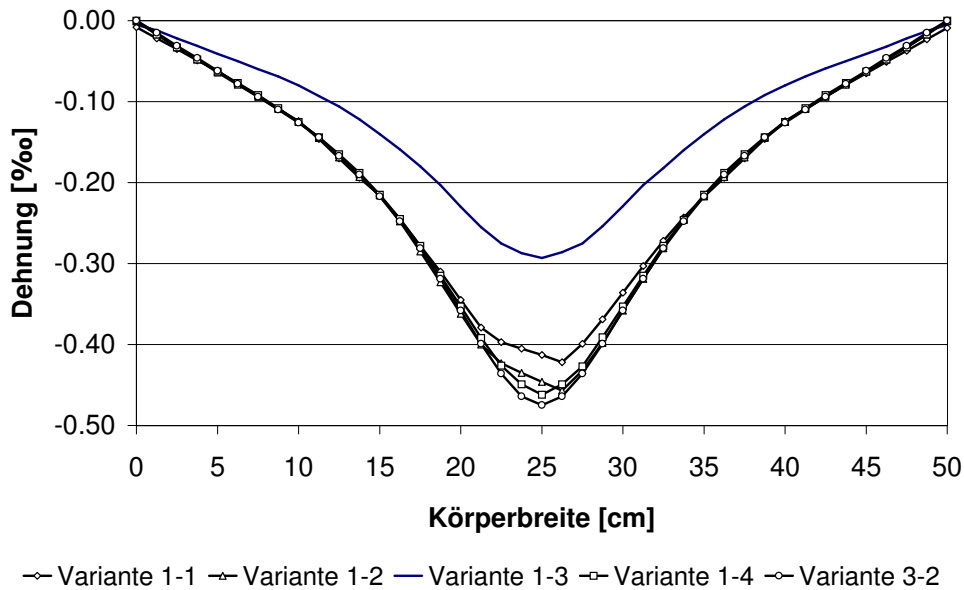


Abbildung 3.13: Berechnete Dehnungen auf der Oberfläche der verschiedenen Varianten von Modell 1 bei $z = 50$ cm (16 cm unterhalb des Stangenendes)

b2) Modell 2 – Unterschied zwischen Zug- und Druckbeanspruchung

Mit Modell 2 wird das Abreißen der Klebstoffschicht am Ende der Gewindestange bei Zugbeanspruchung simuliert. Durch die fehlende Möglichkeit der Normalspannungsübertragung am Stangenende steigt die Dehnung im Holzquerschnitt am Ende der Gewindestange an. Die mit Variante 2 berechnete Dehnung ist um 55% höher als die mit Variante 1-4 ermittelte Dehnung, siehe Tabelle 3.8.

Der Mittelwert der Holzdehnungen am Übergang der Gewindestange zum Holz sollte der mittleren, auf die Gewindestangenoberfläche bezogenen Dehnung

$$\varepsilon_m = \frac{F}{E_\alpha \cdot A} = \frac{50}{1250 \cdot 24 \cdot 0.6^2 \cdot \pi} = 1.47\text{‰} \quad (3.17)$$

mit: F Belastung des Körpers

E_α Elastizitätsmodul in Abhängigkeit der Faserrichtung nach Gleichung (3.19)

A Oberfläche der Gewindestange

entsprechen. Die mit den Varianten 1-4 und 2 berechneten Werte stimmen gut mit der erwarteten Dehnung überein, wohingegen die zum Vergleich mit angegebenen, mit Variante 3-2 berechneten Werte durch die konzentrierte, linienförmige Kräfteinleitung aufgrund der nicht vorhandenen Gewindestangenoberfläche zu hoch sind, siehe Tabelle 3.8.

b3) Modell 3

An der Oberfläche des Körpers sind die mit den verschiedenen Varianten von Modell 3 berechneten Dehnungen identisch. Neben den in Abschnitt 3.2.3.4 auf Seite 54 beschriebenen

Tabelle 3.8: Mit verschiedenen Varianten berechnete Dehnungen am Ende der Gewindestange

	Dehnung		bezogen auf Variante 1-4 [-]
	Stangenende [‰]	Mittelwert [‰]	
Variante 1-4	1.543	1.510	1.000
Variante 2	2.400	1.553	1.555
Variante 3-2	5.493	2.861	3.560
nach (3.17)	-	1.470	-

Variante 3-2 mit Federelementen zwischen Gewindestange und Körper ist noch das Ergebnis einer Variante mit Federen zwischen Gewindestange und Körper abgebildet. Zum Vergleich ist das Ergebnis von Variante 1-4 mit angegeben.

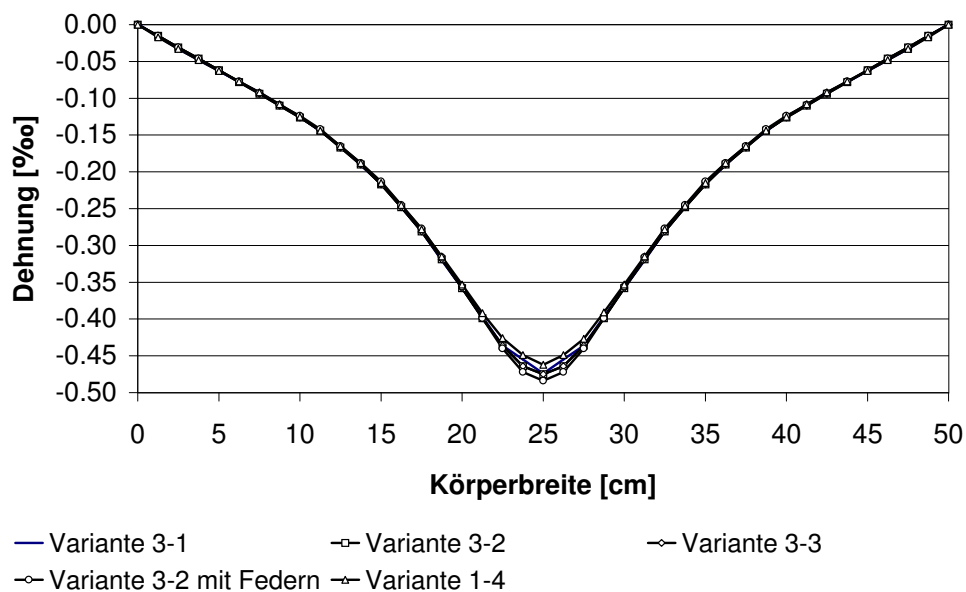


Abbildung 3.14: Berechnete Dehnungen auf der Oberfläche der verschiedenen Varianten von Modell 3 bei $z = 50$ cm (16 cm unterhalb des Stangenendes)

Zur Beurteilung der Unterschiede zwischen den Varianten müssen die Dehnungen in Körpermitte knapp unter dem Ende der Gewindestange herangezogen werden, siehe Abbildung 3.15. Es zeigt sich der zu erwartende Einfluß der am Ende der Gewindestange existierenden Singularitätsstelle.

Die mit der relativ grob vernetzten Variante 3-1, siehe Abbildung 3.11(a) auf Seite 55, berechneten Dehnungen sind im Bereich der Stange relativ niedrig, während Variante 3-2 durch die in diesem Bereich verfeinerte Vernetzung, siehe Abbildung 3.11(b), höhere Dehnungen errechnet. Eine weitere Verfeinerung des Netzes an den Enden der Gewindestange wie bei Variante 3-3, siehe Abbildung 3.12 auf Seite 56, vergrößert durch die feinere Modellierung die maximale Dehnung am Stangenende weiter. Variante 3-2 mit Federn zwischen Stange und Körper errechnet die gleichen Dehnungen wie Variante 3-2 ohne Federn. Variante 1-4

berücksichtigt die räumliche Ausdehnung der Gewindestange und bildet die mittleren Dehnungen entlang der Oberfläche der Gewindestange richtig ab, siehe Tabelle 3.8. In der Annahme, daß Variante 1-4 auch im Bereich des Gewindestangenendes zutreffende Dehnungen ermittelt, erscheinen die mit den Varianten 3-2 und 3-3 berechneten Dehnungen zu hoch.

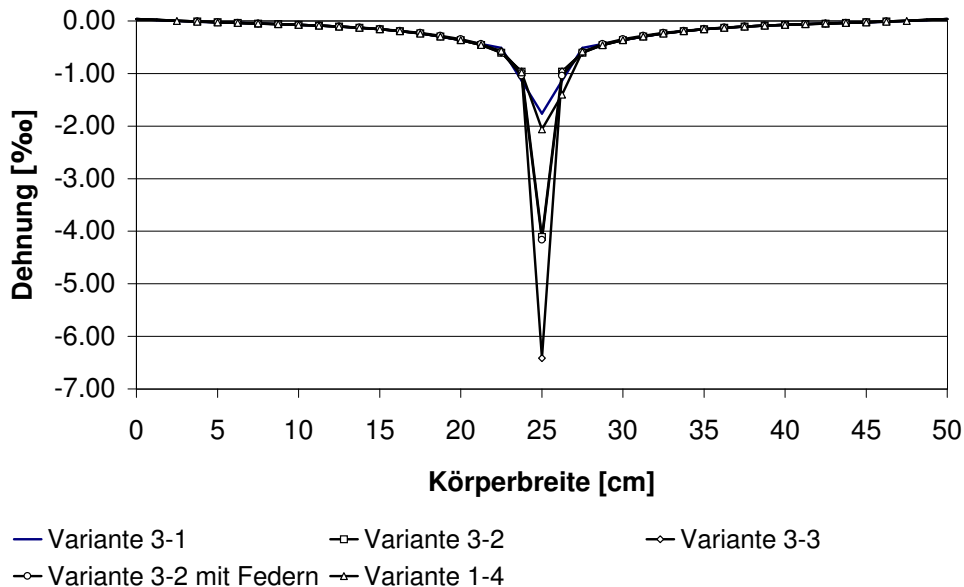


Abbildung 3.15: Berechnete Dehnungen in der Mitte der verschiedenen Varianten von Modell 3 bei $z = 65$ cm (1 cm unterhalb des Stangenendes)

Eine vergleichende Berechnung der Variante 3-2 mit Elementen mit linearen Ansatzfunktionen (Beam4 und Solid45) zeigt geringere Dehnungen im Bereich der Gewindestange, die in der Größenordnung der mit Variante 1-4 berechneten Dehnungen liegen. Bei dieser Variante zeigen sich Unregelmäßigkeiten im Dehnungsverlauf in der Nähe des Gewindestangenendes.

c) Vergleich mit Versuchsergebnissen

Die Genauigkeit der Berechnungsergebnisse und die Richtigkeit der verwendeten Werkstoffkennwerte werden durch einen Vergleich mit den im Versuch gemessenen Werten überprüft. Die Zuordnung der Werte erfolgt über die Koordinaten der Meßpunkte, siehe auch Abbildung 3.3 auf Seite 39.

Die in einer Datenbank gespeicherten Meßwerte werden in ein Tabellenkalkulationsprogramm eingelesen. Beim Einlesen der Meßwerte wird aus dem gemessenen Dehnungsunterschied einander auf der Vorder- und der Rückseite der Körper gegenüberliegender DMS ein Faktor berechnet, mit dem der Einfluß der Biegung um die schwache Achse des Körpers aus den Meßwerten herausgerechnet wird. Bei den Körpern mit über die Breite symmetrischem Dehnungsverlauf werden zusätzlich die Meßwerte an gleicher Position links und rechts der Mittelachse gemittelt.

Die numerischen Ergebnisse werden mit dem Faktor

$$f_{exp \rightarrow num} = \frac{F_{exp}}{F_{num}} \cdot \frac{E_{num}}{E_{exp}} \quad (3.18)$$

mit: F_{exp} ... Belastung des Versuchskörpers zum Zeitpunkt der Messung
 F_{num} ... In der Berechnung aufgebrachte Belastung
 E_{exp} ... Elastizitätsmodul des Versuchskörpers
 E_{num} ... In der Berechnung angesetzter Elastizitätsmodul (12500 N/mm²)

auf das Niveau der Versuchswerte umgerechnet. Die Elastizitätsmoduln der Versuchskörper parallel zur Faser werden Tabelle 3.2 auf Seite 40 entnommen. Der Elastizitätsmodul in Abhängigkeit des Winkels zwischen Kraft und Faser beträgt nach NEUHAUS (1994)

$$E_{\alpha} = \frac{E_{\parallel} \cdot E_{\perp}}{E_{\perp} \cdot \cos^3 \alpha + E_{\parallel} \cdot \sin^3 \alpha} \quad (3.19)$$

mit: E_{\perp} ... 1/29.7 · E_{\parallel} (aus Anpassung an die Ergebnisse der in Abschnitt 3.1 auf Seite 37 beschriebenen Versuche)
 α ... Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung

Die an der Körperoberfläche berechneten Dehnungen sind bei allen Varianten recht ähnlich und zeigen eine gute Anpassung an die Meßwerte. In Anhang C ab Seite 195 sind Diagramme abgebildet, in denen die gemessenen und die mit Variante 1-4 errechneten Dehnungen verglichen werden. Abbildung 3.16 zeigt eines dieser Diagramme für einen Kraft-Faserwinkel $\alpha = 0^{\circ}$.

Zur weiteren Kontrolle der Ergebnisse wird die theoretische mittlere Dehnung

$$\varepsilon_m = \frac{F}{E_{\alpha} \cdot A} \quad (3.20)$$

mit: F ... Belastung des Körpers
 E_{α} ... Elastizitätsmodul in Abhängigkeit der Faserrichtung nach Gleichung (3.19)
 A ... Querschnittsfläche des Körpers

mit den Ergebnissen der FE-Berechnung verglichen. Als Bezugsebene wird die unterste Meßebe (h=20 cm) verwendet, bis zu der sich die Last am weitesten ausgebreitet hat. Die Mittelwerte der Meßergebnisse werden nicht in den Vergleich einbezogen, da die Lage der Meßstellen variiert und eine zutreffende Gewichtung der Einzelergebnisse nicht garantiert werden kann. In Tabelle 3.9 sind die mittleren Dehnungen und die Abweichung der vom Modell ermittelten von der nach Gleichung (3.20) errechneten Dehnung angegeben.

Die Abweichungen der Werte sind insgesamt gering, für einen Winkel von 45° jedoch am größten. Dies kommt daher, daß die Elastizitätsmoduln parallel und rechtwinklig der Faser

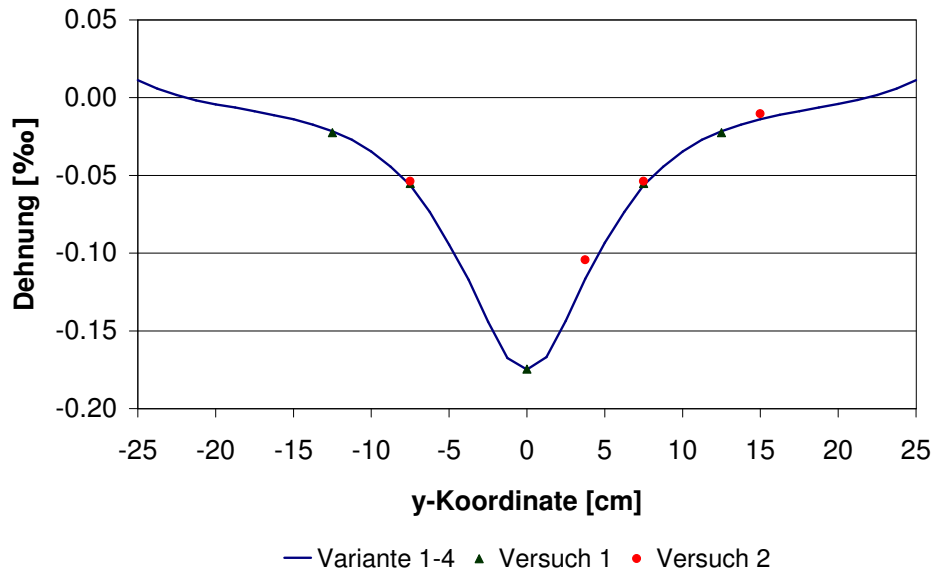


Abbildung 3.16: Mit Variante 1-4 berechnete und gemessene Dehnungen auf der Körperoberfläche bei $z = 70$ cm (4 cm oberhalb des Stangenendes)

Tabelle 3.9: Mittlere Dehnungen

Körper	Mittlere Dehnung		Abweichung [%]
	nach Gleichung (3.20) [‰]	Fe-Ergebnis [‰]	
D0-1	-0.06462	-0.06413	-0.76
D0-2	-0.05764	-0.05721	-0.75
D45-1	-0.67680	-0.70846	4.68
D45-2	-0.66952	-0.70084	4.68
D67.5-1	-1.44692	-1.45635	0.65
D67.5-2	-1.44724	-1.45667	0.65
D90-1	-1.80315	-1.80675	0.20
D90-2	-1.82295	-1.82658	0.20

vorgegeben werden können. Die Elastizitätsmoduln im Winkel zur Faser werden dagegen im FE-Programm anhand der Drehung des Elementkoordinatensystems errechnet. Bei den zum Vergleich nach Gleichung (3.20) auf der vorherigen Seite berechneten Werten werden sie nach Gleichung (3.19) auf der vorherigen Seite ermittelt.

d) Vergleich mit Deng

DENG (1997) hat umfangreiche experimentelle und numerische Untersuchungen an eingeklebten Gewindestangen durchgeführt. Bei der Modellierung der Versuchskörper hat er die Klebefuge berücksichtigt. Die in Abschnitt 3.2.3 auf Seite 52 beschriebenen Modelle werden an die von ihm verwendete Geometrie und die von ihm verwendeten Werkstoffparameter

angepaßt, siehe auch Tabelle 3.10. Durch einen Vergleich der Ergebnisse mit den von Deng ermittelten experimentellen und numerischen Ergebnissen wird das Modell überprüft.

Tabelle 3.10: Werte des Versuchskörpers 5001 nach DENG (1997)

Breite	9 cm	E_{\parallel}	9000 N/mm ²
Dicke	9 cm	E_{\perp}	585 N/mm ²
Länge	50 cm	$G_{LR} = G_{LT}$	582 N/mm ²
Stangendicke	1.7 cm	G_{RT}	60 N/mm ²
Stangenlänge	50 cm	$\nu_{RL} = \nu_{RT}$	0.41
Belastung	15 kN	ν_{LR}	0.037

Abbildung 3.17 zeigt die im Versuch gemessene und die mit den angepaßten Varianten 1-4 und 3-2 berechnete Dehnung der Gewindestange. Die mit Variante 1-4 berechnete Dehnung stimmt gut mit der gemessenen Dehnung überein. Bei Variante 3-2 verläuft die berechnete Dehnung im Gegensatz zur gemessenen Dehnung nahezu linear. Dies deutet auf eine zu steife Modellierung der Gewindestange durch das Balkenelement hin. Eine Berechnung, bei der die Gewindestange mit der halben Querschnittsfläche modelliert wird, zeigt jedoch die gleiche Tendenz, nur wird die Kraft auf einer kürzeren Länge in das Holz übertragen. Gemäß der mit Variante 3-2 berechneten linearen Dehnungsverteilung der Gewindestange bilden sich an deren Enden nur leichte Schubspannungsspitzen aus, siehe auch Abbildung 3.18. Bei Variante 1-4 stimmt dagegen der berechnete Schubspannungsverlauf weitestgehend mit den Meßwerten überein. Das simulierte Abreißen der Klebstoffschicht am Stangenende verändert den Schubspannungsverlauf nur leicht im Bereich des Stangenendes.

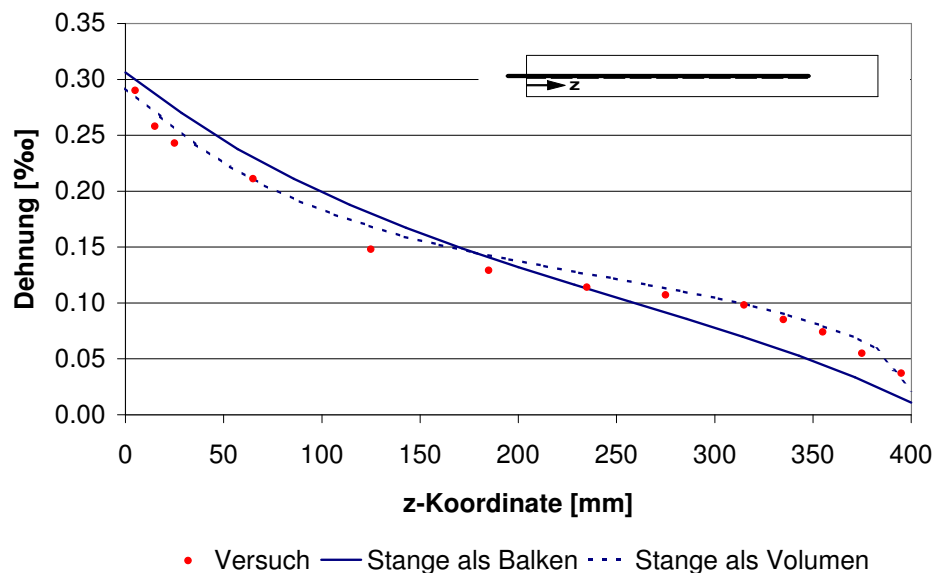


Abbildung 3.17: Gemessene und berechnete Dehnungen der Gewindestange

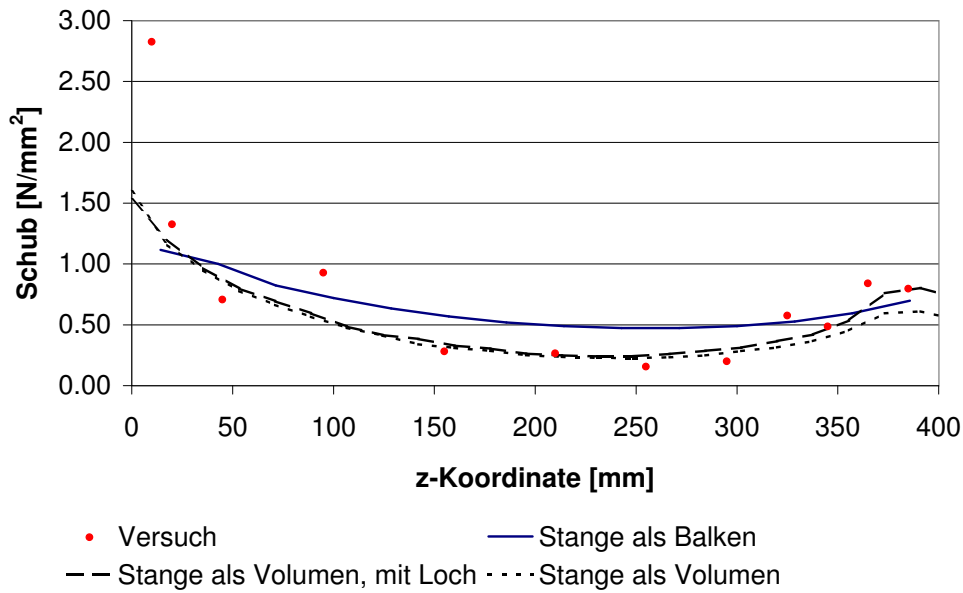


Abbildung 3.18: Gemessene und berechnete Schubspannungsverteilung entlang der Gewindestange

Betrachtet man die in der Mittelfläche des Körpers am Ende der Gewindestange herrschende Dehnungsverteilung erkennt man, daß eine Abbildung der Gewindestange durch Balkenelemente vergleichbare Dehnungen hervorbringt wie eine Abbildung der Gewindestange als Volumen, wenn durch die Klebstoffschicht am Ende der Gewindestange keine Kraftübertragung stattfindet, siehe Abbildung 3.19. Werden am Ende der Gewindestange Normalspannungen in das Holz übertragen, so betragen die Dehnungen nur rund ein Viertel der mit dem Balkenmodell ermittelten Dehnungen. Dies ist auch aus dem in Abbildung 3.20 gezeigten Verlauf der Dehnungen in der Mittelachse des Körpers zu erkennen.

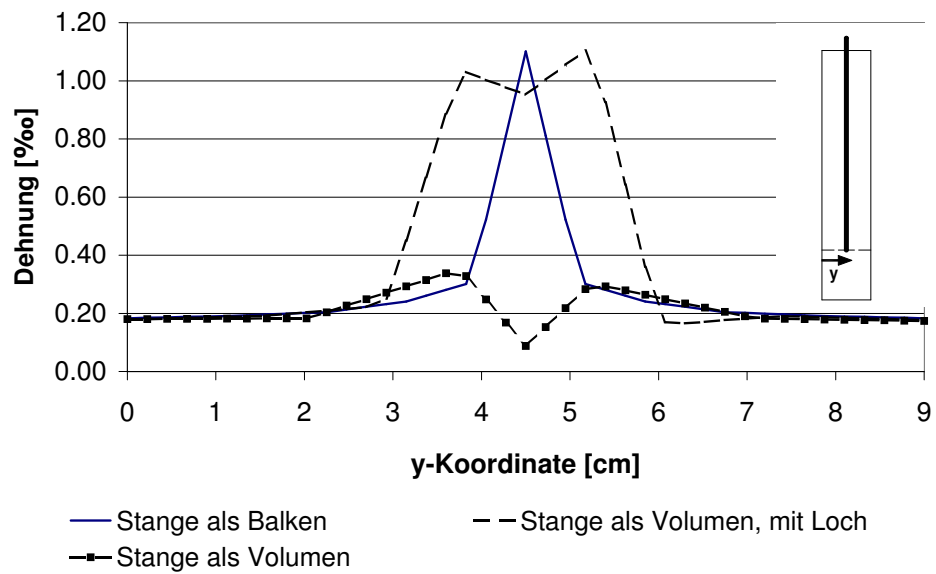


Abbildung 3.19: Am Ende der Gewindestange berechnete Dehnungsverteilung über die Körperbreite ($z = 10$ cm)

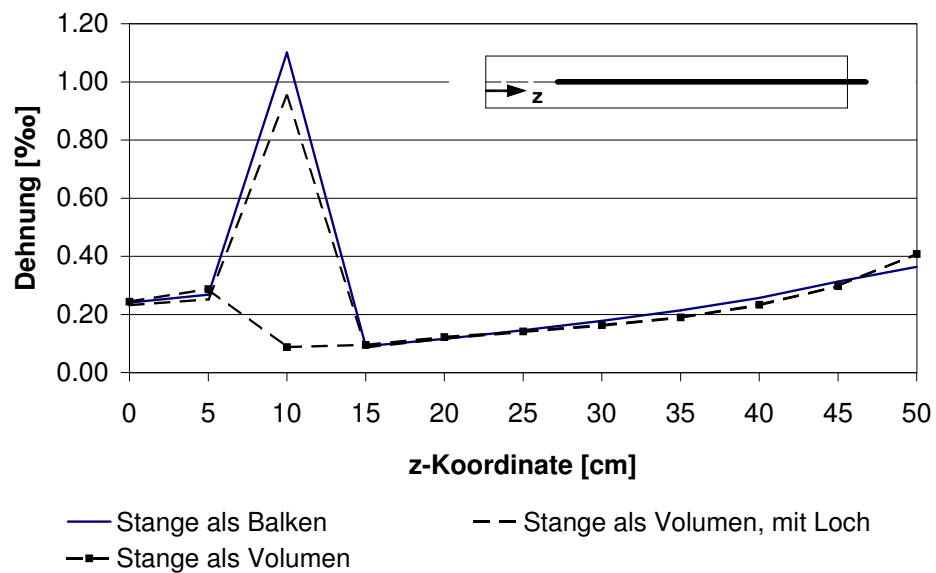


Abbildung 3.20: Berechnete Dehnungsverteilung in der Mittelachse des Körpers ($y = 4.5$ cm)

e) Schlußfolgerung

Die mit den Varianten 1-4 und 3-2 berechneten Dehnungen stimmen untereinander und mit den an der Oberfläche der Versuchskörper gemessenen Dehnungen gut überein. Variante 1-4 bildet jedoch die von [DENG \(1997\)](#) ermittelten Schubspannungswerte entlang der Gewindestange genauer ab. Zusätzlich ist der mit Variante 1-4 berechnete Dehnungsverlauf am Gewindestangenende gleichmäßiger, da durch die Modellierung der Gewindestange als Volumen die geometrische Unstetigkeit von Variante 3-2 vermieden wird. Variante 1-4 wird daher zur Durchführung der Parameterstudie gewählt. Die für die Parameterstudie verwendeten Werkstoffparameter nach Gleichung (3.15) entsprechen in etwa den mittleren Werten der Versuchskörper.

Das Abreißen der Klebstoffschicht am Gewindestangenende bei Zugbeanspruchung wird berücksichtigt, indem die mit Variante 1-4 berechneten Dehnungen mit einem Faktor von 1.5 beaufschlagt werden, entsprechend dem Unterschied zwischen Variante 2 und Variante 1-4, siehe Tabelle 3.8 auf Seite 58.

3.2.4 Parameterstudie

3.2.4.1 Allgemeines

Ausgehend vom Standardfall des Versuchskörpers D0 werden mit dem verifizierten Modell die in Tabelle 3.11 zusammengestellten Parameter variiert. Die Werte des Standardfalles sind fett hervorgehoben. Die Lastausbreitung wird nur für axial belastete Gewindestangen untersucht. Die Belastung der Körper beträgt 100 kN.

Tabelle 3.11: Untersuchte Parameter

Parameter	Werte
Winkel [°]	0 – 22.5 – 45 – 67.5 – 90
Körperbreite [cm]	12.5 – 25 – 50 – 75 – 100
Körperhöhe [cm]	45 – 90 – 135 – 180 – 225
Körperdicke [cm]	4 – 8 – 12 – 16 – 20
Gewindestangenschlankheit	5 – 10 – 20 – 30 – 40
- Durchmesser [mm]	6 – 8 – 12 – 24 – 48
- Länge [mm]	60 – 120 – 240 – 360 – 480
$E_{ }$ [N/mm ²]	8500 – 10500 – 12500 – 14500 – 16500
G [N/mm ²]	380 – 580 – 780 – 980 – 1180
Dichte [kg/m ³]	275 – 375 – 475 – 575 – 675
Feuchte [%]	5 – 10 – 15 – 20 – 25

3.2.4.2 Herleitung des Lastausbreitungswinkels

Unter Lasteinwirkung stellt sich im Querschnitt eine bestimmte Spannungsverteilung ein, deren Maximum sich am Ende der Gewindestange befindet. Zur Ermittlung dieser maximalen Spannung aus der Last muß die Fläche bekannt sein, auf die sich die Last verteilt. Nachfolgend wird ein Vorschlag entwickelt, wie diese „mittragende Fläche“ zu ermitteln ist.

Teilt man die in der Berechnung aufgebrachte Last durch die aus der FE-Berechnung ermittelte maximale Spannung am Ende der Gewindestange erhält man eine „mittragende Fläche“. Die Division der mittragenden Fläche durch die Körperdicke t ergibt die mittragende Breite

$$b_m = \frac{F}{\sigma_{max} \cdot t}. \quad (3.21)$$

Der Tangens des Lastausbreitungswinkels ϕ ist der Quotient aus der halben effektiven Breite und der Einklebelänge der Gewindestange, siehe Abbildung 1.5 auf Seite 5. Der Lastausbreitungswinkel berechnet sich damit zu

$$\phi = \arctan \frac{b_m}{2 \cdot l_g}. \quad (3.22)$$

Zur Abgrenzung des Lastausbreitungswinkels können zwei Grenzwerte angegeben werden. In einem Holzquerschnitt breitet sich die Last in einem bestimmten Maß aus, der Lastausbreitungswinkel ist demnach größer 0° . Bei faserparallel eingeklebten Gewindestangen ist die Dehnsteifigkeit des Holzes größer der Schubsteifigkeit. Die Last wird nicht so gut verteilt wie im isotropen Werkstoff Stahl, für den die Lastausbreitung im elastischen Fall $\phi = 45^\circ$ angegeben ist. Werden Gewindestangen quer zur Faser eingeklebt, nähern sich die Werte der Dehn- und Schubsteifigkeit an, so daß auch der Lastausbreitungswinkel Werte in der Größenordnung von 45° erreichen kann, wie es beispielsweise in [DIN 1074 \(1991\)](#) für die Verteilung von auf Fahrbahnbohlen wirkenden Radlasten angenommen wird.

3.2.4.3 Darstellung der Ergebnisse

Um die Ergebnisse zu veranschaulichen, werden die Dehnungen in Krafrichtung für einen Kraft-Faserwinkel $\alpha = 0^\circ$ und den variierten Parameterbereich über die Breite des Querschnitts aufgetragen. Bei manchen Parametern werden die Dehnungen zusätzlich über den Parameter aufgetragen.

Aus den Spannungen in Krafrichtung in der Mantelfläche der Gewindestange am Gewindestangenende wird für jede Parametervariation ein Lastausbreitungswinkel ϕ nach Abschnitt 3.2.4.2 berechnet. Dieser Lastausbreitungswinkel wird auf den Lastausbreitungswinkel des Standardfalls für den jeweiligen Kraft-Faserwinkel ϕ_s bezogen. Aus dem Verhältniswert der Winkel wird ein Faktor

$$k = \frac{\phi}{\phi_s} \quad (3.23)$$

berechnet, der den Einfluß des Parameters auf die Lastausbreitung, bezogen auf den Standardfall, angibt. Beispielsweise beträgt der berechnete Lastausbreitungswinkel für $\alpha = 0^\circ$ und $u = 20\%$ $\phi = 7.7^\circ$. Der Lastausbreitungswinkel für den Standardfall beträgt $\phi_s = 9.4^\circ$. Hieraus ergibt sich ein Faktor $k_u(0^\circ, 20\%) = 7.7/9.4 = 0.82$. Die so ermittelten Faktoren werden zusammengefaßt und durch eine einheitliche Gleichung angenähert. Für jeden Parameterbereich existiert ein Diagramm, das die einzelnen Faktoren und die resultierende Gleichung darstellt.

3.2.4.4 Kraft-Faserwinkel

Der Winkel zwischen Kraft und Faserrichtung beeinflusst die Lastausbreitung auf zwei Arten. Zum einen folgt der Verlauf der Spannung immer der Faserrichtung. Abbildung 3.21 auf der nächsten Seite zeigt dies anschaulich anhand der für verschiedene Kraft-Faserwinkel dargestellten Linien gleicher Spannung. Die Faserrichtung ist jeweils in der linken unteren Ecke der jeweiligen Abbildung eingezeichnet. Mit Kraft-Faserwinkeln zwischen 0° und 90° entstehen unsymmetrische Dehnungsverläufe, da die Kraft bevorzugt in Richtung der Holzfasern abgetragen wird. Die Dehnungsspitze befindet sich rechts der Mittellinie, da die Faserrichtung der Körper von oben links nach unten rechts verläuft. Die gemessenen Hauptdehnungsrichtungen sind in Abbildung 3.7 auf Seite 48 abgebildet.

Neben der Richtungsabhängigkeit steigen die Dehnungen mit der Neigung der Kraft- zur Faserrichtung an, da der Elastizitätsmodul im Winkel zur Faser sinkt. Die höchsten Dehnungen sind bei Belastung quer zur Faser vorhanden. Gleichzeitig verteilt sich die Last gleichmäßiger. Abbildung 3.22 zeigt die in der Mittelfläche des Körpers bei $z = 45$ cm berechneten Dehnungen. Während für einen Kraft-Faserwinkel von 0° eine Dehnungsspitze in Körpermitte erkennbar ist, sind die Dehnungen für einen Kraft-Faserwinkel von 90° schon recht gleichmäßig verteilt.



(a) $\alpha = 0^\circ$ (b) $\alpha = 22.5^\circ$ (c) $\alpha = 45^\circ$ (d) $\alpha = 67.5^\circ$ (e) $\alpha = 90^\circ$

Abbildung 3.21: Spannungsverteilung im Mittelschnitt des Körpers ($x = 0$ cm) in Abhängigkeit des Kraft-Faserwinkels α (Pfeil in linker, unterer Ecke)

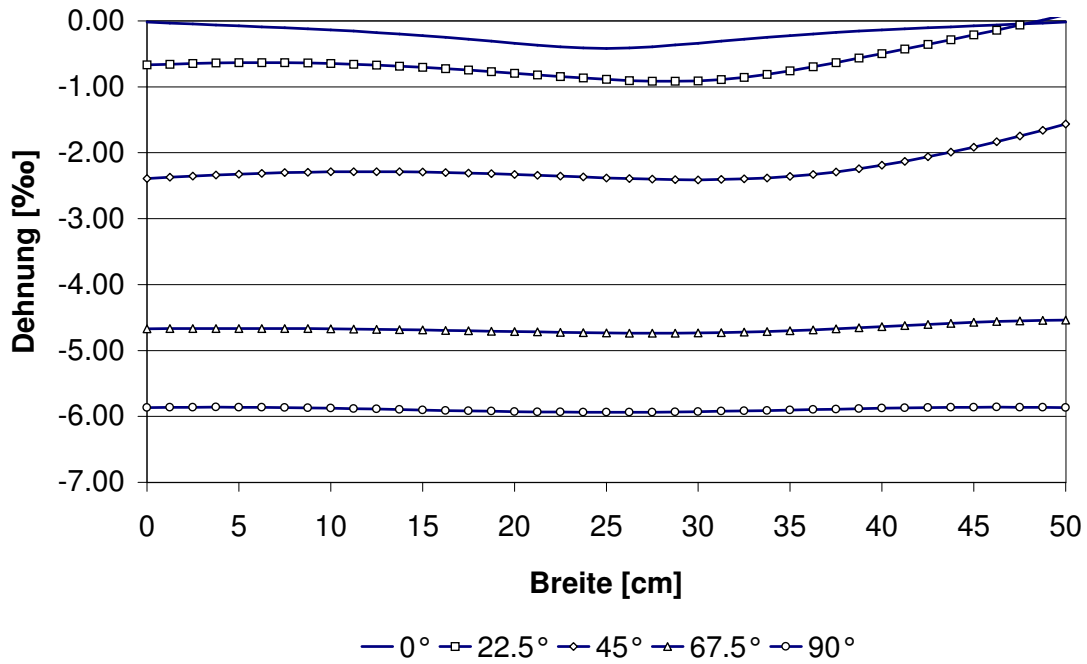


Abbildung 3.22: Dehnungsverteilung bei $x = 0$ cm und $z = 45$ cm (21 cm unterhalb des Gewindestangenendes) in Abhängigkeit des Kraft-Faserwinkels α

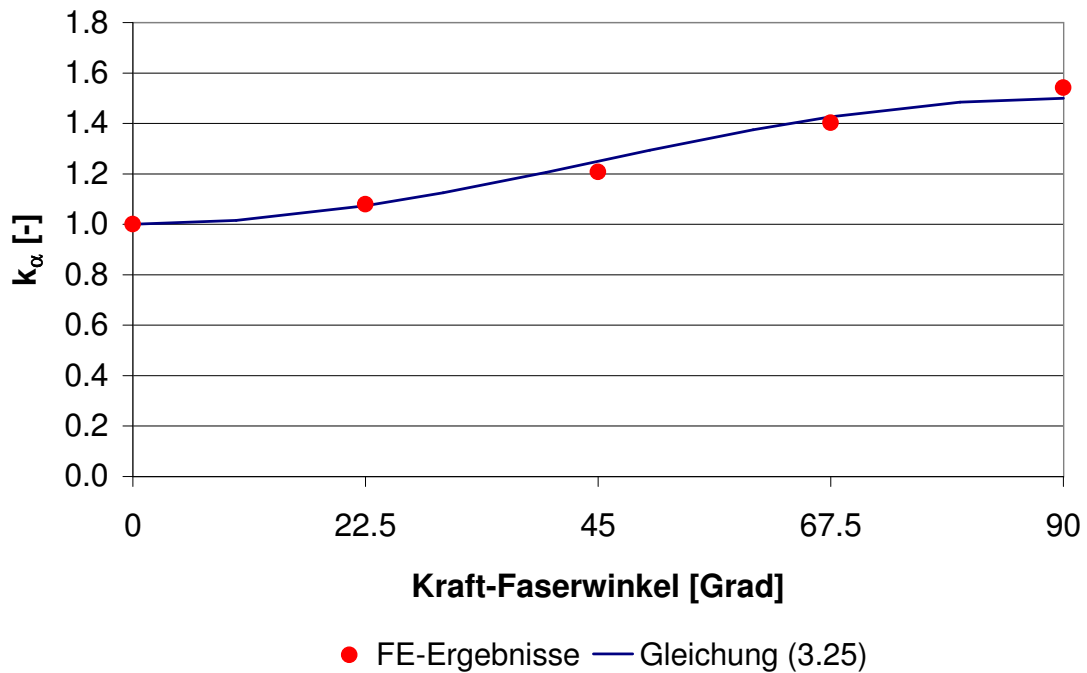


Abbildung 3.23: Faktor k_α

Der Einfluß des Kraft-Faserwinkels auf die Lastausbreitung wird durch den Faktors k_α nach Gleichung (3.24) erfaßt, der in Abbildung 3.23 dargestellt ist. Die Lastausbreitung steigt erwartungsgemäß mit steigendem Kraft-Faserwinkel an. Der relativ geringe Unterschied von 0.5 zwischen $k_\alpha(0^\circ)$ und $k_\alpha(90^\circ)$ kommt daher, daß die Spannungsunterschiede aufgrund der unterschiedlichen Elastizitätsmoduln kleiner sind als die Dehnungsunterschiede, die beispielsweise aus Abbildung 3.22 abgelesen werden können.

$$k_\alpha = 1.25 + 0.25 \cdot \sin(2 \cdot \alpha - 90^\circ) \quad (3.24)$$

mit: α Kraft-Faserwinkel in [°]

3.2.4.5 Körperabmessungen

a) Körperbreite

Die Körperbreite bestimmt mit der Körperdicke die Fläche, in der sich die Last ausbreiten kann. In Abbildung 3.24 ist die Dehnungsverteilung in Abhängigkeit der Körperbreite aufgetragen. Bei geringer Körperbreite ist die Dehnung hoch, da sich die Last nicht auf eine größere Fläche verteilen kann. Mit steigender Körperbreite sinken die Dehnungen im Körper. Ab einer bestimmten Körperbreite wird die zur Verfügung stehende Fläche durch die maximale Lastausbreitung begrenzt, die Dehnungen bleiben konstant. Dies ist auch anhand der in Abbildung 3.25 als durchgezogene Linie eingetragenen Näherung zu erkennen. Der Faktor k_b – und damit die Lastausbreitung – steigt bis zu einer Körperbreite von rund 36 cm, die dem 30-fachen Gewindestangendurchmesser entspricht, an. Diese Stelle bezeichnet den Knick in der in Abbildung 3.25 eingezeichneten bilinearen Kurve. Eine weitere Erhöhung der Körperbreite bleibt ohne Einfluß.

b) Körperdicke

Die Variation der Körperdicke von 4 cm ($3.3 \cdot d_g$) bis 20 cm ($16.7 \cdot d_g$) zeigt wie die Variation der Körperbreite einen klaren Einfluß auf die Dehnungen im Körper. In Abbildung 3.26 sind für einen Kraft-Faserwinkel von 0° und verschiedene Körperdicken die Dehnungen 1 cm unterhalb des Gewindestangenendes über die Körperbreite aufgetragen. In Klammern sind die auf den Gewindestangendurchmesser bezogenen Körperdicken angegeben. Bei geringen Körperdicken kann sich die Last nicht in Dickenrichtung des Querschnitts ausbreiten, die Dehnung ist hoch. Mit steigender Körperdicke breitet sich die Last weiter aus, die Dehnung sinkt. Ab einer Dicke vom zehnfachen des Stangendurchmessers ist die Grenze der Lastausbreitung erreicht, die Dehnung bleibt annähernd konstant, wie man auch aus Abbildung 3.27 erkennt, in der die Dehnungen in der Mittelachse des Körpers bei $z = 65$ cm über die bezogene Körperdicke aufgetragen sind.

Um den Einfluß der Körperdicke besser beurteilen zu können, werden die Dehnungen normiert. Alle Variationen wurden mit einer konstanten Kraft berechnet. Bei kleinerer Dicke und damit kleinerer Fläche resultiert daraus eine höhere Dehnung. Um den direkten Vergleich

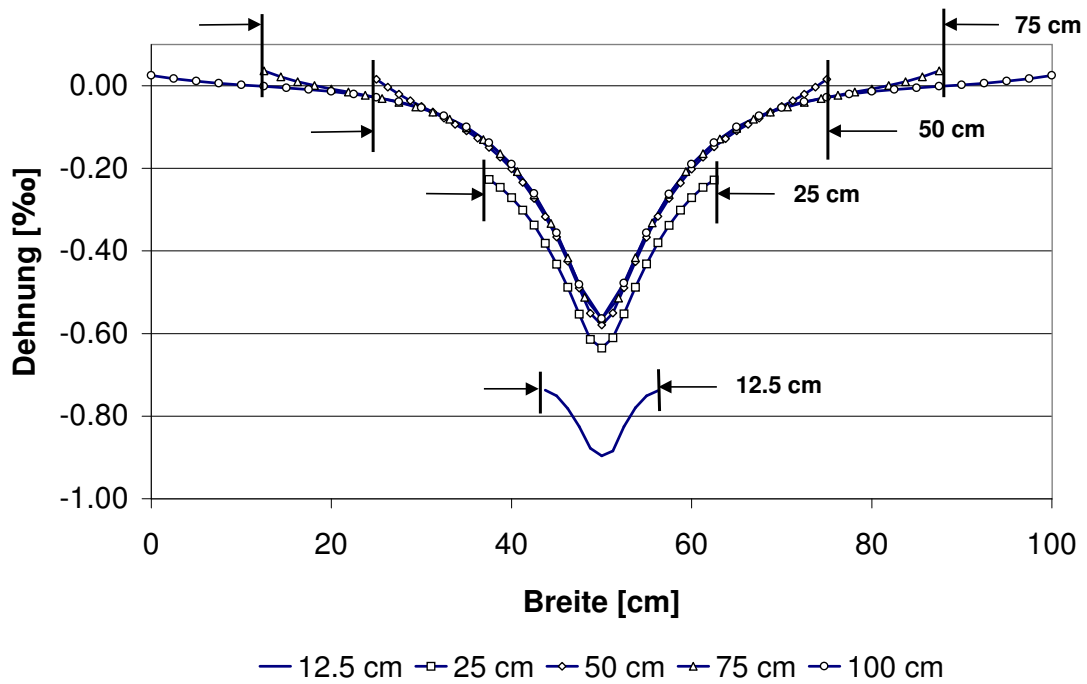


Abbildung 3.24: Dehnungsverteilung bei $x = 0$ cm und $z = 55$ cm (11 cm unterhalb des Gewindestangenendes) in Abhängigkeit der Körperbreite b

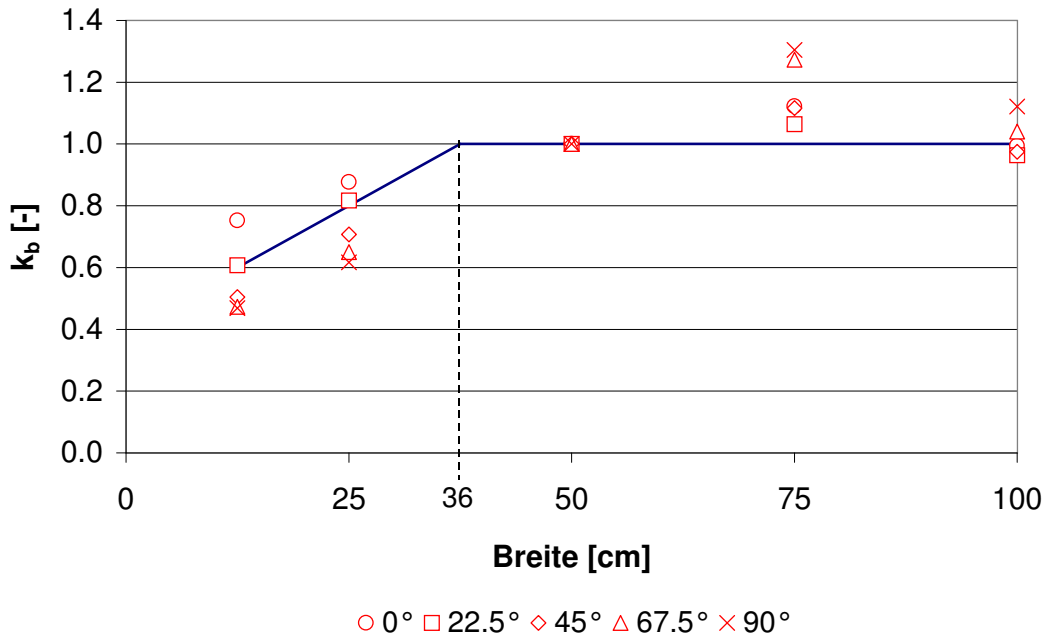


Abbildung 3.25: Faktor k_b

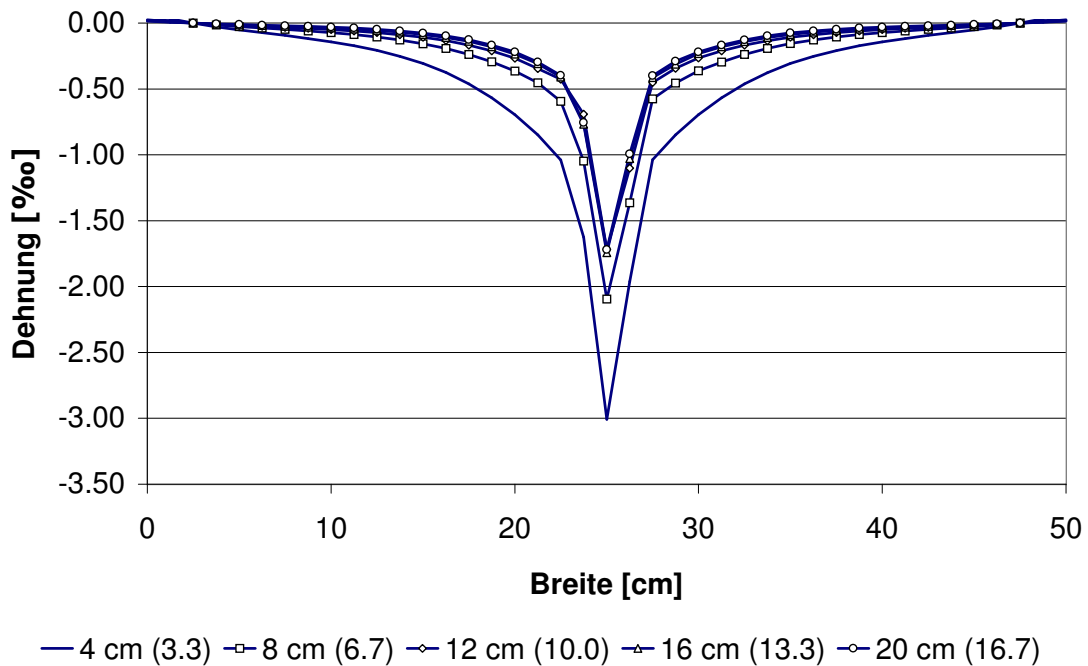


Abbildung 3.26: Dehnungsverteilung bei $x = 0$ cm und $z = 65$ cm (1 cm unterhalb des Gewindestangenendes) in Abhängigkeit der Körperdicke d

zu ermöglichen, werden die absoluten Dehnungen mit einem Faktor multipliziert, der das Verhältnis der Körperflächen zur Fläche bei einer Körperdicke von 8 cm, entsprechend der Dicke des Standardkörpers, ausdrückt, siehe Gleichung (3.25). Für eine Körperdicke von 4 cm wird die Dehnung damit durch Multiplikation mit dem Faktor $4/8 = 0.5$ normiert. Die normierte mittlere Dehnung ist in jedem Körper gleich. Unterscheiden sich die normierten Dehnungen, wie in Abbildung 3.27 zu erkennen ist, so ist die Last noch nicht vollständig über die Körperdicke ausgebreitet.

$$\varepsilon_{norm}(d) = \varepsilon_{abs}(d) \cdot \frac{b \cdot d}{b \cdot 8 \text{ cm}} = \varepsilon_{abs}(d) \cdot \frac{d}{8 \text{ cm}} \quad (3.25)$$

Die Abnahme der Dehnungen infolge der besseren Lastverteilung mit steigender Körperdicke tritt in einiger Entfernung vom Gewindestangenende noch deutlicher zutage, da die Dehnungsspitze am Gewindestangenende keinen Einfluß mehr hat. Die Dehnungen verhalten sich umgekehrt proportional zur Dicke und damit zur Körperfläche. Abbildung 3.28 zeigt die Dehnungsverteilung in der Mittelfläche des Körpers bei $z = 45$ cm in Abhängigkeit der Körperdicke. In Abbildung 3.29 sieht man, daß die normierte Dehnung gleichmäßig verläuft. Dies deutet auf eine gleichmäßige Verteilung der Last über die Körperdicke in diesem Bereich hin. Erst bei größeren Körperdicken ist ein beginnendes Ansteigen der normierten Dehnung, entsprechend einer ungleichmäßigeren Lastverteilung, zu erkennen.

Der Faktor k_d ist in Abbildung 3.30 dargestellt. Er verläuft in diesem Dickenbereich ($\leq 30 \cdot d_g$) wie der Faktor k_b linear ansteigend. Die Lastausbreitung wird durch die Körperdicke begrenzt.

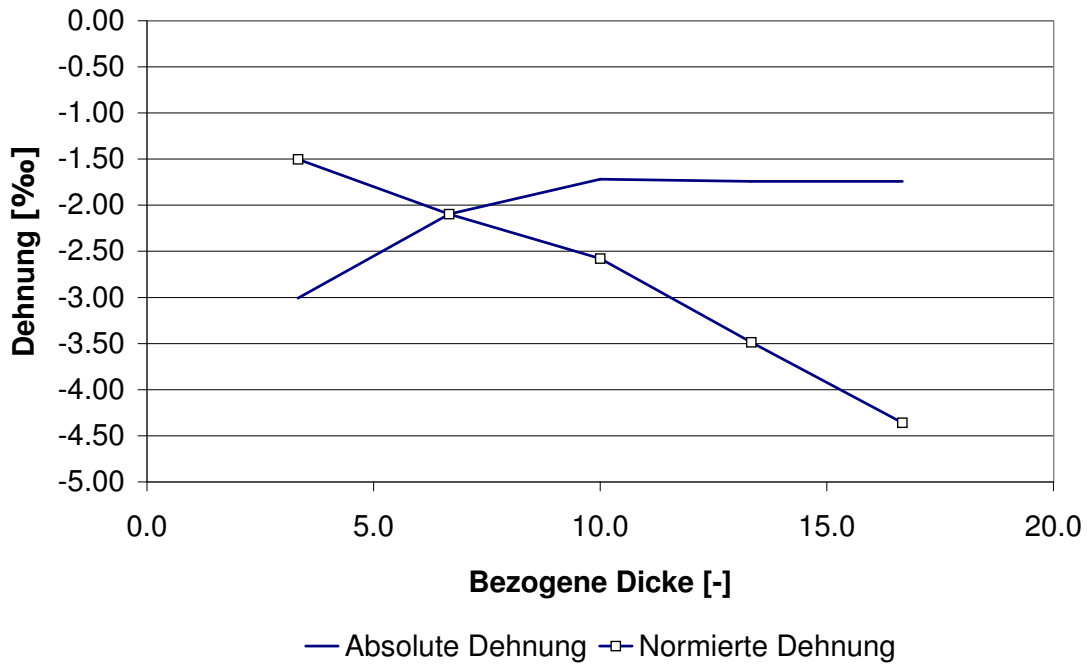


Abbildung 3.27: Dehnungen bei $x = 0$ cm und $z = 65$ cm (1 cm unterhalb des Gewindestangenendes) in Abhängigkeit der bezogenen Körperdicke d/d_g

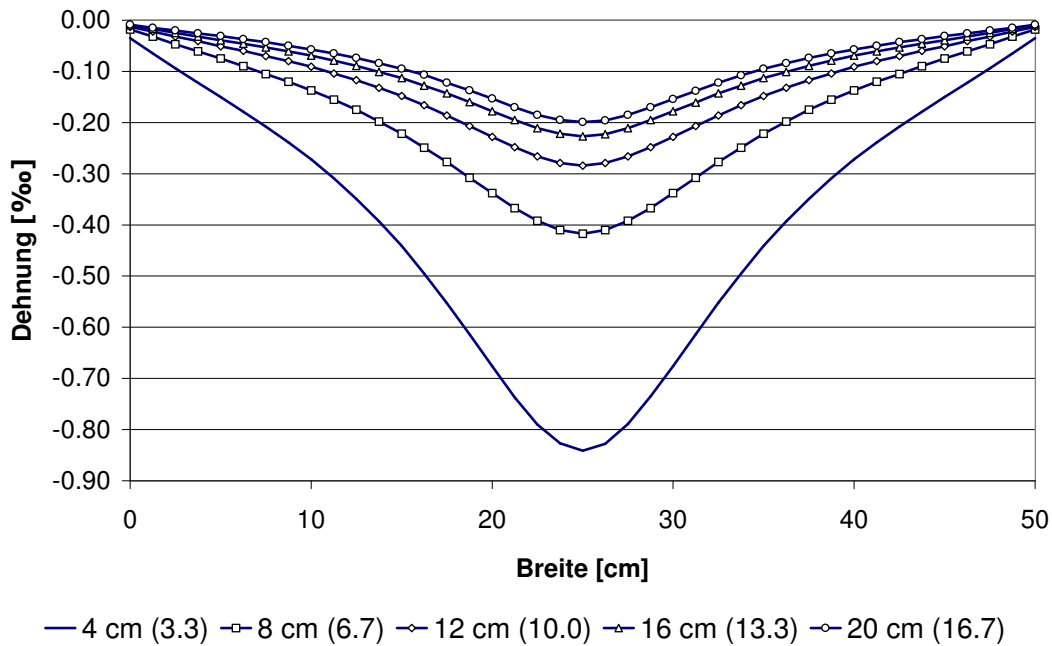


Abbildung 3.28: Dehnungsverteilung bei $x = 0$ cm und $z = 45$ cm (21 cm unterhalb des Gewindestangenendes) in Abhängigkeit der Körperdicke d

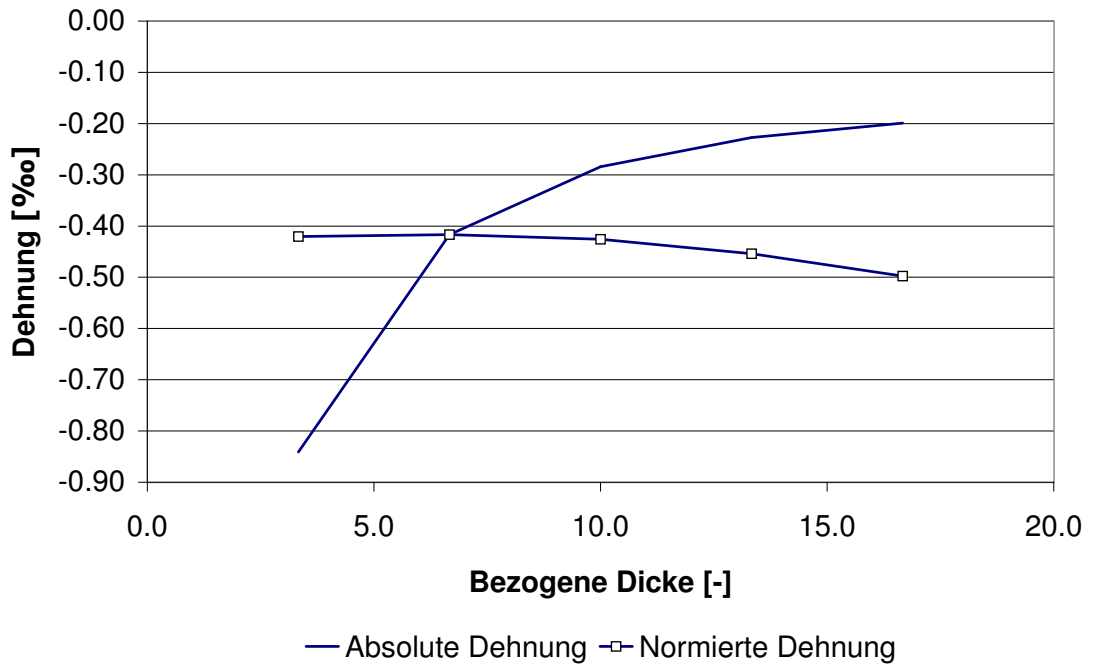


Abbildung 3.29: Absolute und normierte Dehnung bei $x = 0$ cm und $z = 45$ cm (21 cm unterhalb des Gewindestangenendes) in Abhängigkeit der Körperdicke d

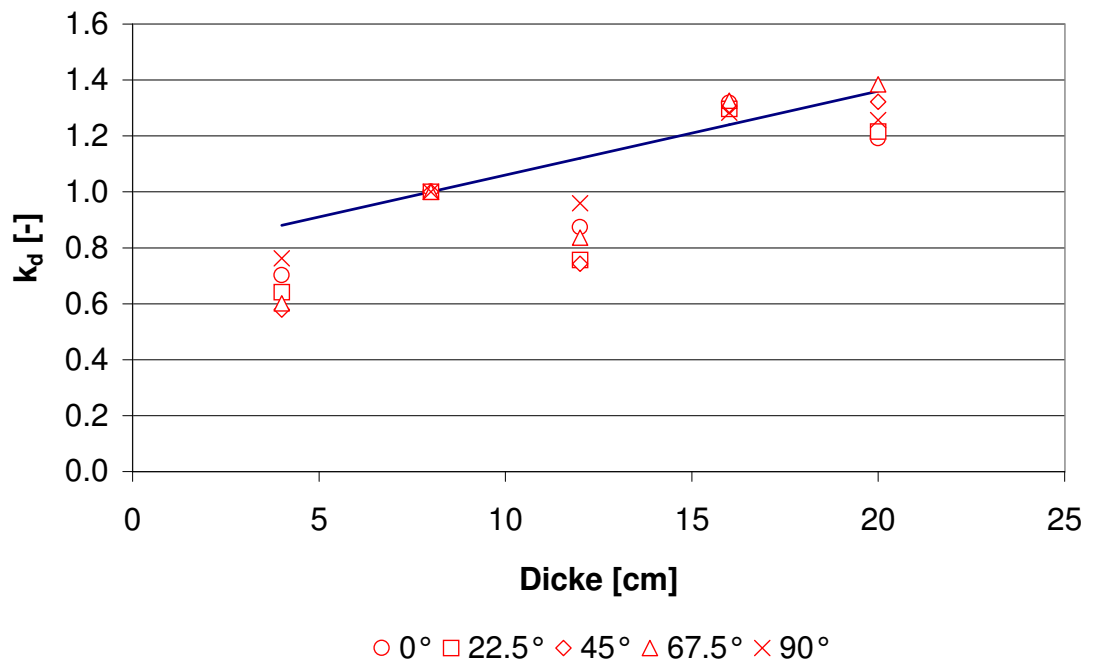


Abbildung 3.30: Faktor k_d

c) Körperhöhe

Die Körperhöhe hat keinen Einfluß auf die Dehnung am Ende der Gewindestange. Mit größerer Entfernung von der Lasteinleitung verteilt sich die Last gleichmäßiger.

3.2.4.6 Gewindestangenschlankheit

a) Gewindestangendurchmesser

Der Gewindestangendurchmesser beeinflusst die Steifigkeit und, bei konstanter Einklebelänge, die Schlankheit der Gewindestange. Mit wachsendem Gewindestangendurchmesser steigt die Dehnsteifigkeit der Gewindestange, die Schlankheit sinkt. Die Last wird von einer steiferen, gedrungeneren Gewindestange tiefer in das Holz eingebracht, die Dehnung am Gewindestangenende steigt an. Gleichzeitig wächst aber auch die Mantelfläche der Gewindestange, über die die Last eingeleitet wird, so daß bei großen Gewindestangendurchmessern die Dehnungen wieder abnehmen, siehe Abbildung 3.31.

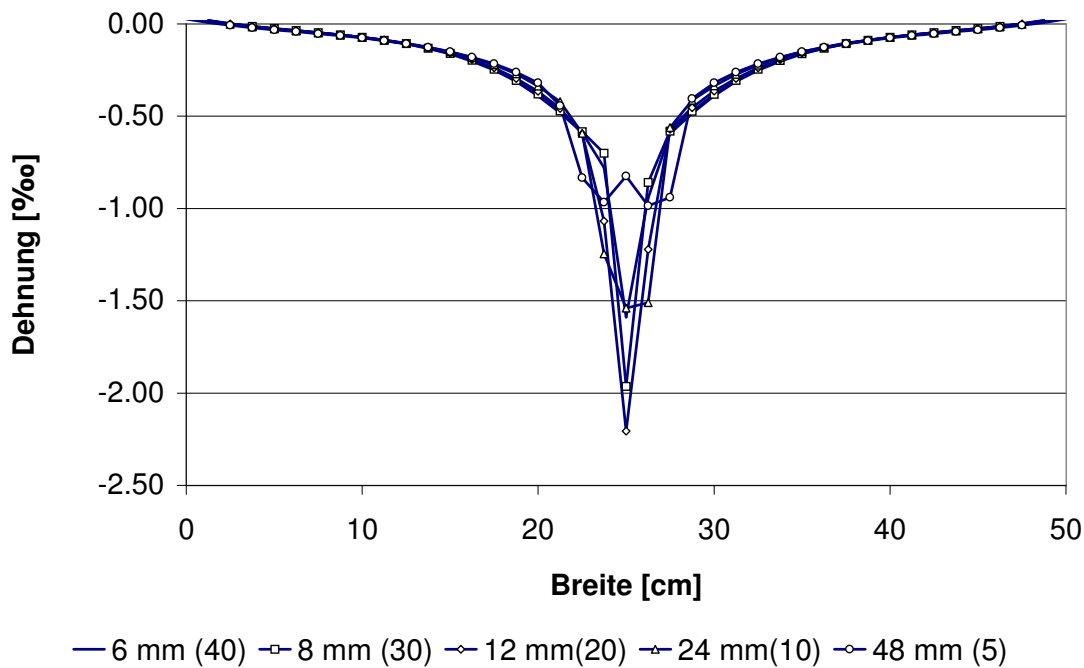


Abbildung 3.31: Dehnungsverteilung bei $x = 0$ cm und $z = 65$ cm (1 cm unterhalb des Gewindestangenendes) in Abhängigkeit der Gewindestangendicke d_g (Gewindestangenschlankheit λ_g)

Der Einfluß der Gewindestangendicke auf die Lastausbreitung wird durch den Faktor k_{d_g} Gleichung (3.26) ausgedrückt, der in Abbildung 3.32 dargestellt ist.

$$k_{d_g} = 0.3 \cdot d_g + 0.7 \tag{3.26}$$

mit: d_gGewindestangendurchmesser in [cm]

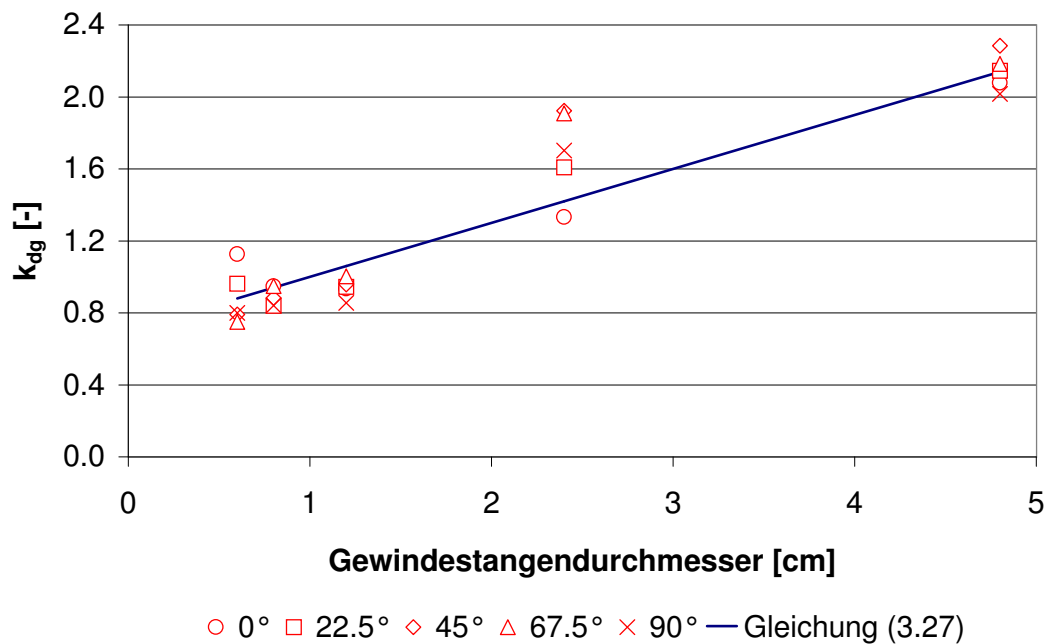


Abbildung 3.32: Faktor k_{dg}

b) Einklebelänge

Mit steigender Einklebelänge bei gleichbleibendem Durchmesser nimmt die Schlankheit der Gewindestange zu. Der Haftspannungsverlauf wird ungleichmäßiger, der größte Teil der Kraft wird am Anfang der Einklebelänge in den Holzquerschnitt eingeleitet. Die Dehnungen sinken mit wachsender Einklebelänge, siehe Abbildung 3.33.

Setzt man die Dehnungen ins Verhältnis zur Dehnung bei der kürzesten untersuchten Einklebelänge von 6 cm ($\varepsilon(l_g)/\varepsilon(6 \text{ cm})$) und vergleicht diesen Wert mit dem Quotienten der kürzesten und der aktuellen Einklebelänge ($6 \text{ cm}/l_g$) erkennt man, daß die Dehnungen umgekehrt proportional zur Einklebelänge der Gewindestange sind, siehe auch Abbildung 3.34. Der Einfluß der Einklebelänge auf die Lastausbreitung wird damit bei der Berechnung der Spannung am Gewindestangenende automatisch richtig berücksichtigt, da die Einklebelänge in die Berechnung der mittragenden Breite eingeht. Diese Vorgehensweise entspricht einem Faktor $k_{l_g} = 1.0$, der in Abbildung 3.35 als durchgezogene Linie eingetragen ist.

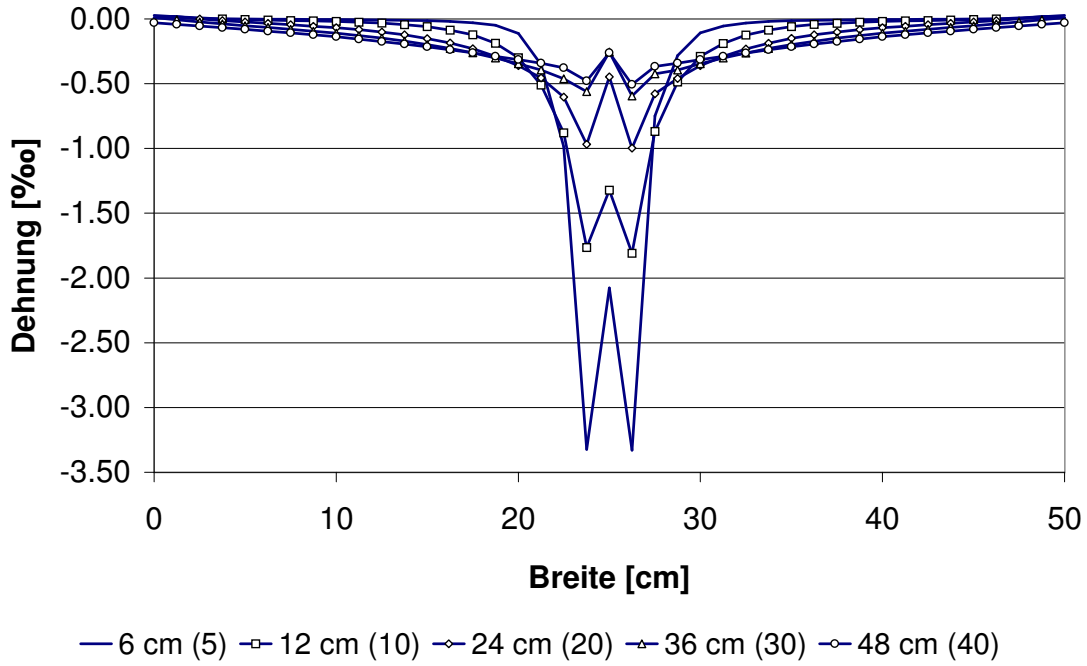


Abbildung 3.33: Dehnungsverteilung am Ende der Gewindestange in Abhängigkeit der Einlebelänge l_g (Gewindestangenschlankheit λ_g)

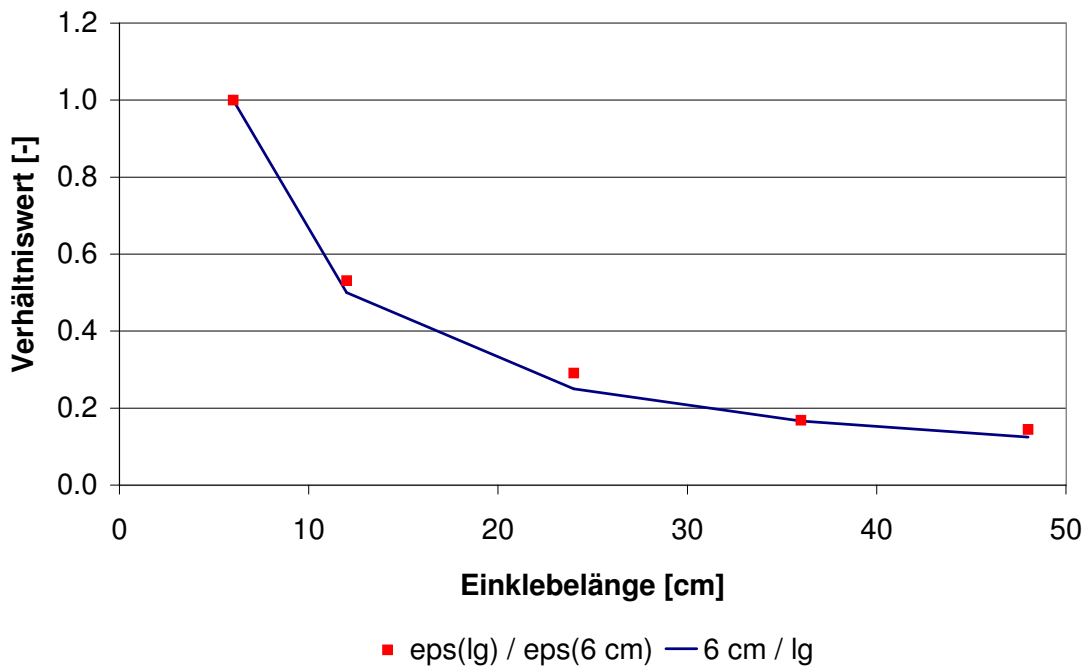


Abbildung 3.34: Dehnungsverteilung bei $x = 0 \text{ cm}$ und $z = 80 \text{ cm}$ (14 cm oberhalb des Gewindestangenendes) in Abhängigkeit der Einlebelänge l_g (Gewindestangenschlankheit λ_g)

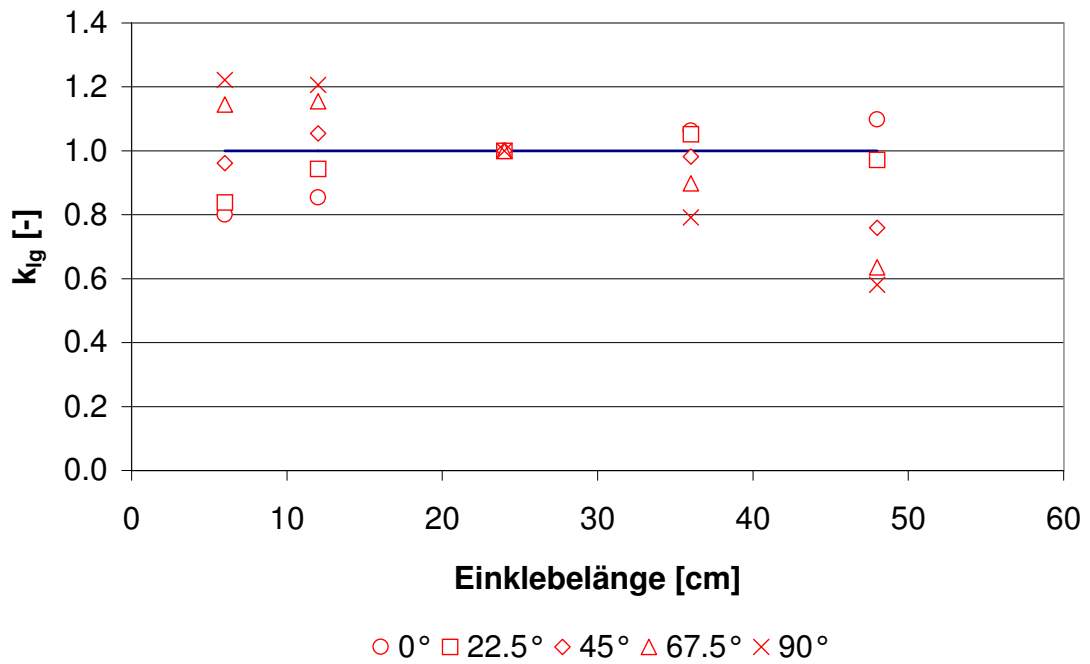


Abbildung 3.35: Faktor k_{lg}

3.2.4.7 Werkstoffparameter

a) Allgemeines

Das elastische Verhalten von Holz ist von verschiedenen Faktoren abhängig, beispielsweise der Rohdichte, der Holzfeuchtigkeit und der Holzart. Im folgenden wird nur die Abhängigkeit von der Rohdichte und der Feuchtigkeit berücksichtigt. Dabei werden feste Verhältnisse der Elastizitäts- und Schubmoduln verwendet. Der Einfluß eines von diesem Verhältnis abweichenden Verhältnisses von Elastizitäts- zu Schubmodul kann aus der separaten Variation von Elastizitäts- und Schubmodul ermittelt werden, die auch den Einfluß dieser Materialparameter auf die Lastausbreitung veranschaulicht.

b) Rohdichte

Die mechanischen Eigenschaften des Holzes sind mit der Rohdichte ρ korreliert. Aus [E DIN 1052 \(1999\)](#), Tabelle M 9, lassen sich die folgenden Beziehungen für die Abhängigkeit der Elastizitäts- und Schubmoduln von der Normalrohichte bei einer Holzfeuchtigkeit von 12% ableiten:

$$E_{\parallel} = -5500.9 + 44.673 \cdot \rho \quad [N/mm^2] \quad (3.27)$$

$$E_{\perp} = -168.69 + 1.4579 \cdot \rho \quad [N/mm^2] \quad (3.28)$$

$$G_{lt/lr} = -332.15 + 2.7477 \cdot \rho \quad [N/mm^2] \quad (3.29)$$

Der Schubmodul G_{rt} wird zu

$$G_{rt} = G_{lt/lr}/19.5, \quad (3.30)$$

die Querdehnfaktoren zu

$$\nu_{xy} = 0.413, \nu_{xz} = 0.261, \nu_{yz} = 0.011 \quad (3.31)$$

angenommen. Für die verschiedenen untersuchten Rohdichten ergeben sich damit die in Tabelle 3.12 zusammengestellten Elastizitäts- und Schubmoduln.

Tabelle 3.12: Parameter in Abhängigkeit der Rohdichte

ρ [kg/m ³]	E_{\parallel} [N/mm ²]	E_{\perp} [N/mm ²]	$G_{lt/lr}$ [N/mm ²]	G_{rt} [N/mm ²]	$E_{\parallel}/G_{lt/lr}$ [-]
275	6784	232	423	22	16.0
375	11251	378	698	36	16.1
475	15719	524	973	50	16.2
575	20186	670	1248	64	16.2
675	24653	815	1523	78	16.2

Mit steigender Rohdichte steigt der Elastizitätsmodul. Die Dehnungen am Ende der Gewindestange verringern sich, siehe Abbildung 3.36. Der Lastausbreitungswinkel wird durch die Rohdichte trotz des konstanten Verhältnisses $E_{\parallel}/G_{lt/lr}$, siehe Tabelle 3.12, beeinflusst. Der Faktor k_{ρ} nach Gleichung (3.32) ist in Abbildung 3.37 dargestellt.

$$k_{\rho} = 0.0007 \cdot \rho + 0.7 \quad (3.32)$$

mit: ρHolzrohndichte in [kg/m³]

c) Feuchtigkeit

NEUHAUS (1981) hat Beziehungen für die Ermittlung der Querdehnzahlen von Fichtenholz in Abhängigkeit der Holzfeuchte u angegeben, siehe Gleichung (3.33).

$$\begin{aligned}
 s_{11} &= (2029.51 - 46.00764 \cdot u + 7.60911 \cdot u^2 - 0.110097 \cdot u^3) \cdot 10^{-6} \\
 s_{22} &= (78.3695 - 0.19499 \cdot u + 0.065734 \cdot u^2 - 0.001236 \cdot u^3) \cdot 10^{-6} \\
 s_{33} &= (1022.73 - 15.17570 \cdot u + 3.20666 \cdot u^2 - 0.045711 \cdot u^3) \cdot 10^{-6} \\
 s_{44} &= (1360.83 - 36.80457 \cdot u + 6.27870 \cdot u^2 - 0.127028 \cdot u^3) \cdot 10^{-6} \\
 s_{55} &= (16657.64 + 89.00003 \cdot u + 43.02922 \cdot u^2 - 0.186506 \cdot u^3) \cdot 10^{-6} \\
 s_{66} &= (1142.99 - 5.17177 \cdot u + 1.95077 \cdot u^2 - 0.009583 \cdot u^3) \cdot 10^{-6} \\
 s_{12} &= (24.0501 - 4.12357 \cdot u + 0.66861 \cdot u^2 - 0.014477 \cdot u^3) \cdot 10^{-6} \\
 s_{21} &= (44.1175 + 3.24024 \cdot u + 0.02282 \cdot u^2 - 0.001381 \cdot u^3) \cdot 10^{-6} \\
 s_{13} &= (390.1615 - 30.06055 \cdot u + 6.79169 \cdot u^2 - 0.159012 \cdot u^3) \cdot 10^{-6} \\
 s_{31} &= (349.3552 - 7.63978 \cdot u + 4.54584 \cdot u^2 - 0.099455 \cdot u^3) \cdot 10^{-6} \\
 s_{23} &= (47.8229 + 0.02379 \cdot u + 0.19614 \cdot u^2 - 0.005033 \cdot u^3) \cdot 10^{-6} \\
 s_{32} &= (19.0595 - 1.19602 \cdot u + 0.29487 \cdot u^2 - 0.007538 \cdot u^3) \cdot 10^{-6}
 \end{aligned} \quad (3.33)$$

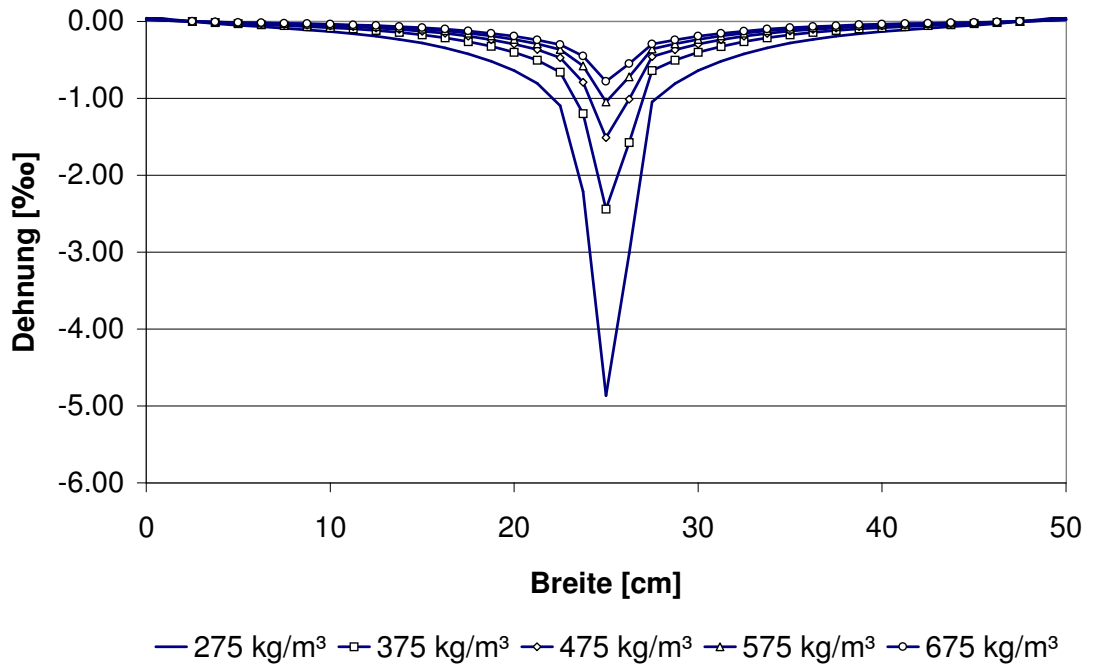


Abbildung 3.36: Dehnungsverteilung bei $x = 0$ cm und $z = 65$ cm (1 cm unterhalb des Gewindestangenendes) in Abhängigkeit der Holzrohddichte ρ

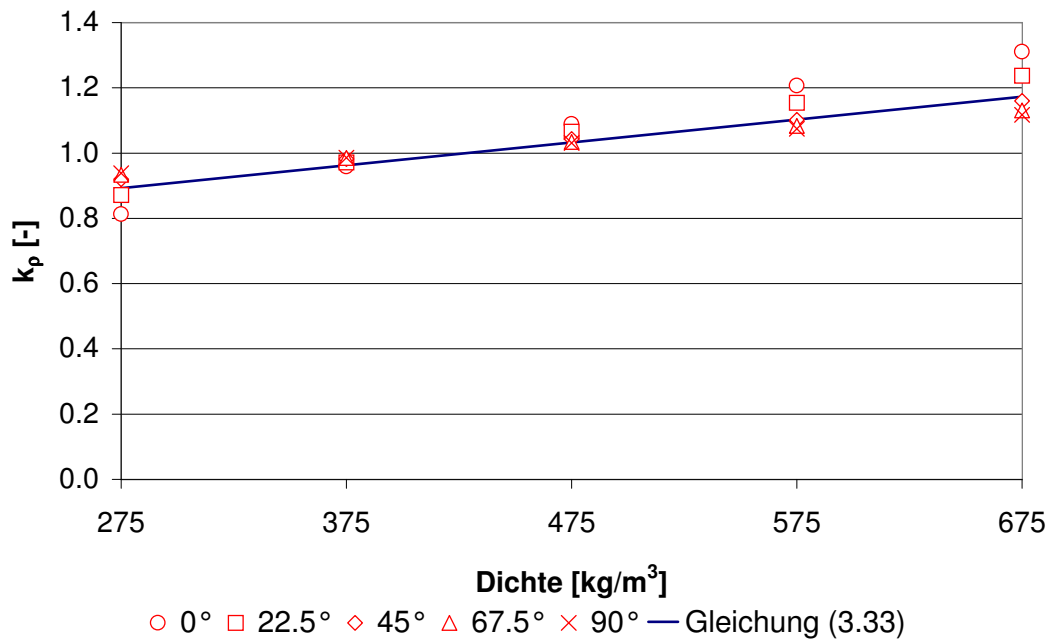


Abbildung 3.37: Faktor k_ρ

Aus den Querdehnraten ermittelt sich der Elastizitätsmodul parallel der Faser

$$E_{\parallel} = 1/s_{22}, \tag{3.34}$$

der Elastizitätsmodul rechtwinklig zur Faser

$$E_{\perp} = 1/s_{11}, \tag{3.35}$$

und die Schubmoduln

$$G_{lt/lr} = 1/s_{66} \tag{3.36}$$

und

$$G_{rt} = 1/s_{55}. \tag{3.37}$$

Die Querdehnfaktoren betragen:

$$\begin{aligned} \nu_{xy} &= (s_{12}/s_{22} + s_{32}/s_{22})/2, \\ \nu_{xz} &= (s_{13}/s_{11} + s_{31}/s_{11})/2, \\ \nu_{yz} &= (s_{21}/s_{11} + s_{23}/s_{33})/2. \end{aligned} \tag{3.38}$$

Für die verschiedenen untersuchten Holzfeuchten ergeben sich damit die in Tabelle 3.13 zusammengestellten Elastizitäts- und Schubmoduln.

Tabelle 3.13: Parameter in Abhängigkeit der Holzfeuchte

u [%]	E_{\parallel} [N/mm ²]	E_{\perp} [N/mm ²]	$G_{lt/lr}$ [N/mm ²]	G_{rt} [N/mm ²]	$E_{\parallel}/G_{lt/lr}$ [-]
5	12677	506	859	55	15
10	12231	450	783	46	16
15	11619	373	679	37	17
20	11004	306	574	29	19
25	10497	255	480	23	22

Mit steigender Holzfeuchte u wird das Holz weicher, die Elastizitäts- und Schubmoduln nehmen ab, die Dehnungen am Ende der Gewindestange steigen, siehe Abbildung 3.38. Da das Verhältnis $E_{\parallel}/G_{lt/lr}$ mit der Holzfeuchte u steigt, wird die Last zunehmend konzentriert abgetragen, die Lastverteilung nimmt ab. Dies drückt sich auch im Faktor k_u nach Gleichung (3.39) aus, der in Abbildung 3.39 dargestellt ist.

$$k_u = 1.1 - u \cdot 0.01 \tag{3.39}$$

mit: u Holzfeuchtigkeit in [%]

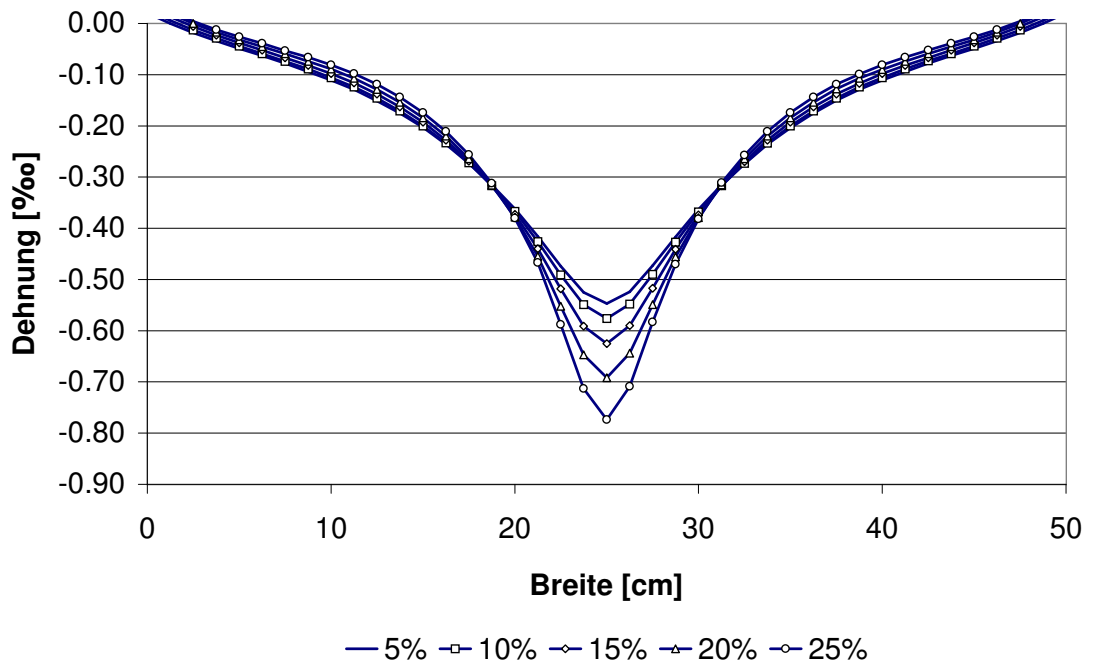


Abbildung 3.38: Dehnungsverteilung bei $x = 0$ cm und $z = 55$ cm (11 cm unterhalb des Gewindestangenendes) in Abhängigkeit der Holzfeuchte u

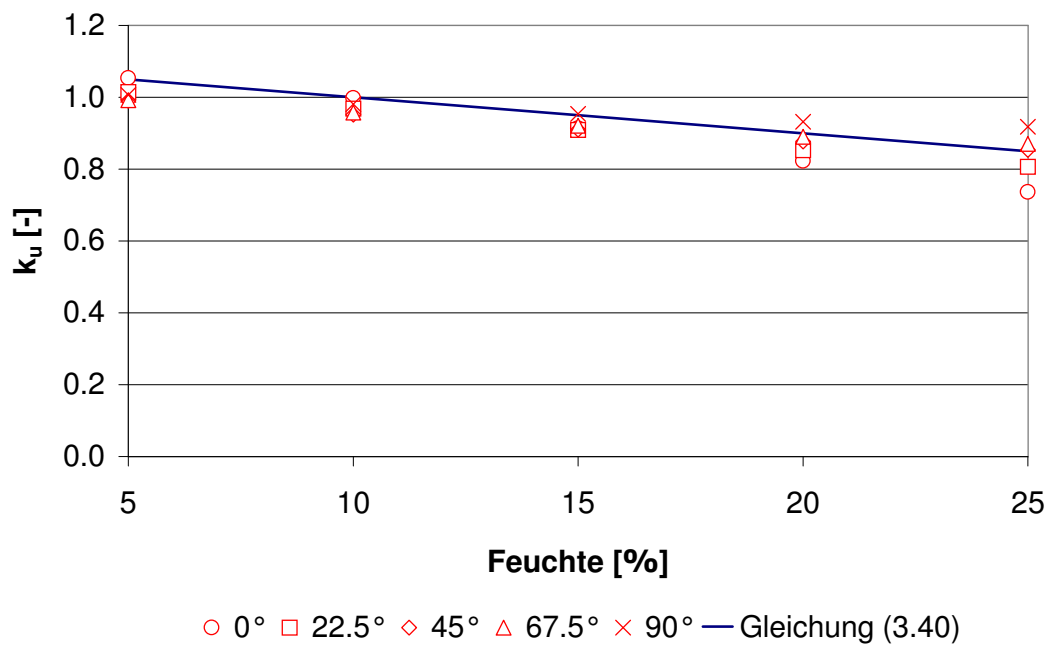


Abbildung 3.39: Faktor k_u

d) Elastizitätsmodul

Die von den anderen Werkstoffkennwerten unabhängige Änderung des Elastizitätsmoduls parallel der Faser ist ein Sonderfall, der die verschiedenen Auswirkungen der Dichteänderung verstehen hilft.

Mit steigendem Elastizitätsmodul sinkt bei gleichbleibender Belastung die Dehnung im Querschnitt. Gleichzeitig verändert sich das Verhältnis von Elastizitätsmodul zu Schubmodul. Die Last wird mit steigendem Elastizitätsmodul konzentrierter in Längsrichtung abgetragen und weniger in die Breite verteilt, siehe Abbildung 3.40. Auf den Lastausbreitungswinkel bleibt dies ohne Einfluß, siehe Abbildung 3.41.

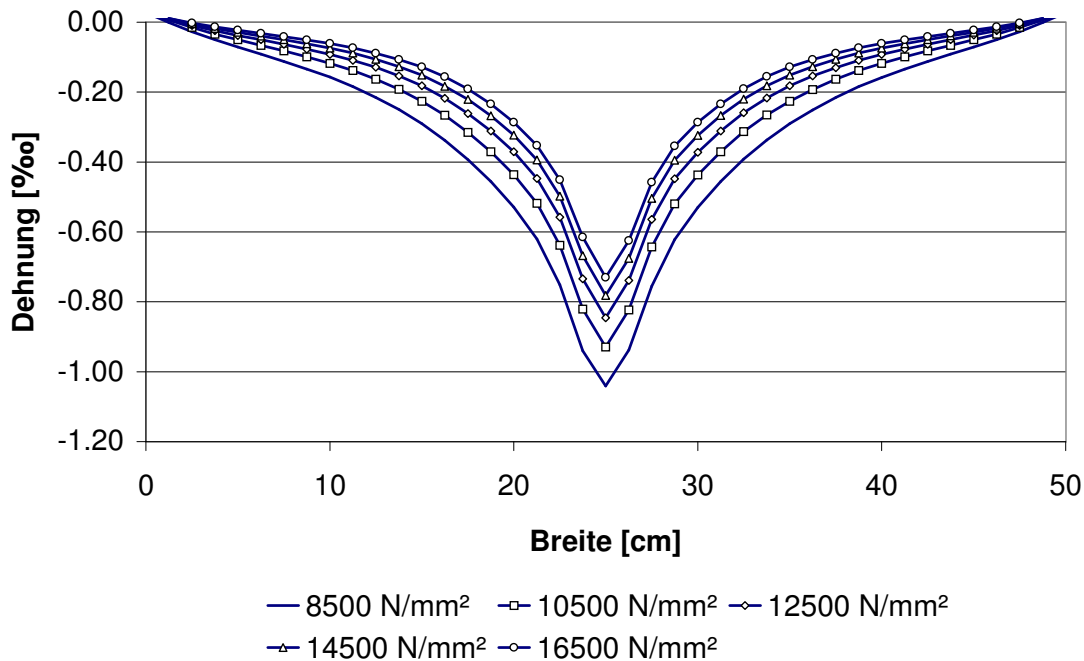


Abbildung 3.40: Dehnungsverteilung bei $x = 0$ cm und $z = 60$ cm (6 cm unterhalb des Gewindestangenendes) in Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls parallel der Faser $E_{||}$

e) Schubmodul

Wie die im vorigen Abschnitt beschriebene Änderung des Elastizitätsmoduls ist auch die von den anderen Werkstoffkennwerten unabhängige Änderung des Schubmoduls ein Sonderfall, der die verschiedenen Auswirkungen der Dichteänderung verstehen hilft.

Die Veränderung des Schubmoduls bei ansonsten gleichbleibenden Werkstoffkennwerten hat den gegenteiligen Effekt wie die Veränderung des Elastizitätsmoduls. Die Last verteilt sich mit steigendem Schubmodul schneller im Körper, der Maximalwert der Dehnung ist geringer, siehe Abbildung 3.42.

Der Einfluß des Kraft-Faserwinkels auf die Lastausbreitung ist in Abbildung 3.43 dargestellt. Gleichung (3.40) nähert die berechneten Werte an.

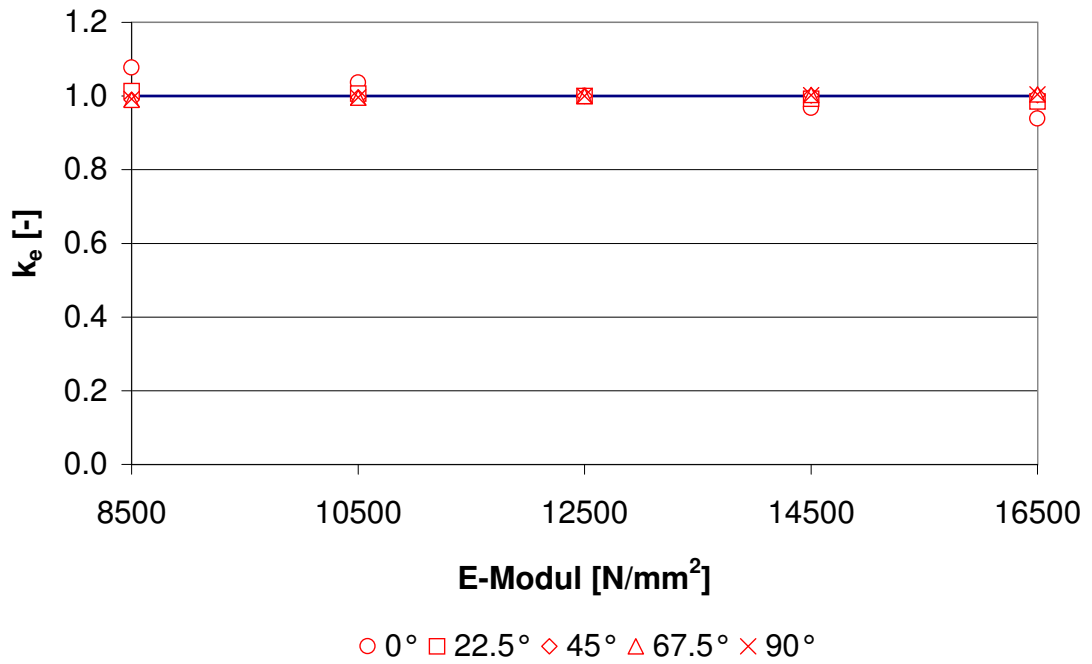


Abbildung 3.41: Faktor k_e

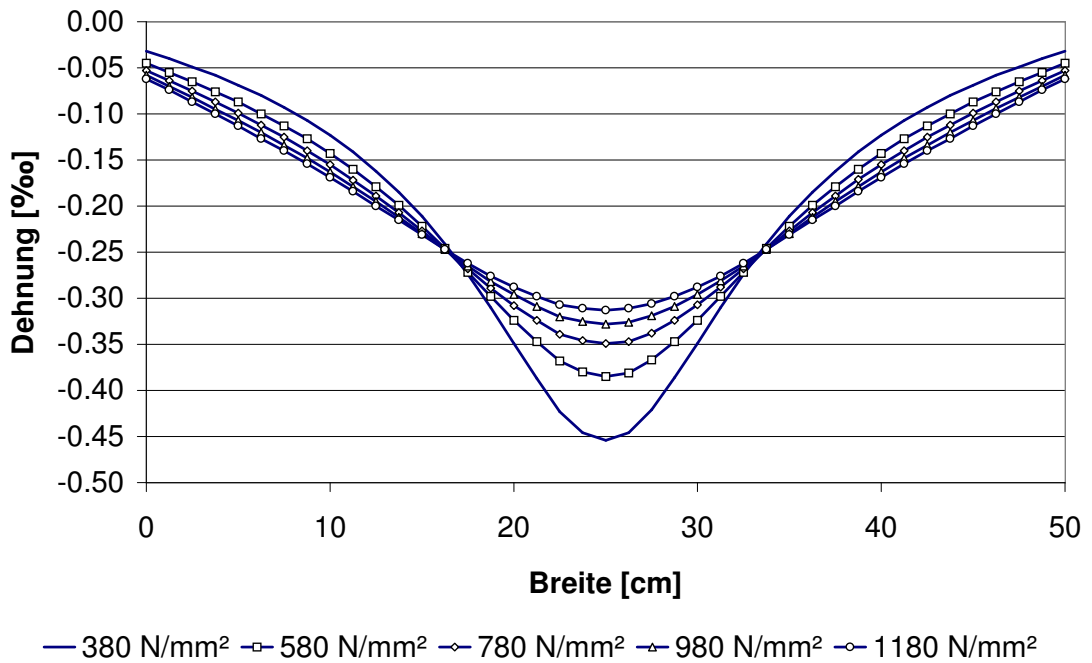


Abbildung 3.42: Dehnungsverteilung bei $x = 0 \text{ cm}$ und $z = 35 \text{ cm}$ (31 cm unterhalb des Gewindestangenendes) in Abhängigkeit des Schubmoduls $G_{lt/lr}$

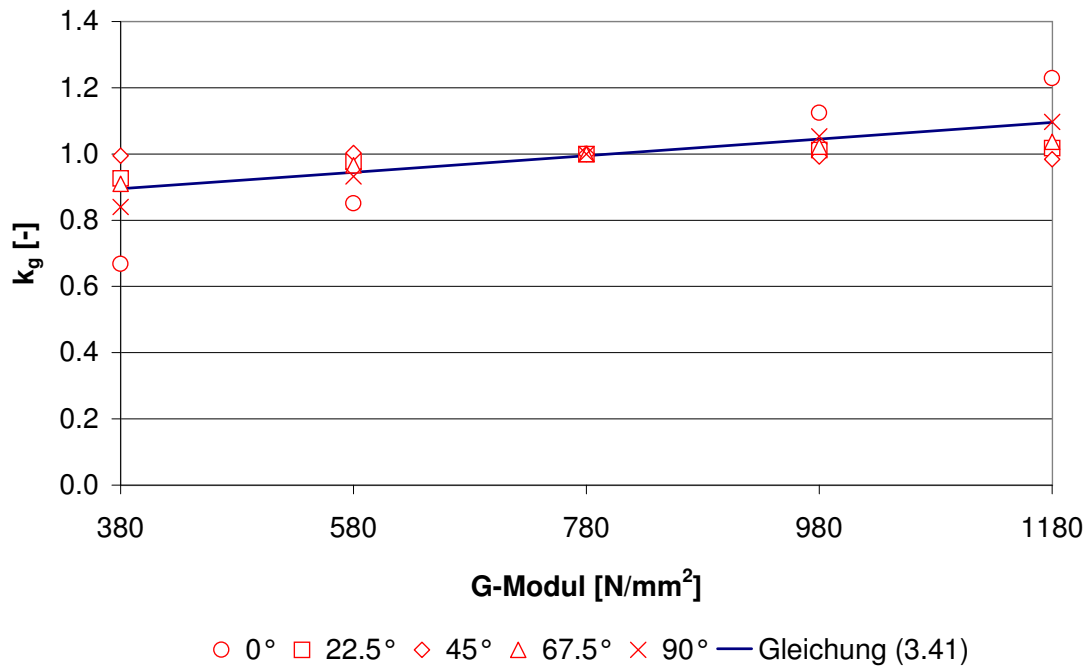


Abbildung 3.43: Faktor k_g

$$k_g = 2.5 \cdot 10^{-4} \cdot G + 0.8 \tag{3.40}$$

mit: G Schubmodul in [N/mm²]

3.2.4.8 Schlußfolgerung

Geringe Abmessungen des Körpers, in den die Gewindestangen eingeklebt werden, behindern die Lastausbreitung. Durch die geringere Fläche erhöhen sich die Spannungen. Dies wird bei der Ermittlung der Lastausbreitung durch die Begrenzung der mittragenden Breite auf die vorhandenen Abmessungen berücksichtigt.

Die Auswirkung variierender Einklebelängen auf die Spannungsverteilung wird berücksichtigt, indem die mittragende Breite mit dem Tangens des Lastausbreitungswinkels aus der Einklebelänge ermittelt wird.

Der einzige variierte Dimensionsparameter, der die Lastausbreitung beeinflusst, ist der Gewindestangendurchmesser. Die Annahme, daß ein größerer Durchmesser der Gewindestange eine höhere Steifigkeit bewirkt, aufgrund der die Last weiter in den Holzquerschnitt eingeleitet wird und höhere Spannungen am Gewindestangenende resultieren, bestätigt sich nicht. Stattdessen sinken die Spannungen mit steigendem Gewindestangendurchmesser, da der größere Umfang die Kraft auf eine größere Fläche verteilt.

Die Werkstoffparameter, die die Steifigkeitsverhältnisse im Bereich der Gewindestange beeinflussen, wirken sich bis auf den Elastizitätsmodul auf die Lastausbreitung aus. Obwohl sich bei einer Änderung der Holzrohddichte das Verhältnis von Elastizitäts- und Schubmodul, das den Grad der Lastweiterleitung in benachbarte Fasern beschreibt, kaum verändert, läßt sich eine Abhängigkeit der Lastausbreitung von der Holzrohddichte nachweisen.

Die alleinige Variation des Schubmoduls wird für den Berechnungsvorschlag nicht verwendet. Hierfür sind weitergehende Untersuchungen erforderlich, die den Einfluß abweichender Verhältnisse des Elastizitäts- und des Schubmoduls, wie sie auch bei unterschiedlichen Holzarten vorkommen, ergründen.

3.3 Berechnungsvorschlag

3.3.1 Berechnung des Lastausbreitungswinkels

Der Lastausbreitungswinkel zur Berechnung der mittragenden Breite am Ende axial belasteter, eingeklebter Gewindestangen kann nach Gleichung (3.41) ermittelt werden. Hierbei wird von einem Basiswinkel ausgegangen, der für den in Tabelle 3.11 auf Seite 65 definierten Standardfall gilt. Der Basiswinkel unterscheidet sich für Zug- und Druckbeanspruchung, da bei Zugbeanspruchung die Klebstoffschicht am Gewindestangenende abreißen kann und sich damit die Spannungsverteilung in diesem Bereich ändert. Der Unterschied in der Lastausbreitung zwischen Druck- und Zugbeanspruchung wird als konstant angenommen. Der Einfluß der untersuchten Parameter wird durch Faktoren erfaßt, mit denen der Basiswinkel multipliziert wird. Die Faktoren zur Berücksichtigung der untersuchten Parameter sind immer auf den Standardfall bezogen und verändern für diesen Fall den Basiswinkel nicht ($k = 1$).

Aufgrund der in Abschnitt 3.3.2 vorgenommenen Überprüfung der Gültigkeit des Berechnungsvorschlags wird der in Abschnitt 3.2.4.4 ermittelte Basiswinkel der Lastausbreitung abgemindert, um mit dem Berechnungsvorschlag konservative Lastausbreitungswinkel anzugeben, die auch bei der Variation mehrerer Parameter auf der sicheren Seite liegen.

$$\phi = \phi_{0,c/t} \cdot k_{\alpha}(\alpha) \cdot k_{\rho}(\rho) \cdot k_u(u) \quad (3.41)$$

- mit: $\phi_{0,t}$ 5° , Basiswinkel der Lastausbreitung bei Zugbeanspruchung
(keine Normalkraftübertragung am Stangenende)
- $\phi_{0,c}$ 7.5° , Basiswinkel der Lastausbreitung bei Druckbeanspruchung
(Normalkraftübertragung am Stangenende)
- $k_{\alpha}(\alpha)$ Faktor zur Berücksichtigung des Winkels zwischen Gewindestange
und Faserrichtung
 $= 1.25 + 0.25 \cdot \sin(2 \cdot \alpha - 90^{\circ})$
mit α in $^{\circ}$ nach Gleichung (3.24)
- $k_{\rho}(\rho)$ Faktor zur Berücksichtigung der Holzrohddichte
 $= 0.0007 \cdot \rho + 0.7$
mit ρ in kg/m^3 bei $u = 12\%$ nach Gleichung (3.32)
- $k_u(u)$ Faktor zur Berücksichtigung der Holzfeuchtigkeit
 $= 1.1 - u \cdot 0.01$
mit u in $\%$ nach Gleichung (3.39)

3.3.2 Gültigkeit

Der Vorschlag zur Berechnung der Lastausbreitung bei Verwendung eingeklebter Gewindestangen wurde auf der Grundlage der Spannungen am Gewindestangenende erstellt. Aufgrund der durchgeführten experimentellen Untersuchungen, bei denen das Versagen des Holzquerschnittes vermieden wurde, kann nicht gesagt werden, ob die berechneten Spannungsspitzen am Gewindestangenende maßgeblich für das Versagen sind und demzufolge zur Berechnung der Lastausbreitung herangezogen werden müssen, oder ob das Versagen nicht erst durch eine Überschreitung der aufnehmbaren Spannungen in einem weiteren Bereich erfolgt. In letzterem Fall würde sich durch die geringeren maßgebenden Spannungen ein größerer Lastausbreitungswinkel ergeben. Zur Klärung dieser Fragestellung sind weitere theoretische und experimentelle Untersuchungen erforderlich, bei denen das Versagen des Holzquerschnittes maßgebend wird.

Zur Überprüfung des Berechnungsvorschlags wurden mit dem numerischen Modell fünf Varianten berechnet. Die Eingangsgrößen und die Ergebnisse der Berechnung nach Gleichung (3.41) sowie der Vergleich mit den Ergebnissen der FE-Berechnung sind in Tabelle 3.14 zusammengestellt. Die teilweise erhebliche Abweichung der FE-Ergebnisse von den Ergebnissen nach Gleichung (3.41) zeigt, daß der Berechnungsvorschlag für manche Parameterkombinationen sehr konservative Lastausbreitungswinkel ergibt. In weitergehenden Untersuchungen sollten die Auswirkungen der gleichzeitigen Veränderung mehrerer Parameter geklärt werden.

Der Berechnungsvorschlag gilt nur für den untersuchten Parameterbereich. Eine Ausweitung der Datenbasis auf weitere Holzarten und Verbindungsmittel ist wünschenswert.

Tabelle 3.14: Varianten zur Überprüfung des Berechnungsvorschlags

Variante		1	2	3	4	5
α	[°]	0	45	90	22.5	30
b	[cm]	50	25	12	50	50
d	[cm]	8	25	12	10	12
h	[cm]	90	90	90	90	90
d_g	[cm]	1.6	2.4	2	0.8	1.6
l_g	[cm]	32	48	20	24	40
ρ	[kg/m ³]	428	428	428	428	500
u	[%]	10	10	10	20	10
$E_{ }$	[N/mm ²]	12500	12500	12500	12500	12500
G	[N/mm ²]	780	780	780	780	780
ϕ_t	[°]	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
k_α	[-]	1.000	1.250	1.500	1.073	1.125
k_ρ	[-]	1.000	1.000	1.000	1.000	1.050
k_u	[-]	1.000	1.000	1.000	0.900	1.000
ϕ	[°]	5.0	6.2	7.5	4.8	5.9
$b_{m,\phi}$	[cm]	5.6	10.5	5.2	4.0	8.2
d_m	[cm]	5.6	10.5	5.2	4.0	8.2
b_m	[cm]	5.6	10.5	5.2	4.0	8.2
A_m	[cm ²]	31.0	109.3	27.4	16.3	67.8
F	[kN]	100	100	100	100	100
σ	[N/mm ²]	32.2	9.1	36.5	61.5	14.7
σ_{FE}	[N/mm ²]	17.1	7.8	16.4	18.0	12.6
σ / σ_{FE}	[%]	189	117	223	342	117

3.4 Zusammenfassung

Zur Ermittlung der Lastausbreitung bei Verwendung eingeklebter Gewindestangen wurden experimentelle und numerische Untersuchungen durchgeführt.

Die experimentellen Untersuchungen dienten der Verifikation des numerischen Modells. Sie ließen aber auch erkennen, daß die Tragfähigkeit schräg zur Faser eingeklebter Gewindestangen erheblich über der faserparallel eingeklebter Gewindestangen liegt. Für die wenigen Versuche wurde die Steifigkeit der Gewindestangen ermittelt.

Für die numerischen Untersuchungen mit Finiten Elementen wurde ein Modell entwickelt, das anhand von Versuchsergebnissen verifiziert wurde. Mit diesem Modell wurde anschließend eine Parameterstudie durchgeführt, aus der ein Vorschlag zur Berechnung eines Lastausbreitungswinkels abgeleitet wurde.

4 Tragverhalten gewinkelter Verbindungen

4.1 Allgemeines

Die Beanspruchung von Rahmen durch Eigengewicht, Wind-, Schnee- und Zusatzlasten in unterschiedlichen Kombinationen erzeugt in der Rahmenecke positive wie negative Biegemomente, Normalkräfte und Querkräfte.

Bei den Momenten unterscheidet man öffnendes und schließendes Moment. Öffnende Momente vergrößern den Öffnungswinkel δ der Rahmenecke, schließende Momente dagegen verkleinern ihn, siehe Abbildung 4.1.

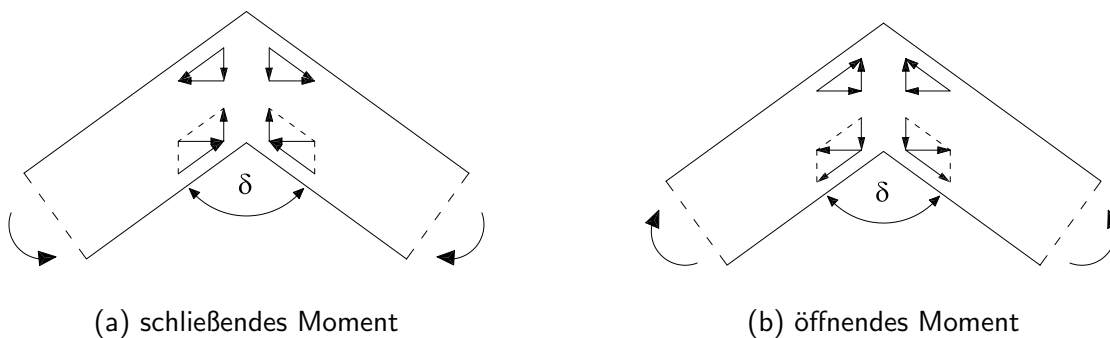


Abbildung 4.1: Öffnungswinkel und Umlenkkräfte in Rahmenecken

Unter ständigen Lasten wirkt in einer Rahmenecke im Allgemeinen ein schließendes Biegemoment. Durch kurzzeitige Beanspruchungen, wie zum Beispiel Wind, kann auch ein öffnendes Moment auftreten.

4.2 Schnittgrößenumlenkung

Die Schnittgrößen werden immer in Bezug zur Achse des Bauteils definiert. An Knickstellen der Bauteilachse – beispielsweise an einer Rahmenecke – müssen die Schnittgrößen in die Richtung der weiterführenden Bauteilachse umgerechnet werden.

Die Umrechnung erfolgt gemäß Gleichung (4.1). Hierin ist $\gamma = \delta - 90^\circ$ der Winkel der Dachneigung, siehe Abbildung 4.2.

$$M_{li} = M_{re} \quad (4.1a)$$

$$N_{li} = N_{re} \cdot \sin(\gamma) + V_{re} \cdot \cos(\gamma) \quad (4.1b)$$

$$V_{li} = N_{re} \cdot \cos(\gamma) - V_{re} \cdot \sin(\gamma) \quad (4.1c)$$

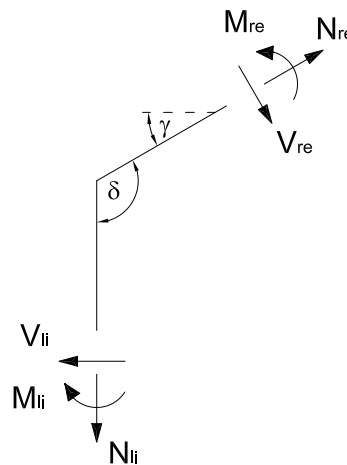


Abbildung 4.2: Schnittgrößen an einer Rahmenecke

Die Momente beider Seiten erzeugen Normalspannungen im Körper, die ideell zu einem Kräftepaar zusammengefasst werden können. Die Umlenkung dieser Spannungen beziehungsweise Kräfte in die neue Wirkungsrichtung kann auf die folgenden zwei Arten erfolgen.

- Werden die Querschnitte stumpf gestoßen, erzeugt das Kräftepaar eine Querkraft im Bereich der Umlenkung, siehe Abbildung 4.3(a). Dabei kann die Querkraft so hoch werden, daß der Querschnitt größer dimensioniert werden muß, um sie abtragen zu können.
- Die Eckausbildung mit einem Gehrungsschnitt ist für den Querschnitt günstiger. Die Umlenkung der Zug- und Druckkomponente des Moments erzeugt eine Umlenkraft, siehe Abbildung 4.3(b). Öffnende Momente erzeugen eine Umlenkzugkraft, schließende Momente eine Umlenkdruckkraft, siehe auch Abbildung 4.1.

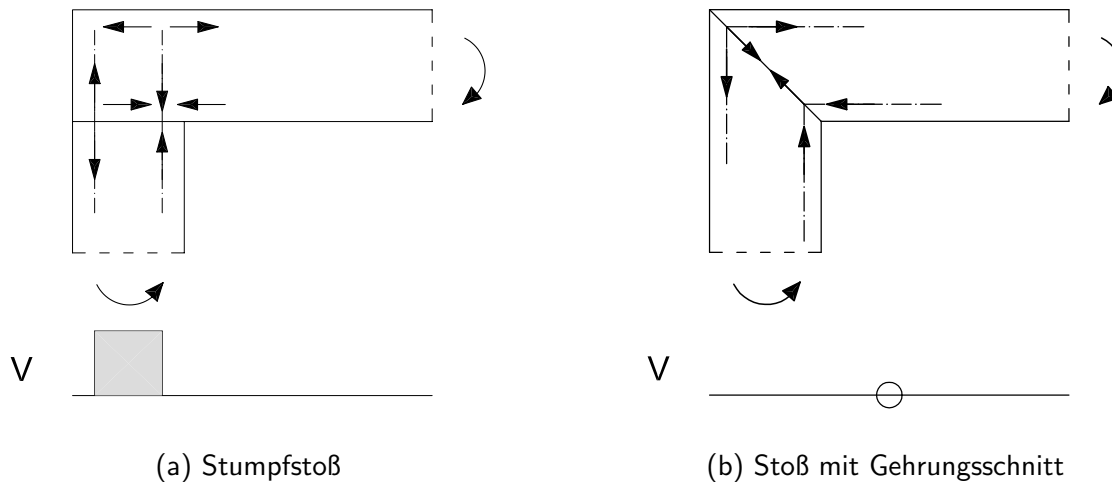


Abbildung 4.3: Schubbelastung im Riegel unter reiner Momentenbeanspruchung bei verschiedenen Stoßarten

Durch die Anordnung des Gehrungsschnitts in der Winkelhalbierenden der Trägerachsen sind die in den Gehrungsschnitt umgerechneten Kräfte der beiden Rahmenschenkel identisch. Der Winkel zwischen Gehrungsschnitt und Trägerachsen beträgt mit dem Dachneigungswinkel γ , siehe Abbildungen 4.2 und 4.4,

$$\alpha = 90^\circ - \beta = 45^\circ - \frac{\gamma}{2} \quad \text{mit} \quad \beta = \frac{\delta}{2} = \frac{90^\circ + \gamma}{2} = 45^\circ + \frac{\gamma}{2} \quad (4.2)$$

Damit gilt für die Umrechnung der Kräfte in das Koordinatensystem des Gehrungsschnitts, siehe auch Abbildung 4.4:

$$M_{\text{Gehrung}} = M_{li} = M_{re} \quad (4.3a)$$

$$N_{\text{Gehrung}} = N_{re} \cdot \cos \alpha - V_{re} \cdot \sin \alpha = N_{li} \cdot \cos \alpha + V_{li} \cdot \sin \alpha \quad (4.3b)$$

$$V_{\text{Gehrung}} = V_{re} \cdot \cos \alpha + N_{re} \cdot \sin \alpha = V_{li} \cdot \cos \alpha - N_{li} \cdot \sin \alpha \quad (4.3c)$$

4.3 Abtragung der Umlenkraft

Die Abtragsrichtung der Umlenkraft beeinflusst die in der Rahmeneckverbindung wirkenden Kräfte. Abbildung 4.5 zeigt die Aufteilung der in der Verbindungsfuge wirkenden Kraft Z_G auf die Zugkraft Z und die Umlenkraft U .

In Abbildung 4.5(a) wirkt die Umlenkraft U_a normal zur Trägerlängskante und schräg zur Zugkraft Z_G . Aus dem Kräfteck erkennt man, daß sich die Zugkraft Z_G auf die Zugkraft Z_a und die Umlenkraft U_a aufteilt.

In Abbildung 4.5(b) wirkt die Umlenkraft U_b parallel zum Gehrungsschnitt. Die Zugkraft Z_b ist nun die vektorielle Summe aus Zugkraft Z_G und Umlenkraft U_b .

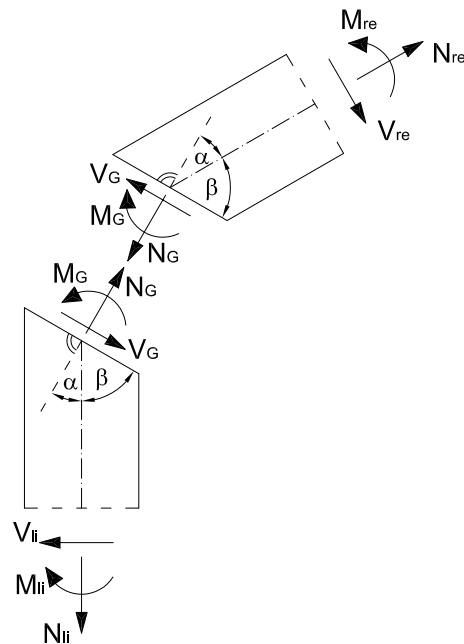
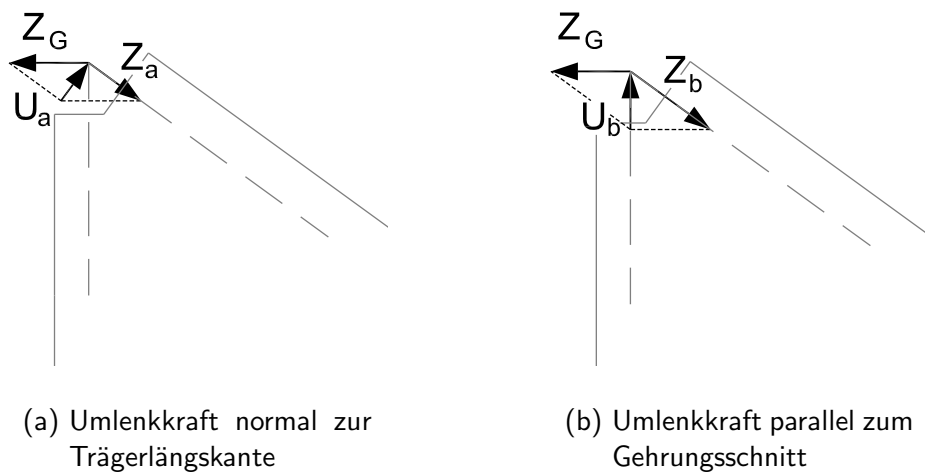


Abbildung 4.4: Schnittgrößen im Gehrungsschnitt



(a) Umlenkraft normal zur Trägerlängskante

(b) Umlenkraft parallel zum Gehrungsschnitt

Abbildung 4.5: Umlenkung der Zugkraft

Da Z_G bei gegebenem Hebelarm in der Verbindung konstant ist, sind die Kräfte im Fall b) größer als im Fall a). Ein Zahlenbeispiel verdeutlicht den Einfluß. Bei einer Dachneigung von $\gamma = 18^\circ$ beträgt nach Gleichung (4.2) der Winkel zwischen Trägerachse und Gehrungsschnitt $\alpha = 45^\circ - 18^\circ/2 = 36^\circ$. Damit ergeben sich die folgenden Verhältnismerte:

$$\begin{aligned} Z_a &= Z_G \cdot \cos 36^\circ = 0.81 \cdot Z_G & Z_b &= Z_G / \cos 36^\circ = 1.24 \cdot Z_G = 1.52 \cdot Z_a \\ U_a &= Z_G \cdot \sin 36^\circ = 0.59 \cdot Z_G & U_b &= Z_G / \tan 36^\circ = 0.73 \cdot Z_G = 1.24 \cdot U_a \end{aligned}$$

Die konstruktive Umsetzung der günstigen, in Abbildung 4.5(a) dargestellten Aufnahme der Umlenkraft führt in einem ersten Schritt zu einer einfachen Verbindung, bei der die Gewindestangen ausschließlich faserparallel eingeklebt werden, siehe Abbildung 4.6(a). Die Gewindestangen werden sowohl achsial durch die Längs- als auch quer durch die Umlenkraft belastet. Aufgrund der im Verhältnis zur Achsialbeanspruchbarkeit geringen Querbeanspruchbarkeit der Gewindestangen wird die Umlenkraft für die Dimensionierung der Gewindestangen maßgebend, es sind viele Stangen erforderlich.

Eine bessere Lösung ist, die Zugkraft faserparallel eingeklebten Gewindestangen (Zugstangen) zuzuweisen, und die Umlenkraft mit zusätzlichen, parallel zum Gehrungsschnitt eingeklebten Gewindestangen (Querstangen) aufzunehmen, siehe Abbildung 4.6(b). Die normal zur Trägerlängskante wirkende Umlenkraft wird dabei in eine Achsialbelastung der Querstangen U_V und in eine Querbelastung U_H aufgeteilt. Aufgrund der im Verhältnis zur Achsialbeanspruchbarkeit geringen Querbeanspruchbarkeit der Gewindestangen sind zur Aufnahme der Querbelastung wiederum viele Stangen erforderlich.

Die Umlenkraft wird daher, wie in Abbildung 4.5(b) gezeigt, nur achsial in die Gewindestangen eingeleitet. Die Stangen erfahren keine planmäßige Querbeanspruchung, die Achsialbeanspruchung der Gewindestangen ist bei dieser, in Abbildung 4.6(c) skizzierten Variante jedoch am höchsten.

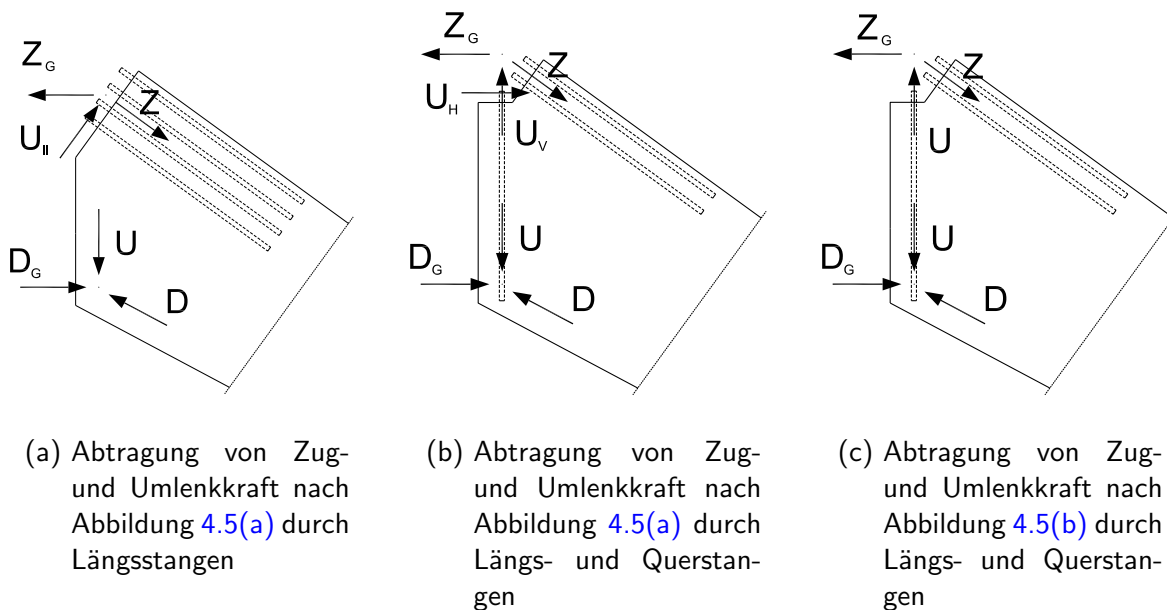


Abbildung 4.6: Konstruktive Varianten zur Abtragung der Umlenkraft

Zur Verbindung der Zug- und Querstangen untereinander und zur Kraftübertragung über den Gehrungsschnitt werden Stahlelemente angeordnet, siehe auch Abschnitt 5.2.6 auf Seite 107. Durch die Verformung der Gewindestangen verdrehen sich diese Elemente und übertragen eine unplanmäßige Querbelastung auf die Gewindestangen.

4.4 Schnittgrößenkombination

Die Berechnung eines als Beispiel ausgewählten Dreigelenrahmens verdeutlicht die Größenverhältnisse der angreifenden Schnittgrößen. Das statische System ist mit den Belastungen in Abbildung 4.7 dargestellt. Die Belastung ist in Tabelle 4.1 zusammengestellt.

Tabelle 4.1: Lastannahmen nach DIN 1055

Dachdeckung	
Trapezblech	0.2 kN/m ²
Nebenträger	14/36 cm ² , a = 2.66 m
Schneelast (s ₀)	1.5 kN/m ² (SLZ II, h = 700 müNN)
Wind (Staudruck q)	0.5 kN/m ²
Holzdichte	5.0 kN/m ³

Der Querschnitt von Stütze und Riegel beträgt 16·70 cm², die Holzgüte BS16. Bei einer Spannweite von 12 m, einer Traufhöhe von 6 m und einem Rahmenabstand von 6.75 m ist der Querschnitt der Rahmenschenkel für ein schließendes Moment voll ausgenutzt. Die Dachneigung γ beträgt 18°, so daß sich eine Firsthöhe von 7,95 m ergibt.

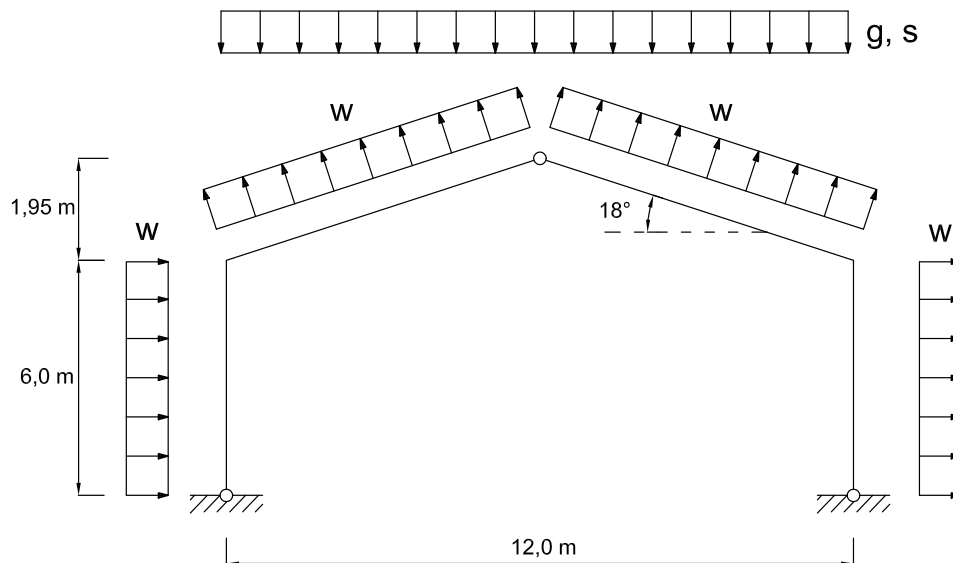


Abbildung 4.7: Statisches System

Die berechneten Schnittgrößen sind für schließendes und öffnendes Moment in Tabelle 4.2 dargestellt. Die Umrechnung in das Koordinatensystem des Gehrungsschnitts erfolgt nach Gleichung (4.3) auf Seite 91. Die maßgebende Lastfallkombination für schließendes Moment ist Eigengewicht, Schnee und Wind, für öffnendes Moment Eigengewicht und Wind.

Tabelle 4.2: Schnittgrößen in der Rahmenecke (Bezeichnungen nach Abbildung 4.4)

Beanspruchung	Moment [kNm]	Normalkraft [kN]	Querkraft [kN]
Rahmenstiel			
	M_{li}	N_{li}	V_{li}
schließend	-197.18	-78.85	-32.24
öffnend	36.40	5.50	-2.03
Rahmenriegel			
	M_{re}	N_{re}	V_{re}
schließend	-197.18	-55.16	65.07
öffnend	36.40	-0.23	-5.86
Gehungsschnitt			
	M_G	N_G	V_G
schließend	-197.18	-82.80	20.24
öffnend	36.40	3.26	-4.88

4.5 Kraftverlauf in den Bauteilen

4.5.1 Allgemeines

In Trägerbereichen, die weit genug von Diskontinuitäten, wie Einzellasteinleitungen oder Verbindungen mit konzentrierter Krafteinleitung, entfernt sind, herrscht ein ungestörter Biege- und Schubspannungsverlauf. Im Bereich von Diskontinuitäten ist dieser Verlauf infolge der konzentrierten Krafteinleitung gestört.

Keilzinkenverbindungen oder Verbindungen durch Kontakt stellen eine kontinuierliche Verbindung von Bauteilen dar, die Spannungsverteilung ändert sich nicht. Eine konzentrierte Kraftübertragung durch Verbindungsmittel, beispielsweise durch eingeklebte Gewindestangen, verursacht dagegen eine Einschnürung des Spannungsverlaufs.

Bei gemeinsamer Wirkung von verschiedenen Verbindungsarten verteilt sich die Gesamtkraft gemäß deren Steifigkeiten auf die einzelnen Verbindungsarten. Die Steifigkeiten der Verbindungsarten müssen dabei ähnlich sein. So überträgt bei der Kombination einer steifen Verklebung mit einer weichen Dübelverbindung die Verklebung die gesamte Last. Die wirkliche Kraftaufteilung läßt sich nur schwer genau bestimmen, da sie durch Fertigungsungenauigkeiten oder andere Unwägbarkeiten von der beabsichtigten Aufteilung abweichen kann.

Beispielsweise tragen im idealen Fall eines Kontaktstosses, der durch ein eingeschlitztes Stahlblech verstärkt wird, beide Komponenten die Last gemeinsam ab. Ist jedoch ein Spalt zwischen den Bauteilen vorhanden, kann kein Kontakt zustande kommen und das Schlitzblech trägt die gesamte Last ab. Ist dagegen das Lochspiel der Schlitzblechverbindung im Verhältnis

zur Fuge im Kontaktbereich zu groß, wird die Kraft ausschließlich über Kontakt abgetragen. [DIN 1052 \(1996\)](#) verlangt aufgrund dieser Unwägbarkeiten, das Bauteil, das die kleinere Kraft erhält, für die 1.5-fache anteilige Kraft zu bemessen.

4.5.2 Moment und Normalkraft

In [Abbildung 4.8](#) sind für einen momentenbelasteten Träger Linien gleicher Normalspannung, die mit einer FE-Berechnung ermittelt wurden, dargestellt. Der Träger wird am rechten Rand durch eine lineare Biegespannungsverteilung belastet. Am linken Rand ist er in [Abbildung 4.8\(a\)](#) dargestellten Fall kontinuierlich gelagert. Dies entspricht der direkten Verbindung zweier Querschnitte, z.B. durch eine Keilzinkung. Im Druckbereich gilt diese Spannungsverteilung auch für Kontakt. Bei konzentrierter Krafteinleitung, z.B. durch Gewindestangen, schnürt sich der Spannungsverlauf ein, siehe [Abbildung 4.8\(b\)](#). Es resultieren hohe, lokale Beanspruchungen mit einem Maximum am Ende der Lasteinleitung.

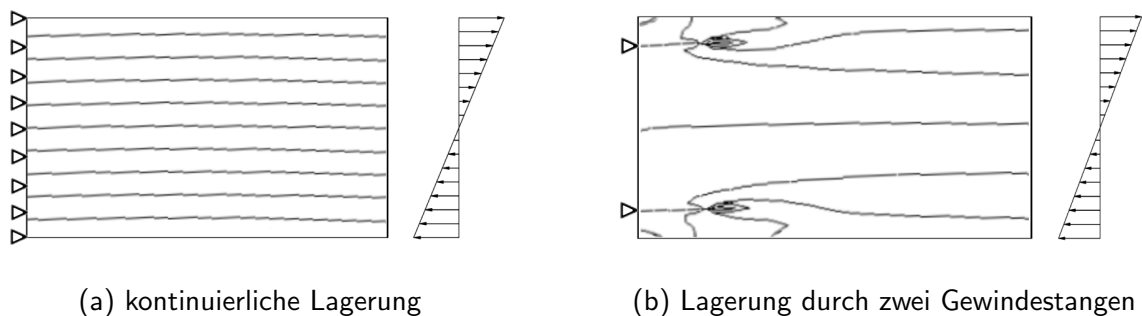


Abbildung 4.8: Linien gleicher Biegenormalspannungen für unterschiedliche Lagerungsbedingungen

4.5.3 Querkraft

[Abbildung 4.9](#) zeigt Linien gleicher Schubspannung bei unterschiedlichen Lagerungsbedingungen. Die Schubspannung wird in beiden Fällen am rechten Rand eingeleitet. In [Abbildung 4.9\(a\)](#) erfolgt die Lagerung am linken Rand kontinuierlich. Im Unterschied dazu wird der Querschnitt in [Abbildung 4.9\(b\)](#) am linken Rand auf einer kurzen Länge in der Mitte festgehalten. Aus dem Vergleich der beiden Abbildungen erkennt man deutlich die Einschnürung des Schubspannungsverlaufs hin zur Lagerung.

4.5.4 Kraftverlauf in der Rahmenecke

Der Kraftverlauf in der Rahmenecke folgt den oben beschriebenen Prinzipien. Die Zugkraft an der äußeren Ecke konzentriert sich in den Gewindestangen. Die Druckkraft wird im Fall

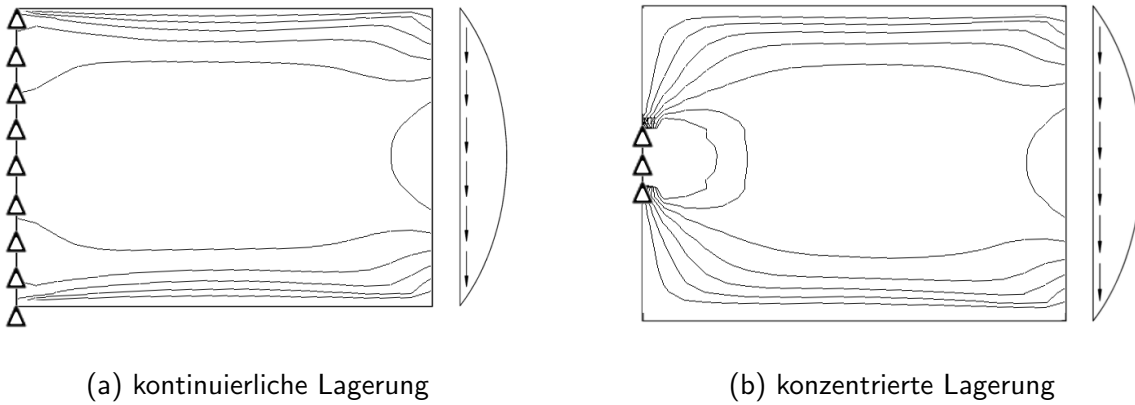


Abbildung 4.9: Linien gleicher Schubspannungen für unterschiedliche Lagerungsbedingungen

der unverstärkten Druckzone recht gleichmäßig übertragen, siehe Abbildung 4.10(a). Wird die Druckzone dagegen durch ein Schlitzblech verstärkt, konzentriert sich auch hier die Kraft in der Verbindung, siehe Abbildung 4.10(b).

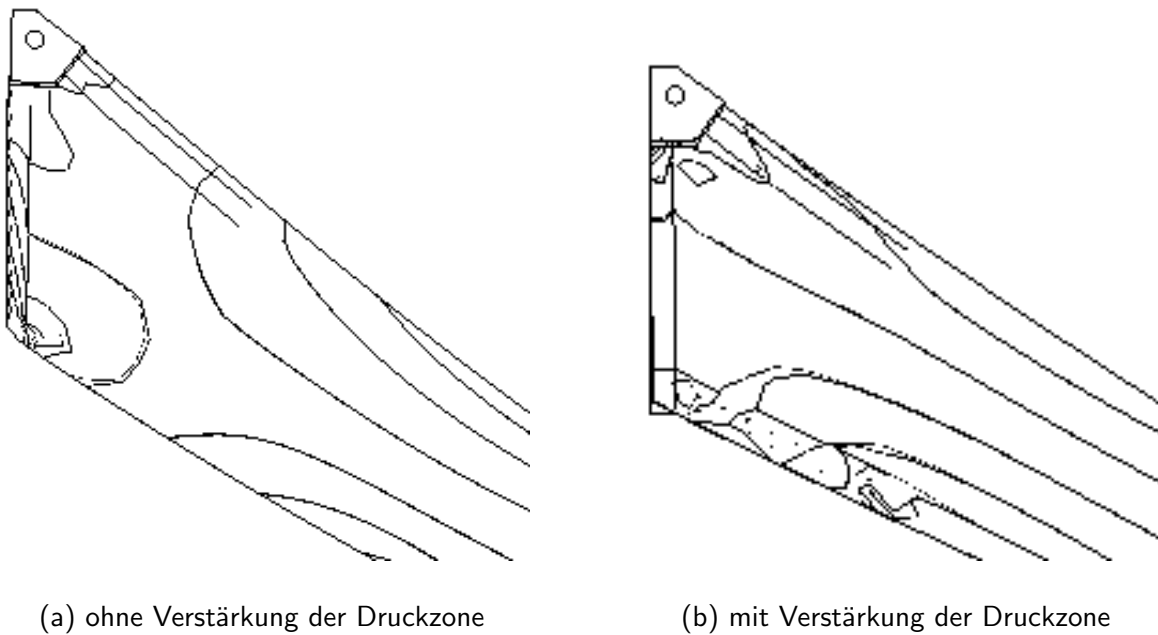


Abbildung 4.10: Linien gleicher Spannungen für unterschiedliche Ausführungen der Druckzone

4.5.5 Einfluß der Voute

Die Erhöhung des Querschnitts mit einer Voute im Eckbereich führt zu unterschiedlich geneigten Trägerkanten. Die Kraftumlenkung bei Druckübertragung durch Kontakt wird davon jedoch nicht beeinflusst. In Abbildung 4.11(a) ist die Kraftumlenkung im Druckbereich für einen Querschnitt ohne Voute dargestellt. Die im Gehrungsschnitt wirkende Druckkraft wird in Richtung der Holzfasern weitergeleitet. Aus der Richtungsänderung ergibt sich die Umlenkraft. Gleiches gilt für den Fall des mit einer Voute vergrößerten Querschnitts, siehe Abbildung 4.11(b). Die Weiterleitung der Normalspannung in Faserrichtung belastet lediglich den schräg angeschnittenen Rand durch Schub und Querdruck- bzw. Querkzugspannungen. Der Nachweis der Spannungscombination am schrägen Rand bestimmt den zulässigen Faseranschnittwinkel und damit die Voutenlänge.

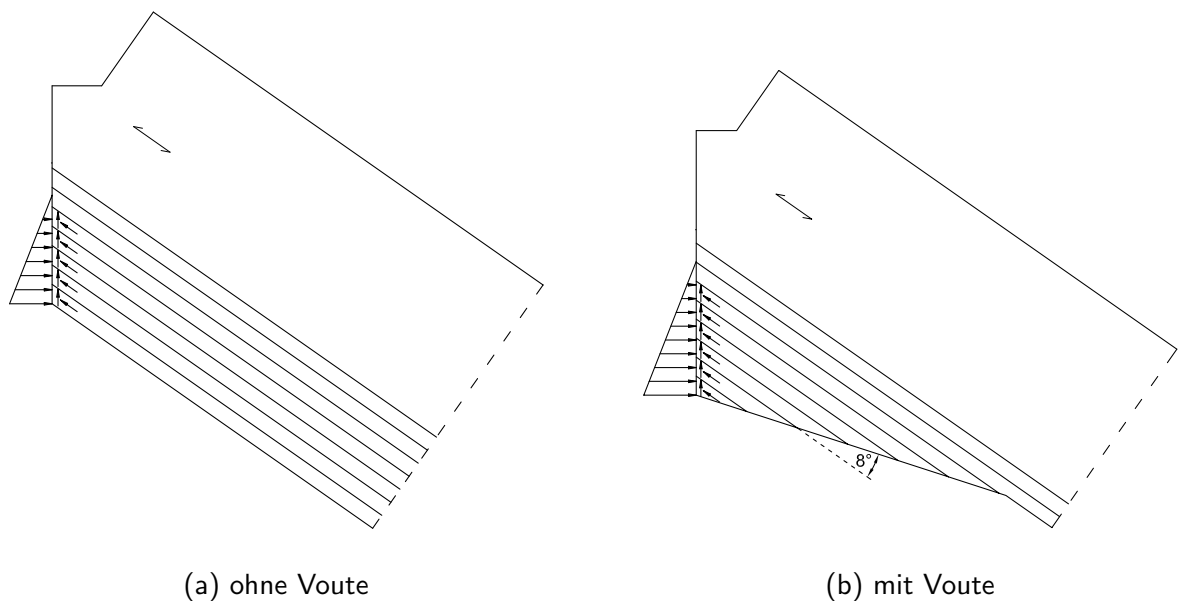


Abbildung 4.11: Umlenkung der Druckkraft im Gehrungsschnitt

Anders verhält es sich, wenn die Kraft am schrägen Rand durch Verbindungsmittel aufgenommen wird. Die Kraft wird dann in Richtung der Verbindungsmittelachse, schräg zur Holzfaser abgetragen und allmählich in den Holzquerschnitt eingeleitet. Der Holzquerschnitt wird dadurch kontinuierlich quer zur Faser belastet. Am Gehrungsschnitt ergeben sich in diesem Fall unterschiedliche Umlenkkräfte, die Differenz wird von den Querstangen in den Querschnitt eingeleitet und als Querkraft abgetragen. Der Kurzschluß mit der in den Verbindungsmitteln verbleibenden Umlenkkomponente der Kraft findet über die Länge der Verbindung statt. Der Querschnitt wird durch eine zusätzliche Schubkraft, sowie durch Querdruck bzw. -zug belastet. Bei Querdruck kann der Querschnitt diese Belastung aufnehmen. Bei Querkzug besteht die Gefahr, daß der Querschnitt durch die Belastung aufreißt. Bei öffnenden Momenten ist also auf eine Voute zu verzichten, die Zugkraft ist faserparallel in den Querschnitt einzuleiten.

4.6 Zusammenfassung

Bei gewinkelten Verbindungen wie Rahmenecken findet immer eine Kraftumlenkung statt. Eine Verbindung mit Gehrungsschnitt vermeidet dabei hohe Schubbeanspruchungen im Eckbereich. Die entlang des Gehrungsschnitts auftretende Umlenkkraft muß in der Verbindung kurzgeschlossen werden. Im Holzbau ist dabei besonderes Augenmerk auf die Umlenkzugkraft bei öffnenden Momenten zu richten, um Quersugversagen zu vermeiden.

Die Art der Lastweiterleitung ist durch die Konstruktion der Verbindung beeinflusst. Wird die Kraft konzentriert durch eingeklebte Gewindestangen übertragen, schnürt sich der Spannungsverlauf an der Stelle der Krafteinleitung ein.

5 Experimentelle Untersuchung der Rahmeneckverbindung

5.1 Allgemeines

Zur Überprüfung des mechanischen Modells und zur Verifizierung des numerischen Modells wurden auf dem Rahmeneckenprüfstand des Otto-Graf-Instituts Versuche an zwei Rahmenecken in Bauteilabmessungen durchgeführt. Eine ausführliche Beschreibung der Versuche ist in [KUHLMANN UND LIPPERT \(2002b\)](#) enthalten.

Der Rahmeneckenprüfstand wurde von [AICHER UND HERR \(1997\)](#) entwickelt und für die dort beschriebenen Rahmeneckenversuche erfolgreich eingesetzt. Die Ecken und der Zylinder liegen horizontal in einer Ebene, siehe Abbildung 5.1. Das Eigengewicht drückt die Ecke auf den Prüfraahmen und stabilisiert sie, es sind keine Aussteifungskonstruktionen erforderlich.



Abbildung 5.1: Prüfstand mit Rahmenecke

Die Versuchskörper werden im Gehrungsschnitt durch Moment und Normalkraft beansprucht. Eine Querkraft im Gehrungsschnitt wird nicht untersucht.

Um die Rahmenecken mit den Versuchen von [AICHER U. A. \(1997\)](#) vergleichen zu können, haben sie einen Querschnitt von $16 \cdot 70 \text{ cm}^2$. Sie bestehen aus Brettschichtholz der Güte BS16. Analog zum in Abschnitt [4.4](#) auf Seite [94](#) beschriebenen Rahmen beträgt die Dachneigung $\gamma = 18^\circ$. Daraus ergibt sich nach Gleichung [\(4.2\)](#) auf Seite [91](#) der Winkel des Gehrungsschnitts zur Schenkelachse zu

$$\alpha = 45^\circ - \frac{18^\circ}{2} = 36^\circ \quad \text{bzw.} \quad \beta = 45^\circ + \frac{18^\circ}{2} = 54^\circ \quad (5.1)$$

5.2 Konstruktion der Versuchskörper

5.2.1 Schließendes Moment

Die im Rahmen wirkenden Schnittgrößen Moment und Normalkraft werden in ein Kräftepaar aufgeteilt. Die Zugkomponente Z wird eingeklebten Gewindestangen zugewiesen. Die Druckkomponente D wird am inneren Rand der Ecke über Druckkontakt übertragen. Zur Abtragung der Umlenkkräfte U werden Gewindestangen parallel zum Gehrungsschnitt eingeklebt, siehe [Abbildung 5.2](#).

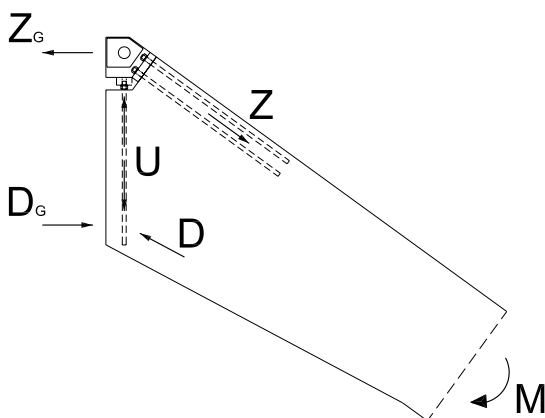


Abbildung 5.2: Rahmenecke für schließendes Moment

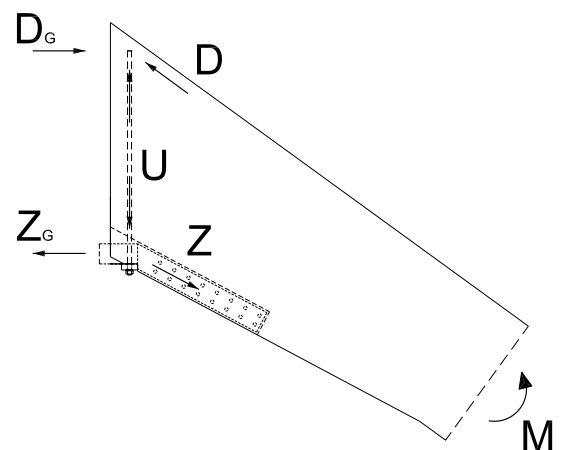


Abbildung 5.3: Rahmenecke für öffnendes Moment

5.2.2 Öffnendes Moment

Bei öffnendem Moment kehrt sich die Beanspruchung um, an der inneren Ecke herrscht nun Zug. Da die Kontaktfläche zur Übertragung der Druckkomponente des schließenden Moments erhalten werden soll, können hier keine Gewindestangen angeordnet werden. Die Zugkomponente Z wird daher über ein eingeschlitztes Stahlblech mit Stabdübeln weitergeleitet, siehe [Abbildung 5.3](#).

Die Umlenkraft U wird in die Querdruckgewindestange eingeleitet. Die Druckkomponente D wird über Kontakt übertragen.

5.2.3 Voute

Um die Tragfähigkeit der Ecke zu erhöhen, kann der innere Hebelarm durch eine Voute vergrößert werden. Im Bereich der Voute erhöht sich die Steifigkeit des Querschnitts, bei einem statisch unbestimmten System wird das Moment im Eckbereich größer. Gleichzeitig ändert sich auch die Schwerlinie des Querschnittes, das statische System nähert sich der Bogenstützlinie, das angreifende Moment wird kleiner.

Bei der Voutenkonstruktion wird zuerst die Höhe der Voute nach dem erforderlichen Hebelarm im Gehrungsschnitt festgelegt. Der Nachweis der Spannungscombination am schräg angeschnittenen Rand bestimmt die Neigung des angeschnittenen Randes und damit die Länge der Voute. Abbildung 5.4 zeigt den Ausnutzungsgrad der Biegespannung bzw. der Spannungscombination am Druckrand eines durch eine Einzellast F belasteten Trägers. Die Knickstelle der Kurven markiert den Voutenbeginn. Bei einer kurzen Voute ist der Querschnitt am Übergang vom unverstärkten Querschnitt zur Voute maximal ausgenutzt. Durch die steile Neigung des Voutenrandes steigt die Körperhöhe schnell an, so daß der Ausnutzungsgrad zurückgeht. Bei einer größeren Voutenlänge steigt die Momentenbelastung annähernd linear mit der Körperhöhe, der Voutenbereich wird gleichmäßig ausgenutzt („mittlere Voutenlänge“ in Abbildung 5.4). Dies ist die optimale Voutenlänge. Wird die Voutenlänge weiter gesteigert, ist der Ausnutzungsgrad schließlich im Gehrungsschnitt maximal.

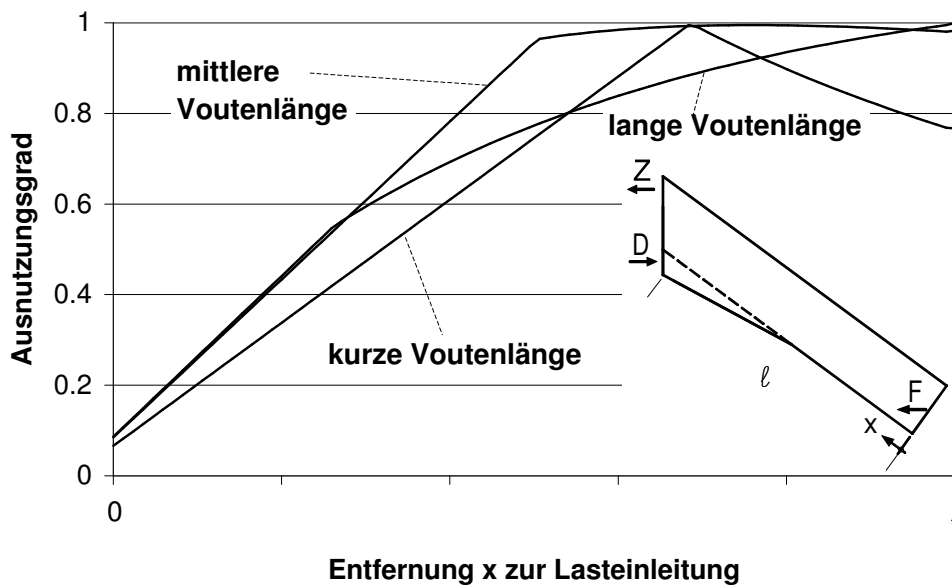


Abbildung 5.4: Einfluß der Voutenlänge auf den Nachweis der Spannungscombination am schräg angeschnittenen Rand

Bei der Herstellung der Brettschichtholzträger können die für die Höhe der Voute erforderlichen zusätzlichen Lamellen zur Minimierung des Holzverbrauchs nur im Bereich der Voutenlänge aufgeleimt werden. Dies läßt sich ohne großen Mehraufwand in den Herstellungsprozeß von Brettschichtholzträgern integrieren. Abbildung 5.5 zeigt einen Brettschichtholzträger in den Abmessungen der Versuchsträger, mit optimaler Voutenlänge und zusätzlichen Lamellen im Voutenbereich.

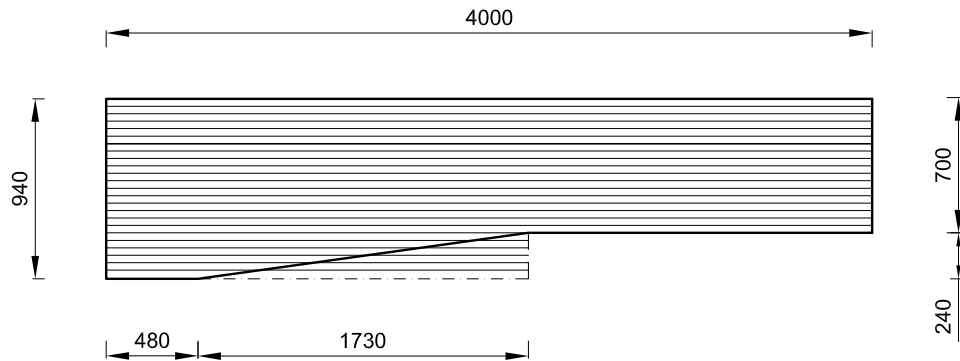


Abbildung 5.5: Aus Lamellen zusammengesetzter Brettschichtholzträger mit zusätzlichen Lamellen im Voutenbereich

Bei Belastung der Rahmenecke durch ein öffnendes Moment liegt der schräg angeschnittene Rand der Voute im Biegezugbereich. Es besteht die Gefahr des Querzugversagens, das aufnehmbare öffnende Moment ist gegenüber einer Belastung mit schließendem Moment geringer. Bei großen öffnenden Momenten sollte auf eine Voute verzichtet werden.

5.2.4 Ausbildung der Versuchskörper

5.2.4.1 Versuchskörper 1

Versuchskörper 1 wird nur mit schließendem Moment belastet, die Innenecke wird nicht verstärkt. Die Konstruktion ist in Abbildung 5.6 dargestellt.

5.2.4.2 Versuchskörper 2

Versuchskörper 2 wird sowohl mit schließendem, als auch mit öffnendem Moment belastet. Setzt man die in den Abschnitten 5.2.1 und 5.2.2 beschriebenen Fälle zusammen, ergibt sich die in Abbildung 5.7 dargestellte Konstruktion. Die Abtragung der Zugkraft erfolgt im Fall schließenden Moments durch eine einfach herzustellende Verbindung mit wenigen Gewindestangen, bei öffnendem Moment durch ein eingeschliztes Stahlblech mit Stabdübeln. Die Druckkraft wird bei schließendem Moment durch Kontakt und das eingeschlitzte Stahlblech, bei öffnendem Moment nur durch Kontakt übertragen.

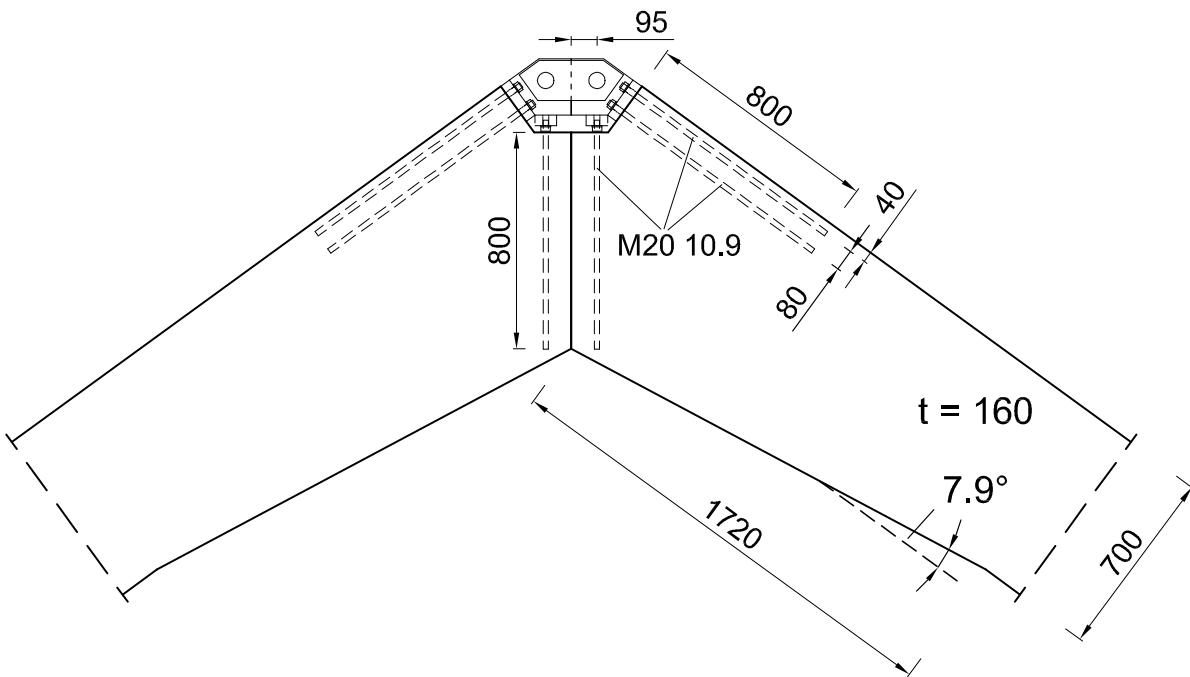


Abbildung 5.6: Versuchskörper 1

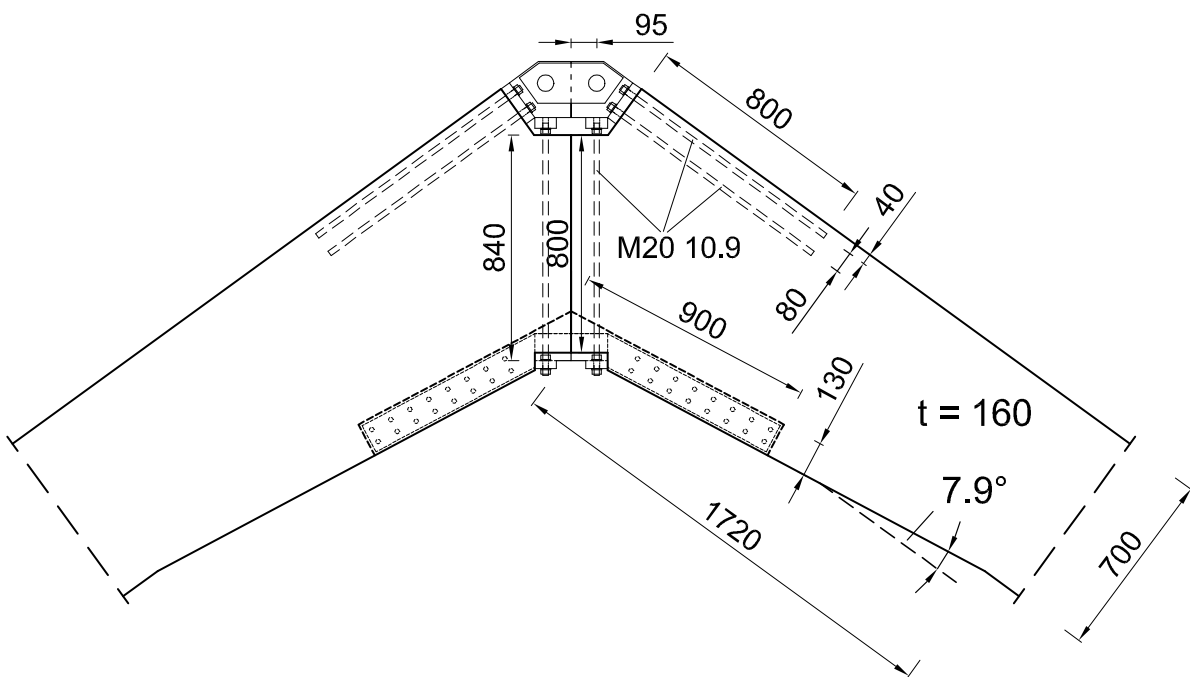


Abbildung 5.7: Versuchskörper 2

5.2.5 Gewindestangen

5.2.5.1 Abstände und Durchmesser

Die Gewindestangen werden symmetrisch angeordnet, unter Berücksichtigung der Konstruktion der Anschlußteile. Nach [E DIN 1052 \(1999\)](#) betragen die erforderlichen Abstände der Gewindestangen

$$\begin{array}{ll} \text{untereinander} & 5 \cdot d, \\ \text{zum Rand} & 2.5 \cdot d. \end{array}$$

Auf der Grundlage dieser Abstände ergibt sich für zweiseitige Anordnung zwischen Körperdicke und Gewindestangendurchmesser der Zusammenhang $2.5d + 5d + 2.5d = 10d \leq b$. Bei 16 cm Körperdicke entspricht dies einem Gewindestangendurchmesser von 16 mm. Die Gewindestangenlänge wird durch die Schlankheit festgelegt. Nach [EHLBECK UND SIEBERT \(1987\)](#) fällt die Haftspannung im mittleren Bereich der Klebefuge eingeklebter Gewindestangen ab einer Schlankheit $\lambda = 40$ auf Null ab, so daß eine weitere Steigerung der Einklebelänge keinen Zuwachs an Tragfähigkeit bringt, siehe auch Abschnitt [2.2.2.1](#) auf Seite [11](#). Für einen Gewindestangendurchmesser von 16 mm ergibt sich eine Einklebelänge von $l = 16 \cdot 40 = 640$ mm. Die damit erreichbare charakteristische Tragfähigkeit von 129,8 kN ist zu gering, um die Zugkraft mit vier Gewindestangen abtragen zu können. Deswegen werden Stangen mit 20 mm Durchmesser verwendet. Die maximale Stangenlänge beträgt nun $l = 20 \cdot 40 = 800$ mm. Die Abstände der Gewindestangen betragen

$$\begin{array}{ll} \text{untereinander} & 80 \text{ mm} = 4 \cdot d, \\ \text{zum Rand} & 40 \text{ mm} = 2 \cdot d \end{array}$$

und entsprechen damit dem Vorschlag von [RIBERHOLT \(1986\)](#).

Zur Abtragung der Zugkraft bei schließendem Moment werden vier Gewindestangen, zur Abtragung der Umlenkkraft zwei Gewindestangen eingeklebt.

5.2.5.2 Verstärkung des Hirnholzes

Das Versagen der Gewindestangen wird durch ein Aufspalten des umgebenden Holzes infolge Querkzugbeanspruchung begünstigt. Die Querkzugbeanspruchung resultiert aus der Ringzugbeanspruchung durch die Lasteinleitung der Gewindestange in das Holz, siehe auch [MOERS \(1981\)](#), und durch eine unvermeidbare Querkbelastung der Gewindestangen.

Nach FE-Berechnungen von [MÜLLER UND ROTH \(1991\)](#) treten die maximalen Querkzugspannungen am Ende der Gewindestange auf, am Anfang der Gewindestange sind die Querkzugspannungen geringer. Das aus der Querkzugbeanspruchung resultierende Aufspalten des Holzes kann durch die Anordnung einer Querkzugbewehrung, analog einer Bewehrung im Stahlbetonbau, verhindert werden. Da die Aufspaltgefahr in der freien Hirnholzfläche durch Trocknungsrisse und verminderte Spaltfestigkeit größer ist, liegt es nahe die Querkzugbeweh-

rung in die Nähe des freien Hirnholzendes zu legen. In Versuchen stellten [MÜLLER UND ROTH \(1991\)](#) eine Steigerung der Tragfähigkeit zwischen 19% und 32% fest.

Die günstige Wirkung auf das Verhalten und die Tragfähigkeit der Verbindung wurde von [DENG \(1997\)](#) in Auszugsversuchen von eingeklebten Gewindestangen bestätigt. [CENCI UND PEDRAGLIO \(1998\)](#) setzten die Technik bei den Verbindungen des „L'Aquilone di Chicco“ ein, siehe Abschnitt 2.3 auf Seite 26.

Bei Körper 2 erfolgt die Verstärkung der Hirnholzfläche am Eintritt der Zugstangen in den Körper durch dünne, kurze Gewindestangen, die quer zu den tragenden Stangen eingeklebt werden, siehe Abbildung 5.8.

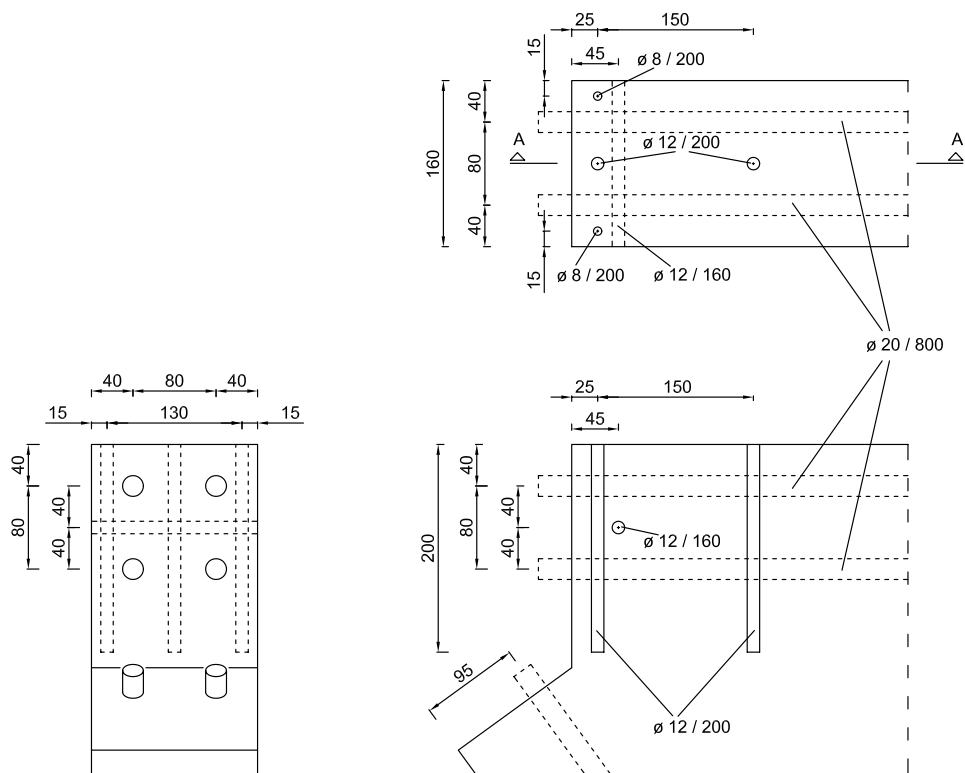


Abbildung 5.8: Verstärkung des Eintrittsbereichs der Zuggewindestangen (Versuchskörper 2)

5.2.6 Stahlteile

5.2.6.1 Allgemeines

Die Stahlteile sammeln die Kräfte aus dem Holzquerschnitt und übertragen die Resultierende über den Gehrungsschnitt. Sie sollen einfach zu fertigen sein und eine zügige Montage, sowohl am Holzquerschnitt als auch später auf der Baustelle, ermöglichen.

Die Verbindung der Stahlteile über den Gehrungsschnitt erfolgt durch seitlich angebrachte Laschen, die durch eine Bolzenverbindung mit den Stahlteilen verbunden werden. Diese Verbindung läßt sich auf der Baustelle einfach erstellen und entkoppelt gleichzeitig die Stahlteile der beiden Rahmenschenkel, so daß keine Momente oder Querkkräfte übertragen werden. Durch die erforderlichen Randabstände der Bolzenverbindung werden die Stahlteile jedoch größer als ein durchgehendes Stahlteil.

Wird die Rahmenecke nur durch eine einsinnige Belastung, z.B. nur durch ein schließendes Moment, beansprucht, so übertragen die Stahlteile eine Zugkraft in die Zugstangen und eine Druckkraft in die Querstangen. In diesem Fall genügt ein Schraubanschluß mit einer Mutter, der nur in eine Richtung Kraft überträgt. Sollen dagegen auch bei öffnender Momentenbeanspruchung Kräfte durch die Gewindestangen übertragen werden, muß der Anschluß der Stahlteile sowohl Zug- als auch Druckkräfte in die Gewindestangen einleiten können. Dies kann durch die Befestigung der Stahlteile mit gekonterten Muttern erreicht werden.

Die Konterung mit zwei Muttern je Stange erlaubt es, innerhalb gewisser Grenzen Toleranzen auszugleichen. Die Verbindung der Stahlteile zu den Stahllaschen kann dann mit Paßbolzen ausgeführt werden, die die spielfreie Weiterleitung von Zug- und Druckkräften – auch als Wechselbeanspruchung – ermöglichen. Sind größere Toleranzen aufzunehmen, müssen die Stahllaschen angepaßt werden.

Die Befestigung mit gekonterten Muttern erfordert, daß die Gewindestangen durch die Stahlteile hindurchgesteckt werden. In Einbausituationen, in denen Gewindestangen aus mehreren Richtungen an die Stahlteile angeschlossen werden müssen, ist das nicht immer möglich. In diesem Fall können auf die Gewindestangen aufgeschraubte Gewindemuffen mit eingeklebt werden. Zur Befestigung der Stahlteile werden dann Schrauben durch diese hindurch in die Gewindemuffe eingeschraubt.

Neben den konstruktiven Eigenschaften soll die Verbindung auch brandschutztechnischen Anforderungen genügen. Dazu ist es nötig, Stahlteile vor direktem Brandangriff zu schützen. Dies kann durch eine Bekleidung, einen Anstrich oder durch das Anordnen innerhalb des Holzquerschnitts geschehen.

Ein duktilen Versagen der Verbindung kann erreicht werden, indem die Stahlteile so konstruiert werden, daß der Stahl plastiziert, bevor die Tragfähigkeit des Holzes oder der Gewindestangen erreicht wird. Dies ist nur möglich, wenn der Stahl keine Überfestigkeiten aufweist, aufgrund denen Plastizieren später als erwartet eintritt.

Die erforderliche Stahldicke t_v zur Übertragung der Schubkraft ist

$$t_v = \frac{V}{b \cdot \sigma_r / \sqrt{3}}. \quad (5.2)$$

mit: t_v erforderliche Blechdicke zur Schubabtragung

V Schubkraft

b Breite des Bleches

σ_r Fließspannung

Aus der Gleichung zur Bestimmung des plastischen Moments unter Berücksichtigung der Querkraft,

$$M = (t_v + 2 \cdot t_m/2) \cdot b \cdot t_m \cdot \sigma_r, \quad (5.3)$$

mit: M Moment

t_m erforderliche Blechdicke zur Abtragung der Zug- bzw. Druckkomponente des Momentes

kann dann die erforderliche Dicke t_m zur Übertragung des Moments ermittelt werden. Die erforderliche Gesamtdicke des Bleches beträgt

$$t = t_v + 2 \cdot t_m. \quad (5.4)$$

mit: t erforderliche Blechdicke des Stahlteils

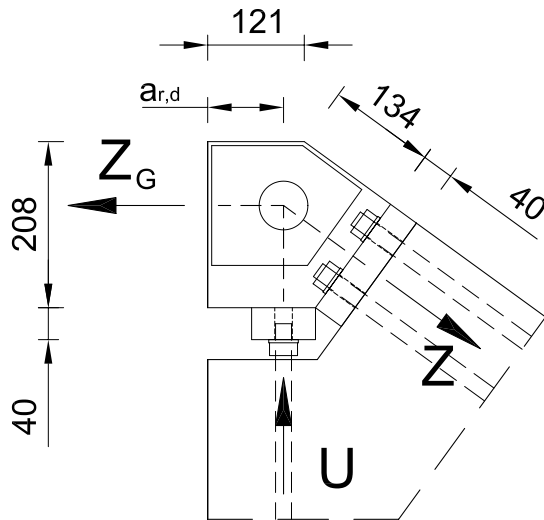
Die Stahlteile sollen im Versuch nicht versagen, sie werden daher mit Sicherheitsbeiwerten bemessen. Die Stahlteile werden auf die Kraft ausgelegt, die beim Ansatz von 95%-Fraktilwerten der Holzfestigkeiten zum Bruch des Holzquerschnitts führt. Entsprechend sind die Stahlteile im Vergleich zum Holzquerschnitt überdimensioniert. Daraus ergeben sich große Bauteildicken, Abmessungen und Randabstände. In der Praxis fallen die Stahlteile im Vergleich zum Holzquerschnitt kleiner aus.

5.2.6.2 Stahlteil an der äußeren Ecke

Über das Stahlteil werden die Gewindestangenkräfte mit der über den Gehrungsschnitt übertragenen Zugkraft ins Gleichgewicht gesetzt. Jede Gewindestangengruppe wird an eine Kopfplatte aus Stahl angeschlossen. Diese Platten werden durch einen in der Mittellinie der Gewindestangen liegenden Steg verbunden, siehe Abbildung 5.9(b). Der innenliegende Stahlsteg ermöglicht einen einfachen Anschluß und kann zu Brandschutzzwecken ummantelt werden.

An das Stahlteil werden über einen Bolzen beidseitig Laschen angeschlossen, die die Kraft über den Gehrungsschnitt übertragen. Diese Verbindung entkoppelt die Stahlteile der beiden Holzquerschnitte und erfüllt damit die Voraussetzung der reinen Normalkraftübertragung, wie sie in der Modellbildung in Kapitel 6 angenommen wird.

Das Bolzenloch ist im Schnittpunkt der Mittellinien der Gewindestangen angeordnet, siehe Abbildung 5.9(a). Auf diese Weise soll eine gleichmäßige Aufteilung der Kraft auf die Gewindestangen sichergestellt werden. Durch die unvermeidliche Verformung der Gewindestangen und die damit verbundene Verdrehung des Stahlteils ist eine zentrische Lasteinleitung in Gewindestangengruppen mit mehr als einer Reihe nicht möglich. Im Querschnitt außenliegende Gewindestangen erhalten immer höhere Belastungen als weiter innen liegende Gewindestangen, siehe auch Abschnitt 5.6.5 auf Seite 131.



(a) Skizze



(b) Foto

Abbildung 5.9: Stahlteil zum Anschluß der Gewindestangen

Die erforderlichen Randabstände der Bolzenverbindung und der Gewindestangengruppen bestimmen die Lage des Bolzenlochs und damit die Abmessungen des Stahlteils. Beispielsweise bestimmt der aufgrund der Lochleibung erforderliche Randabstand $a_{r,d}$ der Bolzenverbindung den Abstand der Quergewindestange zum Gehrungsschnitt, siehe Abbildung 5.9(a).

Durch die Überdimensionierung des Stahlteils im Verhältnis zum Holzquerschnitt steigen dessen erforderliche Abmessungen. Um die Randabstände der Bolzenverbindung gering zu halten, wird die Blechdicke im Bereich des Bohrlochs durch aufgeschweißte Bleche erhöht, siehe Abbildung 5.9.

Ein großes Lochspiel in der Bolzenverbindung erlaubt eine einfache Montage und den Ausgleich von Toleranzen innerhalb der Grenzen des Lochspiels. Es sind aber große Randabstände erforderlich, da mit dem Lochspiel auch die Beanspruchung des Stahlteils steigt. Die Verbindung entspricht der eines Augenstabes, siehe auch [DIN 18800 \(1990\)](#) und [PETERSEN \(1988\)](#).

Bei geringem Lochspiel können keine Montageungenauigkeiten aufgefangen werden. Die Beanspruchung des Stahlteils durch die Bolzenverbindung und damit die erforderlichen Randabstände sind jedoch geringer als bei großem Lochspiel. Zudem ist die Verbindung zur Aufnahme wechselnder Beanspruchung geeignet, da bei einem Lastwechsel von schließendem zu öffnendem Moment kein Lochspiel überwunden werden muß. Diese Variante ist für die alleinige Kraftübertragung durch Stahlteile, siehe Abschnitt 6.5 auf Seite 156, geeignet.

5.2.6.3 Stahlteil an der inneren Ecke

Bei Versuchskörper 2 wird an der Innenecke ein Schlitzblech eingebaut, siehe Abbildung 5.10 und 5.11, das die Übertragung der Zugkraft bei öffnendem Moment sicherstellt. Bei schließendem Moment verstärkt es den Druckbereich.

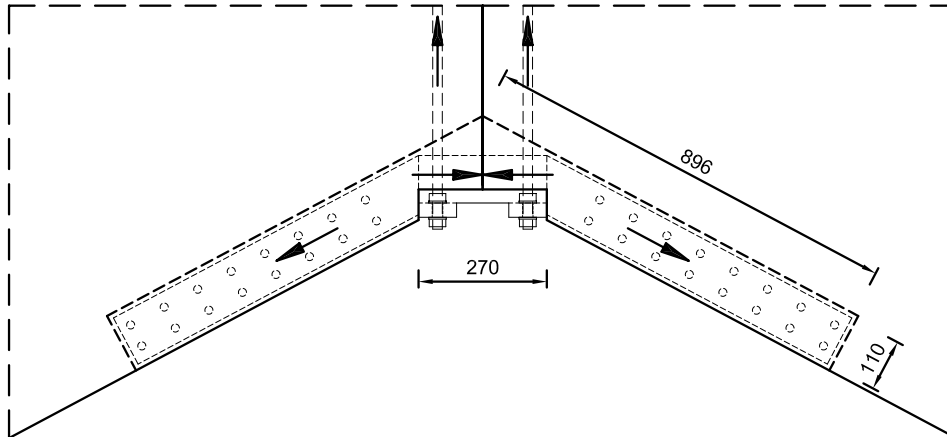


Abbildung 5.10: Schlitzblech zur Verstärkung der Innenecke



Abbildung 5.11: Schlitzblech als Bohrschablone für die Stabdübellöcher

Das Blech folgt dem inneren Trägerrand. Es wird durch Stabdübel mit den Trägerhälften verbunden. Der Anschluß an die Quergewindestangen durch gekonterte Muttern stellt die Abtragung der Umlenkraft sicher, siehe Abbildung 5.12.

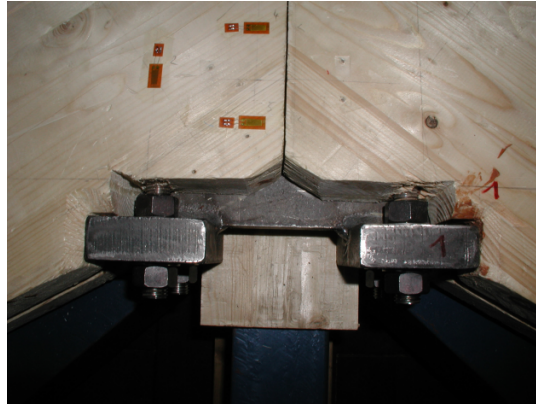


Abbildung 5.12: Anschluß des Schlitzbleches an die Quergewindestangen

Um die Montage zu vereinfachen kann das Stahlteil an der Innenecke wie das Stahlteil an der äußeren Ecke geteilt ausgeführt werden. Die Übertragung der Druckkraft erfolgt dann durch Gewindestangen. Auf eine Voute sollte verzichtet werden, um ein vorzeitiges Querkzugversagen auszuschließen, siehe Abschnitt 4.5.5 auf Seite 98. Eine mögliche Ausführung der Verbindung ist in Abbildung 5.13 zu sehen.

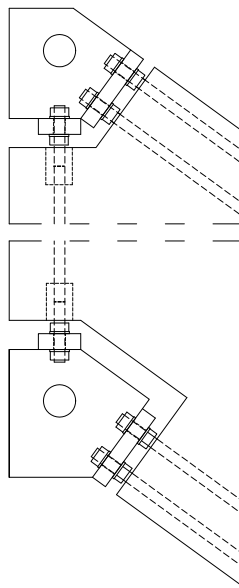


Abbildung 5.13: Stahlteile und Gewindestangen in der Zug- und Druckzone

5.3 Tragfähigkeiten

5.3.1 Holzquerschnitt

Die Tragfähigkeit des Holzquerschnittes wird mit den 5%- und den 95%-Fraktilwerten für die Festigkeitsklasse BS16h ermittelt. Die 5%-Fraktilwerte entsprechen den charakteristischen Festigkeitswerten, die 95%-Fraktilwerte berechnen sich unter Annahme einer Gauss'schen Normalverteilung der Festigkeitswerte mit einem Variationskoeffizienten von rund 12% nach Gleichung (5.5). Damit ergeben sich die in Tabelle 5.1 dargestellten Spannungen.

$$f_{95\%} = \frac{f_{5\%}}{0.8 \cdot 0.8} \quad (5.5)$$

Tabelle 5.1: Angesetzte Spannungen (Festigkeitsklasse BS16h) nach E DIN 1052 (1999)

Spannung [N/mm ²]	5%-Fraktile	95%-Fraktile
$f_{m,g}$	32.00	50.00
$f_{t,0,g}$	22.50	35.16
$f_{t,90,g}$	0.50	0.78
$f_{c,0,g}$	29.00	45.31
$f_{c,90,g}$	3.30	5.16
$f_{v,g}$	3.80	5.94

Die Belastung der Rahmenecke durch die Prüfzylinderkraft F , siehe Abbildung 5.14, erzeugt im Gehrungsschnitt die auf die Trägerachse bezogenen Schnittgrößen

$$N = -F \cdot \cos 36^\circ, \quad (5.6a)$$

$$V = -F \cdot \sin 36^\circ \quad \text{und} \quad (5.6b)$$

$$M = -F \cdot h_m. \quad (5.6c)$$

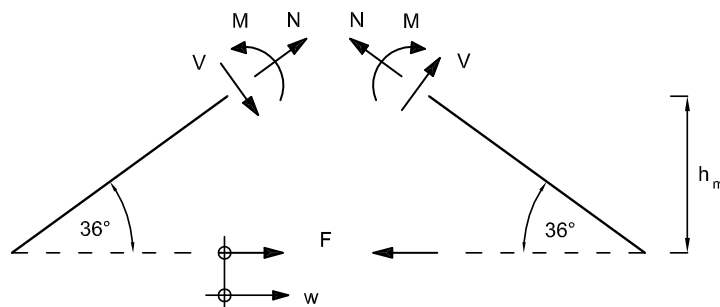


Abbildung 5.14: Kolbenkraft und Schnittgrößen im Gehrungsschnitt

Unter Berücksichtigung der Spannungscombination am schräg angeschnittenen Rand im Bereich der Voute ergeben sich die in Tabelle 5.2 dargestellten minimalen und maximalen

Pressenkräfte und die von diesen hervorgerufenen Schnittgrößen im rechnerischen Bruchzustand des Holzquerschnittes mit den Abmessungen $16 \cdot 70 \text{ cm}^2$. Die erwartete Bruchlast liegt für schließende Belastung im Bereich von 360.5 kN bis 563.3 kN, für öffnende Belastung im Bereich von -191.7 kN bis -299.5 kN. Zum Vergleich ist das vom Querschnitt ohne Voute bei reiner Biegebeanspruchung aufnehmbare Moment angegeben. Teilt man das Moment durch den Hebelarm h_m erhält man die zugehörige Pressenkraft.

Tabelle 5.2: Pressenkräfte und Schnittgrößen bei Ansatz der 5%- und 95%-Fraktilwerte der Festigkeiten nach Tabelle 5.1

Beanspruchungsart		Pressenkraft [kN]	Querkraft [kN]	Normalkraft [kN]	Moment ¹⁾ [kNm]
Belastbarkeit im Voutenbereich (schräg angeschnittener Rand)					
schließend ²⁾	95%	563.3	331.10	455.72	1298.61
	5%	360.5	211.90	291.65	831.08
öffnend ³⁾	5%	-191.7	-112.68	-155.09	-441.94
	95%	-299.5	-176.04	-242.30	-690.45
Belastbarkeit im Normalquerschnitt bei reiner Biegung					
öffnend und schließend	95%	283,3	-	-	653.33
	5%	181,3	-	-	418.13
¹⁾ $h_m = 230.6 \text{ cm}$ (Versuchskörper 1) $\approx h_m = 228.6 \text{ cm}$ (Versuchskörper 2, $\Delta = -0.8\%$) ²⁾ Voute im Biegedruckbereich ³⁾ Voute im Biegezugbereich					

5.3.2 Gewindestangen

5.3.2.1 Allgemeines

Ein Versagen der Gewindestangen soll erst bei fortgeschrittenem Versuchsverlauf möglich sein, daher werden der Querschnitt und die Verklebung der Gewindestangen mit charakteristischen Werten bemessen.

5.3.2.2 Querschnitt

Die charakteristische Last, ab der eine Gewindestange M20, 10.9 fließt, beträgt

$$F_{y,b,k} = A_{sp} \cdot f_{y,b,k} = 245 \cdot 900 \cdot 10^{-3} = 220.5 \text{ kN}. \quad (5.7)$$

Die charakteristische Bruchlast beträgt mit

$$\sigma_{R,k} = \min \begin{cases} \sigma_{1,R,k} = f_{y,b,k}/1.1 = 900/1.1 = 818 \text{ N/mm}^2 \\ \sigma_{2,R,k} = f_{u,b,k}/1.25 = 1000/1.25 = 800 \text{ N/mm}^2 \end{cases} \quad (5.8)$$

$$F_{u,b,k} = A_{sp} \cdot \sigma_{R,k} = 245 \cdot 800 \cdot 10^{-3} = 196.0 \text{ kN}. \quad (5.9)$$

5.3.2.3 Verklebung

Die Gewindestangen werden mit einem gefüllten Resorcinklebstoff eingeklebt, der aufgrund seiner Elastizität gerade bei langen Einklebelängen hohe Haftfestigkeiten und damit hohe Verankerungskräfte zuläßt. Für diesen Klebstoff berechnet sich die Haftfestigkeit der Klebefuge nach [AICHER \(2001a\)](#) zu

$$f_{v,k} = \min \left(5,42 \cdot 12 \cdot d_h^{-0,25} \cdot \left(\frac{l_g}{d_h} \right)^{-0,12} \right) \text{ N/mm}^2 \quad (5.10)$$

mit: d_h Durchmesser des Bohrlochs [mm]
 l_g Einklebelänge der Gewindestange [mm]

Für eine Gewindestange M20 mit 800 mm Einklebelänge, die in ein Bohrloch mit 21 mm Durchmesser eingeklebt wird, beträgt die charakteristische Haftfestigkeit damit

$$f_{v,k} = 12 \cdot 21^{-0,25} \cdot \left(\frac{800}{21} \right)^{-0,12} \text{ N/mm}^2 = 3,62 \text{ N/mm}^2 \leq 5,42 \text{ N/mm}^2. \quad (5.11)$$

Die charakteristische, von einer Gewindestange aufnehmbare Kraft ist damit

$$F_{g,k} = f_{v,k} \cdot A = f_{v,k} \cdot l_g \cdot d_g \cdot \pi = 3.62 \cdot 800 \cdot 21 \cdot \pi \cdot 10^{-3} = 191.2 \text{ kN} \quad (5.12)$$

Nach [BLASS UND LASKEWITZ \(1999\)](#) muß die Haftfestigkeit bei Unterschreitung der Mindestabstände der Gewindestangen verringert werden, um ein Aufspalten des Holzquerschnitts zu vermeiden. Die Mindestabstände betragen:

- zum Rand $2.5d = 2.5 \cdot 20 = 50 \text{ mm}$ und
- untereinander $5d = 5 \cdot 20 = 100 \text{ mm}$.

Vorhanden sind

- zum Rand $2d = 2 \cdot 20 = 40 \text{ mm}$ und
- untereinander $4d = 4 \cdot 20 = 80 \text{ mm}$.

Nach Gleichung (2.2) auf Seite 19 kann die Abminderung wie folgt berechnet werden:

$$\chi = 0.128 \cdot \frac{a}{d_g} + 0.679 \leq 1 \quad \Rightarrow \quad \chi = 0.128 \cdot 2.0 + 0.679 = 0.935 \leq 1. \quad (5.13)$$

Die abgeminderte, charakteristische, von einer Gewindestange aufnehmbare Kraft ist damit

$$F_{g,k} = 0.935 \cdot 191.2 \text{ kN} = 178.8 \text{ kN} \quad (5.14)$$

5.4 Meßwerterfassung

Die aufgenommenen Messwerte sind:

- Kolbenkraft und -weg,
- Verschiebungen

Der Öffnungswinkel des Gehrungsschnitts wird über die Relativverschiebung des inneren Eckpunktes zum äußeren Eckpunkt gemessen (w_1 und w_2 in Abbildung 5.15).

Bei Körper 2 wird zusätzlich die Verschiebung des an die Gewindestangen angeschlossenen Stahlteils gemessen (w_3 bis w_5 in Abbildung 5.15(b)).

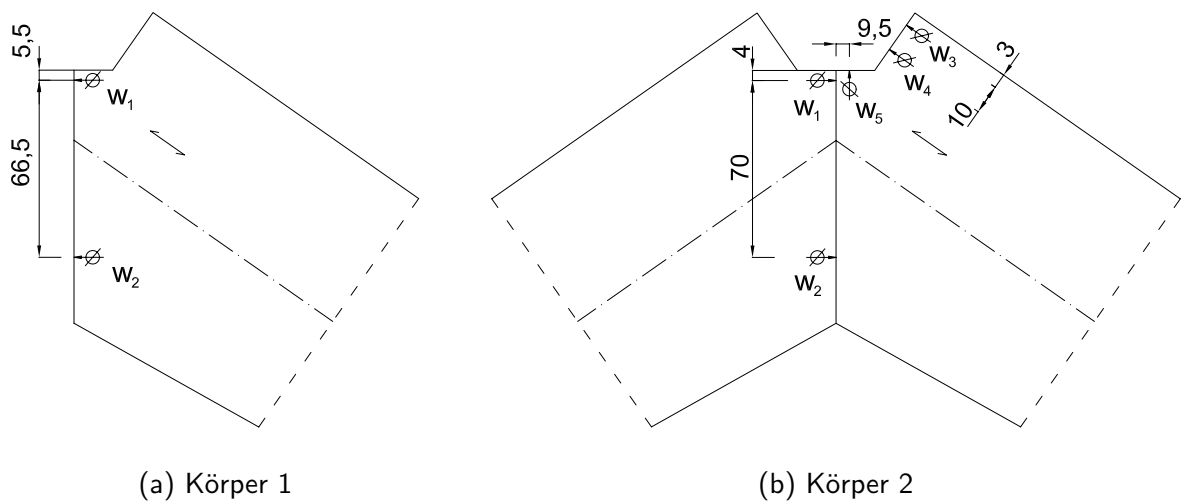


Abbildung 5.15: Verschiebungsmessung

- Dehnungen

Die Dehnungsmessung erfolgt mit Dehnmeßstreifen, deren Lage auf den Versuchskörpern in den Abbildungen Abbildung 5.16 und Abbildung 5.17 angegeben ist. Die bei den einzelnen DMS stehenden Zahlenpaare geben die Position der DMS mit Bezug auf die ebenfalls angegebenen Koordinatensysteme x/y und \bar{x}/\bar{y} an.

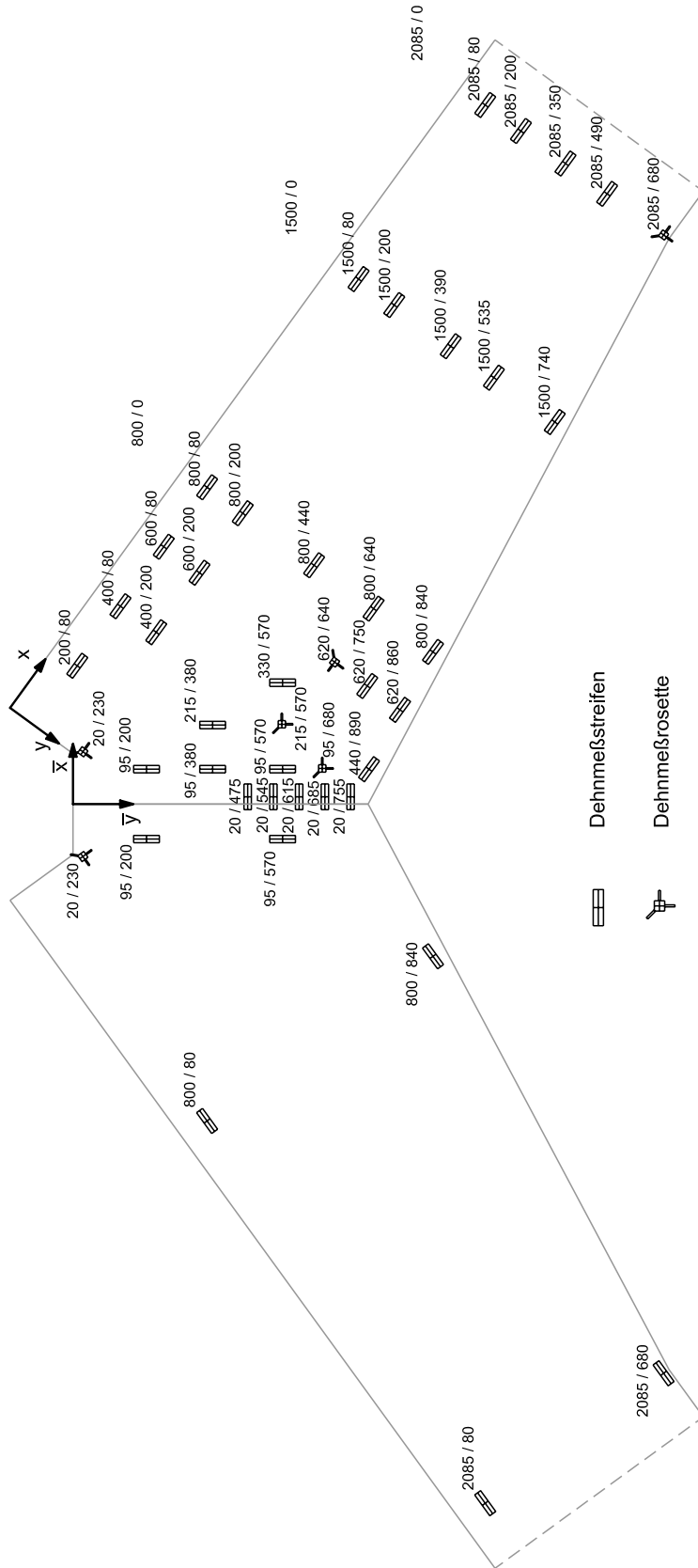


Abbildung 5.16: Anordnung der Dehnmeßstreifen auf Versuchskörper 1

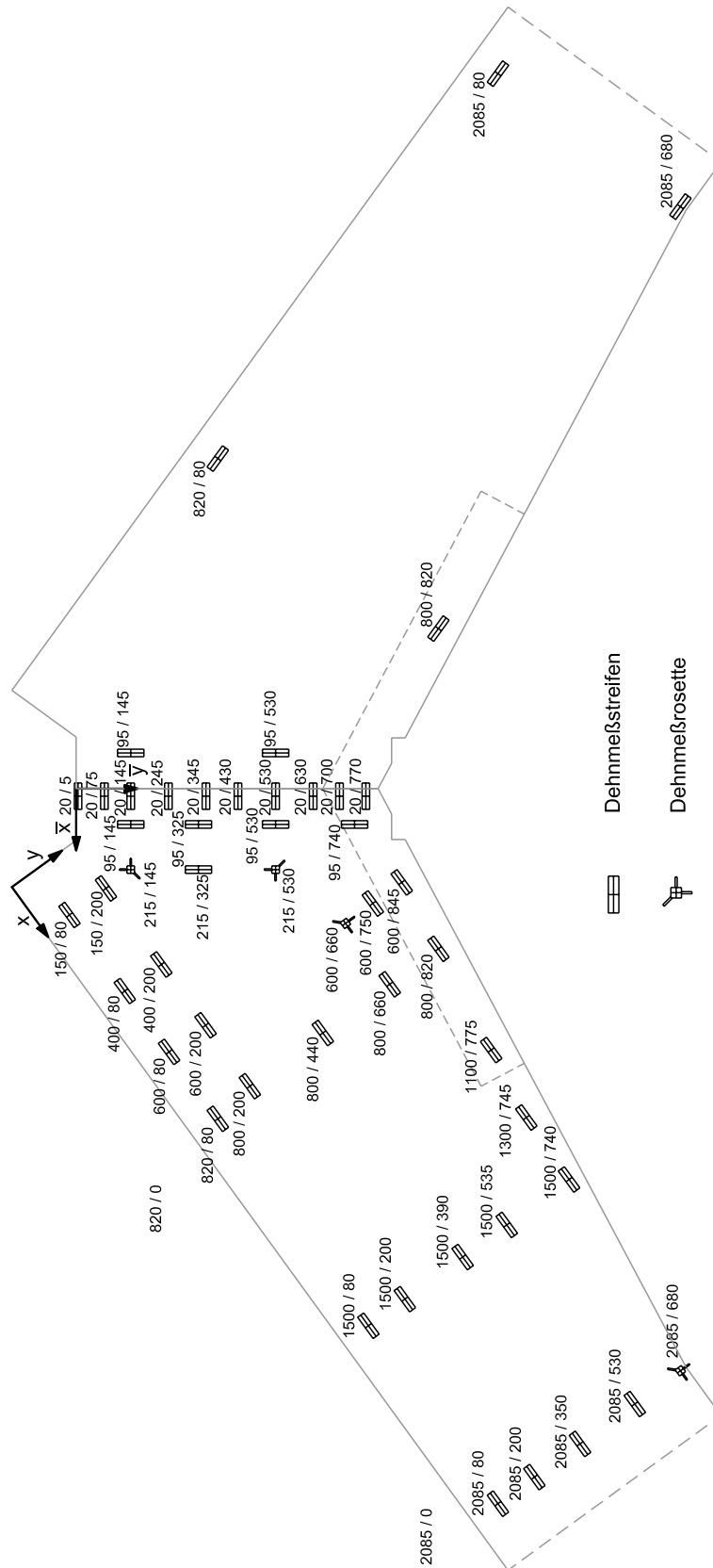


Abbildung 5.17: Anordnung der Dehnmessstreifen auf Versuchskörper 2

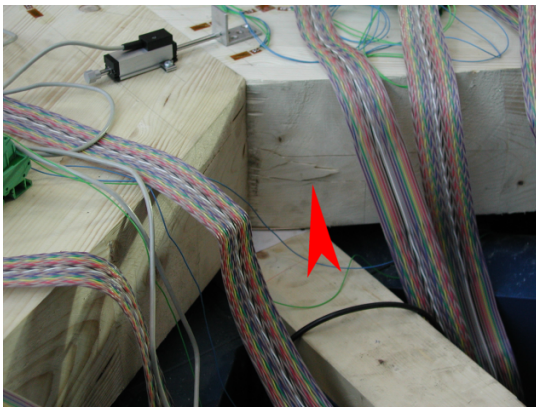
5.5 Versuchsdurchführung

5.5.1 Allgemeines

Versuchskörper 1 wird mit schließendem, **Versuchskörper 2** zusätzlich mit öffnendem Moment geprüft. Die Belastungsgeschwindigkeit beträgt 0.01 mm/s.

5.5.2 Versuchskörper 1

Das Holz erfährt infolge der unverstärkten Ausführung der Innenecke hohe Druckspannungen. Bei 50 kN kündigt sich das spätere Versagen durch das Ablösen eines kleinen Lamellenstücks an, siehe Abbildung 5.18(a). Während der folgenden Laststeigerung platzt ein Teil der Lamelle komplett ab, siehe Abbildung 5.18(b).



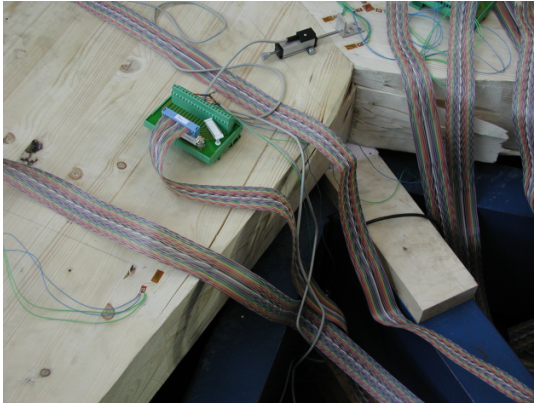
(a) Erste Anzeichen des Versagens an der Rahmeninnenseite



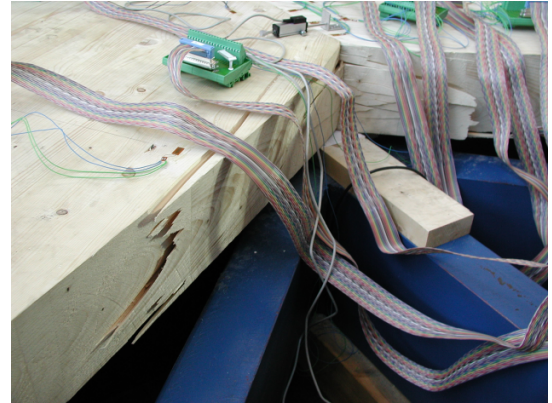
(b) Abplatzen des ersten Lamellenstücks im Druckbereich

Abbildung 5.18: Beginn des Versagens des Versuchskörpers 1

Bei 164.8 kN Pressenkraft entsteht ein Riß am bisher unbeschädigten Schenkel, siehe Abbildung 5.19(a). Nach weiterer Verformungszunahme bei konstanter Kraft platzt dieser Teil der Voute ab, siehe Abbildung 5.19(b), verbunden mit einem Lastabfall auf 150.7 kN. Im weiteren Versuchsverlauf versagt schrittweise die Druckzone, siehe Abbildung 5.20. Die damit verbundene Abnahme des inneren Hebelarms hat eine Vergrößerung der inneren Kräfte zur Folge. Schließlich kann die Querdruckgewindestange die Umlenkraft nicht mehr aufnehmen und wird in den Körper hineingedrückt, siehe Abbildung 5.21. Die damit verbundene Verformung des Stahlteils belastet die Zuggewindestangen durch eine Querkraft und bringt in Verbindung mit der Ringzugwirkung aus der hohen Normalkraft die Lamelle oberhalb der Stangen zum Abplatzen, siehe Abbildung 5.22. Damit versagt auch die Verbindung zwischen Gewindestange und Holz.

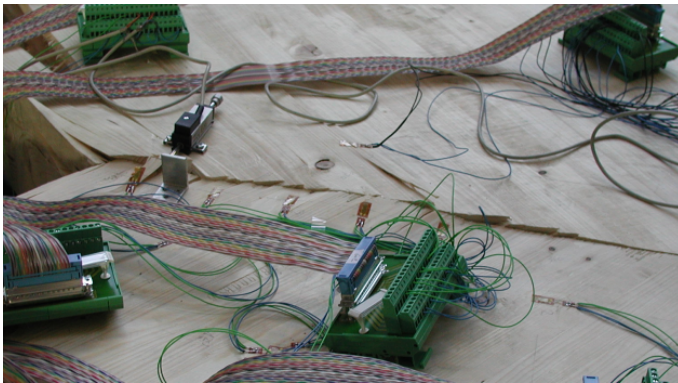


(a) Trennriss an der Rahmeninnenseite



(b) Abplatzen des Lamellenstücks im Druckbereich

Abbildung 5.19: Erreichen der Traglast



(a) Oberfläche des Druckbereichs am Gehrungsschnitt während der Belastung



(b) zerstörter Druckbereich

Abbildung 5.20: Versagen im Druckbereich

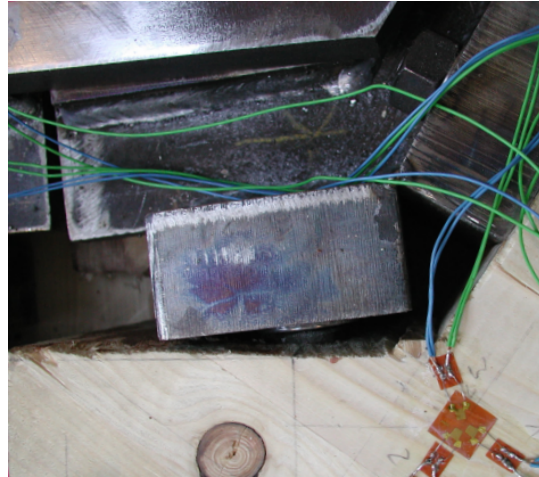
5.5.3 Versuchskörper 2

Die Prüfung des zweiten Versuchskörpers beginnt mit einer öffnenden Belastung bis 25 kN Kolbenkraft, während der keine besonderen Beobachtungen gemacht werden. Nach der Belastung sind an den Stabdübeln am Ende des Schlitzbleches kleine faserparallele Risse zu erkennen.

Da der Gehrungsschnitt infolge Fertigungsungenauigkeiten im Bereich der Innenecke keinen vollflächigen Kontakt hat, werden dort zur besseren Druckübertragung bei schließendem Moment dünne Bleche eingeschoben, siehe [Abbildung 5.23](#).



(a) vor Belastungsbeginn



(b) nach Überschreiten der Traglast

Abbildung 5.21: Oberes Ende der Querstange an Versuchskörper 1



(a) abgeplatzt Holz



(b) sichtbare Gewindestange

Abbildung 5.22: Gewindestangenbereich von Versuchskörper 1 nach Überschreiten der Traglast

Bei der anschließenden Belastung mit schließendem Moment sind während der Laststeigerung keine Auffälligkeiten zu beobachten. Der Kurzschluß der Umlenkraft zwischen Stahlteil und Schlitzblech verhindert ein Eindringen der Quergewindestange in den Körper. Bei einer Kolbenkraft von 303.9 kN versagt die Verklebung der Zuggewindestangen schlagartig. Alle Stangen werden aus dem Holz herausgezogen, siehe Abbildung 5.24.

Der Körper ist bis auf die Zuggewindestangen unbeschädigt, so daß eine weitere Belastung durch öffnendes Moment bis zum Bruch erfolgen kann. Die an die Zuggewindestangen an-



Abbildung 5.23: Im Druckbereich in den Gehrungsschnitt eingeschobene Bleche

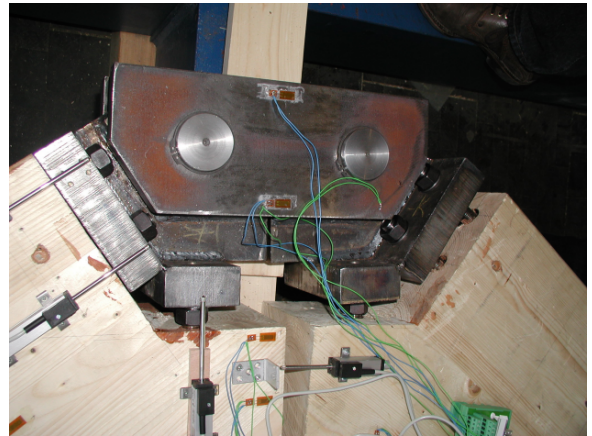
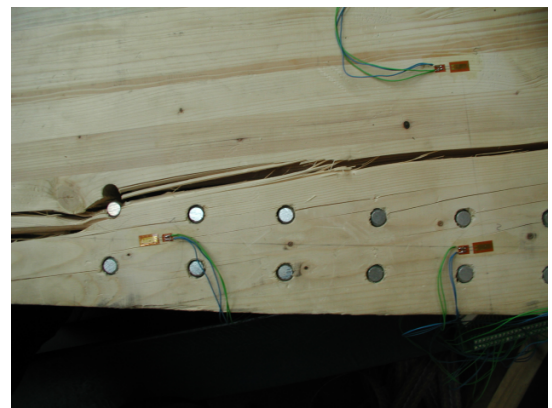


Abbildung 5.24: Versagen der Gewindestangen infolge Belastung durch schließendes Moment (Versuchskörper 2)

geschlossenen Stahlteile werden entfernt, da sie nicht zur Kraftübertragung beitragen. Anschließend wird der Körper wieder in die Ausgangsposition zurückgedrückt. Die Vorbelastung des Schlitzbleches macht hierfür eine Kraft von 13.2 kN erforderlich. Bei der anschließenden Belastung bricht ein Teil der Voute mit dem Stahlteil nach einer Laststeigerung um 35.4 kN bei einer Pressenkraft von 48.6 kN aus, siehe Abbildung 5.25(a).



(a) Ausbrechen der Voute



(b) Querzugrisse

Abbildung 5.25: Querzugversagen im Bereich des Schlitzbleches bei zweiter Belastung durch öffendes Moment (Versuchskörper 2)

Das Stahlteil behindert die Verformung der Rahmenschenkel und belastet den Kräfteinleitungsbereich zusätzlich zur Längskraft durch eine Querzugkraft. In Abbildung 5.25(b) sind zahlreiche in Faserrichtung verlaufende Risse infolge der Querzugbeanspruchung des Trägers zu erkennen.

5.6 Versuchsauswertung

5.6.1 Traglasten

Die Traglasten der beiden Versuchskörper (Lippert 1, 2) sind in Tabelle 5.3 den Traglasten verschiedener Versuche von Rahmenecken für schließendes Moment zusammengestellt. Aus den Versuchen von KOLB (1968) wurden zum Vergleich Rahmenecken mit einfachen Keilzinkenverbindungen (Kolb 1 – 3) ausgewählt. Ebenfalls angegeben sind die von AICHER U. A. (1997) untersuchten Rahmenecken. Dabei ist Aicher 1 eine unverstärkte, keilgezinkte Rahmenecke. Aicher 2 ist eine mit eingeklebten Stahlblechen im Zug- und Druckbereich verstärkte Rahmenecke, und Aicher 3 und 5 sind Rahmenecken mit eingeklebten Gewindestangen.

Die Berechnung der Bruchschnittgrößen erfolgt für die Rahmenecken von Lippert und Aicher gemäß Gleichung (5.6) auf Seite 113. Der hierzu notwendige Winkel α ist in der Tabelle mit angegeben. Für die Rahmenecken nach Kolb wird das in KOLB (1968) beschriebene statische System verwendet.

Aus den Bruchschnittgrößen werden die Bruchspannungen mit dem ungeschwächten Querschnitt der jeweiligen untersuchten Rahmenecke berechnet. Bei der Berechnung des Ausnutzungsgrades ψ wird die in Gleichung (5.15) angegebene lineare Momenten-Normalkraft-Interaktion angenommen.

$$\psi = \frac{N/A}{f_{c,0,k}} + \frac{M/W}{f_{m,k}} \quad (5.15)$$

Die angesetzten charakteristischen Festigkeiten betragen nach E DIN 1052 (1999) für die Holzgüte

$$\begin{aligned} \text{BS11h: } & f_{m,k} = 24 \text{ N/mm}^2; \quad f_{c,0,k} = 24 \text{ N/mm}^2, \\ \text{BS16h: } & f_{m,k} = 32 \text{ N/mm}^2; \quad f_{c,0,k} = 29 \text{ N/mm}^2. \end{aligned}$$

KOLB (1968) gibt an, daß die für die Versuche verwendeten Hölzer *mindestens* der Güteklasse II, entsprechend der heutigen Sortierklasse S10, angehören. Die zugehörige Festigkeitsklasse des Brettschichtholzes ist BS11h. Die ermittelten Ausnutzungsgrade legen nahe, daß die verwendeten Hölzer einer höheren Festigkeitsklasse zuzuordnen sind. Aus diesem Grund sind zum Vergleich die auf die Festigkeitsklasse BS16h bezogenen Ausnutzungsgrade angegeben.

Aus dem Vergleich der verschiedenen Rahmenecken lassen sich folgende Schlußfolgerungen ziehen:

- Die Holzgüte der Versuchskörper von Kolb entspricht BS16h, damit wird ein vergleichbarer Ausnutzungsgrad wie bei der Rahmenecke Aicher 1 erreicht. Die keilgezinkten Rahmenecken liegen alle auf einem Tragfähigkeitsniveau.

- Die von [AICHER U. A. \(1997\)](#) durchgeführten Versuche zeigen, daß sich durch Verstärkung der Rahmenecke mit Stahlblechen oder durch die Ausführung der Verbindung mit eingeklebten Gewindestangen eine Tragfähigkeitssteigerung erzielen läßt.
- Die im Druckbereich unverstärkte Rahmenecke Lippert 1 erreicht die gleiche Traglast wie die von [AICHER U. A. \(1997\)](#) getesteten Rahmenecken.
- Die in der Druckzone zusätzlich verstärkte Rahmenecke Lippert 2 erreicht nahezu die doppelte Traglast wie die Ecken Aicher 2 – 5 und Lippert 1.

Durch Verbindungen mit eingeklebten Gewindestangen lassen sich erhebliche Traglaststeigerungen gegenüber keilgezinkten Rahmenecken erreichen. Insbesondere die zusätzliche Verstärkung der Druckzone ermöglicht es, in der Verbindung die Tragfähigkeit des Holzquerschnitts zu erreichen.

Tabelle 5.3: Vergleich der Bruchlasten verschiedener Rahmenecken

Rahmenecke	Holzgüte	Winkel α	Bruchlast F_u	Bruchschnittgrößen		Bruchspannungen		Ausnutzungsgrad ψ			
	[-]	[Grad]	[kN]	$V_{re,u}$ $-V_{li,u}$	$N_{re,u}$ $N_{li,u}$	$\sigma_{m,u}$	$\sigma_{c,0,u}$	absolut bezogen auf Aicher 1			
				[kN]	[kN]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]			
					M_u			[%]			
					[kNm]						
Versuchsergebnisse nach KOLB (1968)											
Kolb 1	K	BS 11	-	104.0	72.80	104.00	262.08	20.48	1.08	0.898	153.1
Kolb 2	K	BS 11	-	96.0	67.20	96.00	241.92	18.90	1.00	0.829	141.3
Kolb 3	K	BS 11	-	120.0	84.00	120.00	302.4	18.90	1.00	0.829	141.3
Kolb 1	K	BS 16	-	104.0	72.80	104.00	262.08	20.48	1.08	0.677	115.4
Kolb 2	K	BS 16	-	96.0	67.20	96.00	241.92	18.90	1.00	0.625	106.5
Kolb 3	K	BS 16	-	120.0	84.00	120.00	302.4	18.90	1.00	0.625	106.5
Versuchsergebnisse nach AICHER U. A. (1997)											
Aicher 1	K	BS 16	34	107.3	60.00	88.96	226.21	17.87	0.82	0.587	100.0
Aicher 2	G	BS 16	34	160.9	89.97	133.39	348.07	27.32	1.22	0.896	152.7
Aicher 3	G	BS 16	36	170.1	99.98	137.61	387.14	29.81	1.24	0.974	166.1
Aicher 5	G	BS 16	36	158.9	93.40	128.55	366.32	28.21	1.16	0.921	157.0
Eigene Versuche											
Lippert 1	G	BS 16	36	164.8	96.87	133.33	379.92	29.08	1.19	0.950	161.9
Lippert 2	G	BS 16	36	303.9	178.63	245.86	695.24	53.21	2.20	1.738	296.3
K = Keilzinkung, G = Gewindestange											

5.6.2 Steifigkeit

Die Drehfedersteifigkeit des Anschlusses wird als Quotient des Moments und der gegenseitigen Verdrehung der Rahmenschenkel im Gehrungsschnitt berechnet, siehe Gleichung (5.16). Das Moment ist das Produkt aus Kolbenkraft und Hebelarm, siehe auch Abbildung 5.14 auf Seite 113. Die Verdrehung wird aus dem Abstand der Wegaufnehmer w_1 und w_2 und der von ihnen über den Gehrungsschnitt gemessenen, gegenseitigen Verformung der Rahmenschenkel ermittelt.

$$C_\varphi = \frac{M}{\varphi} = \frac{F \cdot h_m}{\varphi} \quad (5.16)$$

mit: C_φ Drehfedersteifigkeit
 M im Gehrungsschnitt wirkendes Moment
 φ Gegenseitige Verdrehung der Rahmenschenkel im Gehrungsschnitt
 $= \arctan((|w_1| + |w_2|)/a_w)$ mit a_w = Abstand der Wegnehmer
 F Kolbenkraft
 h_m Hebelarm der Kolbenkraft zum Gehrungsschnitt

Die so ermittelten Bereiche der Drehfedersteifigkeiten der Anschlüsse sind in Tabelle 5.4 zusammengestellt. Der angegebene Bereich der Drehfedersteifigkeit gilt vom Beginn der Belastung, nach Herstellen des Kraftschlusses, bis zum ermittelten Höchstwert. Zusätzlich wird ein Rechenwert vorgeschlagen, der für die Bemessung verwendet werden kann. Für Versuchskörper 2 läßt sich bei schließender Belastung nur eine pauschale Angabe treffen. Eine Drehfedersteifigkeit von 80000 kNm/rad wird nur kurzzeitig erreicht. Sinnvoll erscheint ein Wert von 70000 kNm/rad, der über einen weiten Bereich mindestens vorhanden ist. Für die 2. öffnende Belastung kann kein sinnvoller Maximalwert ermittelt werden, siehe auch Abbildung 5.29. Der Körper verhält sich anfangs sehr steif, möglicherweise bedingt durch die Momentenbelastung des Schlitzblechs beim Zurückdrücken in die Ausgangsstellung, durch die die Stabdübel ohne Spiel am Holz anliegen. Im Versuchsverlauf nimmt die Steifigkeit stark ab.

In den Abbildungen 5.26 bis 5.29 sind die berechneten Verläufe der Drehfedersteifigkeiten über die Kolbenkraft aufgetragen. Es ist zu erkennen, daß die Drehfedersteifigkeit bei schließender Belastung mit steigender Last zunimmt, da anfängliche Paßungenauigkeiten überwunden sind.

Tabelle 5.4: Bereich der Drehfedersteifigkeiten in [kNm/rad] der Versuchskörper

Versuchskörper	Belastung	Bereich	Rechenwert
1	schließend	22000 – 55000	55000
2	schließend	40000 – 81000	70000
2	1. öffnend	25500 – 32500	30000
2	2. öffnend	38000 – ?	40000

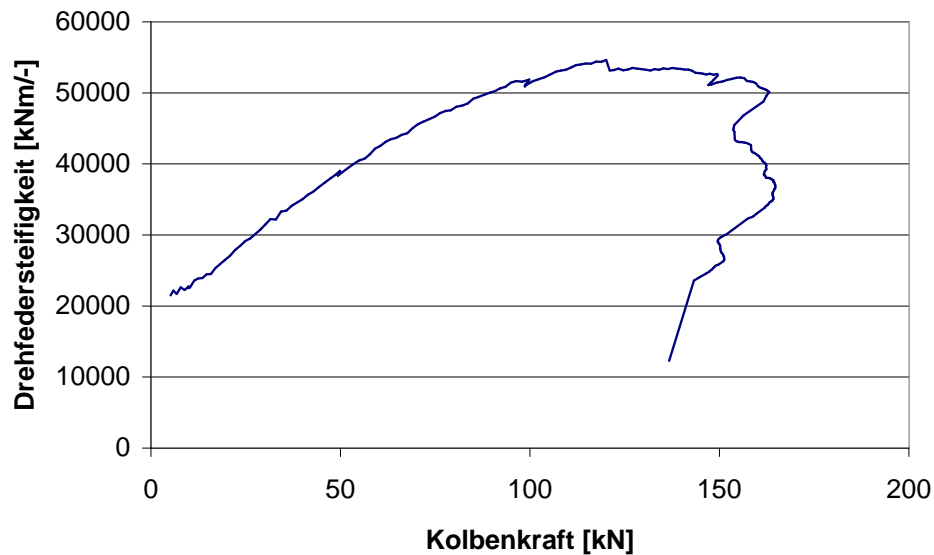


Abbildung 5.26: Drehfedersteifigkeit im Gehrungsschnitt (Versuchskörper 1)

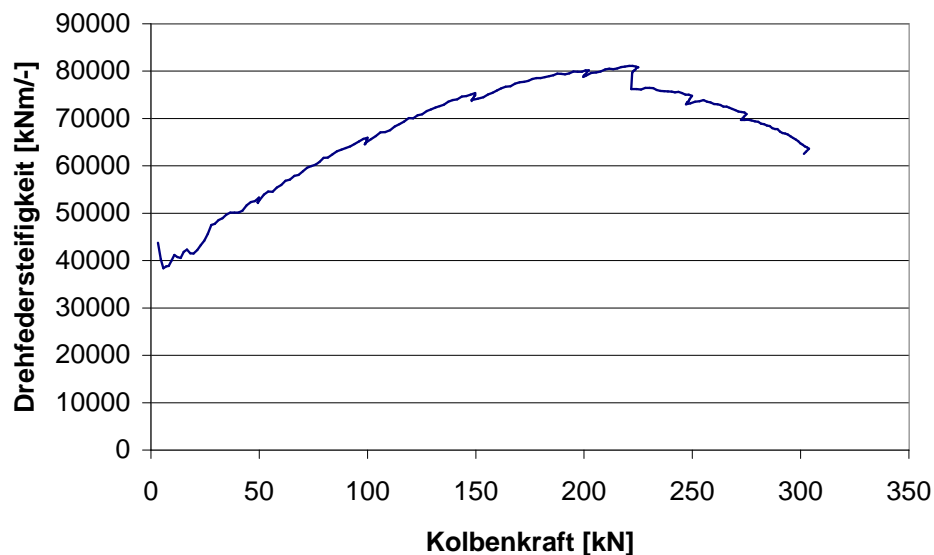


Abbildung 5.27: Drehfedersteifigkeit im Gehrungsschnitt (Versuchskörper 2, schließende Belastung)

5.6.3 Druckzonenhöhe

Aus der Verteilung der Dehnungen im Gehrungsschnitt und der bei Versuchskörper 2 gemessenen Kontakthöhe lassen sich Aussagen zur Lage x_0 der Nulllinie und damit der Höhe der Druckzone treffen, siehe Abbildung 5.30.

In Tabelle 5.5 sind für verschiedene Kolbenlasten Nulllinienlagen angegeben, die aus den gemessenen Dehnungsverteilungen ermittelt wurden. Die Vergrößerung der Druckzone bei

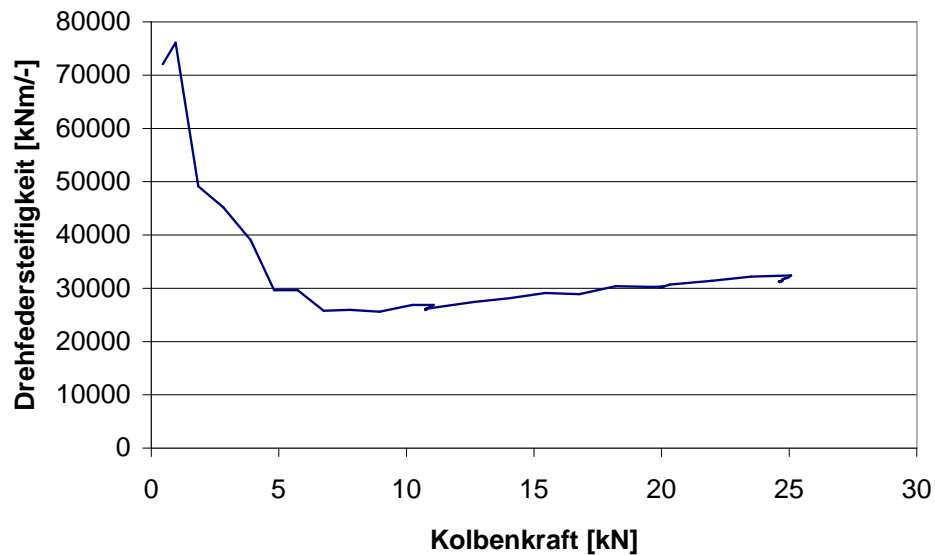


Abbildung 5.28: Drehfedersteifigkeit im Gehrungsschnitt (Versuchskörper 2, erste öffnende Belastung)

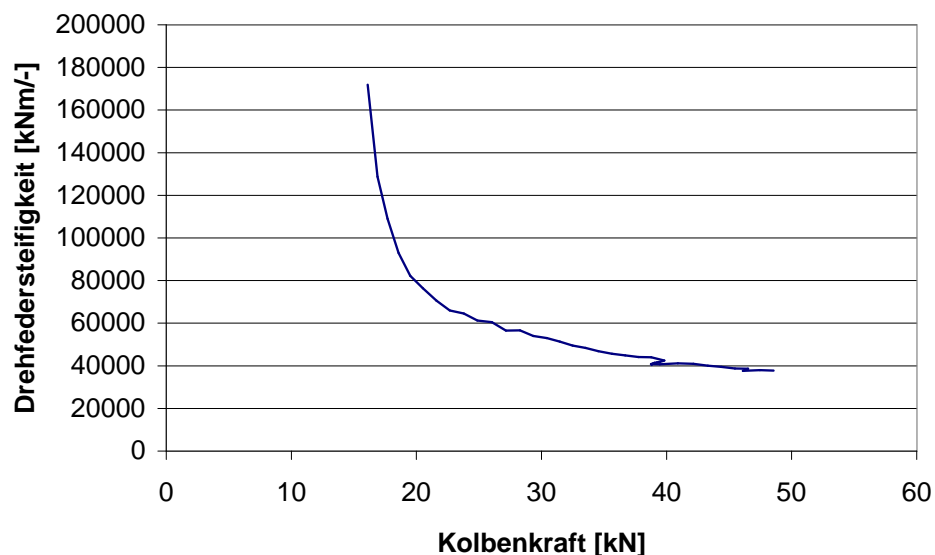


Abbildung 5.29: Drehfedersteifigkeit im Gehrungsschnitt (Versuchskörper 2, zweite öffnende Belastung)

Versuchskörper 1 mit zunehmender Belastung deutet auf eine weiche Aufnahme der Druckkraft hin. Demgegenüber ist bei Versuchskörper 2, der im Druckbereich verstärkt ist, kein Einfluß der Kolbenkraft auf die Druckzonenhöhe feststellbar.

Die Messung der Spaltöffnung bei Versuchskörper 2 bestätigt die aus den Dehnungsverteilungen ermittelten Werte. Hierzu wurde der Punkt, an dem die Trägerhälften gerade noch Kontakt haben, visuell festgestellt und markiert. In Tabelle 5.6 ist für schließendes

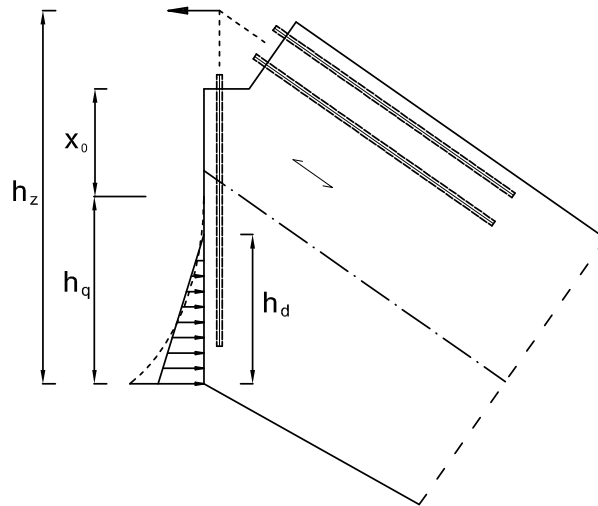


Abbildung 5.30: Druckzonenhöhe

Tabelle 5.5: Aus Dehnungsverteilung ermittelte Nulllinienlage

Kolbenkraft [kN]	x_0 [cm]		
	Körper 1	Körper 2	
		schliessend	öffnend
50	39.6		
100	35.7	35.0	30.0
120	33.5		

Tabelle 5.6: Gemessene Öffnung des Gehrungsschnitts (Versuchskörper 2 – schließend)

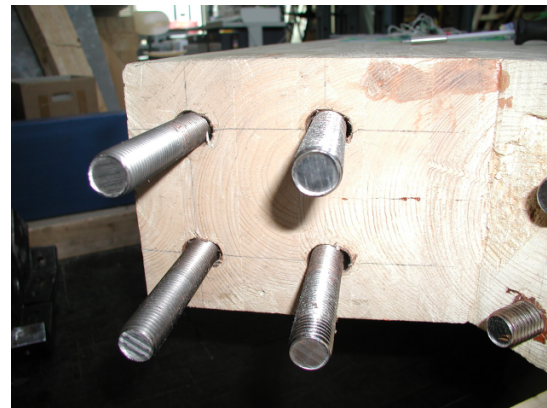
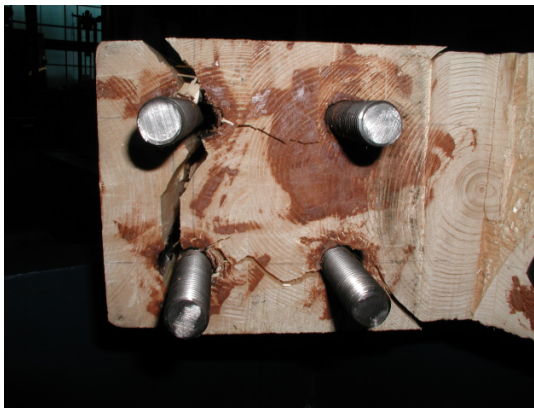
Kolbenkraft [kN]	x_0 [cm]	h_q [cm]	h_d [cm]
50	33.4	47.3	37.8
100	34.0	46.7	37.4
150	34.5	46.2	37.0
200	34.8	45.9	36.7

Moment die bei verschiedenen Lasten gemessene Spaltöffnung x_0 angegeben. Aus den Werten der Spaltöffnung wurde die Höhe der Druckkontaktzone h_q ermittelt, siehe Abbildung 5.30. Nach KLINGLER (2001) kann der quadratische Verlauf der Druckspannung durch eine dreiecksförmige Verteilung mit $h_d = 0.8 \cdot h_q$ angenähert werden, die die gleiche Druckkraft ergibt. Mit $h_z = 99.7$ cm ergibt sich nach Gleichung (6.2) auf Seite 144 eine theoretische Höhe $h_d = 0.4 \cdot 99.7$ cm = 39.9 cm, die gut mit der aus x_0 ermittelten Höhe h_d übereinstimmt.

Bei Versuchskörper 2 fixiert das Schlitzblech den inneren Hebelarm und verhindert das schrittweise Versagen der Druckzone, die Druckzone bleibt nahezu gleich. Bei Versuchskörper 1 dagegen versagt die Druckzone, die Nulllinie wandert zur äußeren Ecke, der innere Hebelarm sinkt.

5.6.4 Verstärkung des Einleitungsbereichs der Gewindestangen

Die Verstärkung des Einleitungsbereichs der Gewindestangen durch eingeklebte Querstangen, siehe Abschnitt 5.2.5.2, Abbildung 5.8 auf Seite 107 ist wirksam, wie man aus dem Vergleich der Stirnflächen nach dem Stangenversagen erkennen kann. In Abbildung 5.31(a) ist die unverstärkte Stirnholzfläche des ersten Versuchskörpers dargestellt. Durch die Ringzugwirkung um die Stangen ist das Holz zwischen den Stangen aufgespalten. In Abbildung 5.31(b) sieht man die verstärkte Stirnfläche des zweiten Versuchskörpers. Die Stirnfläche weist keine Risse auf. Ein Aufspalten des Holzes tritt erst im hinteren, unverstärkten Bereich der Gewindestangen auf, siehe Abbildung 5.32.



(a) unverstärkte Stirnfläche (Versuchskörper 1)

(b) durch quer eingeklebte Gewindestangen verstärkte Stirnfläche (Versuchskörper 2)

Abbildung 5.31: Stirnholzflächen nach dem Versagen der Gewindestangen

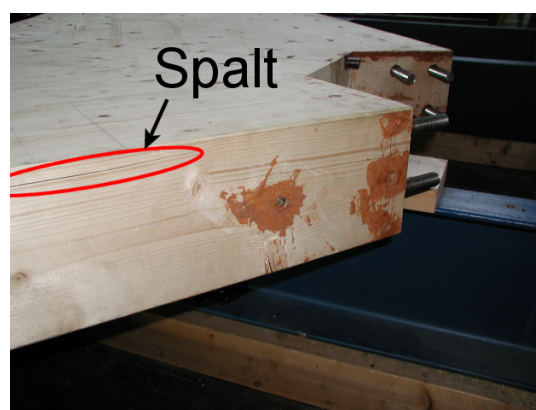


Abbildung 5.32: Aufspalten des Holzes im unverstärkten Bereich (Versuchskörper 2)

5.6.5 Verformung des Stahlteils

Das Stahlteil teilt die über den Gehrungsschnitt übertragene Kraft $Z_{||}$ auf die von den Zugstangen übertragene Kraft Z und die von den Querdruckstangen übertragene Kraft U auf, siehe Abbildung 5.33(a). Durch die elastische Verformung der Gewindestangen verdreht sich das Stahlteil, siehe Abbildung 5.33(b). Die elastische Verformung des Stahlteils ist vernachlässigbar und wird nicht berücksichtigt.

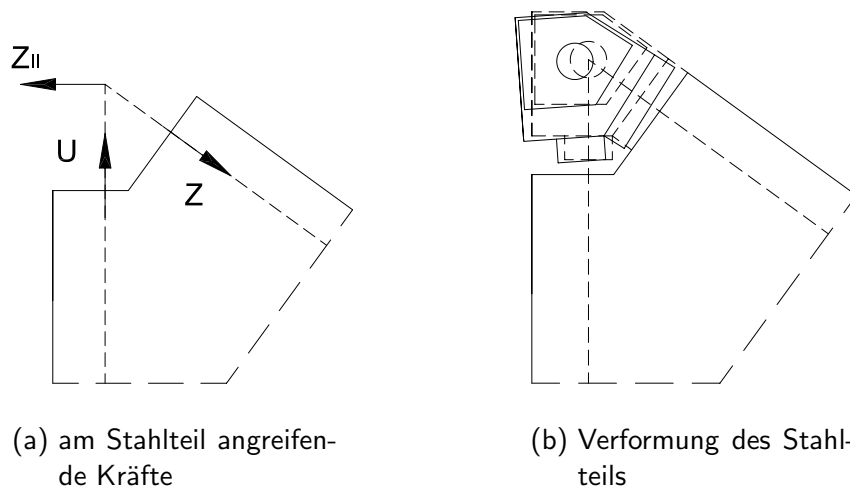


Abbildung 5.33: Theoretische Belastung und Verformung des Stahlteils

Aus den Meßwerten der Wegaufnehmer w_3 bis w_5 kann auf den Drehpunkt R des Stahlteils geschlossen werden. Dieser liegt im Schnittpunkt zweier Achsen, in denen keine Verformung des Stahlteils in Achsrichtung stattfindet.

Aus den Meßwerten der Wegaufnehmer w_3 und w_4 ergibt sich, daß die Nullachse in einem Abstand von 20 cm parallel zur inneren Gewindestange liegt. Der Abstand zum Trägerrand beträgt $3 + 10 + 20 = 33 \text{ cm} \approx 35 \text{ cm} = h/2$, die Nullachse fällt mit der Schwerlinie des Trägerquerschnitts ohne Voute zusammen. Parallel zum Gehrungsschnitt ermittelt man die Nullachse aus der Verformung des Wegaufnehmers w_5 über der Quergewindestange und dem Mittelwert der dieser Verformung parallelen Anteile der Wegaufnehmer w_3 und w_4 , siehe Abbildung 5.34. Diese Nullachse liegt 3.1 cm innerhalb der Querdruckstange, $3.1 + 9.5 = 12.6 \text{ cm}$ vom Gehrungsschnitt entfernt.

Durch die Verdrehung des Stahlteils werden die Gewindestangen einer Gewindestangengruppe ungleichmäßig belastet. Die äußeren Zugstangen erfahren infolge der größeren Verformung eine höhere Belastung als die inneren Zugstangen. Wie aus Abbildung 5.35 zu sehen ist, beträgt der vom äußeren Wegaufnehmer gemessene Weg über den Versuchsverlauf konstant 150% des vom inneren Wegaufnehmers gemessenen Weges. Das Verhältnis der Stangenkräfte ist dem Verhältnis der Wege direkt proportional, die Kraftverteilung der äußeren zu den inneren Zugstangen beträgt damit rund 60% zu 40%.

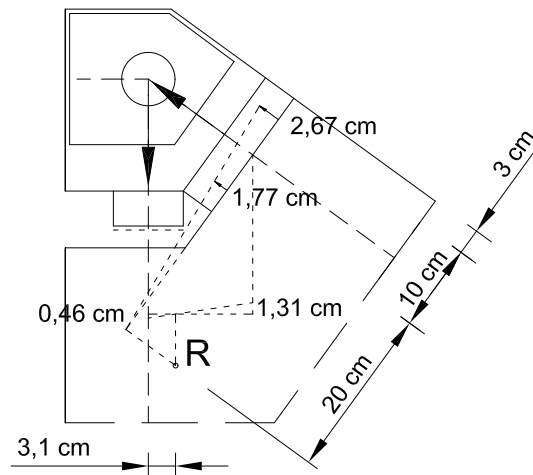


Abbildung 5.34: Drehpunkt des Stahlteils

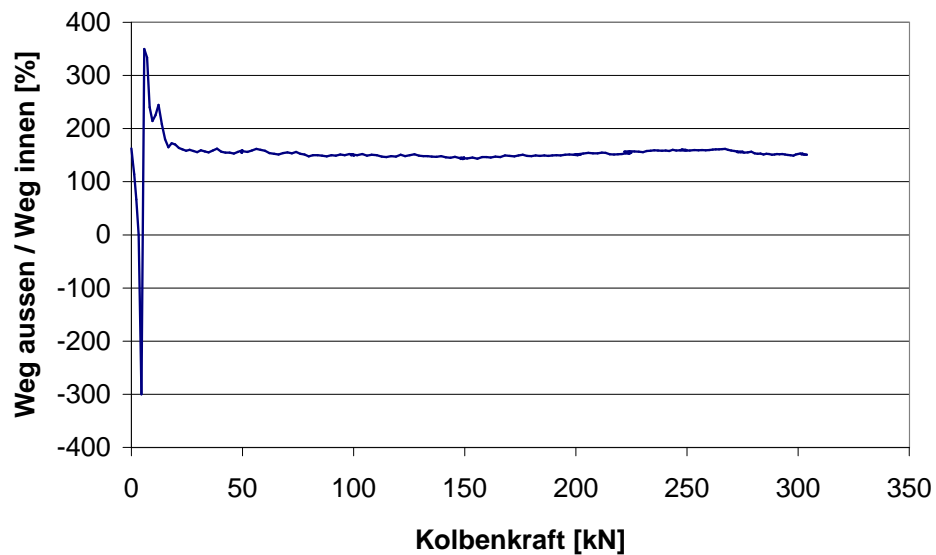


Abbildung 5.35: Verhältnis der Meßwerte von äußerem (w_3) und innerem (w_4) Wegnehmer

Weiter sieht man, daß die Verformung des Wegaufnehmers über der Querstange zunächst bis 150 kN Kolbenkraft zu- und danach wieder abnimmt, siehe Abbildung 5.36. Das Schlitzblech an der Innenecke trägt ab dieser Kolbenkraft vollständig mit und drückt von unten gegen die Querstange, so daß diese zurückgedrückt wird.

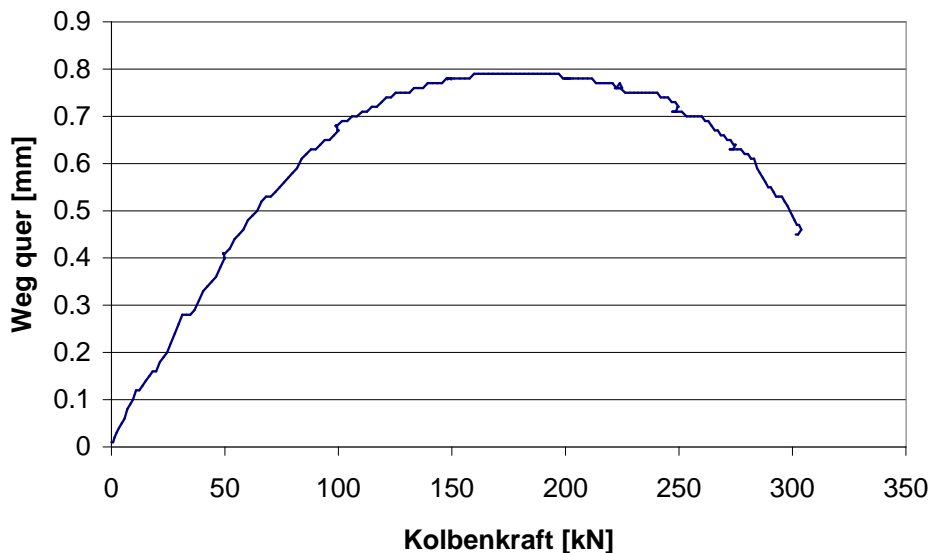


Abbildung 5.36: Über der Querstange gemessene Verformung des Stahlteils (Wegnehmer w_5)

5.6.6 Last-Verformungs-Verhalten

5.6.6.1 Körper 1

Der Versuchskörper hat bis zum Erreichen der Traglast von 163.1 kN ein nahezu lineares Last-Verformungsverhalten, wie aus der Last-Verformungskurve des Prüfzylinders in Abbildung 5.37 zu sehen ist. Die mit den Wegaufnehmern w_1 und w_2 über den Gehrungsschnitt gemessenen Verschiebungen sind affin zum Kolbenweg.

Nach dem Ausbilden eines Trennrisses im Druckbereich fällt die Last kurz ab und erreicht anschließend wieder das Traglastniveau. Die folgenden 50 mm Kolbenweg bleibt die Last nahezu konstant, der Versuchskörper versagt „plastisch“. Schließlich erfolgt die komplette Abtrennung des angerissenen Voutenteiles, gefolgt von der langsamen Zerstörung der Druckzone, der innere Hebelarm schrumpft. Die Kraft nimmt langsam ab. Schließlich platzt durch die resultierenden hohen Stangenkräfte und die große Verformung des Stahlteils parallel zum Gehrungsschnitt die Lamelle oberhalb der Zugstangen ab, die Gewindestangen werden herausgezogen. Infolge Reibung und Querdruck der Gewindestangen auf die Lochwandung hat der Körper eine Resttragfähigkeit von knapp 100 kN.

5.6.6.2 Körper 2

Bei schließender Belastung verläuft die Last-Verformungskurve bis zum Erreichen der Traglast bei 303.9 kN weitgehend linear, siehe Abbildung 5.38. Die Stabdübelverbindung des Schlitzbleches muß anfangs das Lochspiel überwinden. In Abbildung 5.36 erkennt man, daß im Bereich zwischen 50 und 100 kN die Verformung des an die Querstange angeschlossenen

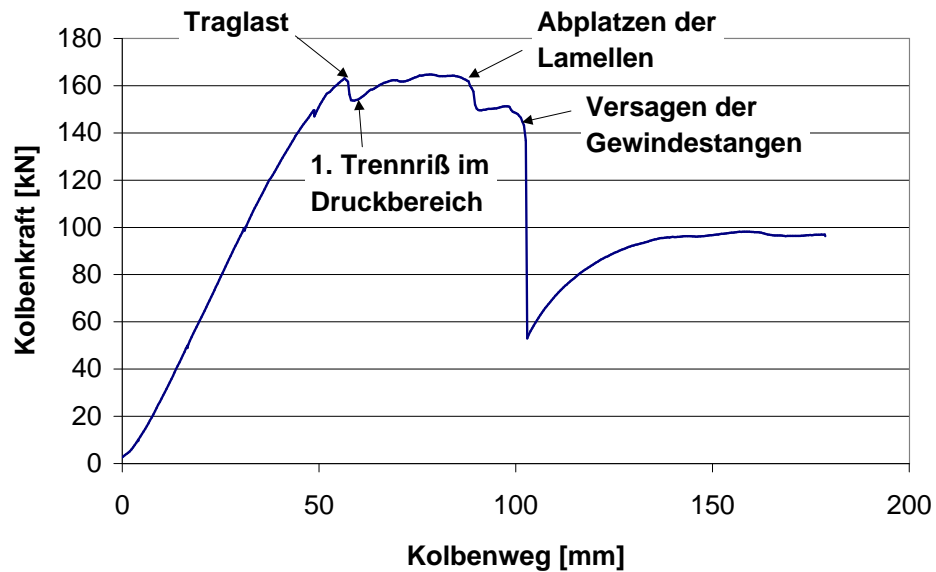


Abbildung 5.37: Kraft-Verformungskurve des Prüfzylinders (Versuchskörper 1)

Stahlteils zurückgeht. Dies deutet auf das beginnende Mitwirken des Schlitzbleches hin, das die Druckzone verstärkt. Daraus resultiert eine höhere Steifigkeit der Verbindung.

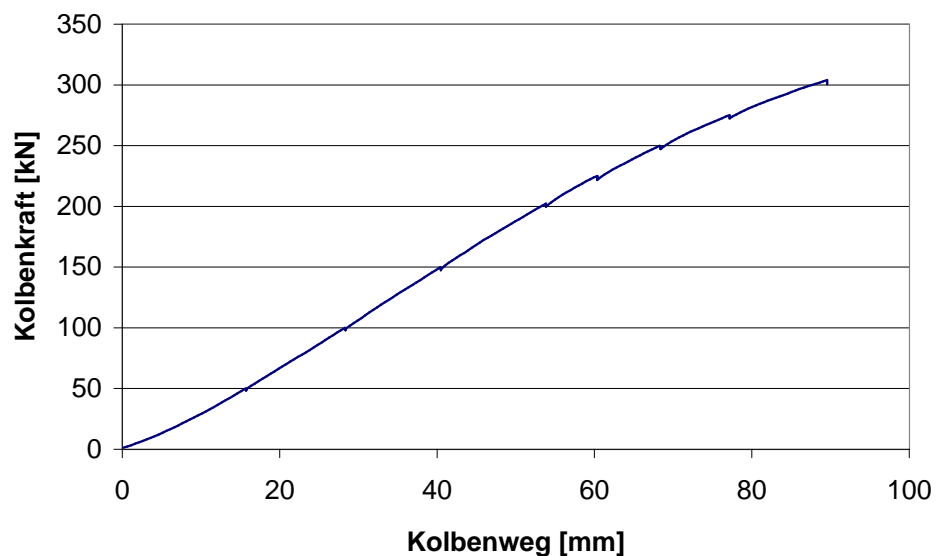


Abbildung 5.38: Kraft-Verformungskurve des Prüfzylinders (Versuchskörper 2 – schließendes Moment)

Die Anbindung des Schlitzbleches an die Quergewindestangen sorgt für einen direkten Kraftschluß der Umlenkraft und damit für eine steife Lagerung des Stahlteils im Zugbereich. Mit steigender Kraft wird die Last-Verformungskurve flacher und somit die Verbindung weicher. Dies deutet auf das beginnende Versagen der Zugstangen hin. Da die Verklebung beschädigt ist entstehen höhere Dehnungen und damit höhere Verformungen, wie man aus

dem überproportionalen Anstieg der Verformungen in Abbildung 5.39 erkennen kann. Die Verbindung versagt schlagartig.

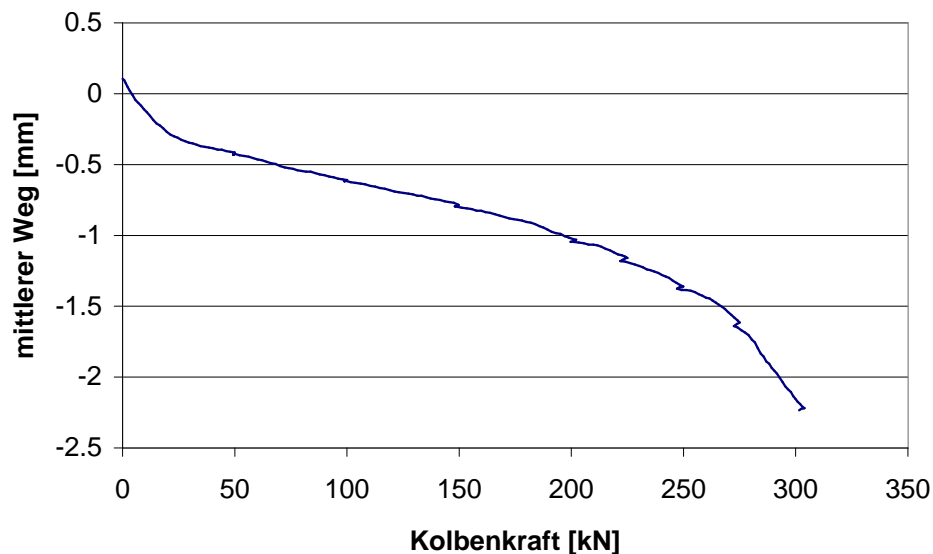


Abbildung 5.39: Mittlere Verformung der über den Zugstangen angebrachten Wegaufnehmer w_3 und w_4 (Versuchskörper 2 – schließendes Moment)

5.6.6.3 Körper 2 - öffnendes Moment

Bei öffnender Belastung steigt die Last bis zum schlagartigen Querkzugversagen bei 48.6 kN Kolbenkraft linear an. In Abbildung 5.40 sind die zusammengesetzten Last-Verformungskurven der beiden Belastungen mit öffnendem Moment abgebildet. Der untere Teil der Kurve stammt von der ersten öffnenden Belastung, bevor der Körper mit schließendem Moment geprüft wurde. Es ist zu erkennen, daß die Kurve mit zunehmender Verformung etwas steiler wird. Die Steifigkeit nimmt zu, da bei beginnender Belastung zuerst das Lochspiel zwischen den Stabdübeln und dem Schlitzblech überwunden werden muß. Die zweite Hälfte der Kurve wurde bei einer Kolbenkraft von 15.05 kN an die erste Kurve angefügt. Sie verläuft etwas flacher als das Ende des ersten Teils und setzt den linearen Verlauf ab dem Ursprung fort.

Nach der vorangegangenen öffnenden Beanspruchung verblieb ein Teil der Verformung im System. Im unbelasteten Zustand war der Gehrungsschnitt an der Außenecke des Querschnitts geöffnet. Zum Schließen dieser offenen Fuge war eine Kraft von 15.05 kN erforderlich, die im Schlitzblech durch Zug übertragen wurde. Durch diese Kraft wurde das System vorbelastet, sie wurde der planmäßigen Beanspruchung überlagert. Die Meßwerte dürfen daher nicht als absolut betrachtet werden.

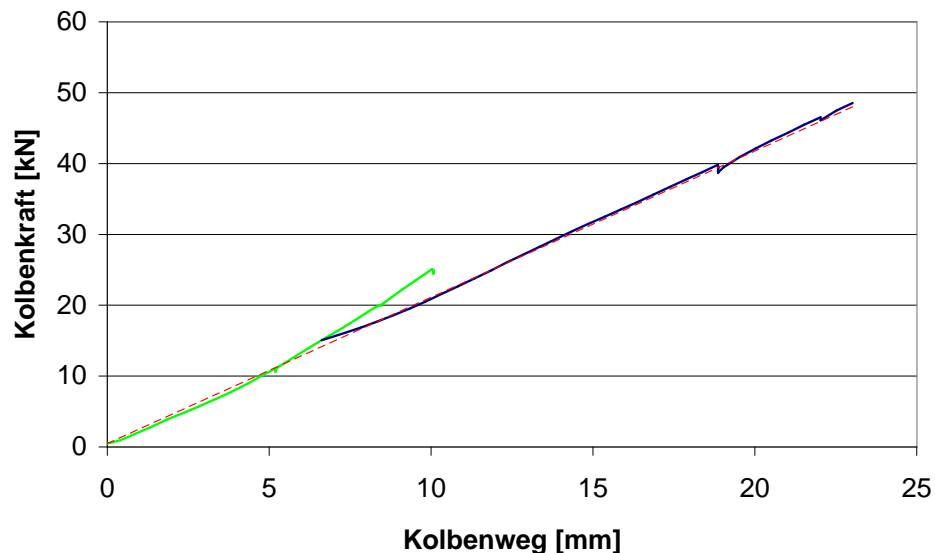


Abbildung 5.40: Kraft-Verformungskurve des Prüfcylinders (Versuchskörper 2 – öffnendes Moment)

5.6.6.4 Vergleich der Last-Verformungskurven

Vergleicht man die Last-Verformungskurven der einzelnen Versuchskörper, siehe Abbildung 5.41, erkennt man die Wirksamkeit der Verstärkung der Druckzone. Bei schließender Belastung haben beide Versuchskörper anfangs die gleiche Steifigkeit, bis bei dem unverstärkten Versuchskörper 1 die Druckzone versagt. Der verstärkte Versuchskörper 2 dagegen behält seine Steifigkeit bis zum Versagen bei. Die Steifigkeit bei öffnender Belastung des Versuchskörpers 2 ist durch den kleineren Hebelarm und die, im Vergleich zu den Gewindestangen weichere, Stabdübelverbindung geringer.

5.6.7 Zusammenfassung

Eine Rahmeneckverbindung mit eingeklebten Gewindestangen ermöglicht eine deutliche Tragfähigkeitssteigerung im Vergleich zu keilgezinkten Rahmenecken. Mit einem unverstärkten Kontaktstoß im Druckbereich an der Innenecke beträgt der Tragfähigkeitszuwachs rund 60%. Bei zusätzlicher Verstärkung der Innenecke steigt die Tragfähigkeit um 200% im Vergleich zur Keilzinkung. Sie erreicht damit die maximale rechnerische Momententragfähigkeit des ungeschwächten Holzquerschnittes, die unter der Annahme einer gauss'schen Normalverteilung der Biegespannung mit einem Variationskoeffizienten von $\sim 12\%$ ermittelt wurde.

Der relativ geringe Tragfähigkeitszuwachs bei ausschließlicher Druckübertragung über Kontakt resultiert aus der Druckspannungsspitze an der Innenecke, die zum Versagen der äußersten Holzschicht führt. Da der Rest des Querschnitts noch intakt ist, kann die Last bei wachsender Verformung und damit verbundener schrittweiser Zerstörung der Druckzone weiter abgetragen werden. Die Verbindung ist gewissermaßen „duktil“.

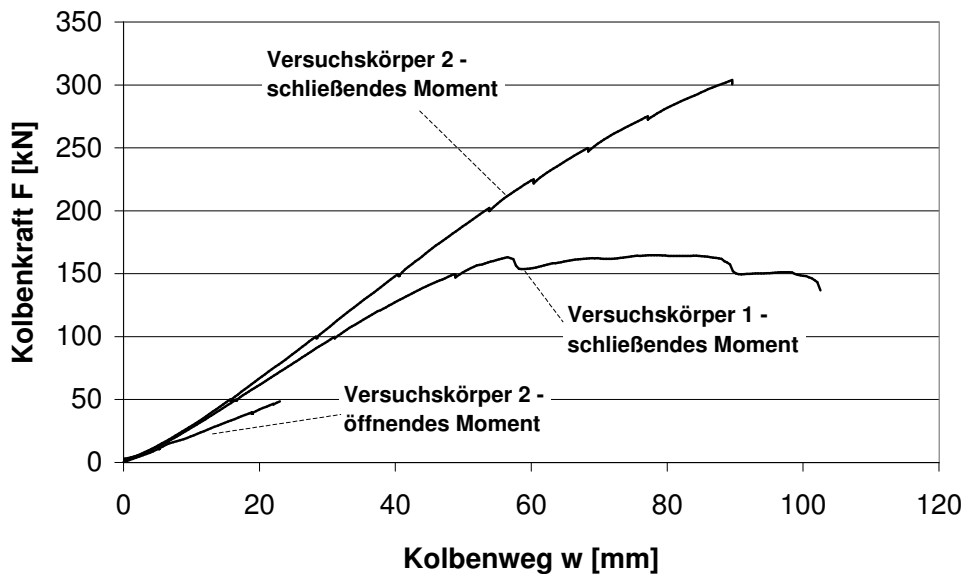


Abbildung 5.41: Kraft-Verformungskurven aller Versuchskörper

Neben der geringen Tragfähigkeit weist diese Ausführung der Verbindung den Nachteil auf, daß die zur Sicherstellung einer gleichmäßigen Kraftübertragung erforderlichen Kontaktflächen plan sein müssen. Fertigungstoleranzen können nicht aufgenommen werden. Die gegenseitige seitliche Verschiebung der Rahmenschenkel muß in der Praxis durch zusätzliche Maßnahmen verhindert werden.

Um das Versagen der Druckzone zu verhindern, kann diese verstärkt werden. Eine Verstärkung übernimmt einen Teil der Druckkraft und fixiert den inneren Hebelarm, die Tragfähigkeit der Verbindung steigt. Das Versagen erfolgt schlagartig durch das Herausziehen der Gewindestangen. Um duktilen Versagen zu erreichen, müssen die Stahlteile so dimensioniert werden, daß sie vor Erreichen der Traglast der Gewindestangen plastizieren.

Um bei öffnendem Moment eine ausreichende Tragfähigkeit zu erzielen, darf die Verstärkung der Innenecke keine Biegesteifigkeit im Gehrungsschnitt aufweisen. Eine Querbeanspruchung des Holzes aus Zwang wie bei Versuchskörper 2 muß vermieden werden. Das Querzugversagen am schräg angeschnittenen Rand der Voute kann zum Beispiel durch Aufkleben einer Decklamelle vermieden werden. Die Einleitung der Zugkraft durch die Verstärkung parallel des Voutenrandes erfolgt im Winkel zur Faserrichtung. Die Kraft wird an der Stelle der Einleitung in die Faserrichtung umgelenkt, es resultiert eine planmäßige Querzugbeanspruchung des Holzes. Diese Querzugbeanspruchung kann durch den Verzicht auf eine Voute vermieden werden. Die Druckkraft an der Innenecke muß in diesem Fall allein durch Verbindungsmittel – beispielsweise eingeklebte Gewindestangen – übertragen werden, da sonst die Traglast aufgrund der Druckspannungsspitze an der Innenecke zu stark absinken würde.

Die Verstärkung des Eintrittsbereichs der Gewindestangen in das Holz durch zusätzliche, quer zu den Zugstangen eingeklebte Gewindestangen macht die Verbindung robust. Querkzugkräfte, die in diesem Bereich auftreten, führen damit nicht unmittelbar zu einem Aufspalten des Holzes mit vorzeitigem Versagen der Gewindestangen.

Die Querstangen eignen sich gut zur Abtragung der Umlenkraft. Sie müssen an beiden Enden kraftschlüssig mit den Stahlteilen zur Aufnahme der Zug- beziehungsweise Druckkräfte verbunden werden. Dadurch wird die Umlenkraft kurzgeschlossen und eine Verformung der Stahlteile in Richtung der Achse der Querstangen minimiert.

Die Höhe der Gewindestangengruppe(n) und damit des Stahlteils ist im Verhältnis zur Körperhöhe gering zu halten, um eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Kraft auf die einzelnen Gewindestangen zu erreichen.

Die Ausführung des Stahlteils mit Kopfplatten zum Anschluß der Gewindestangen ermöglicht eine einfache und schnelle Vorfertigung der Verbindung, die durch den Schraubanschluß justiert werden kann. Die Verbindung der vorgefertigten Bauteile auf der Baustelle ist durch die Bolzenverbindung schnell und einfach möglich.

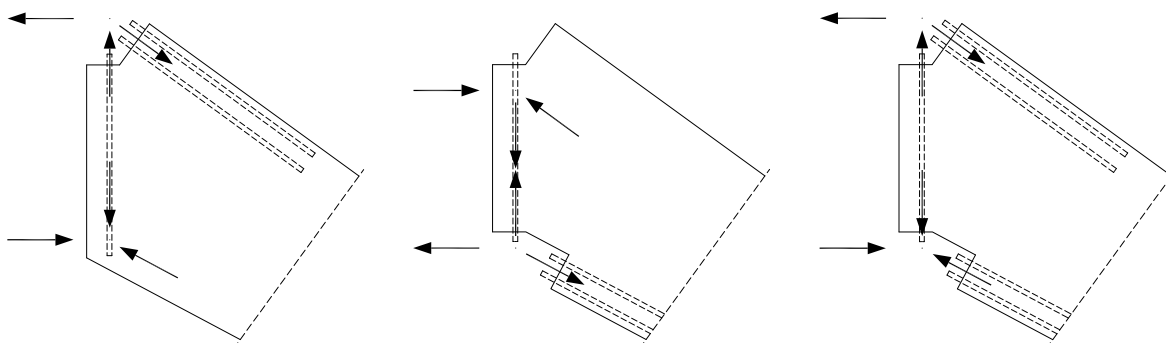
Die zur Bemessung erforderliche Kraftaufteilung in der Rahmeneckverbindung kann mit dem im folgenden Kapitel beschriebenen mechanischen Modell berechnet werden.

6 Mechanisches Modell der Rahmeneckverbindung

6.1 Allgemeines

Moment und Normalkraft sind die für die Auslegung der Rahmenecke maßgebenden Schnittgrößen, siehe auch Tabelle 4.2 auf Seite 95. Die zum Gehrungsschnitt parallele Querkraft ist dagegen verhältnismäßig klein. Sie wird unabhängig von den anderen Schnittgrößen durch nahe der Schwerlinie angeordnete Verbindungsmittel übertragen.

Mit den in Abschnitt 4.5 beschriebenen Arten der Normalkraftübertragung über den Gehrungsschnitt lassen sich die drei im folgenden beschriebenen Verbindungsvarianten herleiten, siehe auch Abbildung 6.1:



(a) schließendes Moment;
Zug über Gewindestangen,
Druck über Kontakt

(b) öffnendes Moment;
Zug über Gewindestangen,
Druck über Kontakt

(c) öffnendes und schließendes
Moment;
Kraftübertragung
durch Gewindestangen

Abbildung 6.1: Verbindungsvarianten mit unterschiedlicher Kraftübertragung

- Zur Abtragung eines schließenden Moments wird die Zugkraft an der Außenecke über eingeklebte Gewindestangen, die Druckkraft an der Innenecke über Kontakt und eine

eventuell vorhandene Verstärkung übertragen, siehe Abbildung 6.1(a). Das zugehörige Gleichgewichtsmodell wird in Abschnitt 6.3 behandelt.

- Die Abtragung eines öffnenden Moments erfolgt über Druckkontakt an der Außenecke und eine zugfeste Verbindung an der Innenecke, siehe Abbildung 6.1(b). Das Modell wird in Abschnitt 6.4 dargestellt.
- In Abschnitt 6.5 wird die Übertragung der Zug- und Druckkomponente durch Stahlteile zugrundegelegt, siehe Abbildung 6.1(c). Dies ermöglicht, sowohl öffnende als auch schließende Beanspruchung mit dem gleichen Modell zu erfassen.

Im folgenden Abschnitt werden zunächst einige zur Berechnung der Verbindung notwendige Annahmen getroffen, bevor in den Abschnitten 6.3 bis 6.5 die mechanischen Modelle erläutert werden.

6.2 Annahmen der Modellbildung

6.2.1 Allgemeines

Das wirkliche Tragverhalten der Verbindung wird durch vereinfachende Annahmen in ein mechanisches Modell überführt, mit dem sich die Kraftaufteilung in der Verbindung berechnen läßt. Die in den folgenden Abschnitten beschriebenen Näherungen zur Ermittlung der Kräfte und Hebelarme werden durch Versuchsbeobachtungen und eine FE-Untersuchung hergeleitet, die KLINGLER (2001) im Rahmen seiner Diplomarbeit durchgeführt hat.

Für die FE-Untersuchung wurde ein dreidimensionales Modell eines Rahmenschenkels erstellt. Die Abmessungen des Rahmenschenkels betragen $16 \cdot 70 \text{ cm}^2$. In allen Berechnungen wurden 4 Zugstangen in zwei Reihen und 2 Querstangen in einer Reihe angesetzt. Unter Ausnutzung der Symmetrie in Dickenrichtung wurde der halbe Rahmenschenkel modelliert.

Stahl wurde durch ein isotropes, linear elastisches, Holz durch ein anisotropes, linear elastisches Materialmodell abgebildet. Gewindestangen und Holz wurden direkt verbunden, die Klebefuge wurde nicht modelliert.

Variiert wurden die Parameter

- Gewindestangenlänge (500 mm bis 1500 mm),
- Gewindestangendurchmesser (10 mm bis 28 mm),
- Achs- (4d) und Randabstände (2d) der Gewindestangen in Abhängigkeit des Durchmessers d,
- Ausführung der einspringenden Ecke (ohne/mit Verstärkung) und
- Schlupf in den Verbindungsmitteln der Verstärkung an der einspringenden Ecke.

Die im folgenden erläuterten Annahmen der Modellbildung gelten für den untersuchten Parameterbereich. Für eine Verallgemeinerung sind weitere Parameterstudien erforderlich. Insbesondere sollten die Abmessungen des Körpers und die Anzahl der Zug- und Querstangen sowie deren Abstände weiter variiert werden.

Bei der Konstruktion der Verbindung ist auf die Umsetzung der getroffenen Annahmen zu achten, insbesondere wenn die Möglichkeit des Zusammenwirkens mehrerer Verbindungsmittel gegeben ist.

6.2.2 Zugkraftaufnahme durch Gewindestangen

Im Zugbereich schnürt sich der Dehnungs- bzw. Spannungsverlauf ein, die Kraft konzentriert sich in den Gewindestangen. Der Nachweis des Holzquerschnittes wird am Stangenende geführt, da dort die höchste Spannung vorhanden ist. Der zur Spannungsermittlung erforderliche Lastausbreitungswinkel wird nach Gleichung (3.41) auf Seite 87 bestimmt.

Die Tragfähigkeit einer Gruppe von Gewindestangen bei zentrischem Zug ist nach DENG (1997) gleich der Summe der Tragfähigkeiten der einzelnen Gewindestangen. Im Fall der Rahmenecke ergibt sich durch die Verdrehung des an die Gewindestangen angeschlossenen Stahlteils, das die über den Gehrungsschnitt übertragene Kraft mit den Kräften in den Gewindestangen kurzschließt, jedoch eine ungleichmäßige Belastung der Gewindestangen, wenn diese in mehr als einer Reihe angeordnet sind, siehe Abbildung 6.2 und Abschnitt 5.6.5 auf Seite 131. Die Aufteilung der Kräfte auf die einzelnen Gewindestangen erfolgt, indem eine lineare Dehnungsverteilung angenommen und an den Stellen der Gewindestangen der jeweils zugehörige Wert abgelesen wird. Da Kraft und Verformung direkt proportional sind, kann mit dem Verhältnis der so ermittelten Werte die Aufteilung der Kraft auf die einzelnen Gewindestangen bestimmt werden.

Zur Ermittlung der linearen Verteilung wird nach KLINGLER (2001) 40% der Höhe des Querschnitts ohne Voute angesetzt, siehe Abbildung 6.2. Der Wert wurde anhand einer Variation der Gewindestangenabstände im numerischen Modell ermittelt. Er stimmt mit den im Versuch gemessenen Verformungen des Stahlteils überein, siehe auch Abschnitt 5.6.5 auf Seite 131.

Die Höhe der Gewindestangengruppe sollte im Verhältnis zur Körperhöhe klein gehalten werden, um eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Kraft auf die einzelnen Gewindestangen zu erhalten.

Durch die Verformung des Stahlteils erhalten die Gewindestangen zusätzlich zur Achsialkraft eine Querbelastung. Für die Zugstangen wird diese nach AICHER U. A. (1997) als Anteil v der Zugbelastung angegeben. v ist ein aus FE-Berechnungen ermittelter Faktor, der nach Gleichung (4.2) für Winkel β zwischen 45° und 60° ermittelt werden kann:

$$v \approx 3.6 \cdot e^{-0.06 \cdot \beta} \quad (6.1)$$

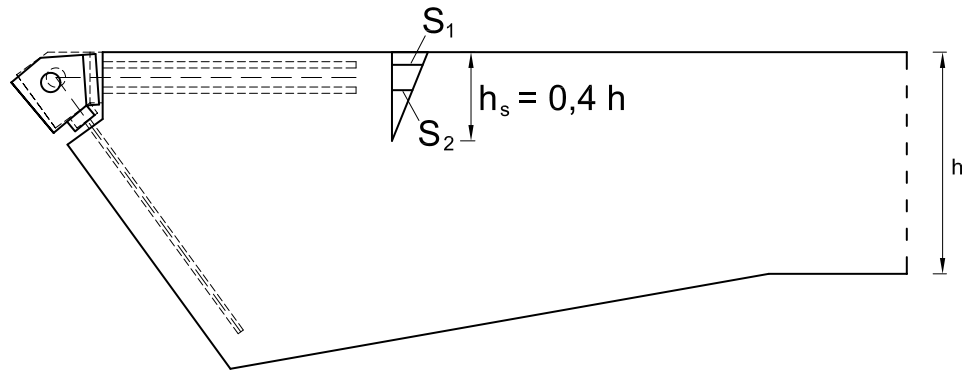


Abbildung 6.2: Verdrehung des Stahlteils und unterschiedliche Belastung der Stangen

mit: β Winkel zwischen Trägerachse und Gehrungsschnitt, siehe Abbildung 4.4 auf Seite 92

Der Wert v nach Gleichung (6.1) ist für verschiedene Winkel β in Tabelle 6.1 dargestellt.

Tabelle 6.1: Faktor v nach AICHER U. A. (1997)

β	45°	50°	54°	60°
v	0.24	0.18	0.14	0.10

KLINGLER (2001) kommt für einen Winkel β von 54° zu einem ähnlichen Ergebnis. Die Querbelastung der Zugstangen beträgt in Abhängigkeit des Stangendurchmessers und der von dieser abhängigen Achs- und Randabstände zwischen 6% und 15% der Achsialbelastung, siehe Abbildung 6.3.

6.2.3 Druckkraftaufnahme durch Kontakt

Die Druckspannung im Gehrungsschnitt ist nichtlinear verteilt. Eine Berechnung mit finiten Elementen ergibt bei einer Kraft von 100 kN die in Abbildung 6.4 eingezeichnete Dehnungsverteilung, die mit den bei Körper 1 gemessenen Dehnungen gut übereinstimmt. Im Bereich der inneren Ecke sind die berechneten Dehnungen zu hoch, da mit dem zur Abbildung des Holzes verwendeten linearen Materialmodell kein Druckplastizieren berücksichtigt werden kann. Die gemessenen Dehnungen an der einspringenden Ecke (geringe y -Werte) deuten darauf hin, daß das Holz in diesem Bereich plastiziert und sich die Spannungen umlagern.

Die berechnete Dehnung wird in einer ersten Näherung durch eine quadratische Funktion abgebildet. Die Wirkung des Druckplastizierens wird hierbei durch eine Abminderung der maximalen Dehnung auf 70% des berechneten Wertes berücksichtigt. Zur weiteren Vereinfachung wird die quadratische Funktion durch eine Gerade ersetzt, so daß die Flächeninhalte unter beiden Kurven gleich sind, siehe KLINGLER (2001). Die so ermittelte Gerade ist in Abbildung 6.4 auf der nächsten Seite eingezeichnet.

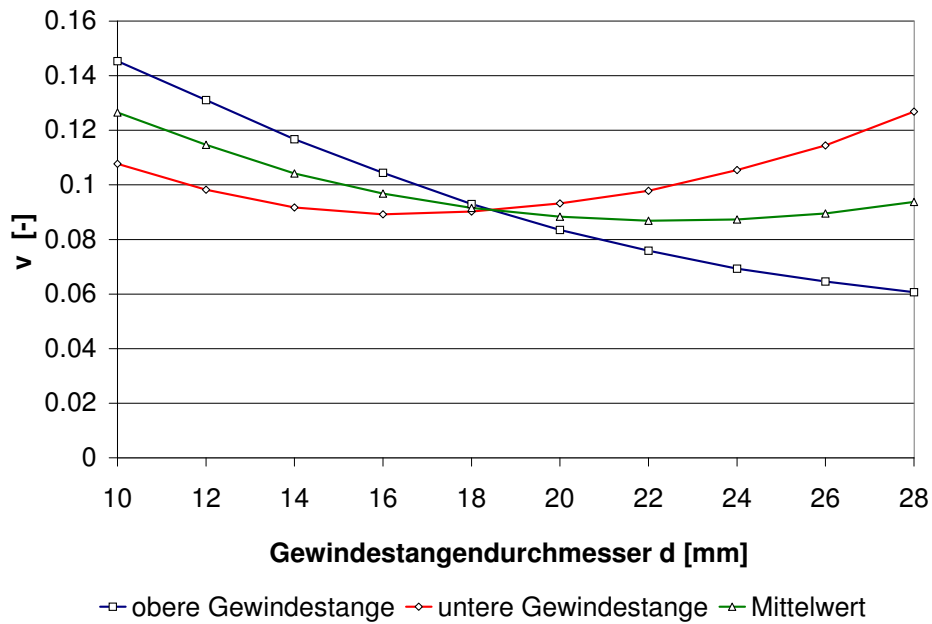


Abbildung 6.3: Faktor v in Abhängigkeit des Stangendurchmessers für einen Winkel $\beta = 54^\circ$ nach KLINGLER (2001)

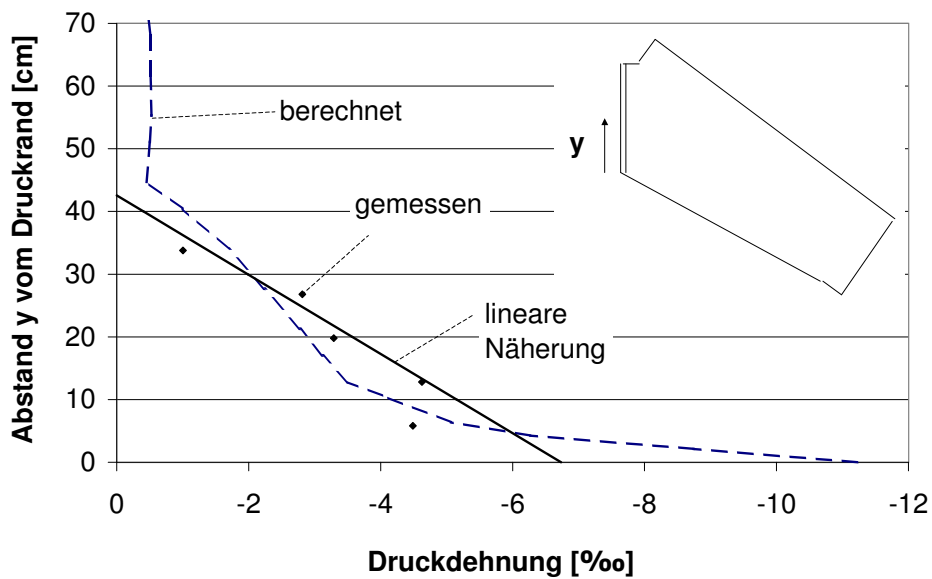


Abbildung 6.4: Gemessene und berechnete Druckdehnungsverteilung im Gehrungsschnitt

KLINGLER (2001) gibt die Höhe h_d der angenäherten Druckzone bei Kraftübertragung durch Kontakt zu 50% der Höhe der Kontaktfläche h_f im Gehrungsschnitt an, siehe Abbildung 6.5 auf der nächsten Seite. Allgemeiner kann die Höhe der Druckzone durch Bezug auf den Ab-

stand h_z zwischen der resultierenden, über den Gehrungsschnitt übertragenen Zugkraft und dem Druckrand des Trägers angegeben werden. Das Verhältnis h_f/h_z beträgt 80 cm/100 cm = 0.80, damit berechnet sich die Höhe der Druckzone zu

$$h_d = 0.80 \cdot 0.5 \cdot h_z = 0.4 \cdot h_z. \quad (6.2)$$

mit: h_d Höhe der dreiecksförmigen Druckzone
 h_z Abstand der Zugkraft zum gegenüberliegenden Trägerrand

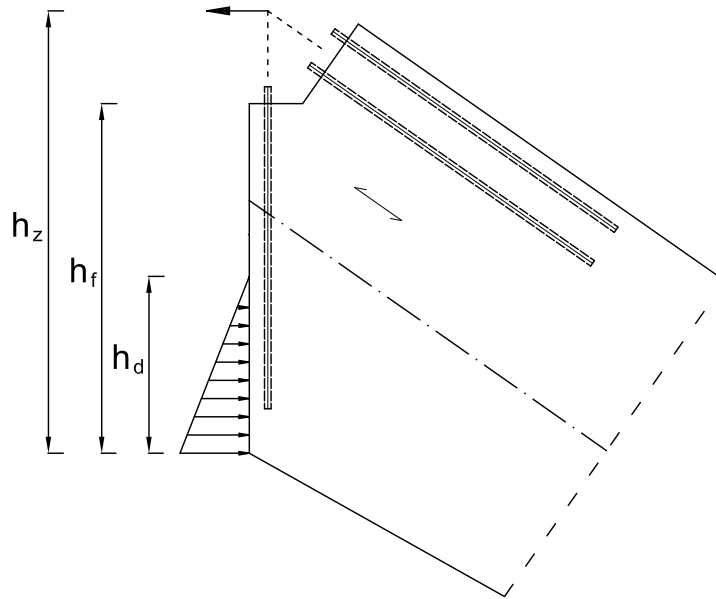
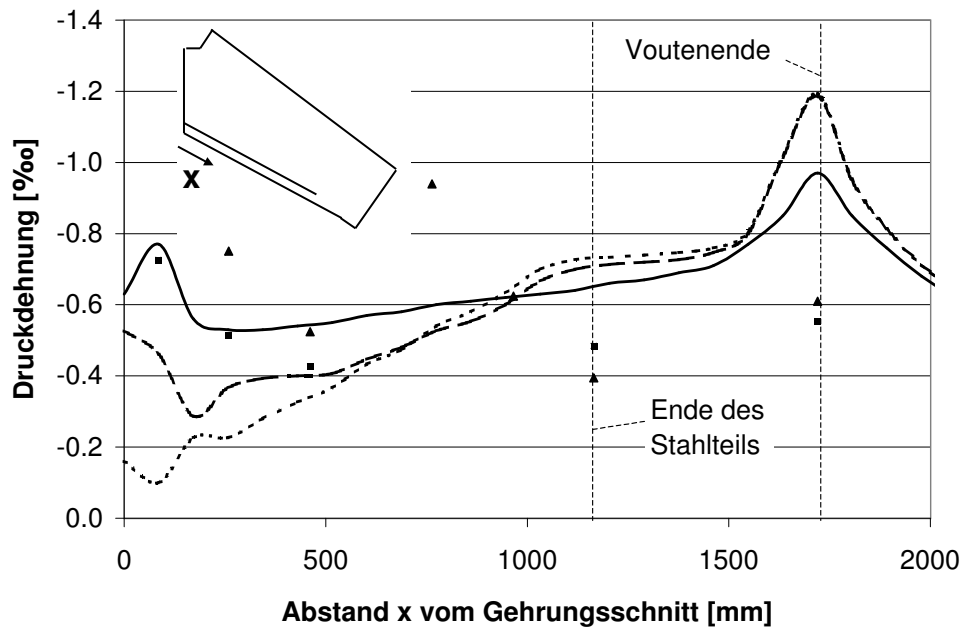


Abbildung 6.5: Höhe der angenäherten Druckzone

6.2.4 Verstärkung der Druckzone

Die Verstärkung der Druckzone wirft das Problem des Zusammenwirkens mehrerer Verbindungsmittel auf. In Abbildung 6.6 ist die Dehnungsverteilung entlang des inneren Querschnittsrandes für verschiedene Ausführungen der Druckübertragung dargestellt. Bei einer unverstärkten Ausführung der Innenecke, also reiner Druckübertragung durch Kontakt, tritt die höchste Druckdehnung im Bereich der Voute am Gehrungsschnitt auf. Wird die Druckzone verstärkt, z.B. durch ein eingeschlitztes Stahlblech, wird nur noch ein Teil der Druckkraft durch Kontakt übertragen. Ist die Verstärkung durch nachgiebige Verbindungsmittel mit dem Holzquerschnitt verbunden, so wird nur ein kleiner Teil der Kraft von der Verstärkung übernommen. Sind die Verbindungsmittel dagegen starr, so erfolgt die Kraftübertragung zu einem großen Teil durch die Verstärkung. Durch die Verstärkung sind die Dehnungen am Gehrungsschnitt geringer als bei einer unverstärkten Verbindung. Über die Länge der Verstärkung steigen die rechnerischen Dehnungen an, bis sie am Ende der Verstärkung das



Art der Verbindung:

- | | | | |
|-------|------------------------------------|---|------------------------|
| — | unverstärkt (ohne Stahlteil) | ▲ | unverstärkt (Körper 1) |
| - - - | verstärkt (nachgiebige Verbindung) | ■ | verstärkt (Körper 2) |
| ⋯ | verstärkt (starre Verbindung) | | |

Abbildung 6.6: Gemessene und berechnete Druckdehnungsverteilungen am inneren Querschnittsrand

Dehnungsniveau des unverstärkten Querschnitts erreichen. Die rechnerische Dehnungsspitze am Ende der Voute kann durch die Messungen nicht bestätigt werden.

Bei der Berechnung der Dehnungsverteilungen wurde sofortiger Kontakt angenommen. Die Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel wurde durch Schlupf in der Symmetrielagerung der Verstärkung simuliert. Die Variation des Schlupfes macht deutlich, daß Toleranzen beim Zusammenwirken mehrerer Verbindungsmittel einen erheblichen Einfluß auf die Dehnungsverteilung haben. Soll die Verstärkung der Druckzone von Anfang an wirksam sein, so muß sie gleichzeitig mit der Kontaktfuge Kraft aufnehmen.

Damit bieten sich die folgenden Möglichkeiten für die Konstruktion und Bemessung der Verbindung:

1. Die Kraft wird auf die beiden Verbindungskomponenten Kontaktzone und Verstärkung aufgeteilt.

Die Aufteilung der Kraft erfolgt normalerweise nach dem Verhältnis der Steifigkeiten der einzelnen Verbindungskomponenten. Für eine Kontaktverbindung kann jedoch keine eindeutige Steifigkeit ermittelt werden, im [HOLZBAU HANDBUCH \(1991\)](#) Reihe

2, Teil 2, Folge 2 wird sie als unnachgiebig angenommen. Die Kontaktverbindung würde dann die ganze Kraft übernehmen, was nicht der Realität entspricht.

Mit der Annahme, daß das Verhältnis der Tragfähigkeiten der Verbindungskomponenten deren Steifigkeitsverhältnis entspricht, kann die Kraft entsprechend dem Verhältnis der Tragfähigkeiten aufgeteilt werden.

2. Die Verstärkung wird mit ihrer vollen Tragfähigkeit angesetzt, der Rest der Druckkraft wird durch Kontakt abgetragen.
3. Die Tragfähigkeit der Druckzone auf Kontakt wird ausgenutzt, der Rest der Druckkraft wird der Verstärkung zugewiesen.
4. Die Druckkraft wird vollständig der Verstärkung zugewiesen, die entsprechend zu bemessen und zu konstruieren ist.

Punkt 1 schätzt die Kraftaufteilung auf Basis der Tragfähigkeiten ab. Die Beeinflussung der Kraftaufteilung durch Montageungenauigkeiten erschwert jedoch eine zutreffende Bemessung. [DIN 1052 \(1996\)](#) sieht in diesem Zusammenhang vor, beim Zusammenwirken mehrerer Verbindungsmittel, „deren Nachgiebigkeit etwa gleich groß ist“, das Verbindungsmittel, das den geringeren Kraftanteil erhält, auf die 1.5-fache anteilige Kraft zu bemessen.

Punkt 2 und 3 stellen eine Grenzwertbetrachtung basierend auf Punkt 1 dar. Die Tragfähigkeit einer Verbindungskomponente wird festgelegt, die andere Verbindungskomponente ist dementsprechend tragfähig auszubilden.

Die Unsicherheit bei der Ermittlung der Kraftaufteilung wird bei Punkt 4 vermieden, indem die Druckkraft vollständig der Verstärkung zugewiesen wird.

6.2.5 Aufnahme der Umlenkraft

Bei der Aufnahme der Umlenkraft muß zwischen den Fällen der unverstärkten Druckübertragung allein durch Kontakt und der verstärkten Druckübertragung durch Kontakt und Verbindungsmittel unterschieden werden.

Im Fall der unverstärkten Druckübertragung durch Kontakt wird die Umlenkraft der Zugseite über die Querstange direkt in das Holz eingeleitet. Der Nachweis der maximalen Druckspannung erfolgt am Ende der Gewindestange, siehe auch Abschnitt [6.2.2](#) auf Seite [141](#).

Im Fall der Druckübertragung durch Verbindungsmittel wird die Umlenkraft an beiden Enden der Querstange jeweils direkt durch ein Stahlteil eingeleitet und kurzgeschlossen. Eine Belastung des Holzes erfolgt nur durch die Dehnungsdifferenz zwischen Gewindestange und Holz und durch die Differenz der Umlenkkräfte in der Druck- und Zugzone bei verschiedenen Neigungswinkeln der Querschnittsränder.

Bei der Einleitung der Umlenkraft wird die Querstange infolge der Verformung des Stahlteils zusätzlich zur Achsialkraft durch eine Querkraft belastet. Erfolgt die Einleitung der Umlenkraft dabei nur durch Kontakt, wird diese Querkraft von der Reibung hervorgerufen und ist vernachlässigbar gering, wie aus FE-Ergebnissen von [KLINGLER \(2001\)](#) hervorgeht. Für den Fall einer druck- und zugfesten Verbindung, beispielsweise durch gekonterte Muttern, kann der Queranteil analog zum Anschluß der Zugstangen mit dem Faktor v nach Gleichung (6.1) auf Seite 141 abgeschätzt werden.

6.2.6 Voute

Im Fall der Druckübertragung durch Kontakt wird die Druckkraft am Gehrungsschnitt in die Faserrichtung des Holzes umgelenkt. Die Umlenkraft wird in die Querstange eingeleitet.

Im Fall der Druckübertragung durch Verbindungsmittel wird die Druckkraft in die Richtung der Verbindungsmittel umgelenkt. Durch die geringere Winkeländerung ist die Umlenkraft geringer als bei Druckübertragung durch Kontakt. Die Umlenkraft wird in die Querstange eingeleitet. Die Differenz der Umlenkkräfte am Gehrungsschnitt belastet den Querschnitt durch eine Querkraft. Da die Verbindungsmittel parallel zum Voutenrand, in einem Winkel zur Faser, angeordnet sind, wird der verbleibende Teil der Umlenkraft über die Länge der Verbindung in den Querschnitt eingeleitet. Die Umlenkung der eingeleiteten Kraft in die Faserrichtung des Holzes erzeugt eine zusätzliche Querbelastung des Körpers, siehe auch Abschnitt 4.5.5 auf Seite 98.

6.3 Kraftaufteilung mit Kontakt bei schließendem Moment

Die inneren Kräfte werden im Zugbereich durch Zugstangen übertragen. Die aus der Umlenkung dieser Zugkraft resultierende Umlenkraft wird durch ein Anschlußelement in weitere, parallel zum Gehrungsschnitt eingeklebte Querstangen eingeleitet, siehe auch Abbildung 6.7.

Infolge der Verformung des Anschlußelementes werden die Zug- und die Querstangen neben einer Achsial- auch durch eine Querkraft beansprucht.

Im Druckbereich wird die Kraft durch Kontakt übertragen. Ist eine Verstärkung vorhanden, unterstützt diese die Kraftübertragung im Druckbereich.

[AICHER U. A. \(1997\)](#) haben ein Modell zur Aufteilung der im Gehrungsschnitt wirkenden Schnittgrößen M , N und V auf die diskreten inneren Kräfte hergeleitet. Da die Schnittkräfte N und V auf die Achsen der Rahmenschenkel bezogen sind, ergeben unterschiedliche Schnittkraftkombinationen, wie sie normalerweise in den beiden Schenkeln (Stiel und Riegel) eines Rahmens auftreten, unterschiedliche Kräfte in deren Verbindungselementen, z.B. unterschiedliche Gewindestangenkräfte oder unterschiedliche Kontaktkräfte. Dies ist aus Gleichgewichtsgründen nicht möglich.

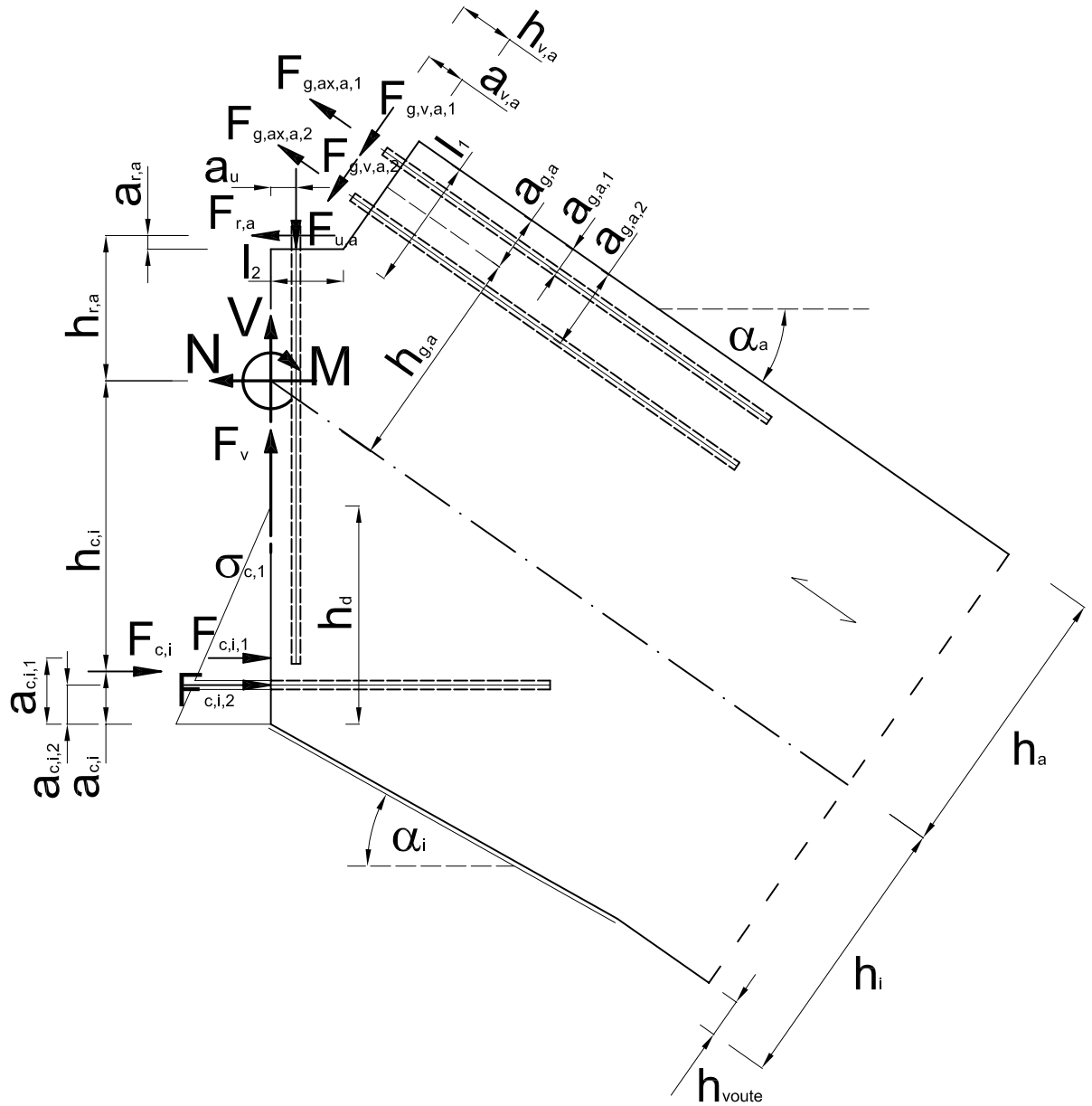


Abbildung 6.7: Kraftaufteilung bei schließendem Moment

Um das Modell für den Fall ungleicher Schnittkraftkombinationen in den Rahmenschenkeln zu verallgemeinern, werden die angreifenden Schnittkräfte N und V nach Gleichung (4.3) auf Seite 91 in das Koordinatensystem des Gehrungsschnitts umgerechnet. Das Gleichgewicht wird nun nicht auf die Schenkelachse, sondern auf das Koordinatensystem des Gehrungsschnitts bezogen.

Vereinfachend werden Kräfte mit gleicher Tragwirkung zusammengefasst. Beispielsweise wird aus den Zugkräften in den Gewindestangen eine resultierende Zugkraft mit resultierendem Hebelarm gebildet.

Die Normal- und Querkräfte der Gewindestangen im Zugbereich lassen sich zu den Resultierenden

$$F_{g,ax,a} = \sum F_{g,ax,a,j} = F_{g,ax,a,1} + F_{g,ax,a,2} \quad \text{und} \quad (6.3)$$

$$F_{g,v,a} = \sum F_{g,v,a,j} = F_{g,v,a,1} + F_{g,v,a,2} \quad (6.4)$$

mit: $F_{g,ax,a}$. . . resultierende Zugkraft auf die Gewindestangen an der äußeren Ecke
 $F_{g,ax,a,j}$. . . Zugkräfte der einzelnen Gewindestangenreihen an der äußeren Ecke,
 $F_{g,ax,a,1}$ und $F_{g,ax,a,2}$ nach Abbildung 6.7
 $F_{g,v,a}$. . . resultierende Querkraft auf die Gewindestangen an der äußeren Ecke
 $F_{g,v,a,j}$. . . Querkräfte der einzelnen Gewindestangenreihen an der äußeren Ecke,
 $F_{g,v,a,1}$ und $F_{g,v,a,2}$ nach Abbildung 6.7

zusammenfassen. Die Lage der resultierenden Achsialkraft $F_{g,ax,a}$ hängt von den Kräften in den Stangen ab. Ihr Abstand zum Trägerrand beträgt

$$a_{g,a} = \frac{\sum F_{g,ax,a,j} \cdot a_{g,a,j}}{F_{g,ax,a}} = \frac{F_{g,ax,a,1} \cdot a_{g,a,1} + F_{g,ax,a,2} \cdot a_{g,a,2}}{F_{g,ax,a}} \quad (6.5a)$$

mit: $a_{g,a}$ resultierender Abstand der Zugkraft zum Querschnittsrand
 $a_{g,a,j}$ Abstand der einzelnen Gewindestangen zum Querschnittsrand
 $a_{g,a,1}$ und $a_{g,a,2}$ nach Abbildung 6.7

Da die äußeren Gewindestangen verformungsbedingt eine größere Kraft erfahren als die weiter innen liegenden Gewindestangen, siehe auch Abschnitt 6.2.2 auf Seite 141, liegt die Wirkungslinie der Achsialkraft näher am Trägerrand als die Mittellinie der Gewindestangengruppe. Im Sinne der Tragfähigkeit auf der sicheren Seite liegend, kann die Kraft in der Mittellinie der Gewindestangen angenommen werden. Durch den geringeren Hebelarm erhöhen sich die inneren Kräfte in der Verbindung. Für zwei Gewindestangenreihen gilt

$$a_{g,a} \approx a_{g,a,app} = a_{g,a,1} + \frac{a_{g,a,2} - a_{g,a,1}}{2} \quad (6.5b)$$

mit: $a_{g,a,app}$. . . angenäherter Abstand der Zugkraft zum Querschnittsrand

Damit lautet die Gleichung für den Hebelarm

$$h_{g,a} = h_a - a_{g,a} \quad (6.6)$$

mit: $h_{g,a}$ Abstand der resultierenden Kraft in den Zugstangen zur Schwerlinie des unverstärkten Querschnitts

h_a Abstand der Schwerlinie des unverstärkten Querschnitts zum äußeren Trägerrand

Die Druckkraft setzt sich aus der Kraft in der Verstärkung und den Resultierenden der Druckspannung im Holz zusammen:

$$F_{c,i} = \sum F_{c,i,j} = F_{c,i,1} + F_{c,i,2} \quad (6.7)$$

mit: $F_{c,i}$ Resultierende Druckkraft an der Innenecke

$F_{c,i,j}$. . . Einzelne Druckkräfte an der Innenecke

$F_{c,i,1}$. . . Resultierende Kontaktkraft, siehe Abbildung 6.7

$F_{c,i,2}$. . . Kraft in der Verstärkung, siehe Abbildung 6.7

Der Abstand der Resultierenden zum unteren Trägerrand ist

$$a_{c,i} = \sum \frac{F_{c,i,j} \cdot a_{c,i,j}}{F_{c,i}} = \frac{F_{c,i,1} \cdot a_{c,i,1} + F_{c,i,2} \cdot a_{c,i,2}}{F_{c,i}} \quad (6.8)$$

mit: $a_{c,i}$ Resultierender Hebelarm der Druckkraft an der Innenecke

$a_{c,i,j}$ Einzelne Hebelarme der Druckkräfte an der Innenecke,
 $a_{c,i,1}$ und $a_{c,i,2}$ nach Abbildung 6.7

Wird die Druckkraft hauptsächlich durch die Verstärkung, also durch die Kraft $F_{c,i,2}$, übertragen, kann der Abstand zum Trägerrand direkt durch

$$a_{c,i} \approx a_{c,i,app} = a_{c,i,2} \quad (6.9)$$

mit: $a_{c,i,app}$ genäherter, resultierender Hebelarm der Druckkraft an der Innenecke

ausgedrückt werden. Die Höhe des unteren Querschnittsteils wird als Summe aus der halben Trägerhöhe und der Voutenhöhe definiert.

$$h_i = h/2 + h_{voute} \quad (6.10)$$

mit: h_i Abstand der Schwerlinie zur inneren Ecke

h halbe Höhe des Querschnitts ohne Voute

h_{voute} . . . Höhe der Voute, rechtwinklig zur Schwerlinie gemessen

Damit ist der Hebelarm gleich

$$h_{c,i} = \frac{h_i}{\cos \alpha_a} - a_{c,i} \quad (6.11)$$

mit: $h_{c,i}$ Hebelarm der Druckkraft an der inneren Ecke
 α_a Winkel zur Umrechnung des Hebelarms in das Koordinatensystem des Gehrungsschnitts

Der Abstand der Kraft $F_{r,a}$ zum Schnittpunkt der Trägerachse mit dem Gehrungsschnitt beträgt

$$h_{r,a} = (h_a - l_1 - l_2 \cdot \sin \alpha_a) / \cos \alpha_a + a_{r,a}, \quad (6.12)$$

mit: $h_{r,a}$ Hebelarm der Reibkraft bezogen auf den Schnittpunkt von Gehrungsschnitt und Schwerelinie
 l_1 Länge des Ausschnitts rechtwinklig zur Trägerlängskante
 l_2 Länge des Ausschnitts rechtwinklig zum Gehrungsschnitt
 $a_{r,a}$ Abstand der Kraft $F_{r,a}$ zum Eintrittspunkt der Gewindestange in den Querschnitt.

Für die Querkraft an den Zugstangen beträgt der Abstand

$$h_{v,a} = ((h_{r,a} - a_{r,a}) \cdot \tan \alpha_a - l_2) \cdot \cos \alpha_a + a_{v,a}. \quad (6.13)$$

mit: $h_{v,a}$ Hebelarm der Querkraft auf die Gewindestangen zum Schnittpunkt von Gehrungsschnitt und Schwerelinie
 $a_{v,a}$ Abstand der Kräfte $F_{g,v,a,j}$ zum Eintrittspunkt der Gewindestangen in den Querschnitt

Bildet man das Gleichgewicht der inneren und äußeren Kräfte erhält man drei Gleichungen mit sechs Unbekannten.

$$V = -F_{u,a} + \sin \alpha_a \cdot F_{g,ax,a} - \cos \alpha_a \cdot F_{g,v,a} + F_v \quad (6.14a)$$

$$N = -F_{c,i} + F_{r,a} + \cos \alpha_a \cdot F_{g,ax,a} + \sin \alpha_a \cdot F_{g,v,a} \quad (6.14b)$$

$$M = -h_{c,i} \cdot F_{c,i} + a_u \cdot F_{u,a} - h_{r,a} \cdot F_{r,a} \quad (6.14c)$$

$$- h_{g,a} \cdot F_{g,ax,a} - h_{v,a} \cdot F_{g,v,a}$$

Die Kraft $F_{u,a}$ ist die aus der Achsialkraft der Gewindestangen resultierende Umlenkraft. Abzüglich dem von den Gewindestangen über Querkraft aufgenommenen Anteil der Umlenkraft beträgt diese

$$F_{u,a} = \sin \alpha_a \cdot F_{g,ax,a} - \cos \alpha_a \cdot F_{g,v,a} \quad (6.15)$$

Die Querbelastung der Querstangen $F_{r,a}$ wiederum hängt von der Umlenkraft ab.

$$F_{r,a} = r \cdot F_{u,a} \quad (6.16)$$

mit: $r \dots \dots$ Beiwert zur Ermittlung der Querbelastung der Querstangen

Einsetzen von Gleichung (6.15) und Gleichung (6.16) in Gleichung (6.14) ergibt ein Gleichungssystem mit vier Unbekannten:

$$V = -\sin \alpha_a \cdot F_{g,ax,a} + \cos \alpha_a \cdot F_{g,v,a} \quad (6.17a)$$

$$+ \sin \alpha_a \cdot F_{g,ax,a} - \cos \alpha_a \cdot F_{g,v,a} + F_v \quad (6.17b)$$

$$= F_v$$

$$N = -F_{c,i} + (r \cdot \sin \alpha_a + \cos \alpha_a) \cdot F_{g,ax,a} + (\sin \alpha_a - r \cdot \cos \alpha_a) \cdot F_{g,v,a} \quad (6.17c)$$

$$M = -h_{c,i} \cdot F_{c,i} + (a_u \cdot \sin \alpha_a - h_{r,a} \cdot r \cdot \sin \alpha_a - h_{g,a}) \cdot F_{g,ax,a} \quad (6.17d)$$

$$- (h_{v,a} + a_u \cdot \cos \alpha_a - h_{r,a} \cdot r \cdot \cos \alpha_a) \cdot F_{g,v,a}$$

Die Schubkraft V im Gehrungsschnitt wird allein von der separaten Schubverbindung durch die Kraft F_v aufgenommen. Die resultierende Querkraft auf die Zugstangen $F_{g,v,a}$ wird näherungsweise als Anteil der Zugkraft $F_{g,ax,a}$ definiert.

$$F_{g,v,a} = v \cdot F_{g,ax,a} \quad (6.18)$$

mit: $v \dots \dots$ Faktor zur Ermittlung des Anteils der Querbelastung der Zugstangen, siehe Abschnitt 6.2.2 auf Seite 141

Durch Auflösen erhält man Gleichungen zur Bestimmung der inneren Kräfte. Die Zugkraft in den Zugstangen beträgt

$$F_{g,ax,a} = \frac{M - N \cdot h_{c,i}}{f_1} \quad (6.19a)$$

mit: $f_1 = a_u \cdot \sin \alpha_a - h_{g,a} - h_{c,i} \cdot \cos \alpha_a$

$$- v \cdot (h_{v,a} + h_{c,i} \cdot \sin \alpha_a + a_u) \quad (6.19b)$$

$$- r \cdot (h_{c,i} \cdot (\sin \alpha_a + v \cdot \cos \alpha_a) + h_{r,a} \cdot (\sin \alpha_a - v \cdot \cos \alpha_a))$$

Die Druckkraft rechtwinklig zum Gehrungsschnitt ist gleich

$$F_{c,i} = -N + (\cos \alpha_a + v \cdot \sin \alpha_a + r \cdot (\sin \alpha_a - v \cdot \cos \alpha_a)) \cdot F_{g,ax,a} \quad (6.20)$$

Wird die Kraft $F_{g,ax,a}$ in die Gleichungen (6.15), (6.16) und (6.18) eingesetzt, erhält man die Kräfte $F_{u,a}$, F_r und $F_{g,v,a}$.

6.4 Kraftaufteilung mit Kontakt bei öffnendem Moment

Bei öffnendem Moment ändert sich die Belastungsrichtung. Die Zugkraft wird über Verbindungsmittel an der Innenecke der Rahmenecke übertragen. Die Umlenkung erzeugt eine Umlenkkraft, die zum größten Teil durch parallel zum Gehrungsschnitt eingeklebte Gewindestangen, zum Teil von den Zugstangen durch Querkraft aufgenommen wird.

Die Umlenkkraft wird durch ein Anschlußelement in die Querstangen eingeleitet. Die Verformung dieses Elementes erzeugt durch Reibung eine Querkraft auf die Querstangen. Im Druckbereich wird die Kraft durch Kontakt übertragen.

Die Kräfte mit den zugehörigen Hebelarmen sind in Abbildung 6.8 dargestellt.

Die Normal- und Querkräfte der Gewindestangen werden zu Resultierenden zusammengefaßt:

$$F_{g,ax,i} = \sum F_{g,ax,i,j} = F_{g,ax,i,1} + F_{g,ax,i,2} \quad (6.21)$$

$$F_{g,v,i} = \sum F_{g,v,i,j} = F_{g,v,i,1} + F_{g,v,i,2} \quad (6.22)$$

mit: $F_{g,ax,i}$. . . resultierende Zugkraft auf die Gewindestangen an der inneren Ecke
 $F_{g,ax,i,j}$. . . Zugkräfte der einzelnen Gewindestangenreihen an der inneren Ecke,
 $F_{g,ax,i,1}$ und $F_{g,ax,i,2}$ nach Abbildung 6.8
 $F_{g,v,i}$. . . resultierende Querkraft auf die Gewindestangen an der inneren Ecke
 $F_{g,v,i,j}$. . . Querkräfte der einzelnen Gewindestangenreihen an der inneren Ecke,
 $F_{g,v,i,1}$ und $F_{g,v,i,2}$ nach Abbildung 6.8

Die Lage der Wirkungslinie der Achsialkraft hängt von den Kräften in den Stangen ab. Der Abstand zum Trägerrand beträgt

$$a_{g,i} = \frac{\sum F_{g,ax,i,j} \cdot a_{g,i,j}}{F_{g,ax,i}} = \frac{F_{g,ax,i,1} \cdot a_{g,i,1} + F_{g,ax,i,2} \cdot a_{g,i,2}}{F_{g,ax,i}} \quad (6.23a)$$

mit: $a_{g,i}$ resultierender Abstand der Zugkraft zum Querschnittsrand
 $a_{g,i,j}$ Abstand der einzelnen Gewindestangen zum Querschnittsrand
 $a_{g,i,1}$ und $a_{g,i,2}$ nach Abbildung 6.8

Näherungsweise kann der Schwerpunkt der Gewindestangengruppe verwendet werden.

$$a_{g,i} \approx a_{g,i,app} = a_{g,i,1} + \frac{a_{g,i,2} - a_{g,i,1}}{2} \quad (6.23b)$$

mit: $a_{g,i,app}$. . . angenäherter Abstand der Zugkraft zum Querschnittsrand

Damit ist der Hebelarm

$$h_{g,i} = h_i - a_{g,i} \quad (6.24)$$

mit: $h_{g,i}$ Abstand der resultierenden Kraft in den Zugstangen zur Schwerlinie des unverstärkten Querschnitts

h_i Abstand der Schwerlinie des unverstärkten Querschnitts zum inneren Trägerrand

Der Hebelarm der Querkraft auf die Querstangen beträgt

$$h_{r,i} = (h_i - l_4 + l_3 \cdot \sin \alpha_i) / \cos \alpha_i + a_{r,i}. \quad (6.25)$$

mit: $h_{r,i}$ Hebelarm der Reibkraft bezogen auf den Schnittpunkt von Gehrungsschnitt und Schwerlinie

l_3 Länge des Ausschnitts rechtwinklig zur Trägerlängskante

l_4 Länge des Ausschnitts rechtwinklig zum Gehrungsschnitt

$a_{r,i}$ Abstand der Kraft $F_{r,i}$ zum Eintrittspunkt der Gewindestange in den Querschnitt

Der Hebelarm für die Querkraft auf die Zugstangen beträgt damit

$$h_{v,i} = h_{r,i} \cdot \sin \alpha_i + l_3 \cdot \sin \alpha_i - a_{v,i}. \quad (6.26)$$

mit: $h_{v,i}$ Hebelarm der Querkraft auf die Gewindestangen bezogen auf den Schnittpunkt von Gehrungsschnitt und Schwerlinie

Aus dem Gleichsetzen der inneren und äußeren Kräfte erhält man drei Gleichungen mit sechs Unbekannten.

$$V = -F_{u,i} - \cos \alpha_i \cdot F_{g,v,i} + \sin \alpha_i \cdot F_{g,ax,i} + F_v \quad (6.27a)$$

$$N = \cos \alpha_i \cdot F_{g,ax,i} + \sin \alpha_i \cdot F_{g,v,i} + F_{r,i} - F_{c,a} \quad (6.27b)$$

$$M = h_{r,i} \cdot F_{r,i} + a_u \cdot F_{u,i} + h_{g,i} \cdot F_{g,ax,i} + h_{v,i} \cdot F_{g,v,i} + h_{c,3} \cdot F_{c,3} \quad (6.27c)$$

Mit den Beziehungen

$$F_{u,i} = \sin \alpha_i \cdot F_{g,ax,i} - \cos \alpha_i \cdot F_{g,v,i}, \quad (6.28)$$

$$F_{r,i} = r \cdot F_{u,i} \quad \text{und} \quad (6.29)$$

$$F_{g,v,i} = v \cdot F_{g,ax,i} \quad (6.30)$$

mit: v Faktor zur Ermittlung des Anteils der Querbelastung der Zugstangen, siehe Abschnitt [6.2.2](#) auf Seite [141](#)

erhält man das folgende Gleichungssystem mit drei Unbekannten.

$$V = F_v \quad (6.31a)$$

$$N = -F_{c,3} + f_2 \cdot F_{g,ax,i} \quad (6.31b)$$

$$M = h_{c,3} \cdot F_{c,3} + f_6 \cdot F_{g,ax,i} \quad (6.31c)$$

mit: $f_2 = \cos \alpha_i + v \cdot \sin \alpha_i + r \cdot (\sin \alpha_i - v \cdot \cos \alpha_i)$ (6.31d)

$$f_6 = h_{g,i} + a_{c,i} \cdot \sin \alpha_i + v \cdot (a_{v,i} - a_u \cdot \cos \alpha_i) + r \cdot h_{r,i} \cdot (\sin \alpha_i - v \cdot \cos \alpha_i) \quad (6.31e)$$

Durch Einsetzen und Umformen erhält man die Beziehungen für die Achsialkraft in der Verstärkung

$$F_{g,ax,i} = \frac{M + N \cdot h_{c,3}}{h_{c,3} \cdot f_2 + f_6} \quad (6.32)$$

und die Druckkraft rechtwinklig zur Gehrungsfuge

$$F_{c,3} = -N + f_2 \cdot F_{g,ax,i}. \quad (6.33)$$

Wird die Kraft $F_{g,ax,i}$ in die Gleichungen (6.28), (6.29) und (6.30) eingesetzt, erhält man die Kräfte $F_{u,i}$, $F_{r,i}$ und $F_{g,v,i}$.

6.5 Kraftaufteilung ohne Kontakt für wechselndes Moment

Zug- und Druckkraft werden eingeklebten Gewindestangen zugewiesen, Kraftübertragung durch Kontakt wird nicht berücksichtigt. Die Umlenkkräfte $F_{u,a}$ und $F_{u,i}$ werden über parallel zum Gehrungsschnitt eingeklebte Gewindestangen (Querstangen) kurzgeschlossen. Sind die Längskanten der Rahmenecke nicht parallel, sind die Umlenkkräfte an der inneren und äußeren Ecke ungleich groß. Die Differenz wird durch die Querstangen in den Querschnitt eingeleitet und mit der „restlichen“ Umlenkkomponente aus den Gewindestangen kurzgeschlossen, siehe Abschnitt 6.2.5.

Durch die Verformung der Anschlußelemente werden die Gewindestangen zusätzlich zur Achsialkraft durch eine Querkraft belastet, siehe Abschnitt 6.2.2.

Die Kräfte mit den zugehörigen Hebelarmen sind in Abbildung 6.9 dargestellt. Sie haben in der eingezeichneten Wirkrichtung ein positives Vorzeichen.

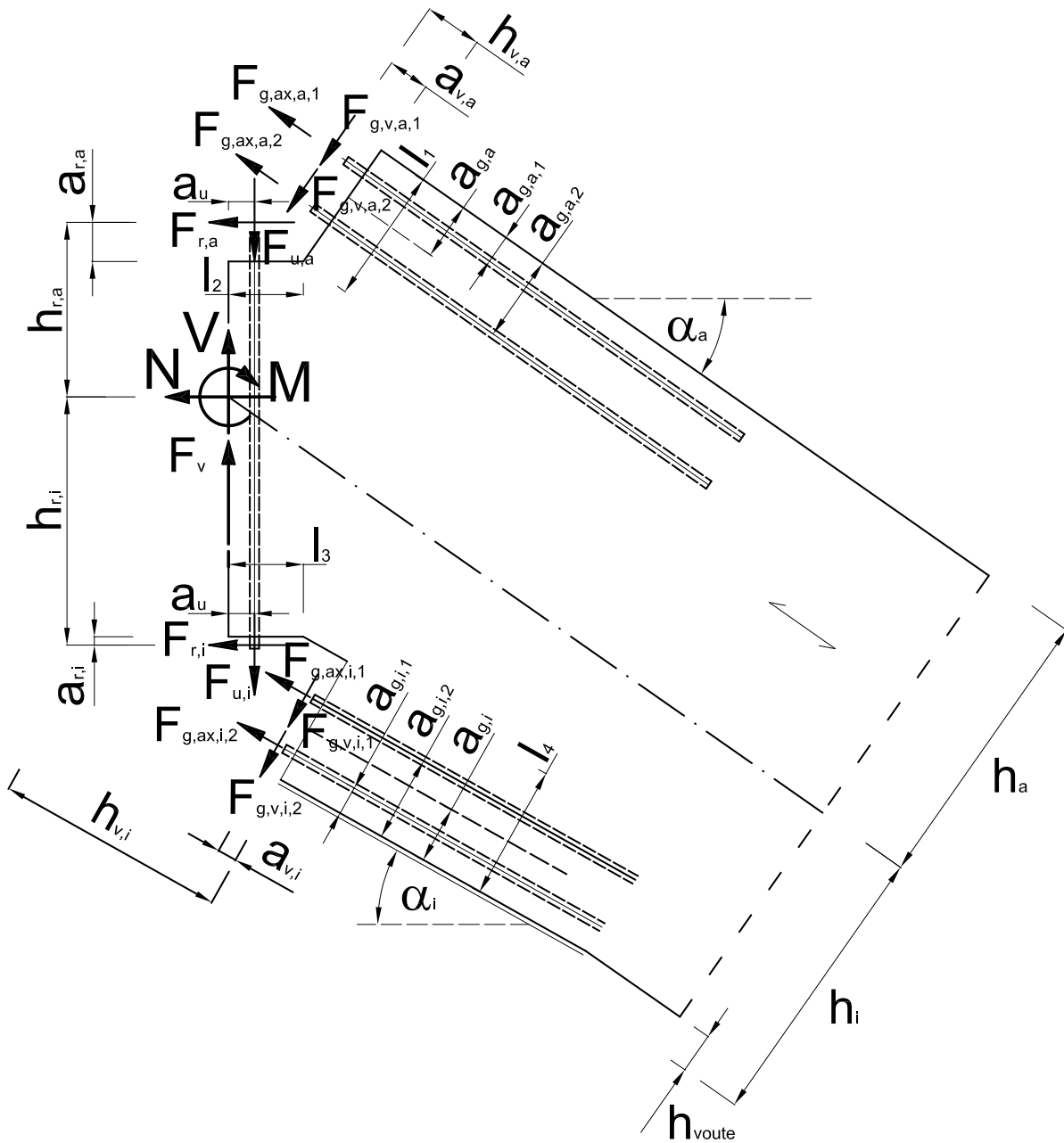


Abbildung 6.9: Kraftaufteilung bei schließendem und öffnendem Moment

Bildet man das Gleichgewicht der inneren und äußeren Kräfte erhält man drei Gleichungen.

$$V = -F_{u,i} - F_{u,a} - \cos \alpha_a \cdot F_{g,v,a} - \cos \alpha_i \cdot F_{g,v,i} \quad (6.34a)$$

$$+ \sin \alpha_a \cdot F_{g,ax,a} + \sin \alpha_i \cdot F_{g,ax,i} + F_v$$

$$N = \cos \alpha_a \cdot F_{g,ax,a} + \sin \alpha_a \cdot F_{g,v,a} + F_{r,a} \quad (6.34b)$$

$$+ \cos \alpha_i \cdot F_{g,ax,i} + \sin \alpha_i \cdot F_{g,v,i} + F_{r,i}$$

$$M = -h_{g,a} \cdot F_{g,ax,a} - h_{v,a} \cdot F_{g,v,a} + a_u \cdot F_{u,a} - h_{r,a} \cdot F_{r,a} \quad (6.34c)$$

$$+ h_{g,i} \cdot F_{g,ax,i} + h_{v,i} \cdot F_{g,v,i} + a_u \cdot F_{u,i} + h_{r,i} \cdot F_{r,i}$$

Durch Einsetzen der in den Abschnitten 6.3 und 6.4 für die Hebelarme und Kräfte angegebenen Beziehungen ergibt sich ein Gleichungssystem mit drei Unbekannten:

$$V = F_v \quad (6.35a)$$

$$N = f_2 \cdot F_{g,ax,i} + f_3 \cdot F_{g,ax,a} \quad (6.35b)$$

$$M = f_4 \cdot F_{g,ax,a} + f_5 \cdot F_{g,ax,i} \quad (6.35c)$$

mit: f_2 nach Gleichung (6.31d) auf Seite 156

$$f_3 = \cos \alpha_a + v \cdot \sin \alpha_a + r \cdot (\sin \alpha_a - v \cdot \cos \alpha_a) \quad (6.35d)$$

$$f_4 = -h_{g,a} + a_u \cdot \sin \alpha_a - v \cdot (h_{v,a} + a_u \cdot \cos \alpha_a) - h_{r,a} \cdot r \cdot (\sin \alpha_a - v \cdot \cos \alpha_a) \quad (6.35e)$$

$$f_5 = h_{g,i} + a_u \cdot \sin \alpha_i + v \cdot (h_{v,i} - a_u \cdot \cos \alpha_i) + h_{r,i} \cdot r \cdot (\sin \alpha_i - v \cdot \cos \alpha_i) \quad (6.35f)$$

Durch Auflösen erhält man Gleichungen zur Bestimmung der inneren Kräfte. Die Kraft auf die Gewindestangen an der äußeren Ecke ist

$$F_{g,ax,a} = \frac{M - N \cdot f_5 / f_2}{f_4 - \frac{f_5 \cdot f_3}{f_2}} \quad (6.36)$$

Die Kraft in den Gewindestangen an der inneren Ecke berechnet sich zu

$$F_{g,ax,i} = \frac{N - f_3 \cdot F_{g,ax,a}}{f_2} \quad (6.37)$$

Werden die Kräfte $F_{g,ax,a}$ und $F_{g,ax,i}$ in die Gleichungen (6.15), (6.16) und (6.18), sowie (6.28), (6.29) und (6.30) eingesetzt, erhält man die restlichen Kräfte.

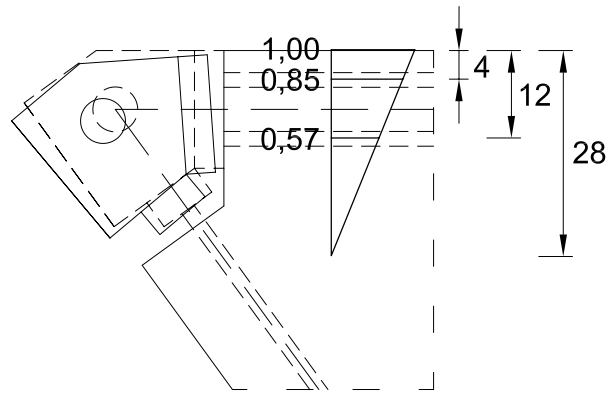


Abbildung 6.11: Verteilung der Zugkraft auf die Gewindestangen

Mit der Kraftverteilung läßt sich nach Gleichung (6.5a) auf Seite 149 der Abstand der Zugkraft zum Trägerrand ermitteln.

$$\begin{aligned}
 a_{g,a} &= \frac{F_{g,ax,a,1} \cdot a_{g,a,1} + F_{g,ax,a,2} \cdot a_{g,a,2}}{F_{g,ax,a}} = \frac{0.6 \cdot F_{g,ax,a} \cdot a_{g,a,1} + 0.4 \cdot F_{g,ax,a} \cdot a_{g,a,2}}{F_{g,ax,a}} \\
 &= 0.6 \cdot a_{g,a,1} + 0.4 \cdot a_{g,a,2} = 0.6 \cdot 4.0 + 0.4 \cdot 12.0 \\
 &= 7.2 \text{ cm}
 \end{aligned} \tag{6.39}$$

Die Annahme der Wirkungslinie der Zugkraft in der Mittellinie der Gewindestangengruppe nach Gleichung (6.5b) auf Seite 149 ergibt einen Abstand zum Trägerrand von

$$a_{g,a,app} = a_{g,a,1} + \frac{a_{g,a,2} - a_{g,a,1}}{2} = 4.0 + \frac{12.0 - 4.0}{2} = 8.0 \text{ cm}, \tag{6.40}$$

der sich nur unwesentlich von $a_{g,a}$ unterscheidet. Mit der halben Höhe des Querschnitts, $h_a = 35.0 \text{ cm}$, beträgt der Hebelarm der Zugkraft nach Gleichung (6.6) auf Seite 150

$$h_{g,a} = h_a - a_{g,a} = 35.0 - 7.2 = 27.8 \text{ cm}. \tag{6.41}$$

Die Druckkraft wird nur durch Kontakt übertragen. Nach Gleichung (6.2) auf Seite 144 beträgt die ansetzbare Höhe der Druckzone

$$h_d = 0.4 \cdot h_z = 0.4 \cdot 99.7 = 39.9 \text{ cm}. \tag{6.42}$$

Da die Druckzone nicht verstärkt ist, entfällt $a_{c,i,2}$ in Gleichung (6.8) auf Seite 150. Der Abstand der resultierenden Druckkraft zum Trägerrand ist damit

$$a_{c,i} = a_{c,i,1} = 39.9/3 = 13.3 \text{ cm}. \tag{6.43}$$

Daraus ermittelt sich der Hebelarm der Druckkraft gemäß den Gleichungen (6.10) und (6.11) auf Seite 151 mit

$$h_i = h/2 + h_{voute} = 35.0 + 24.3 = 59.3 \text{ cm} \tag{6.44}$$

zu

$$h_{c,i} = \frac{h_i}{\cos \alpha_a} - a_{c,i} = \frac{59.3}{\cos 36^\circ} - 13.3 = 60.0 \text{ cm.} \quad (6.45)$$

Die Querbelastung der Querstangen ist nach KLINGLER (2001) vernachlässigbar. $F_{r,a} = 0$, da die Umlenkraft nur durch Kontakt in die Gewindestange eingeleitet wird. Dementsprechend ist der Faktor $r = 0$. $a_{r,a}$ wird nicht benötigt und zu Null gesetzt. Der Abstand

$$\begin{aligned} h_{r,a} &= (h_a - l_1 - l_2 \cdot \sin \alpha_a) / \cos \alpha_a + a_{r,a} \\ &= (35.0 - 21.2 - 13.7 \cdot \sin 36^\circ) / \cos 36^\circ + 0 \\ &= 7.4 \text{ cm} \end{aligned} \quad (6.46)$$

nach Gleichung (6.12) auf Seite 151 wird zur Ermittlung des Abstandes $h_{v,a}$ nach Gleichung (6.13) auf Seite 151 benötigt. Die Wirkung der Querkraft auf die Zugstangen wird in der Mitte des an die Zugstangen angeschlossenen Bleches mit 4.0 cm Dicke angenommen, d.h. $a_{v,a} = 2.0 \text{ cm}$.

$$\begin{aligned} h_{v,a} &= ((h_{r,a} - a_{r,a}) \cdot \tan \alpha_a - l_2) \cdot \cos \alpha_a + a_{v,a} \\ &= ((7.4 - 0) \cdot \tan 36^\circ - 13.7) \cdot \cos 36^\circ + 2.0 \\ &= -4.7 \text{ cm} \end{aligned} \quad (6.47)$$

Nach der Ermittlung der Vorwerte kann der Faktor f_1 nach Gleichung (6.19b) auf Seite 152 berechnet werden. Der Faktor zur Ermittlung der Querbelastung der Zugstangen ist nach Gleichung (6.1) auf Seite 141 $v = 0.1$.

$$\begin{aligned} f_1 &= a_u \cdot \sin \alpha_a - h_{g,a} - h_{c,i} \cdot \cos \alpha_a \\ &\quad - v \cdot (h_{v,a} + h_{c,i} \cdot \sin \alpha_a + a_u) \\ &\quad - r \cdot (h_{c,i} \cdot (\sin \alpha_a + v \cdot \cos \alpha_a) + h_{r,a} \cdot (\sin \alpha_a - v \cdot \cos \alpha_a)) \\ &= 9.5 \cdot \sin 36^\circ - 27.8 - 60.0 \cdot \cos 36^\circ \\ &\quad - 0.1 \cdot (-4.7 + 60.0 \cdot \sin 36^\circ + 9.5) \\ &\quad - 0 \\ &= -74.8 \text{ cm} \end{aligned} \quad (6.48)$$

Die Zugkraft in den Gewindestangen beträgt damit nach Gleichung (6.19a) auf Seite 152

$$F_{g,ax,a} = \frac{M - N \cdot h_{c,i} / \cos \alpha}{f_1} = \frac{-37992 + 164.8 \cdot 60.0 / \cos 36^\circ}{-74.8} = 344.7 \text{ kN} \quad (6.49)$$

Die äußeren Zugstangen tragen 60% der Zugkraft $F_{g,ax,a}$. Die in einer Gewindestange wirkende Kraft $F_{g,ax,1}/2$ ist kleiner als die zulässige Kraft in der Klebefuge und im Querschnitt,

siehe Abschnitt 5.3.2 auf Seite 114.

$$F_{ax} = F_{g,ax,1}/2 = 0.6 \cdot F_{g,ax,a}/2 = 103.0 \text{ kN} < F_{g,k} = 178,8 \text{ kN} \quad (6.50)$$

$$< F_{y,b,k} = 220.5 \text{ kN} \quad (6.51)$$

Der mittragende Holzquerschnitt am Ende der Umlenkstangen wird nach Gleichung (3.41) auf Seite 87 mit einem Lastausbreitungswinkel

$$\phi = 5.0 \cdot 1.0 \cdot 1.07 \cdot 1.0 = 5.3^\circ \quad (6.52)$$

mit: $\phi_{0,t} \dots \dots = 5.0^\circ$

$$k_\alpha(0^\circ) \dots = 1.25 + 0.25 \cdot \sin(2 \cdot 0^\circ - 90^\circ) = 1.0$$

$$k_\rho(500) \dots = 0.0007 \cdot 500 + 0.7 = 1.07$$

$$k_u(10) \dots = 1.1 - 10 \cdot 0.01 = 1.0$$

berechnet. Damit ergibt sich eine mittragende Breite zu einer Seite der Gewindestange von

$$b_{m,1} = l_g \cdot \tan \phi = 80 \cdot \tan 5.3^\circ = 7.5 \text{ cm} > 4 \text{ cm} = 2 \cdot d. \quad (6.53)$$

Die mittragende Breite ist größer als der Abstand der Gewindestangen untereinander und zum Rand und muß daher auf das zur Verfügung stehende Maß begrenzt werden. Die zur Verfügung stehende Fläche am Ende der äußeren Zugstangen beträgt $4 \cdot d^2$. Damit ist die Zugspannung

$$\begin{aligned} \sigma_{t,ax} &= \frac{F_{g,ax}}{(4 \cdot d)^2} = \frac{103.0}{8^2} \cdot 10 = 16.1 \text{ N/mm}^2 \\ &< 35.2 \text{ N/mm}^2 = 22.5/0.64 = f_{t,o,g,k}/0.64. \end{aligned} \quad (6.54)$$

Die Querbelastung einer Zugstange beträgt analog Gleichung (6.18) auf Seite 152

$$F_v = F_{g,v,a,1}/2 = v \cdot F_{g,ax,a}/2 = 0.1 \cdot 103.0 = 10.3 \text{ kN}. \quad (6.55)$$

Die von einer Gewindestange rechtwinklig zur Achse aufnehmbare Kraft beträgt nach E DIN 1052 (1999)

$$R_k = 9.8 \text{ kN} < 10.3 \text{ kN} = F_v. \quad (6.56)$$

Damit müßten die Gewindestangen versagen. Führt man den Nachweis der Gewindestangen mit abgeschätzten 95%-Fraktilwerten, kann die Querbelastung aufgenommen werden.

$$R_{95} = 9.8/0.64 = 15.3 \text{ kN} > 10.3 \text{ kN} = F_v. \quad (6.57)$$

Die gemeinsame Wirkung von Längs- und Querbelastung der Gewindestangen wird durch Quadrieren und Addieren der Einzelanteile nachgewiesen. Die Gewindestangen haben bei diesem Nachweis noch Tragreserven.

$$\left(\frac{F_v}{R_{95}}\right)^2 + \left(\frac{F_{ax}}{F_{g,95}}\right)^2 = \left(\frac{10.3}{15.3}\right)^2 + \left(\frac{103.0}{191.15/0.64}\right)^2 = 0.45 + 0.12 = 0.57 < 1. \quad (6.58)$$

Die Druckkraft rechtwinklig zum Gehrungsschnitt ist nach Gleichung (6.20) auf Seite 152

$$F_{c,i} = -\frac{N}{\cos \alpha} + F_{g,ax,a} \cdot \cos \alpha = -\frac{164.8}{\cos 36^\circ} - 344.7 \cdot \cos 36^\circ = -482.6 \text{ kN}. \quad (6.59)$$

Mit der Druckzonenhöhe $h_d = 39.9 \text{ cm}$ ergibt sich eine Druckspannung an der inneren Ecke von

$$\begin{aligned} \sigma_{c,i} &= \frac{F_{c,i}}{h_d \cdot b/2} = \frac{-482.6}{39.9 \cdot 16/2} \cdot 10 = 15.1 \text{ N/mm}^2 \\ &> 11.3 \text{ N/mm}^2 = 0.25 \cdot 29.0/0.64 = k_{c,36} \cdot f_{c,o,g,k}/0.64 \end{aligned} \quad (6.60)$$

Die Festigkeit beim Nachweis entspricht der 95%-Fraktile der Druckfestigkeit. Der Nachweis der Druckspannung an der inneren Ecke gelingt nicht, entsprechend dem Versagen des Versuchskörpers. Die Umlenkraft errechnet sich nach Gleichung (6.15) auf Seite 151 zu

$$\begin{aligned} F_{u,a} &= F_{g,ax,a} \cdot \sin \alpha_a - v \cdot F_{g,ax,a} \cdot \cos \alpha \\ &= -344.7 \cdot \sin 36^\circ - 0.1 \cdot 344.7 \cdot \cos 36^\circ \\ &= -174.7 \text{ kN} \end{aligned} \quad (6.61)$$

Aufgeteilt auf die beiden Querstangen gelingt der Nachweis.

$$F_{u,a,1} = F_{u,a}/2 = 87.4 \text{ kN} < F_{g,k} = 178,8 \text{ kN} \quad (6.62)$$

$$< F_{y,b,k} = 220.5 \text{ kN} \quad (6.63)$$

Der mittragende Holzquerschnitt am Ende der Umlenkstangen wird nach Gleichung (3.41) auf Seite 87 mit einem Lastausbreitungswinkel

$$\phi = 7.5 \cdot 1.32 \cdot 1.07 \cdot 1.0 = 10.6^\circ \quad (6.64)$$

mit: $\phi_{0,t} \dots \dots = 7.5^\circ$

$$k_\alpha(54^\circ) \dots = 1.25 + 0.25 \cdot \sin(2 \cdot 54^\circ - 90^\circ) = 1.32$$

$$k_\rho(500) \dots = 0.0007 \cdot 500 + 0.7 = 1.07$$

$$k_u(10) \dots = 1.05 - 10 \cdot 0.01 = 1.0$$

berechnet. Damit ergibt sich eine mittragende Breite zu beiden Seiten der Gewindestange von

$$b_{m,1} = l_g \cdot \tan \phi = 80 \cdot \tan 10.6^\circ = 15.0 \text{ cm}, \quad (6.65)$$

die auf einer Seite durch den Gehrungsschnitt begrenzt wird, so daß die gesamte mittragende Breite

$$b_m = b_m + a_u = 15.0 + 9.5 = 24.5 \text{ cm} \quad (6.66)$$

beträgt. Damit ergibt sich eine Druckspannung am Ende der Gewindestangen von

$$\begin{aligned} \sigma_{c,u} &= \frac{|F_{u,a}|}{b_m \cdot b} = \frac{|-202.6|}{24.5 \cdot 16} \cdot 10 = 5.2 \text{ N/mm}^2 \\ &< 7.4 \text{ N/mm}^2 = 0.149 \cdot 29.0/0.64 = k_{c,54} \cdot f_{c,o,g,k}/0.64. \end{aligned} \quad (6.67)$$

Der Nachweis der Aufnahme der inneren Kräfte bestätigt das Versagen des Versuchskörpers im Druckbereich. Die Gewindestangen haben zu diesem Zeitpunkt noch Tragreserven, die die weitere Verformungszunahme und das „plastische“ Versagen ermöglichen.

6.6.2 Versuchskörper 2 - schließendes Moment

Nachfolgend wird die Verteilung der Bruchlast $F_u = 303.9 \text{ kN}$ auf die einzelnen Verbindungskomponenten mit dem in Abschnitt 6.3 beschriebenen Modell berechnet. In Abbildung 6.12 sind die erforderlichen Maße des Versuchskörpers abgebildet.

Der Hebelarm der Zugkraft und deren Aufteilung auf die einzelnen Gewindestangen ermittelt sich wie in Abschnitt 6.6 auf Seite 159. Der Hebelarm der Zugkraft beträgt nach Gleichung (6.41) auf Seite 160

$$h_{g,a} = 27.8 \text{ cm}. \quad (6.68)$$

Die Druckzone ist bei Versuchskörper 2 verstärkt, entsprechend wird die Druckkraft durch Kontakt und das eingeschlitzte Stahlblech übertragen. Die ansetzbare Höhe der Druckzone beträgt wie bei Versuchskörper 1 nach Gleichung (6.42) auf Seite 160

$$h_d = 39.9 \text{ cm}. \quad (6.69)$$

Der Abstand der Kontaktkraft zum inneren Trägerrand ist damit

$$a_{c,i,1} = 39.9/3 = 13.3 \text{ cm}. \quad (6.70)$$

Zusätzlich wirkt bei Versuchskörper 2 eine Druckkraft im Schlitzblech. Die Schwerlinie des Schlitzbleches ist

$$a_{c,i,2} = 1.4 \text{ cm} \quad (6.71)$$

vom inneren Trägerrand entfernt.

Beide Verbindungskomponenten weisen in etwa die gleiche Tragfähigkeit auf. Da für eine Kontaktverbindung keine Steifigkeit ermittelt werden kann, in [HOLZBAU HANDBUCH \(1991\)](#) wird sie als unnachgiebig angenommen, wird die Kraft entsprechend den Tragfähigkeiten aufgeteilt. Nach Gleichung (6.8) auf Seite 150 beträgt der Abstand der resultierenden Druckkraft zum Trägerrand damit

$$a_{c,i} = \frac{F_{r,c,i,1} \cdot a_{c,i,1} + F_{r,c,i,2} \cdot a_{c,i,2}}{F_{r,c,i}} = \frac{361.6 \cdot 13.3 + 355.2 \cdot 1.4}{361.6 + 355.2} = 7.4 \text{ cm.} \quad (6.75)$$

Daraus ermittelt sich der Hebelarm der Druckkraft mit h_i nach Gleichung (6.44) auf Seite 160 zu

$$h_{c,i} = \frac{h_i}{\cos \alpha_a} - a_{c,i} = \frac{59.3}{\cos 36^\circ} - 7.4 = 65.9 \text{ cm} \quad (6.76)$$

Mit $h_{r,a}$ und $h_{v,a}$ nach den Gleichungen (6.46) und (6.47) auf Seite 161 kann der Faktor f_1 nach Gleichung (6.19b) auf Seite 152 berechnet werden.

$$\begin{aligned} f_1 &= a_u \cdot \sin \alpha_a - h_{g,a} - h_{c,i} \cdot \cos \alpha_a \\ &\quad - v \cdot (h_{v,a} + h_{c,i} \cdot \sin \alpha_a + a_u) \\ &\quad - r \cdot (h_{c,i} \cdot (\sin \alpha_a + v \cdot \cos \alpha_a) + h_{r,a} \cdot (\sin \alpha_a - v \cdot \cos \alpha_a)) \\ &= 9.5 \cdot \sin 36^\circ - 27.8 - 65.9 \cdot \cos 36^\circ \\ &\quad - 0.1 \cdot (-4.7 + 65.9 \cdot \sin 36^\circ + 9.5) \\ &\quad - 0 \\ &= -79.9 \text{ cm} \end{aligned} \quad (6.77)$$

Die Zugkraft in den Gewindestangen beträgt damit nach Gleichung (6.19a) auf Seite 152

$$F_{g,ax,a} = \frac{M - N \cdot h_{c,i} / \cos \alpha}{f_1} = \frac{-69472 + 303.9 \cdot 65.9 / \cos 36^\circ}{-79.9} = 559.7 \text{ kN} \quad (6.78)$$

Die äußeren Zugstangen tragen 60% der Zugkraft $F_{g,ax,a}$. Die in einer Gewindestange wirkende Kraft $F_{g,ax,1}/2$ ist kleiner als die zulässige Kraft in der Klebefuge und im Querschnitt, siehe Abschnitt 5.3.2 auf Seite 114.

$$F_{ax} = F_{g,ax,1}/2 = 0.6 \cdot F_{g,ax,a}/2 = 167.9 \text{ kN} < F_{g,k} = 178,8 \text{ kN} \quad (6.79)$$

$$< F_{y,b,k} = 220.5 \text{ kN} \quad (6.80)$$

Mit der in Gleichung (6.54) auf Seite 162 verwendeten mittragenden Fläche am Ende der Gewindestange ergibt sich eine Zugspannung von

$$\begin{aligned} \sigma_{t,ax} &= \frac{F_{g,ax}}{(4 \cdot d)^2} = \frac{167.9}{8^2} \cdot 10 = 2622 \text{ N/mm}^2 \\ &< 35.2 \text{ N/mm}^2 = 22.5/0.64 = f_{t,o,g,k}/0.64 \end{aligned} \quad (6.81)$$

Die Querbelastung einer Zugstange beträgt analog Gleichung (6.18) auf Seite 152

$$F_v = F_{g,v,a,1}/2 = v \cdot F_{g,ax,a}/2 = 0.1 \cdot 167.9 = 16.8 \text{ kN}. \quad (6.82)$$

Die von einer Gewindestange rechtwinklig zur Achse aufnehmbare Kraft beträgt nach E DIN 1052 (1999)

$$R_k = 9.8 \text{ kN} < 16.8 \text{ kN} = F_v. \quad (6.83)$$

Damit müßten die Gewindestangen versagen. Der Nachweis der Gewindestangen gelingt auch mit abgeschätzten 95%-Fraktilwerten nicht:

$$R_{95} = 9.8/0.64 = 15.3 \text{ kN} < 16.8 \text{ kN} = F_v. \quad (6.84)$$

Besonders deutlich wird dies beim Nachweis der gemeinsamen Wirkung von Längs- und Querbelastung der Gewindestangen:

$$\left(\frac{F_v}{R_{95}}\right)^2 + \left(\frac{F_{ax}}{F_{g,95}}\right)^2 = \left(\frac{16.8}{15.3}\right)^2 + \left(\frac{167.9}{178.8/0.64}\right)^2 = 1.21 + 0.36 = 1.57 > 1. \quad (6.85)$$

Die Nachrechnung bestätigt das Versagen der Gewindestangen im Versuch. Die Druckkraft rechtwinklig zum Gehrungsschnitt von

$$F_{c,i} = -\frac{N}{\cos \alpha} + F_{g,ax,a} \cdot \cos \alpha = -\frac{303.9}{\cos 36^\circ} - 559.7 \cdot \cos 36^\circ = -828.5 \text{ kN} \quad (6.86)$$

nach Gleichung (6.20) auf Seite 152 wird durch das Schlitzblech und über Kontakt übertragen. Der Kontakt an der Innenecke wird sofort hergestellt, die Stabdübelverbindung des Schlitzblechs muß erst das Spiel in der Verbindung überwinden, bis sie voll tragfähig ist. Wie oben erwähnt wird die Kraft nach den Tragfähigkeiten der Verbindungskomponenten aufgeteilt. Der Anteil, der über Kontakt übertragen wird, beträgt

$$\frac{F_{r,c,i,1}}{F_{r,c,i,1} + F_{r,c,i,2}} = \frac{361.6}{361.6 + 355.2} = 50.5\%, \quad (6.87)$$

die Druckkraft wird also zu gleichen Teilen über Kontakt und das Schlitzblech übertragen. Mit der Druckzonenhöhe $h_d = 39.9 \text{ cm}$ ergibt sich eine Druckspannung an der inneren Ecke von

$$\begin{aligned} \sigma_{c,i} &= \frac{F_{c,i}/2}{h_d \cdot b/2} = \frac{-828.5/2}{39.9 \cdot 16/2} \cdot 10 = 13.0 \text{ N/mm}^2 \\ &> 11.3 \text{ N/mm}^2 = 0.25 \cdot 29.0/0.64 = k_{c,36} \cdot f_{c,o,g,k}/0.64 \end{aligned} \quad (6.88)$$

Die Kraft $F_{c,i,2}$ muß noch in die Achse des Schlitzblechs umgerechnet werden:

$$\begin{aligned} F_{c,SDue} &= F_{c,i,2}/\cos \alpha_i = (-828.5/2)/\cos 24^\circ \\ &= -453.5 \text{ kN} > 355.2 \text{ kN} = F_{r,c,i,2}. \end{aligned} \quad (6.89)$$

Sowohl die Kontaktzone als auch die Stabdübelverbindung des Schlitzblechs hätten demnach versagen können. Gegenüber den Zugstangen hatten sie die größeren Tragreserven.

Die Umlenkraft errechnet sich nach Gleichung (6.15) auf Seite 151 zu

$$\begin{aligned} F_{u,a} &= F_{g,ax,a} \cdot \sin \alpha_a - v \cdot F_{g,ax,a} \cdot \cos \alpha \\ &= -559.7 \cdot \sin 36^\circ + 0.1 \cdot 559.7 \cdot \cos 36^\circ \\ &= -283.7 \text{ kN} \end{aligned} \quad (6.90)$$

Die Verklebung der Querstangen muß nicht die volle Kraft übertragen, da ein Teil direkt mit der Umlenkraft aus dem Schlitzblech kurzgeschlossen wird. Da jedoch keine genaue Aussage über den vom Schlitzblech aufgenommenen Kraftanteil getroffen werden kann, wird der Nachweis mit der vollen Umlenkraft geführt.

$$F_{u,a,1} = F_{u,a}/2 = 141.9 \text{ kN} < F_{g,k} = 178,8 \text{ kN} \quad (6.91)$$

$$< F_{y,b,d} = 220.5 \text{ kN} \quad (6.92)$$

Mit der mittragenden Breite nach Gleichung (6.65) auf Seite 163 ergibt sich eine Druckspannung am Ende der Gewindestangen von

$$\begin{aligned} \sigma_{c,u} &= \frac{|F_{u,a}|}{b_m \cdot b} = \frac{|-164.5|}{24.5 \cdot 16} \cdot 10 = 4.2 \text{ N/mm}^2 \\ &< 7.4 \text{ N/mm}^2 = 0.149 \cdot 29.0/0.64 = k_{c,54} \cdot f_{c,o,g,k}/0.64. \end{aligned} \quad (6.93)$$

Die Aufteilung der Kräfte und der Nachweis der einzelnen Verbindungsteile zeigen, daß das Modell das Versagen richtig vorhersagt.

6.6.3 Versuchskörper 2 - öffnendes Moment

Die Belastung bei öffnendem Moment war gering, die Bruchlast wurde durch das vorzeitige Ausbrechen der Voute nicht erreicht. Zudem herrschte durch die Rückverformung in den Ausgangszustand ein unbekannter Spannungszustand im Versuchskörper. Es kann keine aussagekräftige Kraftverteilung berechnet werden.

6.7 Zusammenfassung

Das Tragverhalten von Rahmenecken mit eingeklebten Gewindestangen wurde in ein mechanisches Modell überführt, das die Berechnung der in der Verbindung herrschenden Kraftaufteilung gestattet. Das mechanische Modell ist allgemein gehalten und kann auch für die Berechnung von Firststößen verwendet werden.

Die für das mechanische Modell notwendigen Annahmen wurden auf Basis eines numerischen Modells mit einer Finite-Elemente-Berechnung festgelegt. Sowohl das mechanische als auch das numerische Modell wurden durch die in Kapitel 5 beschriebenen Bauteilversuche verifiziert.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Lastausbreitung bei Verwendung eingeklebter Gewindestangen untersucht und ein mechanisches Modell zur Ermittlung des Tragverhaltens eines neuen Rahmeneckentyps mit eingeklebten Gewindestangen entwickelt.

Der Vorschlag zur Ermittlung eines Lastausbreitungswinkels zur Berechnung der maximalen Spannung am Ende eingeklebter Gewindestangen basiert auf einer Parameterstudie, die mit einem dreidimensionalen numerischen Modell durchgeführt wurde. Das numerische Modell wurde anhand der Ergebnisse von Versuchen an dünnen Brettschichtholzkörpern verifiziert. Die Lastausbreitung wird in Abhängigkeit verschiedener geometrischer Parameter und Materialkennwerte als Winkel zur Gewindestangenachse angegeben. Es zeigt sich eine klare Abhängigkeit der Lastausbreitung vom Winkel zwischen Gewindestangenachse und Faserichtung. Der Einfluß der Materialparameter läßt sich ebenfalls recht genau erfassen, wohingegen der Einfluß der geometrischen Parameter und vor allem deren Kombination weiterer Untersuchungen bedarf. Vor diesem Hintergrund stellt der Vorschlag zur Ermittlung des Lastausbreitungswinkels einen ersten Ansatz zu einem Bemessungsvorschlag dar.

Ziel der Konstruktion der Rahmenecke ist eine einfach zu fertigende, schnell montierbare Verbindung eingeklebten Gewindestangen, die eine effiziente, rationale Fertigung und Errichtung von Tragwerken ermöglicht. Die Rahmenelemente können einzeln auf die Baustelle transportiert und dort mittels stahlbaumäßiger Verbindungen schnell zusammengefügt werden.

Der Kraftfluß in der Verbindung wurde durch ein mechanisches Modell abstrahiert und so der Bemessung zugänglich gemacht. Erforderliche Annahmen wurden durch FE-Berechnungen abgeschätzt. Bauteilversuche an zwei Rahmenecken bestätigten im wesentlichen die getroffenen Annahmen und das entwickelte mechanische Modell.

Wird die Rahmenecke ausschließlich durch schließendes Moment belastet, kann die Druckkraft durch Kontakt übertragen werden. Eine Erhöhung des Querschnittes im Eckbereich mit einer Voute und eine gleichzeitige Verstärkung des Druckbereiches kann die Querschnittsausnutzung auf 100% der Momententragfähigkeit des Holzquerschnittes steigern. Dies wurde im Versuch bestätigt.

Die Zugkraft wird immer parallel der Trägerkanten eingeleitet. Bei Verwendung einer Voute erfolgt die Zugkrafteinleitung damit parallel des Voutenrandes, im Winkel zur Faserrichtung. Die Kraft wird nach der Einleitung in den Holzquerschnitt in Faserrichtung abgetragen, aus der damit verbundenen Umlenkung entsteht eine planmäßige Querszugbeanspruchung. Um Querszugversagen zu vermeiden, müssen Zugkräfte daher faserparallel in den Querschnitt eingeleitet werden. Auf eine Voute sollte bei wechselnden Momenten verzichtet werden.

7.2 Ausblick

Der Vorschlag zur Berechnung des Lastausbreitungswinkels gilt nur bei Verwendung achsial belasteter, eingeklebter Gewindestangen und für den untersuchten Parameterbereich. Zur Verallgemeinerung sind weitere numerische und experimentelle Untersuchungen erforderlich. Interessant wäre eine Verallgemeinerung auf andere Holzarten, andere Arten der Lastweiterleitung (quer zur Stangenachse) oder auf Querbelastung der Gewindestange. Daran anschließend kann der Vorschlag auch auf andere Verbindungsmittel wie beispielsweise Stabdübel, die ebenfalls quer belastet werden, erweitert werden.

Um den Berechnungsvorschlag zu überprüfen, sollten Zugversuche mit eingeklebten Gewindestangen durchgeführt werden, bei denen die Prüfkörperabmessungen variiert werden. Aus den Bruchlasten der Versuchskörper sollten mit dem Berechnungsvorschlag Spannungen ermittelt werden, die mit den rechnerischen Bruchspannungen des Holzes übereinstimmen müssen.

Im Zuge der experimentellen Untersuchungen zur Lastausbreitung zeigte sich, daß quer zur Faser eingeklebte, druckbelastete Gewindestangen eine im Vergleich zu faserparallel eingeklebten Gewindestangen erheblich höhere Traglast aufweisen. Derart belastete Gewindestangen können zur Auflagerung von Holzträgern eingesetzt werden. Eine höhere rechnerische Traglast der Gewindestangen würde zu einer Verringerung der Anzahl der Gewindestangen und zu einer wirtschaftlicheren Verbindung führen. Der genaue Einfluß des Winkels zwischen Gewindestange und Faserrichtung auf die Tragfähigkeit eingeklebter Gewindestangen sollte in weiteren Versuchen geklärt werden.

Die Verwendung eingeklebter Gewindestangen ermöglicht es, bestehende Verbindungen im Holzbau zu optimieren und neue Verbindungen zu entwickeln. Der entwickelte Verbindungstyp läßt sich auch bei geraden Stößen anwenden. So können lange Träger in kurze Segmente aufgeteilt und problemlos transportiert werden. Auf der Baustelle können diese Einzelteile dann einfach und schnell zum Gesamtbauteil verbunden werden.

Werden Verbindungsbereiche durch eingeklebte Gewindestangen zur Aufnahme von Querszugspannungen verstärkt, steigt die Robustheit und die Traglast der Verbindung. Bemessungsmodelle hierfür müssen noch entwickelt werden.

Die Verwendung eingeklebter Gewindestangen führt aber nicht nur im Bereich der Verbindungstechnik zu einfachen Lösungen. In hochbelasteten Bereichen können sie auch als Bewehrung – vor allem als Querszugbewehrung – von Holzbauteilen eingesetzt werden. Beispiele

hierfür sind die Verstärkung von Ausklinkungen oder die Verstärkung des Firstbereiches gekrümmter Träger. Gerade bei letzterer Anwendung lassen sich erhebliche Einsparungen an Holz realisieren.

Durch die mit der Neufassung der DIN 1052 normgerecht anzuwendenden eingeklebten Gewindestangen lassen sich viele Probleme des Holzbaus elegant lösen. Dies wirkt sich positiv auf die Gestaltung wie auch auf die Wirtschaftlichkeit von Holzkonstruktionen aus.

8 Literaturverzeichnis

- Aicher 2001a** AICHER, Simon: Characteristic axial resistance of threaded rods glued in spruce dependant on adhesive type / Otto-Graf-Institut, Universität Stuttgart. 2001. – Forschungsbericht
- Aicher 2001b** AICHER, Simon: WP5 – Duration of load tests on full-sized glued-in rod specimens / Otto-Graf-Institut, Universität Stuttgart. 2001. – Forschungsbericht
- Aicher u. a. 1997** AICHER, Simon ; BORNSCHLEGL, Volker ; HERR, Jürgen: Entwicklung leistungsfähiger, geklebter Verbindungen für Rahmenecken und Stützenanschlüsse unter Verwendung hochfester Anschlußelemente / FMPA Baden-Württemberg. Stuttgart, 1997. – Forschungsbericht
- Aicher u. a. 1999** AICHER, Simon ; GUSTAFSSON, P. J. ; WOLF, Michael: Load displacement and bond strength of glued-in rods in timber influenced by adhesive, wood density, rod slenderness and diameter. In: *Proceedings 1st RILEM Symposium on Timber Engineering*. Stockholm, 1999, S. 369–378
- Aicher und Herr 1997** AICHER, Simon ; HERR, Jürgen: Bonded glulam-steel rod connections with long anchorage length. In: *Otto-Graf-Journal* Bd. 8. 1997, S. 232 – 254
- Aicher u. a. 1998** AICHER, Simon ; HÖFFLIN, Lilian ; WOLF, Michael: Influence of specimen geometry on stress distributions in pull-out tests of glued-in steel rods in wood. In: *Otto-Graf-Journal* Bd. 9. 1998, S. 205 – 217
- Ballerini u. a. 1994** BALLERINI, M. ; PIAZZA, M. ; ZANON, P.: Static and cyclic behaviour of glued joints in timber. In: *Pacific Timber Engineering Conference* Bd. 2. Gold Coast Australia, Juli 1994, S. 811 – 818
- Banzhaf 1998** BANZHAF, Kerstin: *Erstellung von Bemessungstabellen für biegesteife Trägerstöße im Holzbau*, Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart, Diplomarbeit, Juli 1998
- Blaß u. a. 1996** BLASS, H. J. ; EBERHART, O. ; EHLBECK, Jürgen ; GEROLD, Matthias: Wirkungsweise von eingeleimten Gewindestangen bei der Aufnahme von Querkraften in gekrümmten Biegeträgern und Entwicklung von Bemessungsgrundlagen / Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine; Universität Karlsruhe. 1996. – Forschungsbericht

- Blaß und Laskewitz 1999** BLASS, H. J. ; LASKEWITZ, B.: Effect of spacing and edge distance on the axial strength of glued-in rods. In: *CIB-W18/32-7-12*. Graz, Austria : Working Commission W18 - Timber Structures, August 1999 (Meeting thirty-two)
- Blaß und Steck 1999** BLASS, H. J. ; STECK, Günter: Querzugverstärkungen von Holzbauteilen. In: *bauen mit holz* (1999), Nr. 3, 4, 5, S. 42 – 46, 44 – 49, 46 – 50
- Buchanan und Fairweather 1992** BUCHANAN, A. H. ; FAIRWEATHER, R. H.: Epoxied moment resisting connections for timber buildings. In: *Proceedings IPENZ Conference* Bd. 1, 1992, S. 245 – 249
- Cenci und Pedraglio 1998** CENCI, Giovanni ; PEDRAGLIO, Giovanni N.: Innovative connections for glulam timber grids. In: ([WCTE98 1998](#)), S. 826–827
- Deng 1997** DENG, James X.: *Strength of Epoxy Bonded Steel Connections in Glue Laminated Timber*, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, New Zealand, Dissertation, 1997
- DIN 1052 1996** *DIN 1052/A1 Holzbauwerke*, Oktober 1996
- DIN 1074 1991** *DIN 1074 Holzbrücken*, Mai 1991
- DIN 18800 1990** *DIN 18800 Stahlbauten, Teil 1: Bemessung und Konstruktion*, November 1990
- DIN V ENV 1995-2 1997** *DIN V ENV 1995-2, Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten, Teil 2: Brücken*, Juli 1997
- Dröge und Jäger 1965** DRÖGE, Georg ; JÄGER, Joachim: Genagelte Knotenplatten aus Buchensperrholz. In: *VDI-Zeitschrift* 107 (1965), Juni, Nr. 17, S. 745 – 750
- E DIN 1052 1999** *E DIN 1052: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken, Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau*, November 1999
- Ehlbeck u. a. 1992** EHLBECK, Jürgen ; BELCHIOR-GASPARD, Paulo ; GEROLD, Matthias: Eingeleimte Gewindestangen unter Axialbelastung bei Übertragung von großen Kräften und bei Aufnahme von Querzugkräften in Biegeträgern / Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine; Universität Karlsruhe. 1992. – Forschungsbericht
- Ehlbeck und Ehrhardt 1994** EHLBECK, Jürgen ; EHRHARDT, Wolfgang: Ermittlung der Tragfähigkeit von eingeleiteten Gewindestangen nach Langzeitbelastung / Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine; Universität Karlsruhe. 1994. – Forschungsbericht
- Ehlbeck u. a. 1991** EHLBECK, Jürgen ; GÖRLACHER, Rainer ; WERNER, Hartmut: Empfehlung zum einheitlichen genaueren Querzugnachweis für Anschlüsse mit mechanischen Verbindungsmitteln. In: *bauen mit holz* (1991), Nr. 11, S. 825 – 828

- Ehlbeck und Siebert 1987** EHLBECK, Jürgen ; SIEBERT, Wichard: Praktikable Einleimmethode und Wirkungsweise von eingeleimten Gewindestangen unter Axialbelastung bei Übertragung von großen Kräften und bei Aufnahme von Querkraften in Biegeträgern / Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine; Universität Karlsruhe. 1987. – Forschungsbericht
- Fischer 2000** FISCHER, Eckhard: *Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Lastausbreitung im Holzbau*, Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart, Diplomarbeit Nr. 2000-24X, 2000
- Gaunt 1998** GAUNT, Doug. J.: Joints in glulam using groups of epoxy grouted steel bars plus an alternative to epoxy bonding. In: ([WCTE98 1998](#)), S. 281 – 288
- Gerold 1992** GEROLD, Matthias: Verbund von Holz und Gewindestangen aus Stahl. In: *Bautechnik* 69 (1992), Nr. 4, S. 167 – 178
- Gerold 1993** GEROLD, Matthias: Anwendung von in Holz eingebrachten, in Schaftrichtung beanspruchten Gewindestangen aus Stahl. In: *Bautechnik* 70 (1993), Nr. 10, S. 603 – 613
- Hollinsky 1992** HOLLINSKY, Karlheinz: In Brettschichtholz eingeklebte Stabelemente: Verhalten bei wechselnden klimatischen Bedingungen, Teil 1: Auszugsversuche. In: *Holzforschung und Holzverwertung* (1992), Nr. 1, S. 3 – 6
- Holzbau Handbuch 1991** : *Reihe 2: Tragwerksplanung, Teil 2: Verbindungsmittel, Folge 2: Genauere Nachweise, Sonderbauarten*. Dezember 1991. (Informationsdienst Holz – holzbau handbuch)
- Jacob 1997** JACOB, Susanne: Vorbildlicher Gewerbebau in Hergatz. In: *bauen mit holz* 6 (1997), S. 404 – 408
- Johansen 1949** JOHANSEN, K. W.: Theory of timber connections. 1949 (Publ. Nr. 9)
- Johansson u. a. 1995** JOHANSSON, Carl-Johan ; SERRANO, Erik ; GUSTAFSSON, Per-Johan ; ENQUIST, Bertil: Axial strength of glued-in bolts, calculation model based on non-linear fracture mechanics. In: *CIB-W18/28-7-9*. Copenhagen, Denmark : Working Commission W18 - Timber Structures, 1995 (Meeting twenty-eight)
- Kangas 1994** KANGAS, Jorma: Joints of glulam structures based on glued-in ribbed steel rods / VTT Technical Research Centre of Finland. 1994 (196). – Forschungsbericht
- Karlsruhe 1972** Neuere Karlsruher Forschungsarbeiten und Versuche im Ingenieurholzbau. In: *bauen mit holz* (1972), Nr. 6, S. 298 – 317
- Keylwerth 1951** KEYLWERTH, Rudolf: *Die anisotrope Elastizität des Holzes und der Lagenhölzer*. VDI-Forschungsheft 430, 1951

- Klingler 2001** KLINGLER, Jörg: *FE-Untersuchung an einer Rahmenecke mit eingeklebten Gewindestangen im Holzbau*, Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart, Diplomarbeit, Nr. 2001-15X, Mai 2001
- Kohlhammer 2001** KOHLHAMMER, Thomas: *Erstellung eines Bemessungsprogramms für biegesteife Rahmenecken*, Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart, Diplomarbeit, Nr. 2001-28X, 2001
- Kolb 1968** KOLB, Hans: Versuche an geleimten Rahmenecken und Montagestößen. In: *bauen mit holz* (1968)
- Kollmann 1951** KOLLMANN, Franz: *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Bd. 1. 2. Springer-Verlag, 1951
- Kuhlmann und Lippert 2002a** KUHLMANN, Ulrike ; LIPPERT, Peter: Lastausbreitung im Holz bei Verwendung eingeklebter Gewindestangen / Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart. 2002. – Versuchsbericht
- Kuhlmann und Lippert 2002b** KUHLMANN, Ulrike ; LIPPERT, Peter: Rahmenecken mit eingeklebten Gewindestangen / Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart. 2002. – Versuchsbericht
- Moers 1981** MOERS, F.: Anschluß mit eingeleimten Gewindestäben. In: *bauen mit holz* (1981), Nr. 4, S. 228 – 231
- Möhler und Hemmer 1981** MÖHLER, K. ; HEMMER, K.: Eingeleimte Gewindestangen. In: *bauen mit holz* (1981), Nr. 5, S. 296 – 298
- Müller und Roth 1991** MÜLLER, J. ; ROTH, W. v.: Untersuchungen zum Tragverhalten von parallel zur Faser in Nadelholz eingeleimten Stäben aus unterschiedlichen Materialien. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 49 (1991), S. 85 – 90
- Neuhaus 1981** NEUHAUS, Helmuth: *Elastizitätszahlen von Fichtenholz in Abhängigkeit von der Holzfeuchtigkeit*. Institut für konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität Bochum, 1981 (Technisch-wissenschaftliche Mitteilungen)
- Neuhaus 1994** NEUHAUS, Helmuth: *Lehrbuch des Ingenieurholzbaus*. B. G. Teubner Stuttgart, 1994
- Petersen 1988** PETERSEN, Christian: *Stahlbau*. Vieweg, 1988
- Prothmann 1999** PROTHMANN, Jürgen: *Varianteuntersuchung einer Halle mit Holzrahmen*, Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart, Diplomarbeit, Nr. 1999-11X, 1999
- Racher 1995** RACHER, P.: *Mechanische Holzverbindungen - Allgemeines*. Kap. C1, S. 1 – 11, Informationsdienst Holz, 1995 (STEP 1 - Holzbauwerke)

- Ramm und Kemmler 2001** RAMM, E. ; KEMMLER, Roman: *Modellierung mit der Methode der Finiten Elemente*. Kap. C, S. 143 – 208. Berlin : Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und techn. Wiss., 2001 (Betonkalender)
- Riberholt 1986** RIBERHOLT, H.: *Glued Bolts in Glulam* / Technical University of Denmark, Lyngby. 1986 (210). – Techn. Report
- Riberholt 1988** RIBERHOLT, H.: *Glued Bolts in Glulam*. In: *CIB-W18/21-7-2 International Council for Building Research studies and documentation (Veranst.)*, Working Commission W18 - Timber Structures, 1988
- Rug 1990** RUG, W. (Hrsg.) ; Bauakademie (Veranst.): *Holzbau - 22. Jahrestagung der Arbeitsgruppe "Timber Structures" des Internationalen Rates für Bauforschung*. Bd. 279. 1990. (Bauforschung – Baupraxis)
- SAS IP 1999** SAS IP, Inc.: *ANSYS Theory Reference*. 9, 1999
- Schick 1999** SCHICK, Jochen: *Vergleich und Bewertung verschiedener Bauelemente zur Normalkraftübertragung in BSH-Träger*, Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart, Diplomarbeit, Januar 1999
- Schnell u. a. 1985** SCHNELL, Walter ; GROSS, Dietmar ; HAUGER, Werner: *Technische Mechanik*. Bd. 2. 4. Springer-Verlag, 1985
- Slavik u. a. 1993** SLAVIK, J. J. ; TURKOWSKY, S. W. ; RUG, W. ; KREISSIG, W.: *Montierbare Verbindungen in Holzkonstruktionen mit schräg eingeklebten Stäben*. In: *Die Bautechnik* 70 (1993), Nr. 4, S. 212 – 217
- Turkowsky 1990** TURKOWSKY, S. W.: *Bemessung von Leimholzkonstruktions-Verbindungen aus eingeleimten Stäben*. In: (RUG 1990), S. 27–30
- Unger 1995** UNGER, Josef: *Beitrag zur Anwendung von eingeklebten Gewindestangen in einer Rahmenecke aus Brettschichtholz*, Technische Universität Wien, Dissertation, September 1995
- Volkersen 1953** VOLKERSEN, Olaf: *Die Schubkraftverteilung in Leim-, Niet- und Bolzenverbindungen*. In: *Energie und Technik* (1953), März, Mai, Juli, S. 68–71, 103–108, 150–154
- WCTE98 1998** NATTERER, Julius (Hrsg.) ; SANDOZ, Jean L. (Hrsg.): *Proceedings of the 5th world conference on timber engineering*. Bd. 1. Montreux, Switzerland, 1998
- Zubarev 1990** ZUBAREV, G. N.: *Verbindungen mit eingeklebten Stahlstäben*. In: (RUG 1990), S. 22–23

9 Bezeichnungen

9.1 Formelzeichen und Symbole

a	Abstand
A	Fläche
b	Breite
C	Drehfedersteifigkeit
d	Durchmesser
D	Druckkraft
f	Spannung, Faktor
F	Kraft
g	Eigenlast
h	Höhe, Hebelarm
k	Faktor zur Spannungsabminderung im Winkel zur Faser
l	Länge
M	Moment
n	Anzahl
N	Normalkraft
r	Radius, Querbelastrung der Querstangen
R	aufnehmbare Kraft
s	Schneelast, Dehnung
t	Dicke
U	Umlenkkraft
v	Querbelastrung der Zugstangen
V	Querkraft
w	Windlast, Verschiebung
W	Widerstandsmoment
x	Abstand
Z	Zugkraft
α	Neigung des Gehrungsschnitts zur Trägerachse Neigung der Trägerachse zur Pressenkraft
β	Neigung des Gehrungsschnitts zur Trägerachse $= 90^\circ - \alpha$
γ	Dachneigung

δ	Öffnungswinkel der Rahmenecke
λ	Schlankheit
σ	Spannung
ϕ	Winkel
ψ	Ausnutzungsgrad

9.2 Indizes

a	außen, Variante a
abs	absolut
app	angenähert
ax	achsial
b	Variante b, Schraube, Stabdübel
c	Druck
d	Druck, Bemessungswert, dreiecksförmig
ef	effektiv
g	Gewindestange
G	Gehrungsschnitt
h	Loch
H	horizontal
i	innen
j	Zähler
k	charakteristischer Wert
li	links
m	Moment, mittragend
norm	normiert
o	oben
q	quadratisch
r	Querbelastung der Querstange, Widerstand
re	rechts
s	Gehrungsschnitt, Standard
sp	Spannungsquerschnitt
t	Zug
u	Umlenkung, unten, Bruchspannung, Bruchlast
v	Schub, Querbelastung der Zugstange
V	vertikal
y	Fließspannung, Fließlast
z	Zugkraft
0	parallel der Faser, Nulllinie
1 ... 6	Zähler
5%	5%–Fraktilwert
95%	95%–Fraktilwert
	parallel

Anhang

A Bemessungsvorschläge für eingeklebte Gewindestangen

A.1 Achsialbeanspruchung

A.1.1 Bemessungsvorschlag nach Möhler und Hemmer

MÖHLER UND HEMMER (1981) geben einen Bemessungsvorschlag für mit Resorcinklebstoff eingeklebte Gewindestangen an. Die Stangen werden in Bohrlöcher eingedreht, die mit dem Mittel aus Nenn- und Kerndurchmesser der Gewindestangen gebohrt sind. Eine Nut in der Gewindestange ermöglicht den Druckausgleich im Klebstoff und dessen Verteilung im Bohrloch.

d Nenndurchmesser der Gewindestange

$$d = d_g \quad (\text{A.1})$$

l Einklebelänge

$$l = l_g \quad (\text{A.2})$$

f_v . . . zulässige Schubspannung [N/mm²]

Bei Zugbeanspruchung rechtwinklig zur Faser eingeklebter Stangen ist der Wert für f_v zu halbieren. Zwischenwerte dürfen linear interpoliert werden.

$$\text{zul } f_v = \begin{cases} 1.2 & \text{für } d_g \leq 24 \text{ mm} \\ 0.8 & \text{für } d_g = 30 \text{ mm} \end{cases} \quad (\text{A.3})$$

A.1.2 Bemessungsvorschlag nach Gerold

GEROLD (1992) macht einen auf den Vorschlägen von MÖHLER UND HEMMER (1981) und RIBERHOLT (1986) basierenden Bemessungsvorschlag. In der Bemessungsgleichung ist der Einfluß wechselnder Holzfeuchten berücksichtigt.

d . . . Nenndurchmesser der Gewindestange

$$d = d_g \quad (\text{A.4})$$

l . . . Einklebelänge

$$l = l_g \quad (\text{A.5})$$

f_v . . . mittlere Schubspannung bei einer Rohdichte von 380 kg/m³

$$f_{v,m} = f_{v,m,b} \cdot \left(1 - k_s \cdot \frac{l_g}{d_g} \right) - \tau_{\Delta u} \cdot \gamma \quad (\text{A.6})$$

mit: γ Sicherheitsbeiwert, $\gamma = \gamma_F \cdot \gamma_M$

k_s nach GEROLD (1993)

$f_{v,m,b}$. . . nach GEROLD (1993)

$\tau_{\Delta u}$ Schubbeanspruchung der Klebefuge aus Holzfeuchteänderung, nach GEROLD (1993)

A.1.3 Bemessungsvorschlag nach DIN V ENV 1995-2

In DIN V ENV 1995-2 (1997) wird die Schubspannung abhängig vom Durchmesser und der Holzdicke berechnet. Eine Abhängigkeit von der Einklebelänge oder Schlankheit wird nicht berücksichtigt.

d . . . äquivalenter Durchmesser

$$d = d_{equ} = \min \left\{ \begin{array}{l} d_h \\ 1.25 \cdot d_g \end{array} \right. \quad (\text{A.7})$$

mit: d_h Durchmesser des Bohrlochs

d_g Durchmesser der Stange

= d_g bei Gewindestangen

= $1.1 \cdot d_g$ bei Bewehrungsstahl

l Einklebelänge

$$l = l_g \quad (\text{A.8})$$

f_v . . . charakteristische Schubspannung

$$f_{v,k} = 1.2 \cdot 10^{-3} \cdot d_{equ}^{-0.2} \cdot \rho_k^{1.5} \quad (\text{A.9})$$

A.1.4 Bemessungsvorschlag nach Kangas

KANGAS (1994) hat auf der Basis eigener Auszugversuche an eingeklebten Stahlstäben eine Bemessungsgleichung angegeben. Die Parameter sind:

d Bohrlochdurchmesser

$$d = d_h \quad (\text{A.10})$$

l effektive Einklebelänge

$$l = l_{g,ef} = l_g - 1.5 \cdot d_g \quad (\text{A.11})$$

mit: l_g Einklebelänge
 d_g Gewindestangendurchmesser

f_v . . . charakteristische Schubspannung [N/mm²]

$$f_{v,k} = 6.5 \cdot \left(1 - \frac{l_{g,ef}}{100 \cdot d_g} \right) \quad (\text{A.12})$$

A.1.5 Bemessungsvorschlag nach Riberholt

In RIBERHOLT (1986) und RIBERHOLT (1988) wird eine nicht dimensionsreine Bemessungsgleichung für die von einer Gewindestange aufnehmbare Kraft angegeben:

$$F = \begin{cases} f_{ws} \cdot \rho_k \cdot d \cdot \sqrt{l_g} & \text{für } l \geq 200 \text{ mm,} \\ f_{wl} \cdot \rho_k \cdot d \cdot l_g & \text{für } l < 200 \text{ mm.} \end{cases} \quad (\text{A.13})$$

Die mittlere Haftspannung f_v ist nicht unmittelbar erkennbar. Durch Gleichsetzen von Gleichung (A.13) mit Gleichung (2.1) auf Seite 14 und Auflösen erhält man eine Beziehung für f_v .

d Durchmesser

$$d = \max \begin{cases} d_h & \text{Bohrlochdurchmesser} \\ d_g & \text{Nenndurchmesser der Gewindestange} \end{cases} \quad (\text{A.14})$$

l Einklebelänge

$$l = l_g \quad (\text{A.15})$$

f_v . . . charakteristische Schubspannung [N/mm²]

$$f_v = \begin{cases} \frac{f_{ws} \cdot \rho_k}{\pi \cdot \sqrt{l_g}} & \text{für } l \geq 200 \text{ mm} \\ \frac{f_{wl} \cdot \rho_k}{\pi} & \text{für } l < 200 \text{ mm} \end{cases} \quad (\text{A.16})$$

mit: f_{ws} Festigkeitsparameter des Klebstoffes für $l_g \geq 200$ mm nach Tabelle A.1
 f_{wl} Festigkeitsparameter des Klebstoffes für $l_g < 200$ mm nach Tabelle A.1
 ρ_k charakteristische Dichte des Holzes [g/cm³]

Tabelle A.1: Festigkeitsparameter f_{ws} und f_{wl} nach RIBERHOLT (1988)

Festigkeitsparameter	Klebstoff	
	spröde	nichtspröde
$f_{ws,k}$ in [N/mm ^{1.5}]	520	650
$f_{wl,k}$ in [N/mm ²]	37	46
$f_{ws,m}$ in [N/mm ^{1.5}]	627	784
$f_{wl,m}$ in [N/mm ²]	44	55

A.1.6 Bemessungsvorschlag nach Blaß u.a.

BLASS U. A. (1996) studierten die bisher durchgeführten Versuchsergebnisse, ergänzten sie durch Auszugversuche, die im Besonderen auch kurze Einklebelängen berücksichtigten und paßten den Bemessungsvorschlag von Riberholt an diese zusätzlichen Versuchsergebnisse an. Die Einklebelänge geht in ihrem Vorschlag erst ab $l_g \geq 250$ mm (Riberholt 200 mm) in die Ermittlung der Haftspannung ein. Für kleinere Einklebelängen wird eine geringere mittlere Haftspannung als bei Riberholt angesetzt. Da die Versuchsergebnisse für nichtspröde Klebstoffe geringere Werte ergaben als bei Riberholt, verzichteten Blaß u. a. auf eine Unterscheidung zwischen verschiedenen Klebstoffen.

d Nenndurchmesser der Gewindestange

$$d = d_g \quad (\text{A.17})$$

l Einklebelänge

$$l = l_g \quad (\text{A.18})$$

f_v charakteristische Schubspannung [N/mm²]

$$f_v = \begin{cases} \frac{f_{ws} \cdot \rho_k}{\pi \cdot \sqrt{l_g}} & \text{für } l \geq 250 \text{ mm} \\ \frac{f_{wl} \cdot \rho_k}{\pi} & \text{für } l < 250 \text{ mm} \end{cases} \quad (\text{A.19})$$

mit: f_{ws} Festigkeitsparameter des Klebstoffes für $l_g \geq 200$ mm nach Tabelle A.2
 f_{wl} Festigkeitsparameter des Klebstoffes für $l_g < 200$ mm nach Tabelle A.2
 ρ_k charakteristische Dichte des Holzes [kg/m³]

Tabelle A.2: Festigkeitsparameter f_{ws} und f_{wl} nach [BLASS U. A. \(1996\)](#)

Festigkeitsparameter	
$f_{ws,k}$ in $[\text{N}/\text{mm}^{1.5}]$	0.520
$f_{wl,k}$ in $[\text{N}/\text{mm}^2]$	0.033
$f_{ws,m}$ in $[\text{N}/\text{mm}^{1.5}]$	0.627
$f_{wl,m}$ in $[\text{N}/\text{mm}^2]$	0.040

A.1.7 Bemessungsvorschlag in E DIN 1052

Der in [E DIN 1052 \(1999\)](#) enthaltene Bemessungsvorschlag beruht auf dem im vorigen Abschnitt beschriebenen Bemessungsvorschlag nach [BLASS U. A. \(1996\)](#). Zur einfacheren Verwendung wird die Kurve durch einen Geradenzug angenähert. Die Dichte wird dabei mit $\rho_k = 380 \text{ kg}/\text{m}^3$ angenommen.

d . . . Nenndurchmesser der Gewindestange

$$d = d_g \quad (\text{A.20})$$

l . . . Einklebelänge

$$l = l_g \quad (\text{A.21})$$

f_v . . . charakteristische Schubspannung $[\text{N}/\text{mm}^2]$

$$f_{v,k} = \begin{cases} 4.0 & \text{für } l < 250 \text{ mm} \\ (5.25 - 0.005 \cdot l) & \text{für } 250 \text{ mm} \leq l < 500 \text{ mm} \\ (3.5 - 0.0015 \cdot l) & \text{für } 500 \text{ mm} \leq l < 1000 \text{ mm} \end{cases} \quad (\text{A.22})$$

A.1.8 Bemessungsvorschlag nach Aicher

[JOHANSSON U. A. \(1995\)](#) geben ein auf der nichtlinearen Bruchmechanik basierendes Modell zur Berechnung von Verbindungen mit eingeklebten Gewindestangen an. Auf der Grundlage zahlreicher Auszugversuche an der FMPA Stuttgart wurde von [AICHER U. A. \(1999\)](#) ein Vorschlag zur Ermittlung des Mittelwerts der gemittelten Schubspannung gemacht, der ebenfalls auf der Bruchmechanik beruht. Aufbauend darauf gibt [AICHER \(2001a\)](#) einen Vorschlag an, mit dem sich charakteristische Werte der gemittelten Schubspannung berechnen lassen.

In den Versuchen zeigten sich signifikante Unterschiede zwischen den verwendeten Klebstoffen. Für einen elastischen Resorcinklebstoff gilt Gleichung (A.25). Die Elastizität dieses Klebstoffs drückt sich in einer geringen Abhängigkeit von den Parametern Stabdurchmesser und -länge aus. Gleichung (A.26) gibt die charakteristische Schubspannung für spröde Klebstoffe wie Epoxdharz oder Polyurethanklebstoff an. Hier ist der der Einfluß von Stabdurchmesser und -länge stärker ausgeprägt.

d . . . Bohrlochdurchmesser

$$d = d_h \quad (\text{A.23})$$

l . . . Einklebelänge

$$l = l_g \quad (\text{A.24})$$

f_v . . . charakteristische Schubspannung [N/mm²]

- für Phenol-Resorcinharz (nachgiebig):

$$f_{v,k} = \min \left(\begin{array}{c} 5.42 \\ 12 \cdot d_h^{-0.25} \cdot \left(\frac{l_g}{d_h} \right)^{-0.12} \end{array} \right) \quad (\text{A.25})$$

- für Epoxydharz (spröde):

$$f_{v,k} = \min \left(\begin{array}{c} 7.55 \\ 60 \cdot d_h^{-0.49} \cdot \left(\frac{l_g}{d_h} \right)^{-0.46} \end{array} \right) \quad (\text{A.26})$$

A.2 Querbeanspruchung

A.2.1 Bemessungsvorschlag nach Möhler / Hemmer

MÖHLER UND HEMMER (1981) geben die zulässige Kraft für parallel und rechtwinklig zur Faser eingeklebte Gewindestangen wie folgt an:

$$zul\ F = A_{\parallel/\perp} \cdot d^2 \quad [N]. \quad (\text{A.27})$$

mit: A_{\parallel} Festwert für parallel der Faser eingeklebte Stangen

$$= \begin{cases} 10\ \text{N/mm}^2 & \text{für } d \leq 16\ \text{mm} \\ 8\ \text{N/mm}^2 & \text{für } d = 30\ \text{mm} \end{cases}$$

(Zwischenwerte dürfen linear interpoliert werden)

A_{\perp} Festwert für rechtwinklig zur Faser eingeklebte Stangen

$$= 14\ \text{N/mm}^2 \text{ für } d \leq 30\ \text{mm}$$

Bei einer Ausmitte der Kraft zur Holzoberfläche von $e > 10\ \text{mm}$, siehe Abbildung A.1, sind die Werte um 20 % abzumindern.

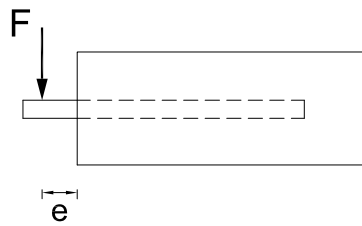


Abbildung A.1: Querbelastung im Abstand e zur Holzoberfläche

A.2.2 Bemessungsvorschlag nach Riberholt

RIBERHOLT (1988) gibt folgenden Bemessungsvorschlag für parallel und rechtwinklig zur Faser eingeklebte Gewindestangen an. Er berücksichtigt eine mögliche Verstärkung der Holzoberfläche durch aufgeklebte Baufurniersperrholzplatten.

$$F_k = \left[\left(\sqrt{e^2 + k_s} - e - t \right) \cdot f_e + t \cdot f_{e,s} \right] \cdot d \quad [N] \quad (\text{A.28})$$

mit: e Abstand des Kraftangriffs von der Holzoberfläche [mm]

$$k_s \dots \dots \frac{2 \cdot M_y}{d \cdot f_e} - t \cdot (2 \cdot e + t) \cdot \left(\frac{f_{e,s}}{f_e} - 1 \right) \quad [\text{mm}^2]$$

M_y charakteristisches Fließmoment der Gewindestange [Nmm]

t Dicke des aufgeleimten Sperrholzes [mm]

d max(Nenndurchmesser | Lochdurchmesser)

f_e Lochleibungsfestigkeit [N/mm²]

$f_{e,s}$ Lochleibungsfestigkeit des Sperrholzes [N/mm²]

A.2.3 Bemessung nach EC 5 und DIN 1052

Der Bemessung querbeanspruchter, stiftförmiger Verbindungsmittel in DIN V ENV 1995-2 (1997) und E DIN 1052 (1999) liegt die Theorie von JOHANSEN (1949) zugrunde. Nach E DIN 1052 (1999) darf bei rechtwinklig zur Faser eingeklebten Gewindestangen die Lochleibungsfestigkeit des Holzes um 25 % gegenüber dem Wert für eine Stabdübelverbindung erhöht werden. Für parallel der Faser eingeklebte Gewindestangen beträgt die Lochleibungsfestigkeit 10 % des Wertes für rechtwinklig zur Faser eingeklebte Gewindestangen. Die Bemessungsgleichungen sind in den angeführten Normen enthalten und werden hier nicht aufgeführt.

B Dehnmeßrosetten

Dehnmeßrosetten messen Dehnungen in drei Richtungen. Aus diesen Dehnungen ermittelt man die Hauptdehnung und die Hauptdehnungsrichtung. Die Umrechnung der gemessenen Dehnungen zwischen verschiedenen Koordinatensystemen erfolgt nach den folgenden Formeln, siehe [SCHNELL U. A. \(1985\)](#).

$$\varepsilon_\xi = \frac{1}{2}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) + \frac{1}{2}(\varepsilon_x - \varepsilon_y) \cos 2\varphi + \frac{1}{2}\gamma_{xy} \sin 2\varphi \quad (\text{B.1a})$$

$$\varepsilon_\eta = \frac{1}{2}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) - \frac{1}{2}(\varepsilon_x - \varepsilon_y) \cos 2\varphi - \frac{1}{2}\gamma_{xy} \sin 2\varphi \quad (\text{B.1b})$$

$$\frac{1}{2}\gamma_{\xi\eta} = -\frac{1}{2}(\varepsilon_x - \varepsilon_y) \sin 2\varphi + \frac{1}{2}\gamma_{xy} \cos 2\varphi \quad (\text{B.1c})$$

Zwei der drei Meßgitter der Rosetten schließen einen Winkel von 90° ein, die Achse des dritten Gitters ist unter einem Winkel von 45° zu den anderen beiden Gittern angeordnet. Hierfür gibt es zwei Möglichkeiten, siehe [Abbildung B.1](#). ε_x , ε_y und ε_ξ sind bekannt, γ_{xy} ergibt sich aus Gleichung [\(B.1a\)](#) durch Umformen und Einsetzen von φ . Daraus resultieren die folgenden beiden Fälle für die Berechnung des Winkels γ_{xy} :

Fall 1: $\varphi = 45^\circ$ und $\varphi = 45^\circ \pm 180^\circ$

$$\gamma_{xy} = 2\varepsilon_\xi - \varepsilon_x - \varepsilon_y \quad (\text{B.2a})$$

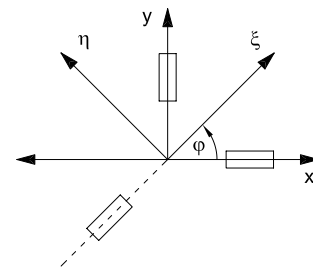
Fall 2: $\varphi = -45^\circ$ und $\varphi = -45^\circ \pm 180^\circ$

$$\gamma_{xy} = -(2\varepsilon_\xi - \varepsilon_x - \varepsilon_y) \quad (\text{B.2b})$$

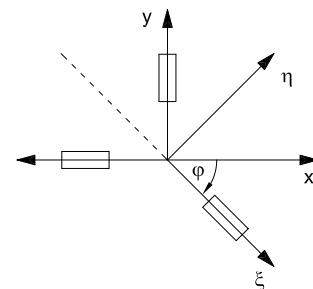
Mit diesen Daten läßt sich die Hauptdehnungsrichtung berechnen:

$$\tan 2\varphi^* = \frac{\gamma_{xy}}{\varepsilon_x - \varepsilon_y} \quad (\text{B.3})$$

Durch Einsetzen in die Gleichungen [B.1a](#) und [B.1b](#) kann man feststellen, welche Hauptdehnung zu diesem Winkel gehört.



(a) $\varphi = 45^\circ$



(b) $\varphi = -45^\circ$

Abbildung B.1: Orientierung der Meßgitter

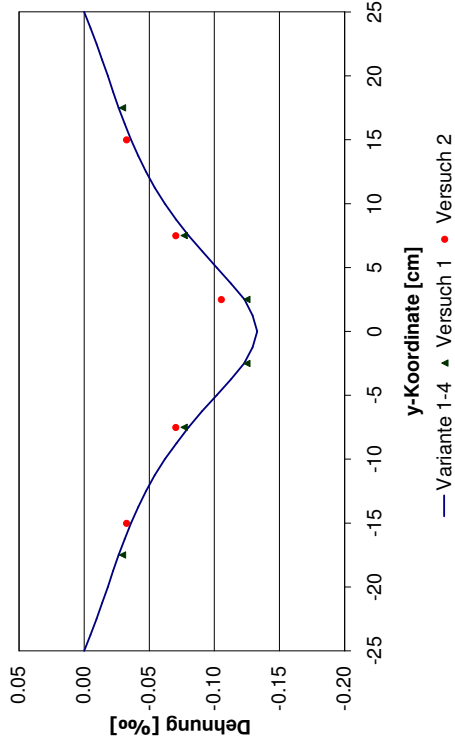
C Vergleich der Meß- und Rechenwerte

Auf den folgenden Seiten finden sich für die einzelnen Konfigurationen der Versuchskörper zur Untersuchung der Lastausbreitung Diagramme, in denen für jede Meßebene die bei einer Last von 30 kN gemessenen und die zugehörigen, mit Variante 1-4 berechneten Dehnungen dargestellt sind. Die Lage der Meßebenen wird aus Abbildung 3.3 auf Seite 39 ersichtlich.

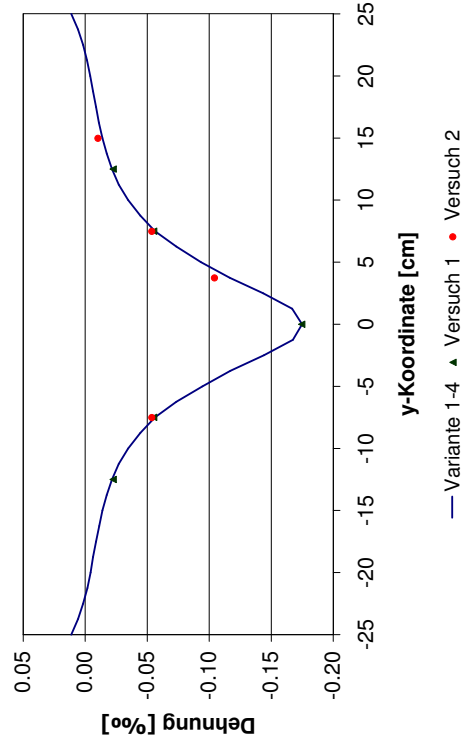
Die durchgezogene Linie gibt jeweils die mit Variante 1-4, siehe Abschnitt 3.2.3.2 auf Seite 53, berechneten Dehnungsverläufe wieder. Die gemessenen Dehnungen des ersten Körpers sind als Dreiecke, die des zweiten Körpers als Kreise eingetragen.

Die x-Achse der Diagramme entspricht den Koordinaten in Querrichtung der Körper ($-25 \text{ cm} \leq y \leq +25 \text{ cm}$). Auf der y-Achse sind die Dehnungen aufgetragen.

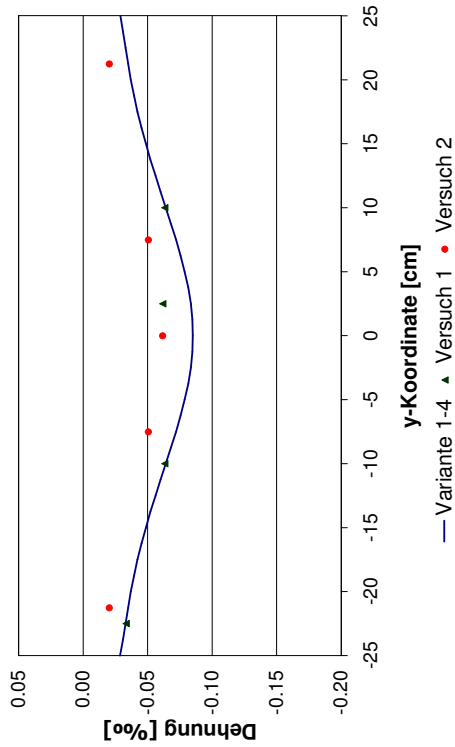
Die Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen ist für die Konfigurationen D0, D90 und Z0 sehr gut. Bei den Versuchen D45 und D67.5 streuen die Ergebnisse teilweise stark. Die mit dem Modell berechneten Dehnungen bilden aber die aus den Meßwerten erkennbaren Tendenzen richtig ab.



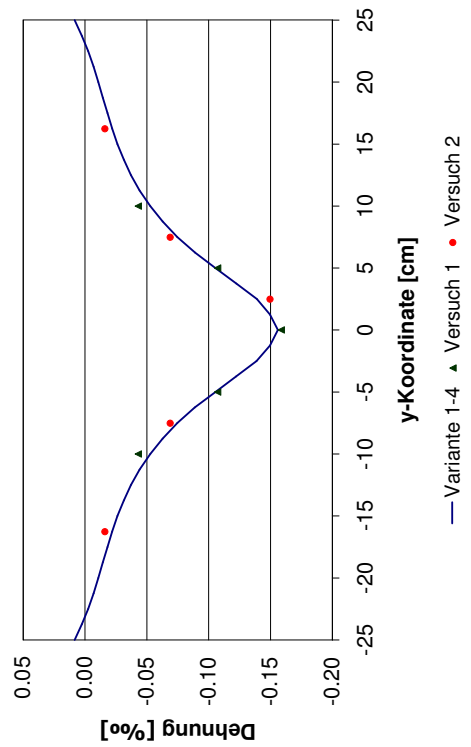
(a) $h = 20$ cm



(b) $h = 50$ cm

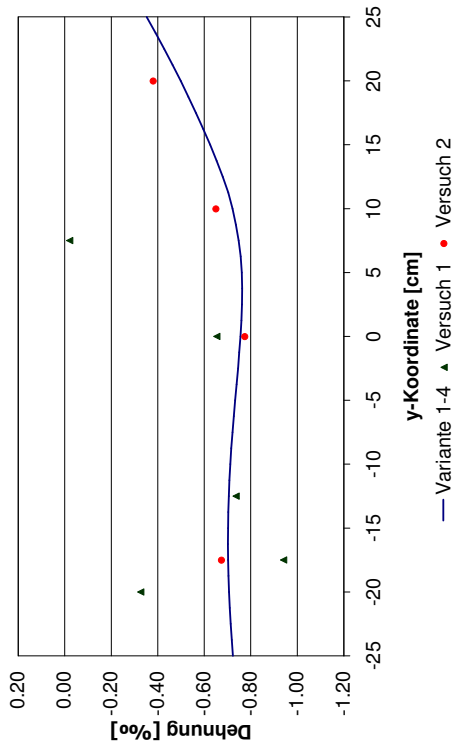


(c) $h = 60$ cm

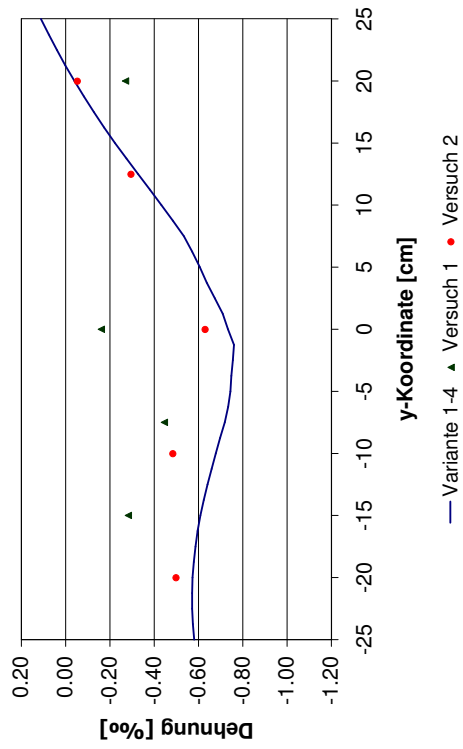


(d) $h = 70$ cm

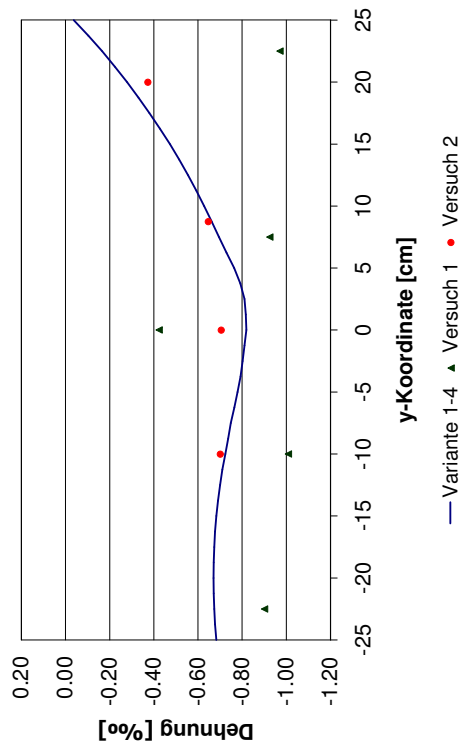
Abbildung C.1: Körper D0



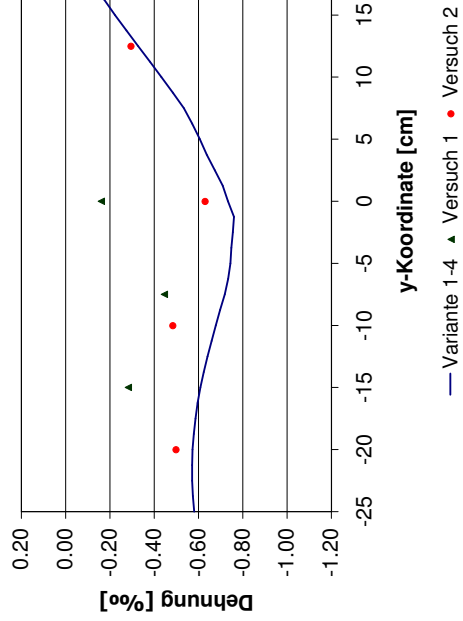
(a) $h = 20$ cm



(b) $h = 50$ cm



(c) $h = 60$ cm



(d) $h = 70$ cm

Abbildung C.2: Körper D45

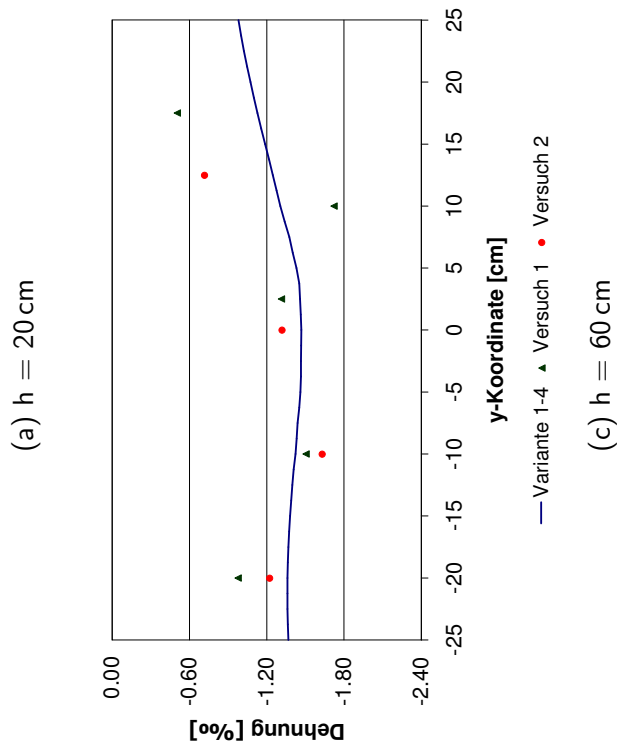
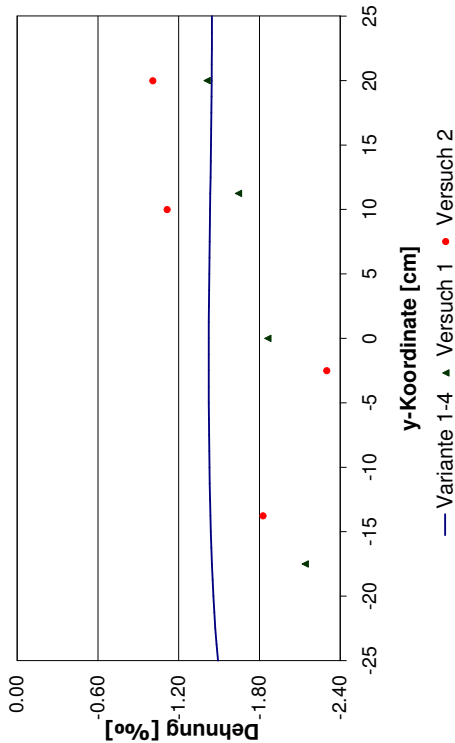
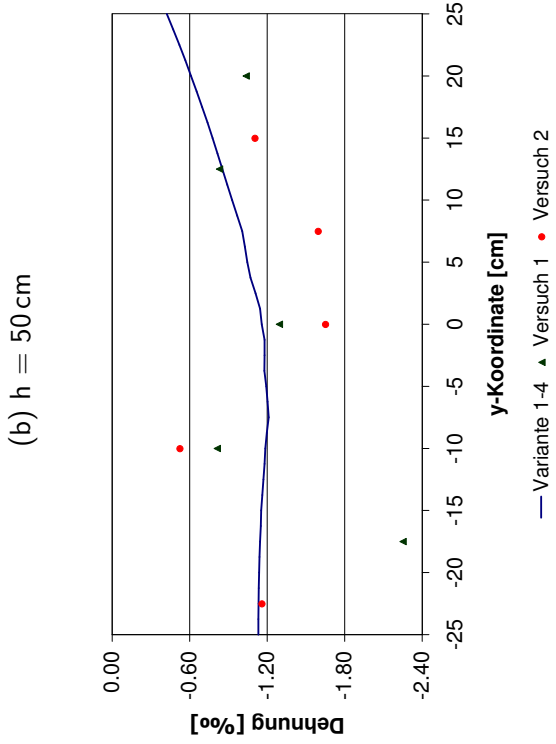
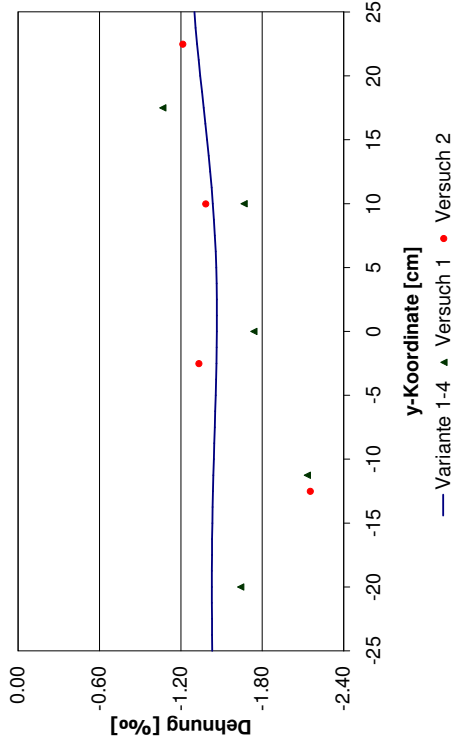
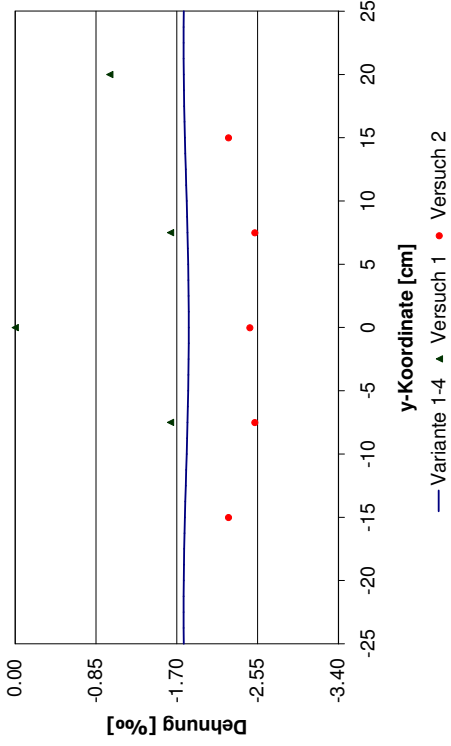
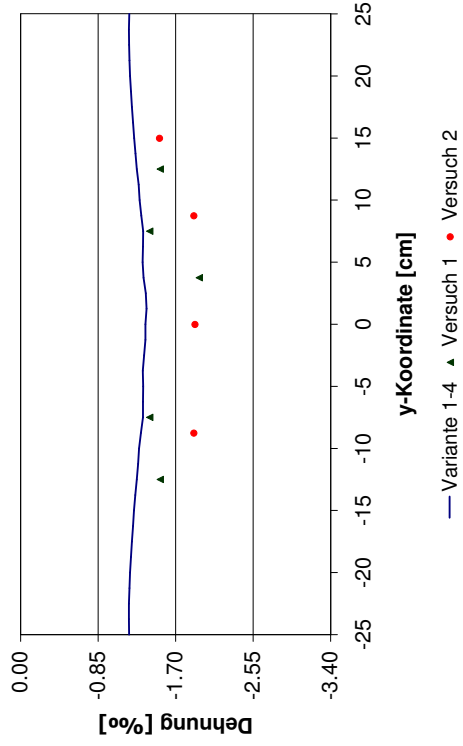


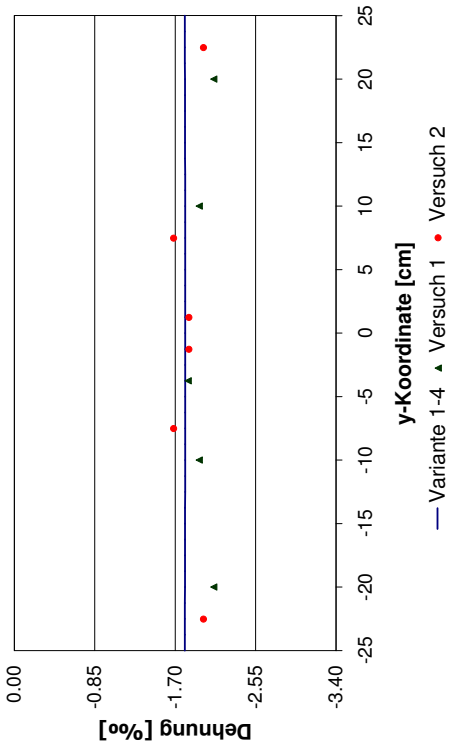
Abbildung C.3: Körper D67.5



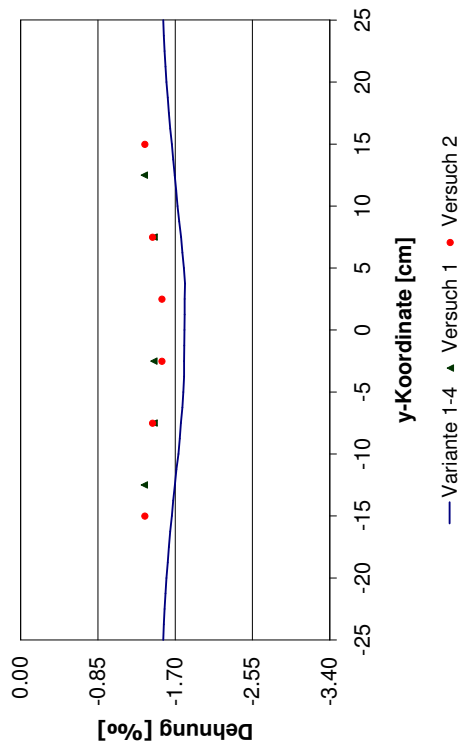
(a) $h = 20$ cm



(b) $h = 50$ cm

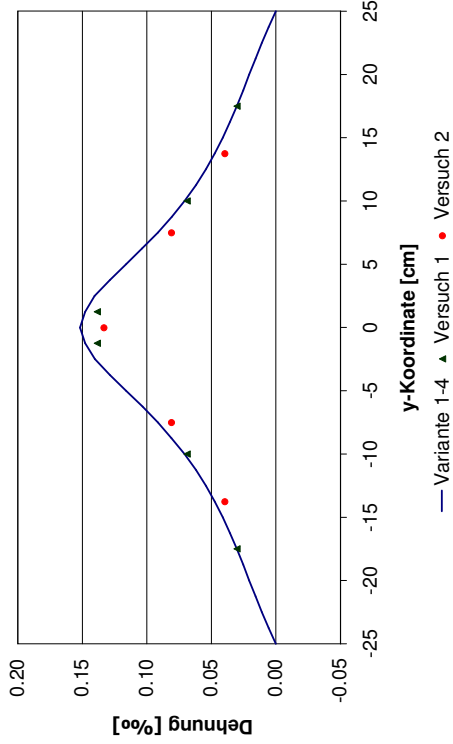


(c) $h = 60$ cm

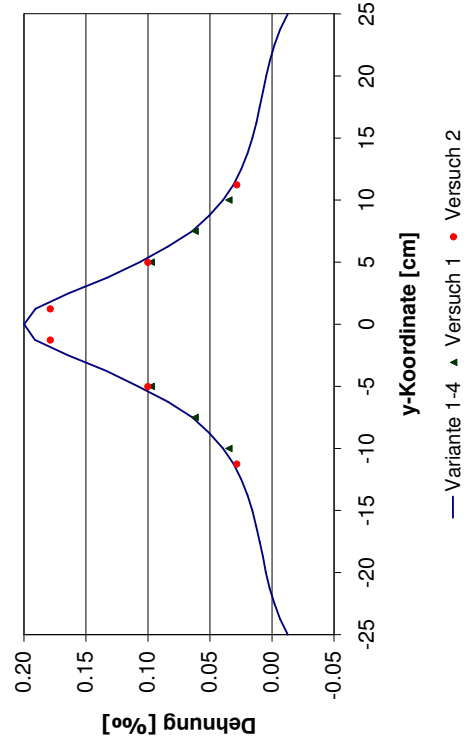


(d) $h = 70$ cm

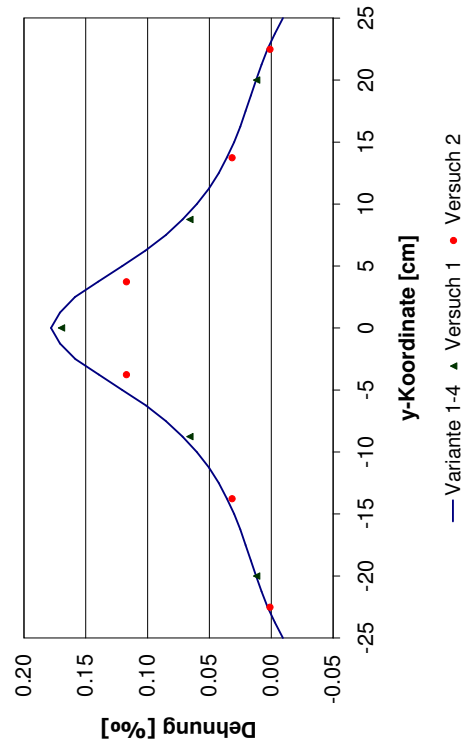
Abbildung C.4: Körper D90



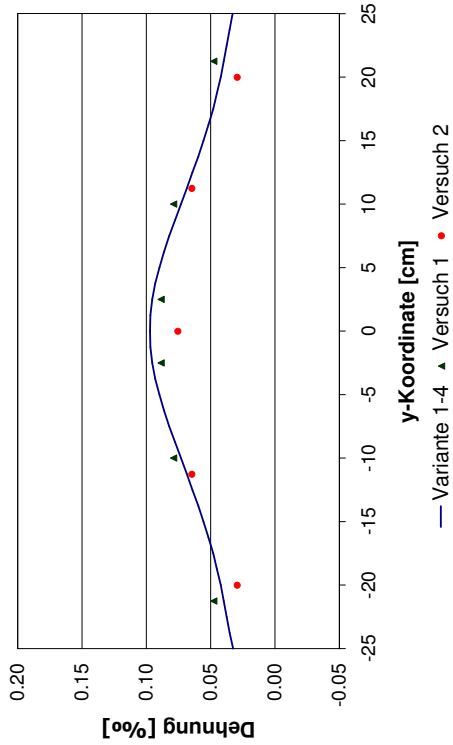
(a) $h = 20$ cm



(b) $h = 50$ cm

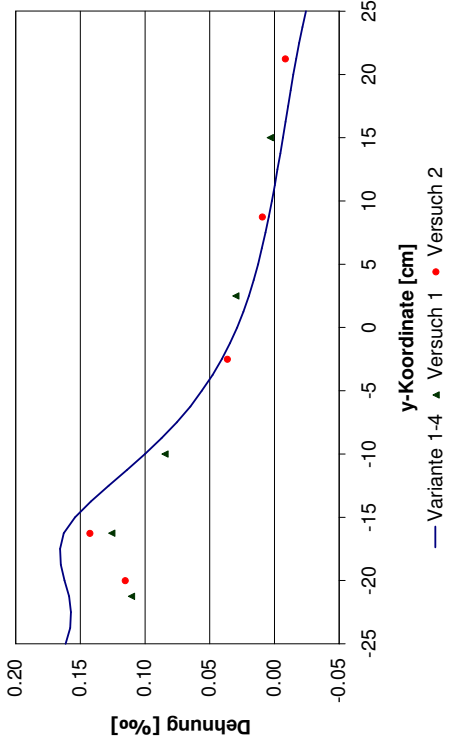


(c) $h = 60$ cm

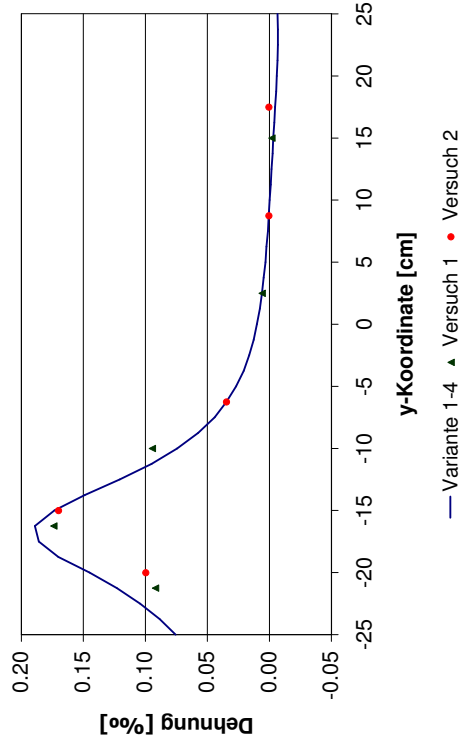


(d) $h = 70$ cm

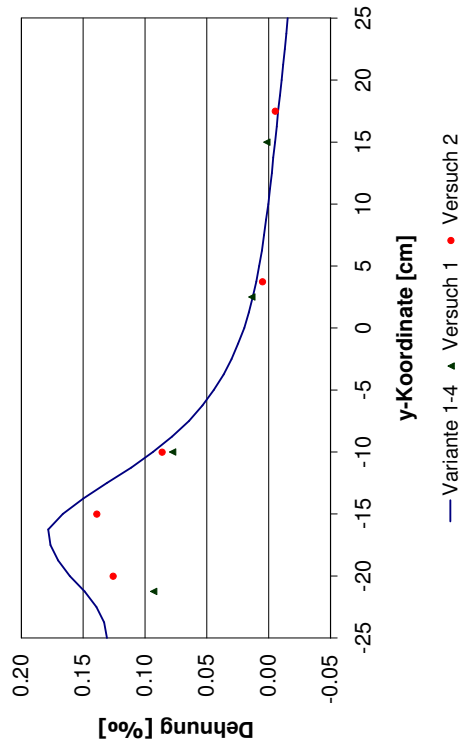
Abbildung C.5: Körper Z0



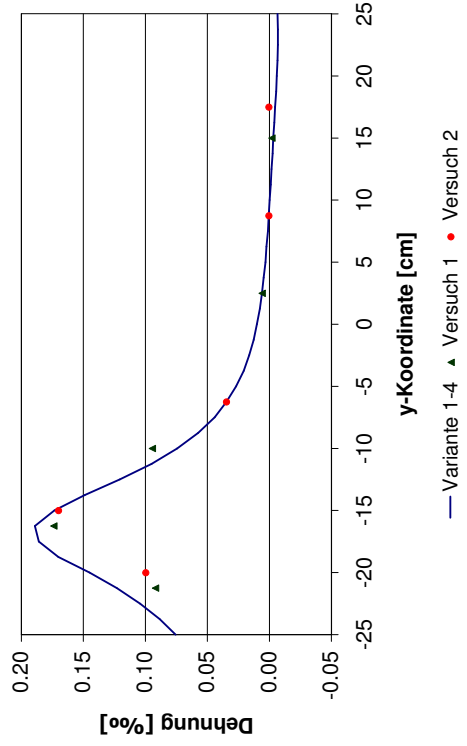
(a) $h = 20$ cm



(b) $h = 50$ cm



(c) $h = 60$ cm



(d) $h = 70$ cm

Abbildung C.6: Körper Z0E