

Das mechanische Verhalten von Klebeverbindungen im Holzbau

D-4-04/2010



Purgstaller Thomas

Institut für Holzbau und Holztechnologie
Technische Universität Graz

Das mechanische Verhalten von Klebeverbindungen im Holzbau

Masterarbeit von
Thomas PURGSTALLER

Eingereicht am
Institut für Holzbau und Holztechnologie
Technische Universität Graz

Begutachtung:
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard SCHICKHOFER

Betreuer:
Dipl.-Ing. Manfred AUGUSTIN

Graz, Mai 2010

meinen Eltern

Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt, und die in den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, Mai 2010

.....

Thomas Purgstaller

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gerhard Schickhofer, Leiter des Institutes für Holzbau und Holztechnologie der TU Graz, für die abschließende Begutachtung meiner Arbeit und sein Engagement herzlich bedanken.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinem Betreuer Dipl.-Ing. Manfred Augustin. Seine Ratschläge, Ideen, Anregungen aber auch die fachlichen und oft ermutigenden und motivierenden Gespräche haben ganz wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Ein großes Dankeschön gilt all meinen Freunden, mit denen ich eine wunderschöne und sicherlich unvergessliche Studienzeit in Graz verbringen durfte.

Mein größter Dank gilt meinen Eltern Anna und Peter die erst mein Studium ermöglichten. Ich danke ihnen für die Unterstützung, und das bedingungslose Vertrauen, das sie all die Jahre in mich gesetzt haben.

Meiner Freundin Susanne möchte ich für die liebevolle, nachsichtige und verständnisvolle Unterstützung Danken.

Kurzfassung

Der moderne Ingenieurholzbau benötigt effiziente und leistungsfähige Verbindungsmittel um beim Auftreten großer Lasten konkurrenzfähig zu sein. Die klassischen Verbindungsmittel im konstruktiven Holzbau wie Nägel, Dübel, Schrauben und Bolzen können nur noch in begrenzter Weise die Anforderungen der heutigen Zeit erfüllen. Daher geht die Nachfrage der ausführenden Ingenieure klar in Richtung geklebter Verbindungen. Der hohe Vorfertigungsgrad, welcher durch eingeklebte Verbindungsmittel im Holzbau ermöglicht wird, steigert die Effektivität bei gleichzeitigem Vorliegen kleinerer Toleranzen und senkt somit die Kosten. Die Nachteile dieser Verbindungstechnik liegen zur Zeit noch in der ausgeprägten Sensibilität gegenüber wechselnden Klimabedingungen, der eingeschränkten Duktilität und dem teilweise aufwendigen Herstellungsprozess.

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde im Anschluss an die Zusammenfassung der historischen Entwicklungsgeschichte von Klebeverbindungen im Holzbau und der Erfassung der zur Zeit gültigen normativen Festlegungen für eingeklebte Verbindungsmittel und Prüfverfahren, die Theorie der mechanischen Verklebung eingehend beleuchtet. Im Zuge dessen wurde die Herleitung der allgemein gültigen Differentialgleichung des verschieblichen Verbundes ausführlich dargestellt und in weiterer Folge auf unterschiedliche Verbundspannung-Verschiebungs-Beziehungen angewandt. Weiters wurde anhand der „Volkersen-Theorie“ eine Parameterstudie angestellt, welche anschauliche Diagramme und Aufschlüsse über das Klebstoffverhalten lieferte.

Abschließend erfolgte die Betrachtung eines bruchmechanischen Ansatzes zur Berechnung von Klebeverbindungen, sowie eine Zusammenfassung der festigkeitsbeeinflussenden Faktoren (Zeit, Temperatur und Feuchte) von Klebeverbindungen.

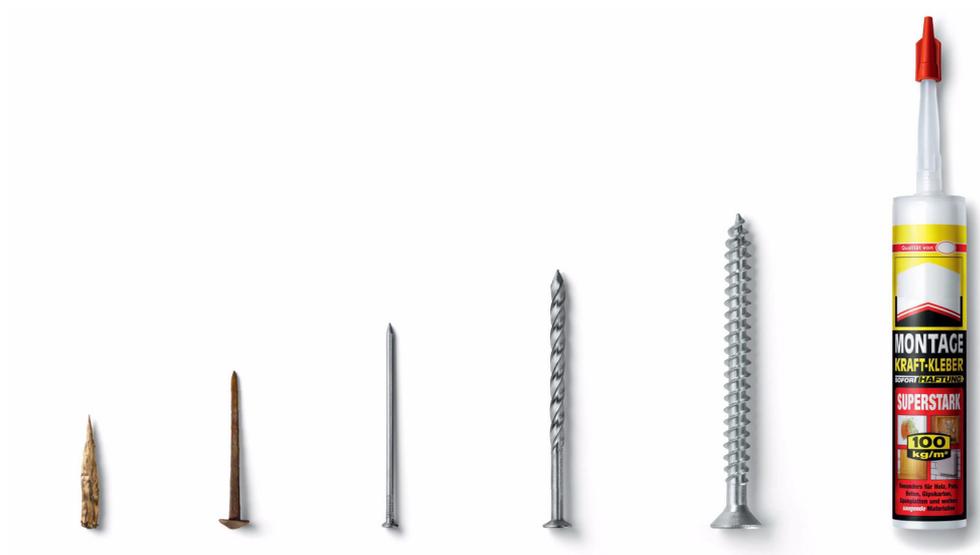
Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass Klebeverbindungen im Holzbau das Potenzial besitzen als Pendant zur Schweißverbindung im Stahlbau zu gelten. Dies liegt darin begründet, dass Klebeverbindungen die Charakteristik von starren sowie kraft- und formschlüssigen Verbindungen aufweisen. Es sind jedoch noch weitere Untersuchungen hinsichtlich des Klebstoffverhaltens und der -eigenschaften notwendig um eine sichere und zuverlässige, sowie effizientere Planung mit dieser Verbindungstechnik zu ermöglichen.

Abstract

To be competitive for structures with higher-loads Timber Engineering requires efficient and high-capacity joining-technique. Classical fasteners like nails, dowels, screws and bolts can only to a limited degree fulfill nowadays requirements. As a consequence design engineers tend more and more to high-capacity joints with adhesively bonded members. With this type of connection a high degree of prefabrication having smaller tolerances is possible which increases the efficiency and subsequently reduces the costs. On the other hand the disadvantages of this technique can be mentioned in having a high sensitivity to changing climatic conditions, a restricted ductility and the more sophisticated production process.

In this Master-Thesis a summary of the historical development of joints in Timber Engineering, the actual standardization specifications for the design of adhesively bonded joints and there testing methods are shown in detail. Special emphasis is given to the mechanical analysis of this type of connections. In this course the derivation of the differential equation for the characterization of flexible joints has been presented in detail and solutions for different stress-slip-curve relations are given. In addition Volkersen's Shear Lag Analysis has been used to depict illustrative charts for the understanding of the mechanical behaviour of adhesively bonded joints. Finally, the application of the Fracture Mechanical Approach has been used for the analysis of the load-carrying capacity. In addition a summary concerning the influence of strength-reducing factors like duration of load, temperature and moisture content has been given.

As a conclusion it can be stated that adhesively bonded joints in Timber Engineering have the potential as a counterpart to the welding in steel construction. This is the fact because this joining-technique enables the production of rigid and friction- and locked joints. But it has also to be mentioned that still further research work concerning the mechanical behaviour and the properties of adhesives is necessary to ensure a safe and reliable, but also efficient application of this joining-technique.



...eine etwas andere Evolution



Inhaltsverzeichnis

Einleitung

- 1 Der Werkstoff Klebstoff 1**
 - 1.1 Allgemeines 1
 - 1.2 Klebemechanismus 3
 - 1.3 Starre und elastische Klebeverbindungen 4
 - 1.3.1 Starre Verklebung 4
 - 1.3.2 Elastische Verklebung 4
- 2 Kleben in der Natur..... 5**
 - 2.1 Klebesysteme mit physikalischen Abbindevorgang..... 5
 - 2.2 Klebesysteme mit chemischen Abbindevorgang 6
 - 2.3 Klebesysteme mit temporärer Haftung..... 7
- 3 Ziel der Masterarbeit 8**

Stand des Wissens und der Forschung

- 1 Begriffsdefinitionen 9**
 - 1.1 Klebstoff 9
 - 1.2 Leim 10
 - 1.3 Allgemeine Begriffe zum Themenbereich Klebstoff 11
 - 1.3.1 Adhäsion 11
 - 1.3.2 Kohäsion 11
 - 1.3.3 Topfzeit 12
 - 1.3.4 Wartezeit 12

1.3.5	Härter	13
1.3.6	Primer	13
1.3.7	Fügeteile	14
1.3.8	Klebefuge	14
2	Typen von Klebeverbindungen	16
2.1	Linienförmige Klebeverbindungen	16
2.2	Flächenförmige Klebeverbindungen	17
2.3	Punktförmige Klebeverbindungen	17
2.4	Diverse Sonderformen von Klebeverbindungen.....	18
2.4.1	Schäftung	18
2.4.2	Keilzinkenverbindung	19
2.4.3	Überlappung	20
2.4.4	Stumpfe Stöße	20
3	Historischer Abriss zur Entwicklung der Verbindungstechnik im Holzbau	21
3.1	Die ersten Verbindungsmittel im Holzbau	21
3.2	Zimmermannsmäßige Verbindungen	23
3.2.1	Blatt	24
3.2.2	Zapfen	24
3.2.3	Versatz	25
3.2.4	Klauung	25
3.2.5	Kamm	26
3.2.6	Hartholzdübel	26
3.3	Ingenieurmäßige Verbindungen	27
3.3.1	Mechanisch wirkende Verbindungen	28
3.3.1.1	Nagelbau	28
3.3.1.2	Schraubenverbindungen	29
3.3.1.3	Dübel besonderer Bauart	29
3.3.1.4	Bolzen und Stabdübel	31
3.3.2	Geklebte Verbindungen	32
3.3.2.1	Brettschichtholzkonstruktionen	33
3.3.2.2	Keilzinkung	35
3.3.2.3	Volkersen-Theorie bei Nietverbindungen	37
3.3.2.4	Eingeklebte Gewindestangen	37
3.3.2.5	Eingeklebte Rohrverbinder	40
3.3.2.6	Eingeklebte Lochbleche	41
3.3.2.7	Flächenhafte Verklebungen	42
3.4	Entwicklung der Klebeverbindungen für andere Bauweisen	44

3.4.1	Natursteinbau und Mauerwerksbau	44
3.4.2	Beton und Stahlbetonbau	44
3.4.3	Stahlbau	44
3.4.4	Glasbau	44
3.4.5	Automobilbau	45
3.4.6	Flugzeugbau	45
3.5	Zukunft der Verbindungsmittel im Holzbau	46
3.5.1	Eingeklebte Gewindestange	46
3.5.1.1	Anwendungsbereiche	47
3.5.1.2	Herstellung und Einbau	48
3.5.2	Eingeklebte Rohrverbinder	49
3.5.2.1	Anwendungsbereiche	51
3.5.2.2	Herstellung und Einbau	52
3.5.3	Eingeklebte Lochbleche	53
3.5.3.1	Anwendungsbereiche	54
3.5.3.2	Herstellung und Einbau	54

Regeln der Technik

1	Eingeklebte Gewindestangen	57
1.1	Auszug aus DIN 1052:2008-12	58
1.1.1	Allgemeines	58
1.1.2	Beanspruchung rechtwinklig zur Stabachse	59
1.1.3	Beanspruchung in Richtung der Stabachse	61
1.1.4	Kombinierte Beanspruchung	63
1.2	Auszug aus SIA 265:2003	64
1.2.1	Allgemeines	64
1.2.2	Beanspruchung rechtwinklig zur Stabachse	64
1.2.3	Beanspruchung in Richtung der Stabachse	64
1.2.4	Kombinierte Beanspruchung	65
1.3	Auszug aus prEN 1995-2 Second draft, 2003-05	66
1.3.1	Allgemeines	66
1.3.2	Beanspruchung rechtwinklig zur Stabachse	66
1.3.2.1	Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit	66
1.3.2.2	Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	67
1.3.3	Beanspruchung in Richtung der Stabachse	67
1.3.3.1	Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit	69
1.3.3.2	Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	70
1.3.4	Kombinierte Beanspruchung	70
1.4	Auszug aus ÖNORM B 4100-2:2004-03	71

1.4.1	Allgemeines	71
1.4.2	Beanspruchung rechtwinklig zur Stabachse	71
1.4.3	Beanspruchung in Richtung der Stabachse	72
1.4.4	Kombinierte Beanspruchung	73
1.5	Gegenüberstellende Betrachtung und Gemeinsamkeiten der Regelungen in den analysierten Normen	74
2	Die Normung von Klebstoffen für tragende Holzbauteile	78
2.1	Allgemeines	78
2.2	Prüfung und Prüfverfahren	79
2.2.1	Längszugscherprüfung nach EN 302-1:2004-10	80
2.2.2	Delaminierungsprüfung nach EN 302-2:2004-10	82
2.2.3	Prüfung der Querkzugfestigkeit mit Einfluss von Säureschädigung der Holzfasern nach EN 302-3:2006-01	83
2.2.4	Prüfung des Einflusses von Holzschwindung auf die Scherfestigkeit nach EN 302-4:2004-10	85
2.2.5	Bestimmung der Mindestpresszeit nach EN 302-6:2004-10	86
2.2.6	Bestimmung der Gebrauchsdauer nach EN 302-7:2004-10	87
3	Prüfung und Versuchsaufbauten von Klebeverbindungen	88
3.1	Allgemeines	88
3.2	Zerstörende Prüfverfahren	89
3.2.1	Zugscherbeanspruchung	89
3.2.2	Schubbeanspruchung	90
3.2.2.1	„dicke“ Zugscherprobe	90
3.2.2.2	Stumpf geklebte Rohrproben	91
3.2.3	Zugbeanspruchung	92
3.2.4	Druckscherbeanspruchung	92
3.2.5	Torsionsbeanspruchung	93
3.2.6	Schälbeanspruchung	94
3.2.7	Spaltbeanspruchung	96
3.3	Zerstörungsfreie Prüfverfahren.....	97
3.3.1	Verfahren auf Basis mechanischer Vibration	97
3.3.2	Elektrische Verfahren	97
3.3.3	Thermische Verfahren	98
3.3.4	Strahlungsverfahren	98

Theorie der mechanischen Verklebung

1	Allgemeines	99
2	Rechenmodelle für den flächenhaften Klebeverbund	101
2.1	Geschäftete Klebeverbindung	101
2.1.1	Berechnungsablauf	102
2.1.2	Parameterstudie	103
2.2	Differentialgleichung des verschieblichen Verbundes („Volkersen-Theorie“)	104
2.2.1	Herleitung der Differentialgleichung des verschieblichen Verbundes	105
2.2.1.1	Spezielle Lösung mit den Randbedingungen für einen Zug-Druck-Körper	109
2.2.1.2	Spezielle Lösung mit den Randbedingungen für einen Zug-Zug-Körper	111
2.2.2	Vergleichende Betrachtung von Zug-Druck- und Zug-Zug-Körper	114
2.2.3	Parameterstudie	117
2.3	Lösungen der Differentialgleichung des verschieblichen Verbundes für weitere Schubspannungsansätze	122
2.3.1	Analytisch lösbare Ansätze	122
2.3.1.1	Exponentieller Ansatz für Zug-Druck-Körper und Zug-Zug-Körper	122
2.3.1.2	Bilinearer Ansatz für Zug-Druck-Körper	126
2.3.1.3	Bilinearer Ansatz für Zug-Zug-Körper für einen speziellen Fall	130
2.3.2	Numerische Lösungen der Verbundspannungsansätze	133
2.3.2.1	Bilinearer Ansatz für Zug-Zug-Körper für den allgemeinen Fall	134
2.3.2.2	Elastisch-plastischer Ansatz	135
2.3.2.3	Trilinearer Ansatz mit Entfestigung	136
2.3.2.4	Exponentieller Ansatz mit Entfestigung	136
3	Weitere Rechenmodelle für Klebeverbindungen	137
3.1	Rechenmodell für den rotationssymmetrischen Klebeverbund	137
3.2	Erweiterte Rechenmodelle für den Klebeverbund	138
3.2.1	Spannungsverteilung nach Goland und Reissner	138
3.2.2	Spannungsverteilung nach Hart-Smith	140
3.2.3	Spannungsverteilung nach Braig	142
3.2.4	Spannungsverteilung nach Glahn	142
3.2.5	Spannungsverteilung nach Hahn	142
3.2.6	Spannungsverteilung nach Roberts	143
4	Bruchmechanische Ansätze	144
4.1	Allgemeines	144
4.2	Bruchmechanische Grundlagen	145

4.2.1	Linear-elastische Bruchmechanik	146
4.2.2	Berechnung der Verbundbruchkraft	147
5	Probleme bei numerischen Berechnungen	150
5.1	Spannungsspitzen	150
5.2	Abbildungsmöglichkeiten	150
6	Einflussparameter auf die Festigkeitseigenschaften von Klebeverbindungen im Holzbau	152
6.1	Feuchte	152
6.1.1	Allgemeines	152
6.1.2	Versuche	153
6.1.2.1	Versuchsmaterialien und -methodik	153
6.1.2.2	Versuchsergebnisse	153
6.2	Temperatur	155
6.2.1	Allgemein	155
6.2.2	Versuche und Ergebnisse	155
6.2.2.1	Versuchsmaterial und -methodik	155
6.2.2.2	Versuchsergebnisse	155
6.2.3	Zeit.....	157

Schlussbetrachtung und Ausblick

Literaturverzeichnis

Einleitung

Bevor auf das eigentliche Thema dieser Masterarbeit, das mechanische Verhalten von Klebeverbindungen im Holzbau eingegangen wird, soll in diesem einleitenden Kapitel ein Blick auf den Werkstoff Klebstoff und die in der Natur vorkommenden Klebstoffe geworfen werden.

1 Der Werkstoff Klebstoff

[1]; [3]; [4]; [9]; [21]

Klebstoffe sind Materialien, welche unterschiedlichste Werkstoffe kraftschlüssig und ohne mechanische Verbindungsmittel (Nägeln, Bolzen, Dübel,...) miteinander verbinden können. Auf diese Eigenschaft wird im folgenden Abschnitt eingegangen.

1.1 Allgemeines

Im Vergleich der gängigen Fügeverfahren (Schweißen, Löten, Klemmen,...) ist das Kleben eine der am längsten angewendeten Techniken. Kleben bezeichnet ein stoffschlüssiges Verfahren, bei dem die Verbindung der Füge Teile durch eine Zugabe eines gesonderten Werkstoffes erfolgt. Die Verfahren Schweißen und Löten können mit dem Kleben verglichen werden, was die Zugabe eines fremden Stoffes betrifft. Kleben bietet, im Gegensatz zu den anderen Fügeverfahren, weiters die Möglichkeit unterschiedliche Materialien miteinander zu verbinden.

Ein Vorteil aller Klebstoffe ist die sehr dichte Verbindungsfläche, wodurch ein guter Korrosionsschutz erzielbar ist. Hohe Temperaturen unter Dauerbelastung wirken sich jedoch nachteilig auf den Klebstoff aus, da die Klebeschicht eine, im Vergleich z.B. mit Stahl geringe Temperaturbeständigkeit aufweist.

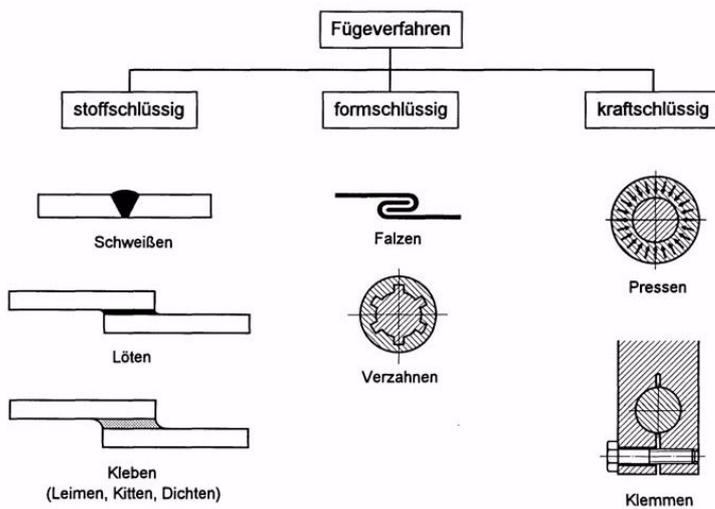


Abb. 1.1 Fügeverfahren und deren Einteilung [1]

Als Vorteile des Klebens können genannt werden:

- Es tritt keine Schwächung der Fügeteile, z.B. durch eine Bohrung auf. Daher erfolgt die Kraftübertragung flächenförmig anstatt punktförmig.
- keine Beanspruchung der Fügeteile durch hohe Temperaturen, wie bei Schweißen und Löten; keine thermisch verursachte Veränderung der Materialeigenschaften
- Es besteht die Möglichkeit, unterschiedliche Materialien, ohne eine Veränderung der Eigenschaften herbeizuführen, miteinander zu verbinden.
- Die Verbindung sehr dünner Werkstoffe ist möglich.
- Die Kombination mit form- und kraftschlüssigen Fügeverfahren führt zur Optimierung von Festigkeit, Steifigkeit und eventuell auch Korrosionsbeständigkeit.

Die Nachteile des Klebens sind:

- Es liegt eine begrenzte Temperaturbeständigkeit der Klebeschicht vor. Je nach Klebstoffgrundstoff liegt die maximale Temperatur für eine Dauerbelastung zwischen ca. 120 bis 300 °C (kurzzeitig).
- Eine Verminderung der Festigkeit durch Umwelteinflüsse (Feuchtigkeit,...) an den Oberflächen der Fügeteile ist möglich.
- Für die Oberflächenbehandlung der Fügeteile ist ein zusätzlicher Arbeitsschritt notwendig (Hobeln, Schleifen,...).
- Die erforderliche Zeit für den Reaktionsablauf der Härtung vor einer Beanspruchung ist einzuhalten.
- Es stehen nur wenige zerstörungsfreie Prüfverfahren zur Verfügung.

1.2 Klebemechanismus

Die kraftschlüssige Verbindung durch Klebstoffe wird durch eine Reihe von Parametern (Klebstoffart, Fügepartnermaterial, Verarbeitung,...) beeinflusst. Adhäsion und Kohäsion bestimmen dabei die Gesamttragfähigkeit der Klebstofffuge, ohne eine wesentliche Veränderung des Gefüges der Fügepartner herbeizuführen. Um einen Bruch in der Klebfuge bei Klebeverbindungen zu vermeiden müssen folgende Bedingungen gelten:

- $Adhäsion_{Klebfuge} > Adhäsion_{Fügeteil}$
- $Kohäsion_{Klebfuge} > Kohäsion_{Fügeteil}$

Die mechanisch-physikalische Verankerung stellt einen wesentlichen Anteil der Adhäsion dar. In Abhängigkeit der Schnittfläche (radial, tangential) erscheinen Hohlräume (Kavitäten) an der Holzoberfläche, welche in weiterer Folge der mechanischen „Verankerung“ zwischen Klebstoff und Holz dienen. Je nach Viskosität dringt der Klebstoff mehr oder weniger in die Hohlräume ein. Dieser Umstand ist in Abb. 1.2 anhand der hellen Bereiche gut zu erkennen. Kavitäten kommen ebenfalls bei glatt erscheinenden Oberflächen vor, da sie sehr kleine Dimensionen aufweisen können, welche mit bloßem Auge nicht erkennbar sind. Eine weitere Verankerungsmöglichkeit für den Klebstoff ist jene direkt unter der Holzoberfläche. Diese hängt jedoch von der Permeabilität der Hölzer sowie der Viskosität der Klebstoffe ab. Der Begriff „Permeabilität“ beschreibt dabei die Diffusionsfähigkeit von Partikeln durch Membranen hindurch. Weiters kann davon ausgegangen werden, dass auch zwischenmolekulare „Van der Waals“-Kräfte einen Anteil an den Bindungskräften einer Klebeverbindung besitzen, besonders dann, wenn die hohe Polarität des Lignin- und Zelluloseanteils betrachtet wird. Es wird jedoch angenommen, dass die mechanische Verankerung den Hauptanteil der Adhäsionswirkung beim Verkleben von Hölzern und porösen Materialien beiträgt.

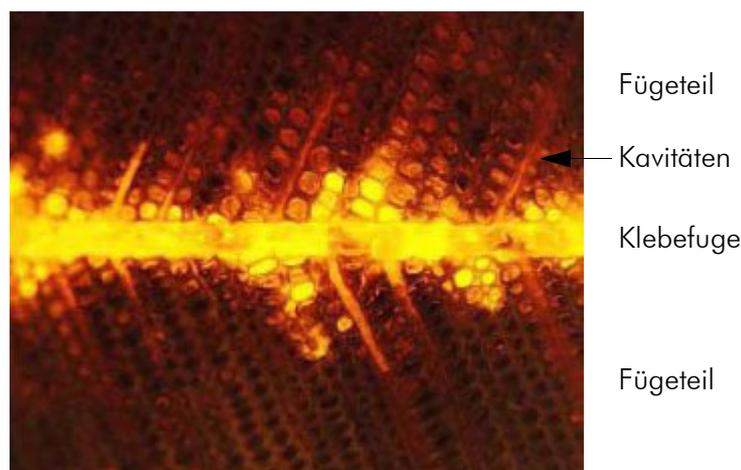


Abb. 1.2 mikroskopische Aufnahme einer Klebeschicht; „Verankerung zwischen der Klebstoffschicht und den Fügepartnern [46]

1.3 Starre und elastische Klebeverbindungen

Klebeverbindungen werden im Allgemeinen in starre und elastische Verbindungen unterteilt. Auf diese beiden Begriffe soll in diesem Abschnitt eingegangen werden.

1.3.1 Starre Verklebung

Starre Klebeverbindungen verursachen unter Scherbelastung Spannungsspitzen an den Überlappungsenden. Diese Spitzen führen bei übermäßiger Belastung dazu, dass die Klebeschicht von den Enden her einreißt, was in weiterer Folge zum Versagen der Verbindung führt. Aus Abb. 1.3 ist gut zu erkennen, dass die mittlere Zone der Klebeverbindung nur unwesentlich zur Lastübertragung beitragen.

Ob eine Verklebung als starr angesehen wird, hängt in erster Linie von der Dicke der Klebstofffuge ab. Je dünner diese ist, desto starrer ist das Verhalten der gesamten Verbindung. Weiters bestimmt auch die Klebstoffart mit ob es sich um eine starre oder elastische Verbindung handelt.

1.3.2 Elastische Verklebung

Im Gegensatz zu starren Klebeverbindungen, entstehen bei dicken, zäh-elastischen Verklebungen unter der selben Belastung (Scherbeanspruchung), keine ausgeprägten Spannungsspitzen an den Überlappungsenden. Wie aus Abb. 1.3 zu erkennen ist, verteilen sich die Spannungen gleichmäßiger über die gesamte Verbundlänge. Dies hat zur Folge, dass anhand einer Vergrößerung der Klebefläche eine Steigerung der Bruchlast möglich ist. Bei starren Klebeverbindungen ist dies nur in begrenzter Weise möglich, da die auftretenden Spannungsspitzen frühzeitig ein Versagen einleiten.

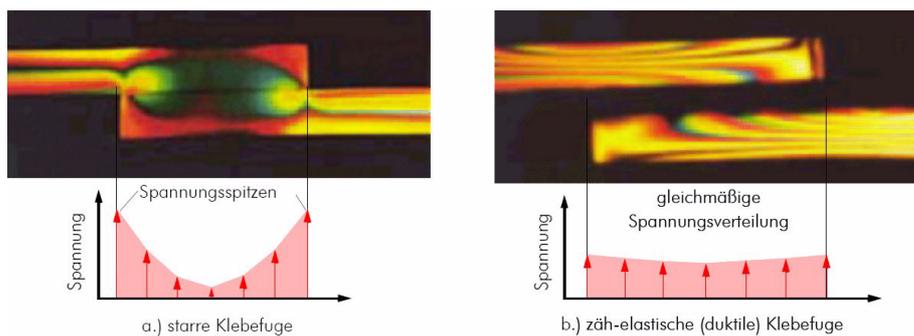


Abb. 1.3 spannungsoptische Aufnahme einer auf Abscheren beanspruchten Klebeverbindung und Verteilung der Schubspannungen in der Klebefuge; links: starre Klebefuge; rechts: zäh-elastische Klebefuge [4]

Bei den meisten Verklebungen im Ingenieurholzbau kann von dünnen Klebefugen und des weitern von einem quasi-starren Verhalten der Klebeverbindung ausgegangen werden. Es gilt folgende näherungsweise Abgrenzung:

$$\text{dünn-schichtige Verklebung} < 0,1 \text{ mm} < \text{dick-schichtige Verklebung}$$

2 Kleben in der Natur

[3]; [43]; [44]

In jeder noch so unwirtlichen Region dieser Erde verwenden die dort vorkommenden Organismen die Fügetechnik „Kleben“, oder eine Kombination aus mechanischen Haften und Kleben als Teil ihrer Überlebensstrategie. Im Folgenden soll daher kurz die in der Natur vorkommenden „Klebeverbindungen“ eingegangen werden.

Obwohl eine Vielzahl an unterschiedlichen Klebstoffkombinationen in der Natur vorkommen, bestehen die meisten aus nur wenigen Grundbaustoffen (Proteinen, Polyphenolen, Lipiden,...) oder aus Kombinationen dieser. Diese „Sparsamkeit“ ist dem effizienten Stoffmanagement der Natur zuzuschreiben. Die erreichbare Festigkeit dieser natürlichen Klebstoffe kann $10 - 14 \text{ N/mm}^2$ erreichen, welche mit dem Potential zahlreicher synthetischer Klebstoffe vergleichbar ist.

2.1 Klebesysteme mit physikalischen Abbindevorgang

In der Natur kommen eine Vielzahl an physikalisch abbindender Klebstoffsysteme vor. So sind gelöste Stoffe in organischen Lösungsmitteln ebenso üblich, wie natürlich hergestellte Dispersionen (z.B. Latexmilch des Gummibaums). Weiters findet auch das Prinzip der Schmelzklebstoffe beim Wabenbau von Bienen bzw. Wespen Anwendung. Dabei werden die Wachsmoleküle im Körper der Bienen erwärmt, so dass diese flüssig werden und somit zur Verarbeitung geeignet sind. Nach dem Auftragen und Auskühlen auf Umgebungstemperatur erreichen diese Waben eine Festigkeit, welche ausreicht um die „Insektenbauten“ an den entsprechenden Untergründen anhaften zu lassen.



Abb. 1.4 Wabenstruktur von Feldwespen [51]

Den verwendeten Celluloseklebstoff für den Bau ihrer Waben, gewinnen die Wespen aus zerkauten Holzspänen, in dem sie die wasserunlöslichen Makromoleküle der Cellulose zerlegen. Der auf diese Weise gewonnene Klebstoff entspricht in seiner chemischen Zusammensetzung weitestgehend dem heutigen Tapetenkleister.

Die Lehmester der Schwalben verdanken ihre Festigkeit und Beständigkeit der Speichelsaccharide. Fleisch fressende Pflanzen nutzen drüsenbesetzte Klebefallen um ihre Beutetiere zu fangen. Dabei verhält sich der Klebstoff wie ein Haftklebstoff und härtet nicht aus. Spinnen nutzen das selbe Prinzip beim Bau der Spinnennetze an dem in weiterer Folge die Beutetiere kleben bleiben.

2. 2 Klebesysteme mit chemischen Abbindevorgang

Bei den chemisch abbindenden Klebstoffen in der Natur handelt es sich häufig um Einkomponentensysteme. Ein Beispiel für deren natürliche Verwendung sind bei der Fortpflanzung der Florfliege zu erkennen. Dieses Insekt legt ihre Eier auf einem Stiel ab, den sie selbst mit Hilfe von reaktiven Substanzen erzeugt. Bei der Herstellung des Stiels tritt eine Flüssigkeit aus einer ihrer Drüsen aus, welche innerhalb von Sekunden aushärtet.

Weitere chemisch abbindende Klebstoffsysteme finden bei unterschiedlichen Muschelarten Anwendung. Diese Tiere nutzen den Klebstoff um an Oberflächen haften zu bleiben. Die Fäden mit denen Miesmuscheln die Verbindung zum Untergrund herstellen, können als Dreikomponenten-Unterwasser-Klebstoff angesehen werden. Der Hauptbestandteil dieses Klebstoffsystems ist ein Protein. Insgesamt verwendet eine Muschel rund 50 bis 100 solcher Fäden um an Oberflächen zu haften. Die erreichbaren Festigkeiten solcher Klebeverbindungen können dabei jene von guten Epoxidharz-Klebstoffen übertreffen.



Abb. 1.5 „Klebstofffäden“ einer Miesmuschel [52]

Die Vorteile und Überlegenheit dieser natürlichen Klebetechnik gegenüber synthetischen Klebeverbindungen zeigt sich vorallem unter Wasser. Ein weiterer Vorteil ist die biologische Abbaubarkeit der „Klebstoffe“.

2.3 Klebesysteme mit temporärer Haftung

Die temporären Klebstoffsysteme in der Natur erzielen ihre Haftwirkung ohne einen Übergang von einer flüssigen in eine feste Phase. Die Besonderheit dieser Klebeverbindung ist das sichere Haften und die Möglichkeit eines schnellen Lösens. Blattläuse nutzen z.B. einen dünnen Flüssigkeitsfilm, der kohäsive und adhesive Eigenschaften, sowie eine gute Benetzbarkeit der Beinenden aufweist. Auf diese Weise entsteht eine temporäre Klebeverbindung zwischen Tier und Klebepartner. Aufgrund der Oberflächenspannungen der Klebeschicht ist die Benetzbarkeit des Fügeteils nicht maßgebend. Untersuchungen ergaben, dass die auftretenden Adhäsionskräfte meist deutlich über jenen der Gravitations- und Beschleunigungskräfte liegen.

Geckos machen sich im Gegensatz zu den Blattläusen ein anderes Prinzip für die temporäre Haftung zu Nutzen. Den Gravitations- und Beschleunigungskräften wirken die Kletterechsen entgegen, indem sie den Abstand zu fein strukturierten Oberflächen soweit minimieren, sodass ausreichend Adhäsionsbrücken entstehen. Den Echsen kommt dabei die schwächste bekannte Bindungsart zur Hilfe, die Van-der-Waals-Wechselwirkung. Das Geheimnis der Haftung von Geckos liegt in ihren fein behaarten Füßen. Rund 5.000 Härchen/mm² aus Keratin sorgen für eine „Klebeverbindung“ mit dem Untergrund. Dabei entsteht eine Haftwirkung die eine Festigkeit von rund 0,60 N/mm² entspricht. Diese Erkenntnisse zum „Klebmechanismus“ stehen im Gegensatz zu der bisherigen Annahme, dass diese Echsen für die Haftung an Oberflächen elektrostatische Anziehungskräfte oder Klebstoffsekrete nutzen. Der Grund weshalb Geckos trotz dieser hohen Klebewirkung laufen können (15 Schritte pro Sekunde) liegt in der schälenden Bewegung der Zehen. Schälbelastung stellt für Klebeverbindungen im Allgemeinen die ungünstigste Beanspruchungsart dar.



Abb. 1.6 Tokay Gecko an einer Glasscheibe [44]

3 Ziel der Masterarbeit

Der moderne Ingenieurholzbau benötigt effiziente und leistungsfähige Verbindungsmittel um bei großen Lasten konkurrenzfähig zu sein. Die klassischen Verbindungsmittel im konstruktiven Holzbau wie Nägel, Dübel, Schrauben und Bolzen können nur noch in begrenzter Weise die Anforderungen der heutigen Zeit erfüllen. Daher geht die Nachfrage der ausführenden Ingenieure klar in Richtung der geklebten Verbindungen. Der hohe Vorfertigungsgrad, welcher durch eingeklebte Verbindungsmittel im Holzbau ermöglicht wird, steigert die Effektivität bei gleichzeitig ermöglichten kleineren Toleranzen und senkt somit die Kosten. Die Nachteile dieser Verbindungstechnik liegen zur Zeit noch in der großen Sensibilität gegenüber wechselnden Klimabedingungen, der eingeschränkten Duktilität und dem teilweise aufwendigen Herstellungsprozess.

Der erste Teil dieser Masterarbeit beschäftigt sich nach anfänglichen Begriffsdefinitionen im Themenbereich Kleben und Klebstoffe, mit der historischen Entwicklung der Verbindungstechnik im Holzbau, insbesondere mit der Geschichte von geklebten Holzprodukten. Weiters wird auch die historische Entwicklung anderer Werkstoffen beleuchtet.

Mit einer Zusammenfassung der normativen Festlegungen für eingeklebte Verbindungsmittel im Holzbau und Klebstoffprüfverfahren wird die Grundlage für Berechnungen der, in dieser Masterarbeit behandelten geklebten Verbindungsmitteln gelegt.

Den Hauptteil dieser vorliegenden Arbeit stellt die Betrachtung der Theorie der mechanischen Verklebung dar. Ausgehend von einer ausführlichen Herleitung der allgemein gültigen Differentialgleichung des verschieblichen Verbundes erfolgt eine Untersuchung unterschiedlicher Verbundspannung-Verschiebungs-Beziehungen. Weiters werden Parameterstudien anhand der „Volkersen-Theorie“ angestellt und ein bruchmechanischer Ansatz zur Berechnung von Klebeverbindungen betrachtet.

Ziel dieser Masterarbeit wird es sein, für die eingeklebten Verbindungsmittel im konstruktiven Holzbau eine genaue und zielführende Vorhersagbarkeit des Verhaltens der Klebeverbindung durch ein geeignetes Rechenmodell zu ermöglichen. Aufgrund dieser Erkenntnisse sind in weiterer Folge neue und realitätsnähere Berechnungsmethoden für Klebeverbindungen ableitbar.

Stand des Wissens und der Forschung

In diesem Kapitel wird auf den Status Quo von eingeklebten Verbindungsmittel im Holzbau eingegangen. Vorgängig erfolgt dazu die Definition wichtiger relevanter Begriffe zum Themenbereich Kleben. Weiters werden die zur Zeit verwendeten, verschiedenen Arten und Typen von Klebeverbindungen angeführt und kurz vorgestellt. Zum Abschluss dieses Kapitels wird die Geschichte der geklebten Verbindungsmittel – nicht nur das Fachgebiet des Holzbau betreffend – beleuchtet und ein Blick in die Zukunft der geklebten Verbindungen im Holzbau geworfen.

1 Begriffsdefinitionen

Im folgenden Abschnitt werden unterschiedliche Begriffsdefinitionen zum Themenbereich Kleben und Klebstoffe angeführt. Dies soll einer fälschlichen Nutzung der Begriffe in weiterer Folge vorbeugen.

1.1 Klebstoff

aus **KLEBEN - ERFOLGREICH UND FEHLERFREI**, [1]

Klebstoffe sind nichtmetallische, flüssige, pastöse aber auch feste Werkstoffe, welche durch Adhäsions- und Kohäsionskräfte Füge­teile miteinander verbinden. Die Adhäsionskräfte sind für die Oberflächenhaftung verantwortlich und die Kohäsionskräfte verleihen dem Klebstoff die innere Festigkeit.

aus **HOLZ-LEXIKON**, [2]

Klebstoff bezeichnet nichtmetallische Stoffe, die gleiche oder verschiedenartige Füge­teile durch Flächenhaftung (Adhäsion) und innere Festigkeit (Kohäsion) verbinden können. Der Oberbegriff Klebstoff schließt eine Vielzahl an gebräuchlichen Begriffen für weitere Klebstoffarten (Leim, Kleister, Lösungsmittel-, Schmelzklebstoff,...) mit ein. Der zum Teil verwendete Begriff Bindemittel ist zu vermeiden, da dieser in anderen Fachbereichen im konträren Sinne Verwendung findet und so Mißverständnisse abwendbar sind.

aus **KLEBTECHNIK**, [3]

Klebstoff steht laut DIN EN 1692 für einen nichtmetallischen Stoff, der Werkstoffe durch Oberflächenhaftung und innere Festigkeit miteinander verbindet.

eigene **BEGRIFFSDEFINITION: KLEBSTOFF**

Klebstoff dient als Überbegriff für nichtmetallische Verbindungsmittel, bei denen die Verbundwirkung auf Adhäsion und Kohäsion beruht. Anwendungsbereich kann die Verbindung gleichartiger, aber auch werkstofffremder Fügebauteile sein.

1.2 Leim

aus **KLEBEN - ERFOLGREICH UND FEHLERFREI**, [1]

Unter dem Begriff Leim versteht man relativ hochviskose Klebstoffe, welche Wasser als Lösungs- bzw. Quellmittel aufweisen. Der Aufbau von Leimen basiert auf tierischen und/oder pflanzlichen (ev. gemischt mit künstlichen) Grundstoffen.

aus **HOLZ-LEXIKON**, [2]

Als Leim werden alle jene Klebstoffe bezeichnet, welche aus synthetischen, tierischen oder pflanzlichen Grundstoffen mit Wasser als Lösungs- bzw. Dispersionsmittel bestehen. Ein Großteil der Klebstoffe kann somit der Gruppe der Leime zugeordnet werden.

aus **DAS KLEINE BAULEXIKON**, [47]

Leim ist ein wasserlöslicher Klebstoff auf Basis organischer Stoffe. Hierbei stellt aber der Wasserglasleim eine Ausnahme dar. Dieser härtet physikalisch durch Verdunsten oder Entzug des Wassers aus.

Eine Unterteilung der Leime kann wie folgt erfolgen:

- Glutinleim (Knochenleim, Hautleim) basierend auf Eiweißbasis und
- Stärkeleim (Kaseinleime) basierend auf Kohlehydratbasis

Beanspruchungsklassen können von jenen der Holzklebstoffe entnommen werden (früher: B1, B2, B3 und B4 Leim - heute: D1, D2, D3, und D4 Leim)

eigene **BEGRIFFSDEFINITION: LEIM**

Klebstoffe, welche der Gruppe der Leime zugeordnet werden können, sind ein vorwiegend im Holzbau eingesetztes Verbindungsmittel. Aus tierischen oder pflanzlichen Stoffen bestehend, ist Leim wasserlöslich.

1. 3 Allgemeine Begriffe zum Themenbereich Klebstoff

1. 3. 1 Adhäsion

aus **KLEBEN - ERFOLGREICH UND FEHLERFREI**, [1]

Der Begriff Adhäsion hat lateinischen Ursprung (lat.: adhaesio, adhaerere) und bedeutet „an etwas haften“. Somit wird mit Adhäsion das aneinander Haften gleicher oder verschiedener Stoffe durch atomare oder molekulare Anziehungskräfte beschrieben. Die Grenzschicht definiert dabei den Wirkungsbereich der Adhäsionskräfte.

aus **HOLZ-LEXIKON**, [2]

Als Adhäsion wird jene Erscheinungsform der Molekularkräfte bezeichnet, bei welcher nah aneinanderliegende Stoffe (auch unterschiedliche Materialien) mit absolut ebener Oberfläche aneinander haften. Zwischen zwei Oberflächen, bei gleichzeitigen Vorhandensein von flüssigen Stoffen, ist Adhäsion am leichtesten zu erzielen.

1. 3. 2 Kohäsion

aus **KLEBEN - ERFOLGREICH UND FEHLERFREI**, [1]

Kohäsion hat ebenfalls lateinischen Ursprung (lat.: cohaerere) und bedeutet „sich gegenseitig anziehen, zusammenhalten“. Kohäsionskräfte bezeichnen jene Kräfte, die innerhalb einer Klebeschicht wirken. Je größer diese sind, desto besser ist die Formbeständigkeit eines Stoffes (flüssig oder fest).

aus **HOLZ-LEXIKON**, [2]

Kohäsion ist die Summe aller Kräfte, welche den inneren Zusammenhalt und somit auch die Festigkeit eines Körpers ergeben. Bei Verklebungen sind diese Kräfte im flüssigen Zustand gering.

eigene **BEGRIFFSDEFINITION: ADHÄSION und KOHÄSION**

Adhäsion und Kohäsion beeinflussen maßgeblich durch ihre Kräfte die Eigenschaften von Klebstoffen. Adhäsionskräfte sind für die Haftung an den Fügeteilen verantwortlich, wobei hingegen Kohäsionskräfte die Festigkeit der Klebstoffschicht bestimmen. Die Intensität beider Kräfte hängt maßgeblich vom Zustand (flüssig oder fest) des Klebstoffes ab.

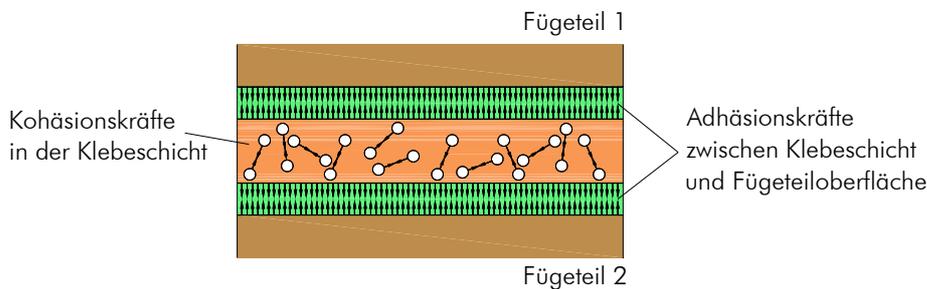


Abb. 2.1 Zusammenwirken von Adhäsions- und Kohäsionskräfte [1]

1. 3. 3 Topfzeit

aus **KLEBEN - ERFOLGREICH UND FEHLERFREI**, [1]

Als Topfzeit wird die Zeitspanne bezeichnet, die zwischen dem Mischen der Klebstoffkomponenten und der endgültigen Verarbeitung vergehen darf. Diese Phase kann bei verschiedenen Reaktionsklebstoffen unterschiedlich lange ausfallen (Minuten bis Stunden).

aus **HOLZ-LEXIKON**, [2]

Die Topfzeit wird auch als Gebrauchsdauer von Klebstoffen bezeichnet und ist jene Zeitspanne, in der ein Klebstoff nach dem Vermischen mit den Bestandteilen für eine bestimmte Verwendung noch ausreichend verarbeitungsfähig ist. Die Periode kann von wenigen Sekunden (Sekundenkleber) bis hin zu Tagen reichen und unterliegt chemischen und physikalischen Einflüssen.

eigene **BEGRIFFSDEFINITION: TOPFZEIT**

Die Topfzeit ist jener Zeitabschnitt in der Verarbeitung von Klebstoffen, der zwischen dem Abschluss des Mischvorganges der Klebstoffkomponenten und der endgültigen Verarbeitung (Fixierung) vergehen darf.

1. 3. 4 Wartezeit

aus **KLEBEN - ERFOLGREICH UND FEHLERFREI**, [1]

Als geschlossene Wartezeit wird jener Zeitabschnitt bezeichnet, in der eine Klebung fixiert werden muss, bis die Festigkeit so groß ist, dass eine äußere Krafteinwirkung die Fügeteile nicht mehr gegeneinander verschieben kann.

Die offene Wartezeit ist jene Zeitspanne, welche zwischen dem Auftragen des Klebstoffes auf die Fügeteile und deren Fixierung liegt.

aus **HOLZ-LEXIKON**, [2]

Wartezeit benennt jene Phase, die zwischen dem Auftragen des Klebstoffs auf die Füge-teile und dem Erreichen des vollen Pressdrucks vergeht. Es kann eine Gliederung in zwei Teile erfolgen:

Die geschlossene Wartezeit ist die Periode zwischen dem Zusammenlegen der zu verkle-benden Füge-teile und dem Erreichen des vollen Pressdruckes.

Offene Wartezeit (= offene Zeit oder Naßklebzeit) bezeichnet jene Zeitspanne, welche zwischen dem Klebstoffauftrag bis zum Zusammenlegen (Vereinigen) der Füge-teile ver-geht. Diese wird von der Art des verwendeten Klebstoffes, der Holzfeuchte, der relativen Luftfeuchte, Holz-, Raum- und Klebstofftemperatur beeinflusst.

eigene **BEGRIFFSDEFINITION: WARTEZEIT**

Wartezeit ist die Zeitspanne zwischen dem Klebstoffauftrag auf die Fügepartner und der Belastung mit dem vollen Pressdruck. Weiters lässt sich der Begriff Wartezeit in offene und geschlossen unterteilen.

1. 3. 5 Härter

aus **KLEBEN - ERFOLGREICH UND FEHLERFREI**, [1]

Ein Härter ist ein Klebstoffbestandteil, der das chemische Abbinden des Klebstoffs durch Polymerisation, Polykondensation oder Polyaddition bewirkt. Auch als zweite Kompo-nente bekannt, wird der Härter dem Klebstoffharz zugesetzt oder beigemischt.

aus **HOLZ-LEXIKON**, [2]

Als Härter werden Zusätze zu Klebstoffen bezeichnet, welche den Härtingsprozess in Gang setzen oder diesen Vorgang zumindest beschleunigen.

1. 3. 6 Primer

aus **KLEBEN - ERFOLGREICH UND FEHLERFREI**, [1]

Ein Primer ist eine Substanz, der Adhäsion zwischen Klebstoff und Füge-teiloberfläche ver-bessert und gleichzeitig die Alterungsvorgänge mindert.

aus **KLEBTECHNIK**, [3]

Primer sind Beschichtungssysteme, die vor dem Klebstoffauftrag auf die zu verklebende Oberfläche aufgebracht werden, um die Adhäsionseigenschaften des Klebstoffes zu verbessern und eine unkontrollierte Veränderung durch die Umwelt zu verhindern.

eigene **BEGRIFFSDEFINITION: HÄRTER und PRIMER**

Sind Zusatzstoffe und Substanzen, welche die Eigenschaften der Klebeverbindung hinsichtlich des Härtungsprozesses und der Oberflächenhaftung beeinflussen.

1. 3. 7 Füge­teile

aus **KLEBEN - ERFOLGREICH UND FEHLERFREI**, [1]

Füge­teile bestehen aus festen Körpern, welche bereits miteinander verbunden sind, oder durch den Klebstoff verbunden werden. Eine alternative Bezeichnung für Füge­teile ist Klebepartner.

aus **HOLZ-LEXIKON**, [2]

Füge­teile sind jene Teile (aus Holz oder anderen Werkstoffen) einer Klebeverbindung, die durch den Klebstoff miteinander zu verbinden sind oder bereits verbunden wurden.

1. 3. 8 Klebefuge

aus **KLEBEN - ERFOLGREICH UND FEHLERFREI**, [1]

Als Klebefuge wird der Raum zwischen zwei Füge­teilen bezeichnet, der mit Klebstoff aufzufüllen ist.

aus **HOLZ-LEXIKON**, [2]

Die Klebefuge ist jener Zwischenraum bei zwei Klebeflächen, der durch den Klebstoff ausgefüllt wird. Es wird zwischen dünnen (Dicke bis 0,1 mm) und dicken (über 0,1 mm) Klebefugen unterschieden.

eigene **BEGRIFFSDEFINITION: FÜGETEIL und KLEBEFUGE**

Als Füge­teil werden jene Teile einer Klebeverbindung bezeichnet, die mit Hilfe des Klebstoffes miteinander verbunden werden. Der, mit Klebstoff ausgefüllte Bereich zwischen den Füge­teilen, wird als Klebefuge (Klebeschicht x Klebefläche) definiert.

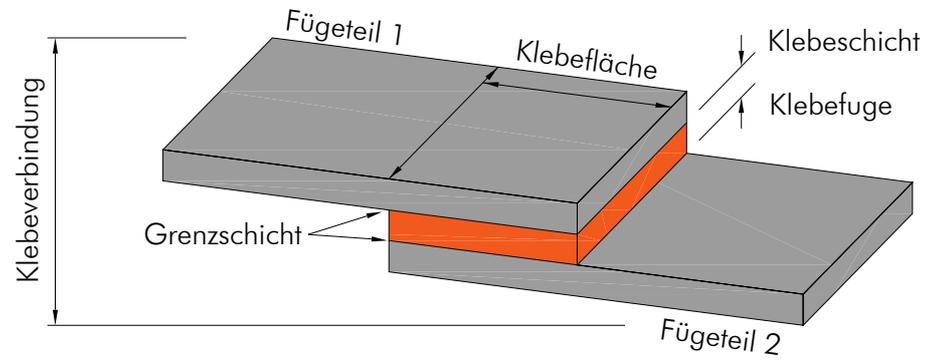


Abb. 2.2 typische Klebeverbindung

2 Typen von Klebeverbindungen

[4]; [6]; [7]; [8]; [9]; [19]

Im folgenden Abschnitt wird eine Einteilung der Klebeverbindungen in vier Gruppen getroffen:

- linienförmige-,
- flächenförmige-,
- punktförmige Klebeverbindungen und
- diverse Sonderformen.

Weiters werden für jede Gruppe beispielhaft Produkte dargestellt.

2.1 Linienförmige Klebeverbindungen

Die linienförmige, stabförmige Verklebung von Holz kam dadurch auf, dass man sich im Holzbau nicht mehr auf die, von der Natur vorgegebenen Dimensionen beschränken lassen wollte. Solche natürlichen Beschränkungen sind das Zopfmaß und die Länge des Bloches. Durch die Entwicklung des Holzleimbau spielen die Abmessungen von Rund- und Schnittholz keine entscheidende Rolle mehr.

Als Ausgangsmaterial für linienförmige Klebeverbindungen dienen Bretter (Lamellen) und Balken.



Abb. 2.3 linienförmige Klebeverbindungen: Brettschichtholzträger mit 4 Lamellen [7], Kreuzholz-balken [7]

2.2 Flächenförmige Klebeverbindungen

Bevor Klebeverbindungen im Holzbau Einzug hielten waren nur unverklebte stabförmige Konstruktionen möglich. Die Weiterentwicklung der Bearbeitungstechniken und der Klebetechnik machte es schlussendlich möglich, auch flächenförmige Holzwerkstoffe herzustellen. Diese Produkte erlauben die Kraftabtragung über Platten- und Scheibenwirkung. Die zweiachsige Tragwirkung ist der große Vorteil gegenüber stabförmigen Holzbauteilen.

Als Ausgangsmaterial für flächenförmige Klebeverbindungen dienen Bretter und Furnier-späne und -fasern.



Abb. 2.4 flächenförmige Klebeverbindungen: 7-schichtiges Brettsperrholzelement [4], Dreischichtplatte [8], Furnierschichtholzplatte [8]

2.3 Punktförmige Klebeverbindungen

Die Punkt-Klebung kommt bei den Holzwerkstoffen mit Spänen oder Fasern vor. Die Basis für Holzwerkstoffe auf Spanbasis bilden Partikel unterschiedlicher Größe. Diese reichen von 300 mm bis hin zu einigen Zehntel mm (hauptsächlich im Möbelbau). Die Zerlegung des Holzes bis hin zu Fasern, Faserbündeln oder Faserbruchstücken bildet die Grundlage für Holzwerkstoffe auf Faserbasis.

Bei der Herstellung von Produkten auf Spanbasis erfolgt der Klebstoffauftrag in zwei Stufen. Die Klebstoffflotte (Klebstoff, Wasser, Härter und Zusatzstoffe) wird zuerst dosiert und mit den Spänen vermischt. Ein punktförmiger Klebstoffauftrag wird durch Zer- und Verteilen erreicht.



Abb. 2.5 punktförmige Klebeverbindungen: OSB-Flachpressplatte [8], Spanplatte für das Bauwesen [8], Holzwolle- Leichtbauplatte [8]

2. 4 Diverse Sonderformen von Klebeverbindungen

Unter diesem Punkt werden jene Klebeverbindungen angeführt, welche nicht eindeutig den flächenförmigen, linienförmigen oder punktförmigen Verbindungen zuzuordnen waren.

Diese Sonderformen sind z.B.:

- Schäftung,
- Keilzinkenverbindung,
- Überlappung und
- stumpfer Stoß.

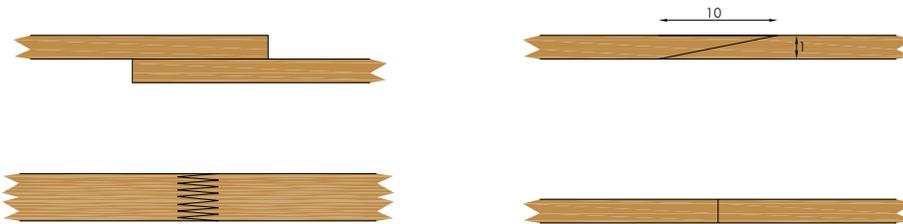


Abb. 2.6 Überlappungs-, geschäftete, Keilzinken- und stumpf geklebte Verbindung

2. 4. 1 Schäftung

Eine Schäftung ist das Aneinanderfügen zweier, unter einem Winkel abgeschrägter und dort miteinander verklebter Fügeiteile, sodass ein kontinuierlicher Bauteil bzw. Lamelle entsteht. Schäftungen sind die Vorgänger der Keilzinkenverbindungen und wurden von diesen in der Anwendung verdrängt. Der Grund hierfür liegt in der einzelnen schrägen Fläche der Schäftung, wodurch ein geringerer Klebstoffauftrag möglich ist als bei der Keilzinkung. Weitere Nachteile sind der hohe Holzverlust und die hohe Anforderung an die Astfreiheit im Bereich der Schäftung. In der Längenaddition von Brettern wurde die Schäftung komplett durch die Keilzinkung ersetzt.

Anwendung findet die Schäftung bei dünnen Bauteilen, wie der Herstellung von Furnierplatten um die einzelnen Furniere in der Längsrichtung zu verbinden.

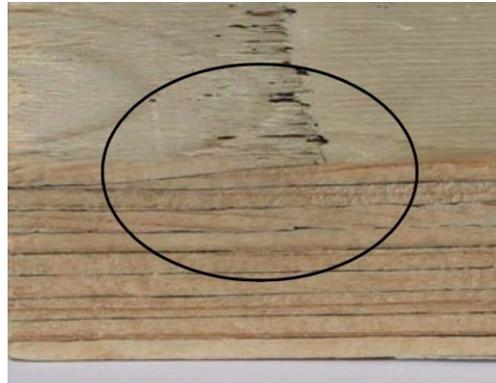


Abb. 2.7 Schäftung bei Furnierschichtholz [4]

2. 4. 2 Keilzinkenverbindung

Keilzinkenverbindungen („gefaltete Schäftung“) werden im Holzbau eingesetzt, um eine Optimierung sowie Längenaddition, des Baustoffs zu erzielen. Die natürlichen Schwachstellen (Äste, Risse, Einschlüsse) des Holzes werden dabei aus den Brettern ausgekappt. Die resultierenden fehlerfreien Abschnitte, mit keilförmig eingefrästen Zinken gleicher Teilung an den Stirnseiten des Holzes, werden durch Verkleben zu „Endloslamellen“ verbunden. Die Applikation des Klebstoffes kann per Kontaktauftrag (mittels Walze / Kamm) oder durch kontaktlosen Auftrag (Raupenauftrag) erfolgen. Nach dem Klebstoffauftrag stellt das Aushärten unter Druck den Abschluss des Herstellungsprozesses dar. Häufig verwendete Klebstoffe sind PRF-Harze, welche mit Soja-Proteinen modifiziert wurden. Diese Modifizierung hat zur Folge, dass der Klebstoff sehr rasch abbindet und somit die Presszeit verkürzt wird. Weiters kann ein 1K-PUR-Klebstoff zur Anwendung kommen, bei dem die Möglichkeit für den Hersteller besteht, die offene Zeit gezielt für sein Produkt einzustellen.

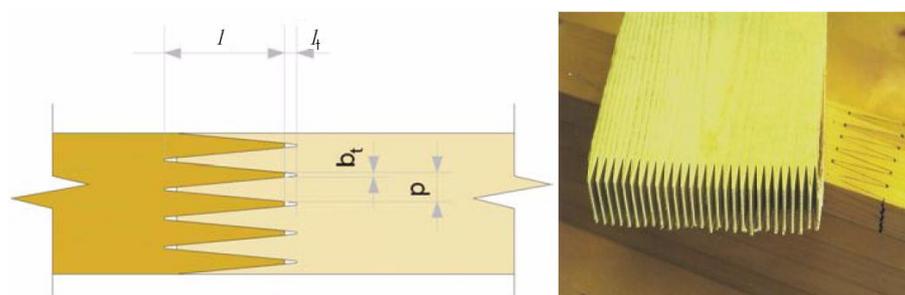


Abb. 2.8 Geometrie einer Keilzinkenverbindungen [4]

Die gewählte Keilzinkengeometrie (Tab. 2.1) und die betriebsabhängige Produktionsqualität sind hauptverantwortlich für das Leistungspotential von Keilzinkenverbindungen.

	Zinkenlänge l [mm]	Zinkenteilung p [mm]	Zinkengrund b_f [mm]	Querschnitts- schwächung [%]
Profil 1	15	3,8	0,3	rund 11
Profil 2	20	6,2	1,0	rund 16

Tab. 2.1 Keilzinkengeometrien

2. 4. 3 Überlappung

Ein Überlappungsstoß wird ebenfalls wie die Schäftung bei der Herstellung von Furnierplatten eingesetzt, um die einzelnen Furniere in der Längsrichtung zu verbinden. Die Wahl des Klebstoffes und des Auftrageverfahrens ist vom Furniertyp abhängig.

Überlappungsklebung wurden ursprünglich von Otto Graf anhand von tragenden Bauteilen untersucht. Aus diesen Klebeverbindungen entwickelten sich im Laufe der Zeit die zuvor erwähnten Keilzinkenverbindungen.



Abb. 2.9 Überlappungsstoß bei Furnierschichtholz [4]

2. 4. 4 Stumpfe Stöße

Stumpf geklebte Stöße spielen eine untergeordnete Rolle, da ihre Leistungsfähigkeit klar hinter jener einer Schäftung und vorallem einer Keilzinkung zurücksteht. Der Grund hierfür liegt in der relativ kleinen Fläche, welche zur Verklebung der Füge-teile zur Verfügung steht. Weiters sind die zur Zeit gebräuchlichen Klebstoffe nicht in der Lage Beanspruchungen aufzunehmen, die der Zugfestigkeit parallel zur Faserrichtung des Holzes entsprechen. Somit führt ein Klebstoffversagen zu einem Versagen der gesamten stumpf gestoßenen Klebeverbindung. Die Übertragung von Druckbelastungen stellt hingegen kein Problem für die Verbindung dar.

3 Historischer Abriss zur Entwicklung der Verbindungstechnik im Holzbau

[3]; [4]; [5]; [10]; [11]; [13]; [14]; [18]; [19]; [24]; [39]; [40]; [41]; [42]

Seitdem der Mensch die Höhlen verlassen hat suchte er Schutz vor den Umweltbedingungen in Behausungen. Der Werkstoff Holz wurde dazu seit jeher zum Bauen eingesetzt, man war aber an die Abmessungen und Dimensionen des Rohstoffträgers „Baum“ gebunden. Diese Einschränkung veranlasste die Menschen schon seit jeher nach Möglichkeiten zu suchen um dieser Tatsache entgegenzuwirken. In diesem Abschnitt soll ein kurzer Einblick in die ersten Verbindungsmittel bis hin zu den Heute gebräuchlichen Verbindungstechniken gegeben werden.

Eine Definition für den Oberbegriff Holzverbindung lässt sich in der folgenden Form angeben:

„Zusammenfügen von Holzteilen, zu deren Verlängerung (Anschuhen) gerade, schräg oder über Eck, zur Verbreiterung, zur Aufnahme von Kräften getragener auf tragende Hölzer, zur Überkreuzung wie zum Anschluss von Hölzern in Wänden, Decken und räumlichen Konstruktionen mit oder ohne Kraftübertragung und zu Anschlüssen verstreibender oder aussteifender Gefügeteile“. [11]

3.1 Die ersten Verbindungsmittel im Holzbau

Die aller ersten Verbindungsmittel im „Holzbau“ waren durch die Natur vorgegeben. In der Altsteinzeit suchten die Menschen bereits nach passenden Formen (Astgabeln, Wurzeln) in der Natur, welche die gewünschte Funktion erfüllen können. Als erstes materialfremdes Verbindungsmittel wurde schon recht früh das Seil (Hanf, Stroh, Bast,...) eingesetzt um eine Lagefixierung der Holzteile erzielen zu können. Mit dieser Methode konnten Baumhäuser und Flose effizient hergestellt werden.

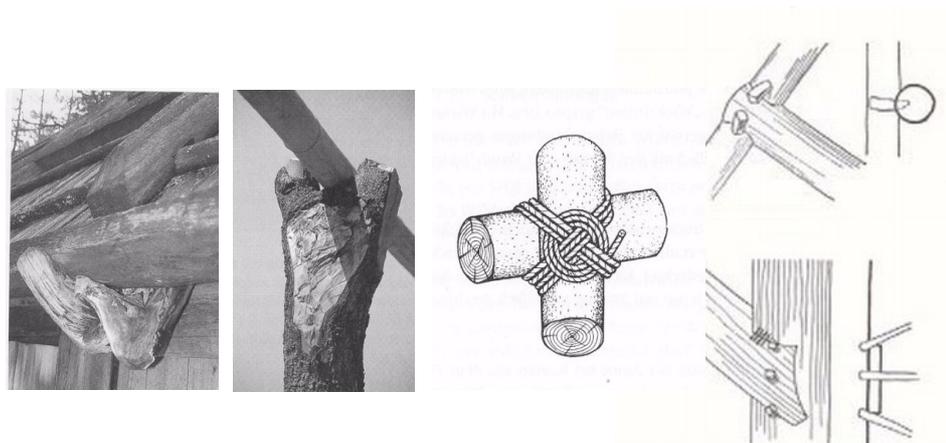


Abb. 2.10 „Verbindungen“ aus einer Wurzeln, Astgabel, Seil und zweier Holz nagelungen [11]

Um in weiterer Folge höhere Kräfte übertragen zu können und um exaktere Verbindungen herzustellen kamen immer häufiger Keile, Holznägel und Dollen zum Einsatz. Für die Bearbeitung des Holzes in dieser Weise benötigte man Werkzeuge, die zu Beginn aus Feuerstein hergestellt wurden und somit nur begrenzt Eignung für die Bearbeitung von Holz besaßen. Die Entdeckung der Bronze (etwa 1.500 v. Chr.) und das Schmieden von Eisen erlaubten entscheidende Entwicklungssprünge in der Holzverbindungstechnik, da nun Werkzeuge zur Verfügung standen, mit denen man aufwendigere Geometrien herstellen konnte. Aus diesem Entwicklungsschritt heraus entwickelten sich die zimmermannsmäßigen Holzverbindungen wie wir sie heute noch kennen und teilweise einsetzen.

3.2 Zimmermannsmäßige Verbindungen

Zimmermannsmäßige Verbindungen zeichnen sich dadurch aus, dass die Lastübertragung zwischen den Holzteilen auf Kontakt basiert und somit holzfremde Materialien, sofern überhaupt notwendig, lediglich zur Lagesicherung eingesetzt werden. Diese handwerklich hergestellten Verbindungen bewährten sich über Jahrhunderte hinweg. Durch ihre Anpassungsfähigkeit und Vielfalt wurde die Ausbildung unterschiedlicher Dachtragwerke und Brücken ermöglicht. Solche Bauwerke haben bis heute Bestand. Die Erbauer solcher zimmermannsmäßigen Verbindungen zeichnete große Erfahrung und die gewonnene Kenntnis aus. Nachteile dieser Verbindungsart sind der geringe Ausnutzungsgrad, die geringe Steifigkeit und die erforderliche hohe Herstellungsgenauigkeit. Die Kräfteübertragung erfolgt im Allgemeinen auf Druck und Schub. Ab dem Beginn des 20. Jahrhunderts wurde die zimmermannsmäßige Holzbauweise immer mehr von dem ingenieurmäßigen Holzbau beeinflusst und in weiterer Folge abgelöst.

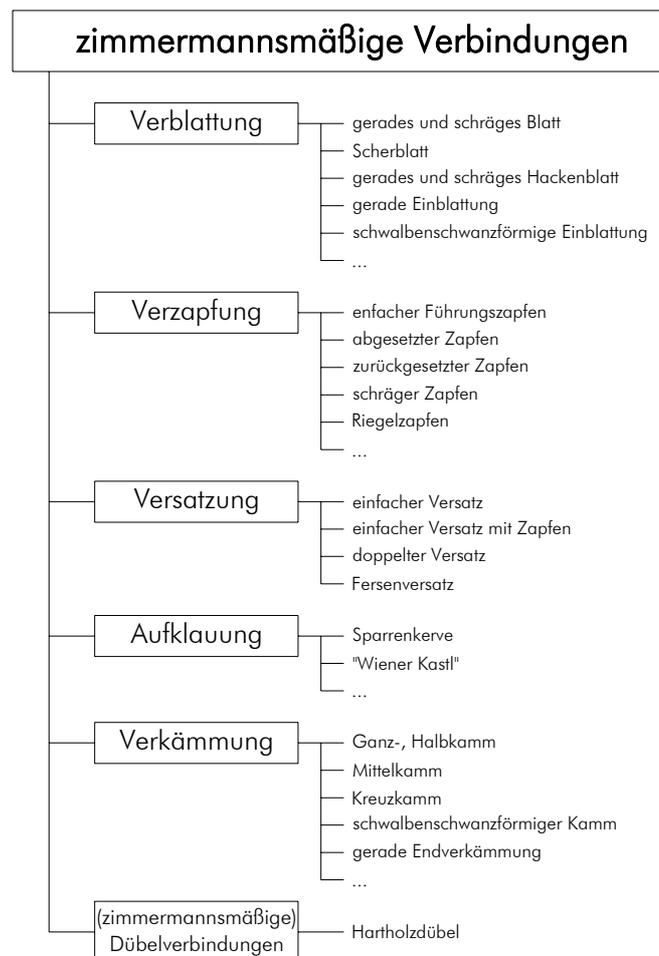


Abb. 2.11 Einteilung der zimmermannsmäßigen Holzverbindungen [5]

Der folgende Abschnitt soll einen Einblick in die historische Entwicklung typischer zimmermannsmäßiger Verbindungen verschaffen.

3. 2. 1 Blatt

Einsatzgebiete von Verblattungen waren und sind Längs-, Eck-, Quer-, Kreuz- und schräge Verbindungen. All diese Varianten haben die plan abgearbeitete Auflagerfläche gemein, um einen festen Sitz der Verbindung zu gewährleisten.

Die Blattverbindung ist jene Verbindungsart im zimmermannsmäßigen Holzbau mit der größten Variantenbreite. Die Entwicklungsschritte der Verblattung lassen sich wie folgt verfolgen; Anblattung, Verblattung und Blattung. Den Anfang machte diese Technik bei Glättungen zur Lagesicherung von Rundhölzern und endete in komplizierten Blättern in Schlössern und anderen Prunkbauten. Bei Fachwerkwandkonstruktionen wurden Verblattungen etwa um 1500 n. Chr. durch die Zapfenverbindung verdrängt.

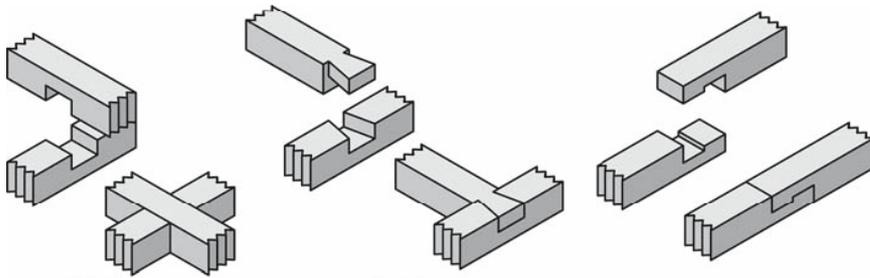


Abb. 2.12 Verblattungen [12]

3. 2. 2 Zapfen

Zapfenverbindungen sind bei Längs-, Eck-, Quer- und Kreuzverbindungen einsetzbar. Sie dienen der Sicherung der gegenseitigen Lage zweier Hölzer und können zur Querkraftübertragung genutzt werden. Dafür steht eine große Palette an Formen und Dimensionen zur Verfügung. Als günstigste Breite des Zapfens erwies sich, schon in den Anfangszeiten dieses Verbindungstyps ca. 1/3 der Holzstärke.

Eine Vorgängerstufe zur Zapfenverbindung war die Anspitzung welche bereits 3000 v. Chr. bei Holzbauten zum Einsatz kam und durch die Weiterentwicklung der Werkzeuge von den Zapfen abgelöst wurde. Am Ende des 13. Jahrhunderts waren Zimmerleute sehr geschickt im Umgang mit Zapfenverbindungen, was sich auch in den entsprechenden Dimensionen niederschlug. So waren Scherzapfen von 60 cm Länge keine Seltenheit.

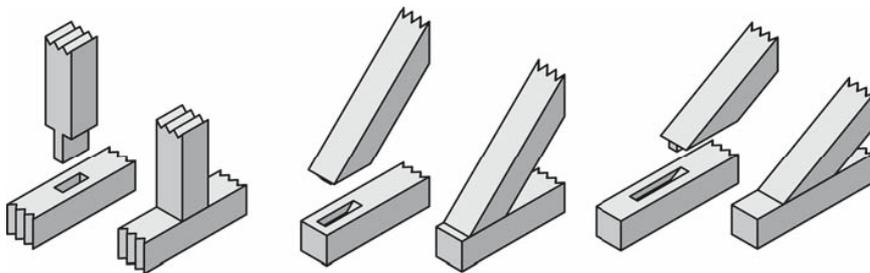


Abb. 2.13 Zapfenverbindungen [12]

3. 2. 3 Versatz

Versätze wurden und werden im zimmermannsmäßigen Holzbau zum Übertragen großer, schräg auftreffender Druckkräfte eingesetzt. Die Kraftübertragung erfolgt dabei über Druckkräfte in den Stirnflächen der Verbindung.

Als Erfinder des Versatzes gelten die Römer, die diese Verbindungstechnik bereits bei ihren Dach- und Dreiecksbindern einsetzten. Anfangs wurden die Stirnflächen rechteckig eingeschnitten. Eine Verbesserung hinsichtlich der maximal übertragbaren Kraft erfolgte durch die Veränderung des Winkels des Stirnversatzes (Winkelhalbierende des Stirnwinkels). Später folgten der doppelte Stirnversatz und eine Kombinationen aus Stirn- und Fersenversatz (doppelter Versatz). Da all diese Versätze nicht gegen seitliches Ausweichen gesichert waren, stellte das zusätzliche Anarbeiten eines Führungzapfens eine erhebliche Verbesserung dar. Als Alternative zum Zapfen kann eine ingenieurmäßige Lagesicherung (Sparrennagel) ausgeführt werden.

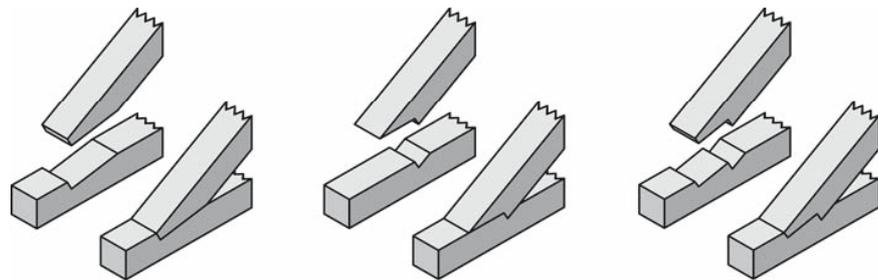


Abb. 2.14 Versätze [12]

3. 2. 4 Klauung

Im Gegensatz zu einem Versatz werden Klauungen überwiegend zur Lagesicherung und nicht zur Kraftübertragung eingesetzt. Eine Ausnahme stellt hier die Sparrenklau dar, welche zur Übertragung von Druckkräften verwendet wird.

Der früheste Nachweis perfekt ausgebildeter Klauen kann germanischen Häusern aus dem 4. Jahrhundert n. Chr. zugeordnet werden. Aufgrund der eher einfachen Geometrien einer Klauenverbindung konnten diese auch von ungeübten Zimmerern hergestellt werden und waren diese daher weit verbreitet.

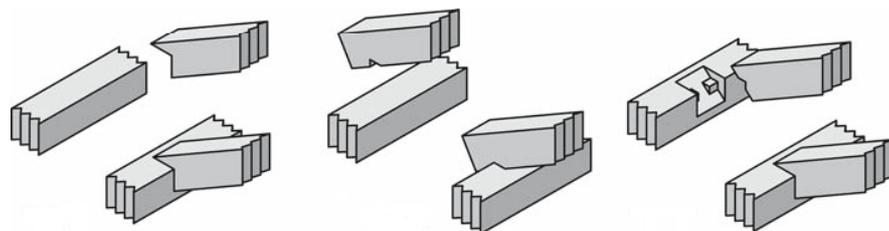


Abb. 2.15 Verklauungen [12]

3. 2. 5 Kamm

Kämme gelten als Sonderform von Blattverbindungen. Eingesetzt werden sie ähnlich wie das Blatt bei Eck-, Quer- und Kreuzverbindungen. Charakteristische Merkmale sind, dass sie nur liegend vorkommen und dass verkämmte Hölzer nie bündig liegen. Weiters gibt es keine Längsverbindungen mit Kämmen.

Der Ursprung und die historische Entwicklung von Verkämmungen ist zeitlich von den Verblattungen nicht zu trennen. Somit ist das erste Vorkommen von Kammverbindungen in der Jungsteinzeit einzuordnen. In Bauwerken aus dem 13. Jahrhundert, welche bis heute Bestand haben, kamen bereits voll ausgereifte Kammverbindungen zum Einsatz.

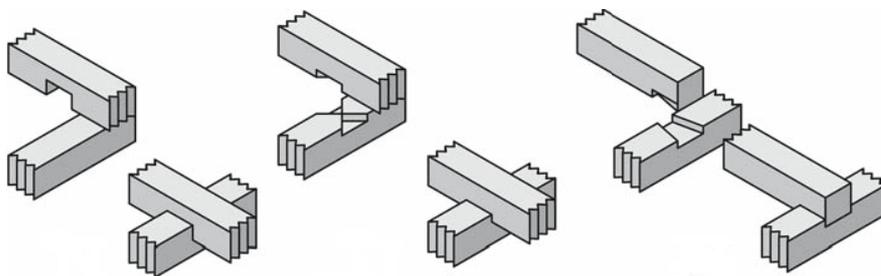


Abb. 2.16 Kammverbindungen [12]

3. 2. 6 Hartholzdübel

Hartholzdübel stellen den Übergang von den zimmermannsmäßigen zu den ingenieurmäßigen Verbindungen dar. Die quaderförmigen Holzbauteile aus Hartholz werden vorwiegend auf Druck und Abscheren beansprucht. Beim Einbau der Dübel, welche in vorbereitete Vertiefungen in das Holz eingelegt werden, muss darauf geachtet werden, dass sie in Faserlängsrichtung beansprucht werden. Zur Lagesicherung sind zusätzlich Klemmbolzen (früher Stahlgurte) anzubringen.

Der Hartholz-, Rechteck- oder auch Zimmermannsdübel ist die älteste heute noch gebräuchliche Dübelart. Als Erfinder des Vollholzdübelns gilt der Franzose Emy, der seine Erfindung 1856 in Italien veröffentlichte. Der Älteste in Serie hergestellte Dübel war ein Hartholzdübel, der bereits 1917 sein Patent erhielt.

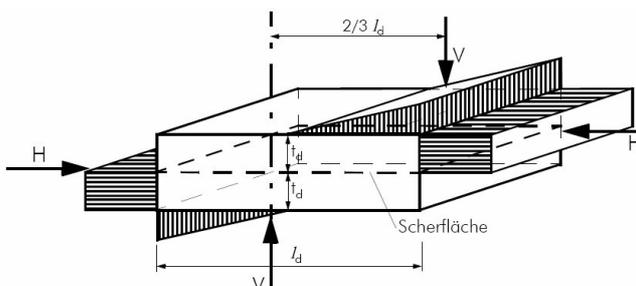


Abb. 2.17 Hartholzdübel [5]

3.3 Ingenieurmäßige Verbindungen

Die ingenieurmäßigen Verbindungen verdrängten in den letzten zwei bis drei Jahrzehnten die zimmermannsmäßigen fast komplett. Im Gegensatz zu den zimmermannsmäßigen Verbindungen erfolgt der Nachweis der Tragfähigkeit bei ingenieurmäßigen durch Berechnungen und nicht auf Grund von Erfahrungswerten. Stahl und Klebstoff sind die hauptsächlich verwendeten Materialien der Verbindungen. Nur in seltenen Fällen wird Hartholz oder Kunststoff verwendet.

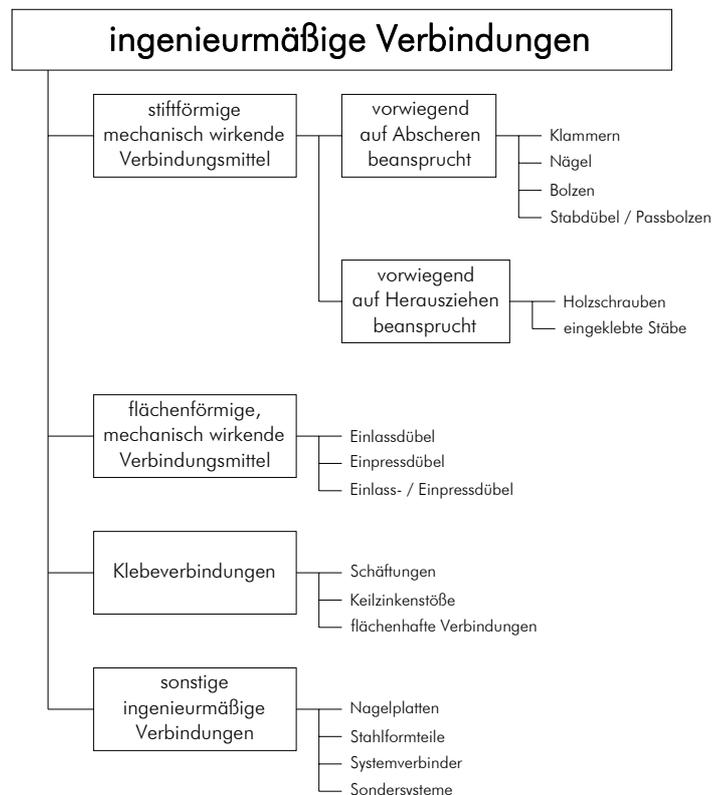


Abb. 2.18 Einteilung der ingenieurmäßigen Holzverbindungen [5]

Im folgenden Abschnitt wird auf die historische Entwicklung der ingenieurmäßigen Verbindungstechniken und Bauweisen eingegangen. Dabei wird zwischen den mechanisch wirkenden Verbindungsmitteltypen und den verklebten Verbindungen unterschieden.

3. 3. 1 Mechanisch wirkende Verbindungen

3. 3. 1. 1 Nagelbau

Die ersten nagelähnlichen Verbindungsmittel entstanden in der Bronzezeit aufgrund der gewonnenen Kenntnisse in der Metallbearbeitung. Durch den hohen Herstellungsaufwand der geschmiedeten Nägel wurden diese vorläufig nur in wertvollen und hochrangigen Bauwerken eingesetzt. In weiterer Folge dauerte es Jahrhunderte bis der Nagel an Bedeutung gewann. Am Ende des 16. Jahrhunderts setzte Philibert de l'Orme den Nagel als Verbindungsmittel im Holzbau ein. Grund dafür war seine Besorgnis darüber, dass in Zukunft nicht ausreichend große Längen an Holz verfügbar sein würden und daher eine geeignete Verbindung von mehreren kurzen Hölzern von Nöten wäre. Weitere Förderer des Nagelbaues waren Gilly (um 1800) und Emy (um 1850), jedoch hinterließen die Letztgenannten keine Veröffentlichungen zu ihren Berechnungen und so geriet der Nagel in Vergessenheit.

Dies war auch der Grund weshalb Nägel in der ersten Entwurfsfassung der DIN 1052 (1931) völlig verboten wurden. Eine Trendwende im Nagelbau kam erst durch die Arbeiten von Wilhelm Stoy zustande. Dieser bekam 1926 den Auftrag eine Turnhalle mit 16 m Spannweite zu errichten. Die Vorgabe lautete, dass die Binder aus Brettern und Nägel herzustellen sein. Um dieser Forderung gerecht zu werden, begann Stoy mit Versuchen zur Bestimmung der Tragfähigkeit von Nagelverbindungen. Bereits aus den ersten Erkenntnissen der Versuche war es ihm möglich, die geforderten Abmessungen nachzuweisen und zu fertigen. Es folgten weitere Aufträge und so fand auch der Nagel als tragendes Verbindungsmittel 1933 Berücksichtigung in der ersten Fassung der DIN 1052.

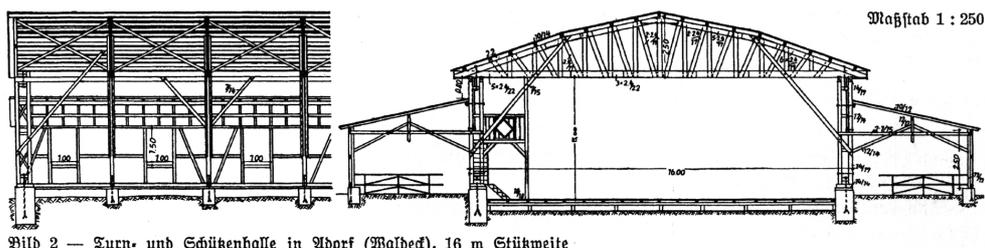


Bild 2 — Turn- und Schützenhalle in Adorf (Waldeck), 16 m Stützweite

Abb. 2.19 Turn- und Schützenhalle Adorf (Waldeck), Entwurf: Wilhelm Stoy [10]

Durch den Zwang sparsamer Baustoffverwendung in den Kriegsjahren und in der Nachkriegszeit wurde der Nagelbau im Holzbau dominierend. Weitere Forschungstätigkeiten ermöglichten Spannweiten bis zu 40 m (Nagelbrettbinder) und Holzeinsparungen bis zu 30%. In Folge des Aufschwungs dieser Bauweise entwickelten sich Sonderformen (Anker-, Rillen-, Schraubnagel). Bis ans Ende der 1960er-Jahre blieb der Nagel das am Häufigsten verwendete Verbindungsmittel. Heute werden einfache Drahtstifte mit einem Flachkopf vorwiegend zur Befestigung untergeordneter Bauteile und von Schalungen und dergleichen eingesetzt.

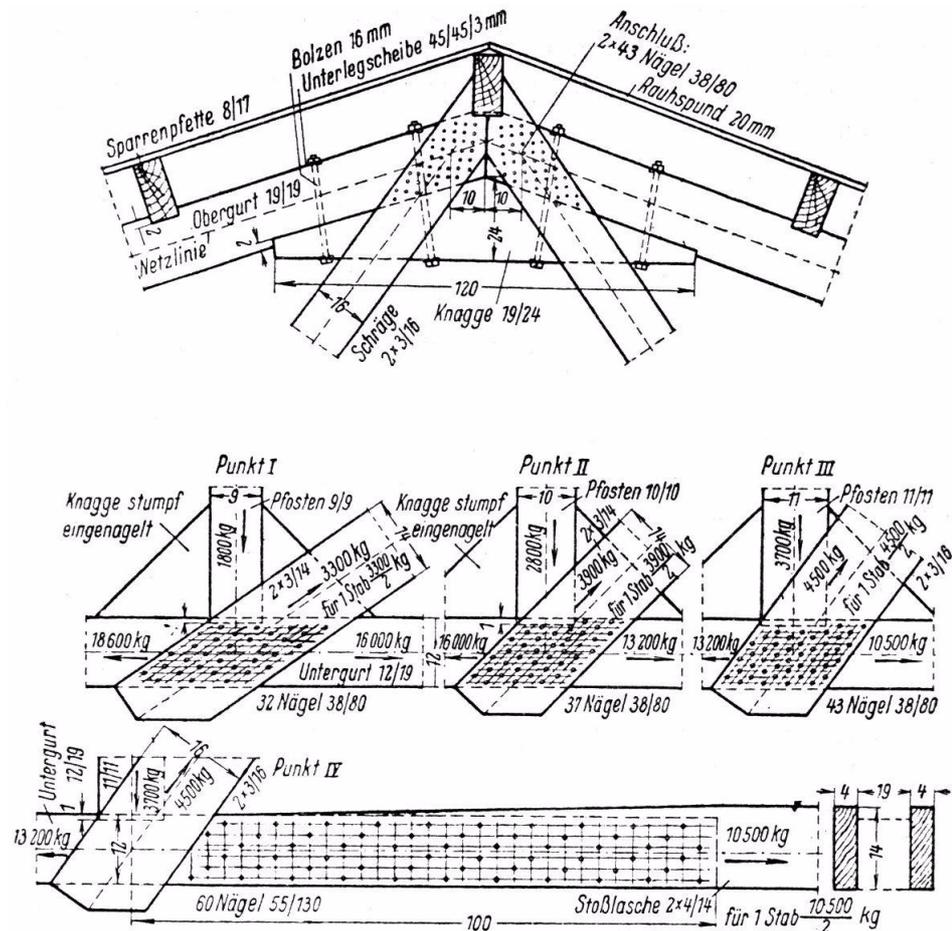


Abb. 2.20 unterschiedliche Nagelverbindungen [13]

3. 3. 1. 2 Schraubenverbindungen

Die Entwicklung der Holzschraube leitete sich von jener der Nägel ab. Die Vorteile der Schraube gegenüber dem Nagel sind die leichtere Demontierbarkeit und der höhere Auszugswert. Aus diesem Grund verdrängte die Schraube den Nagel in den letzten Jahrzehnten zusehends. Im selben Zeitraum entstand ebenfalls eine große Vielfalt an herstellerabhängigen Sonderformen für die unterschiedlichsten Beanspruchungssituationen.

3. 3. 1. 3 Dübel besonderer Bauart

Die Dübel besonderer Bauart entwickelten sich aus den Hartholzdübeln, welche den zimmermannsmäßigen Verbindungen zuzuordnen sind. Diese Weiterentwicklung stellt auch den Wechsel zwischen den beiden Verbindungsmittelsystemen im Holzbau dar. Wurde Anfangs noch über einen Austausch des Hartholzdübeln durch Stahlprofile nachgedacht, entwickelten sich in den ersten 25 Jahren des ingenieurmäßigen Holzbaues zahlreiche unterschiedliche Scheibendübel aus Stahl. Diese wurden in geometrisch konforme Aus-

fräsungen im Holz eingelassen (Einlassdübel). Im Gegensatz dazu wurden die weiterentwickelten Einpressdübel ohne Ausfräsungen zwischen die zu verbindenden Holzteile gelegt. Beide Dübelssysteme werden auf Druck oder Abscheren beansprucht, und eine Übertragung der Verbindungskräfte erfolgt mittels Lochleibungs- und Scherkräften.

Ab dem Jahr 1907 begannen Holzbaufirmen eigene Dübelkreationen zu patentieren und die Verwendbarkeit über Versuche an Materialprüfanstalten nachzuweisen. Daraus resultierte eine Vielzahl an Dübel besonderer Bauart mit unterschiedlichsten Abmessungen und Formen.

Die erste bauaufsichtliche Regelung erfolgte in der 4. Fassung der DIN 1052 aus dem Jahr 1944. Grundlage für die Berücksichtigung in der genannten Norm, welche bis dahin Dübel besonderer Bauart verbot, waren die Forschungsarbeiten von Otto Graf an der TH Stuttgart. In diesen Arbeiten wurde eine vergleichende Bewertung der in der Praxis üblichen Dübelarten durchgeführt. Somit wurden erstmals Einpress- und Einlassdübel hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit und konstruktiven Verwendung für die Holzbaupraxis geregelt.

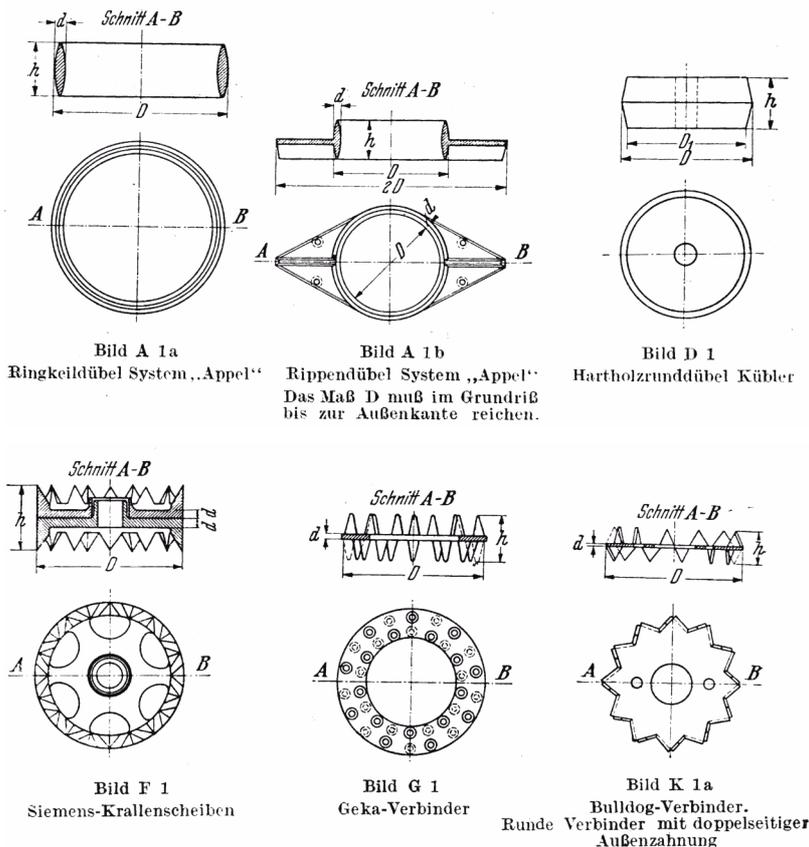


Abb. 2.21 genormte Dübel, nach DIN 1052, Fassung 1943 [10]

Die Bedeutung der Dübel für Fachwerkträger ging mit dem Aufkommen der Brettschicht-holzbauweise schrittweise zurück. Jedoch ergaben sich auch aus dieser Entwicklung neue Einsatzgebiete für die Dübel besonderer Bauart. Anschlüsse von Nebenträger an Hauptträger aus Brettschichtholz wurden z.B. häufig mit diesem Verbindungsmittel hergestellt. Grund dafür war das Bestreben eine unsichtbare Verbindung zu erhalten. Erstmals wurden diese Stirnholzanschlüsse mit Einpress- und Ringkeildübel in der DIN 1052 aus dem Jahr 1988 geregelt.

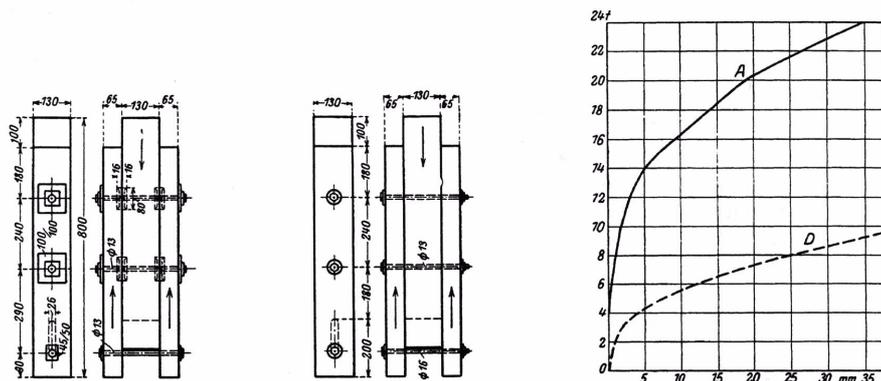


Abb. 2.22 Lastverformungskurven von Untersuchungen an Bolzenverbindungen mit und ohne Krallenplatten [10]

3. 3. 1. 4 Bolzen und Stabdübel

Bolzen als Verbindungsmittel fanden schon früh in geschmiedeter Form Verwendung im Holzbau. Klemmbolzen wurden dabei zur Lagesicherung von anderen Holzverbindungen (z.B. Einlass-, Einpressdübel) eingesetzt. Diese Bolzen wurden auf beiden Seiten mit Unterlegscheiben versehen und mit Muttern fixiert.

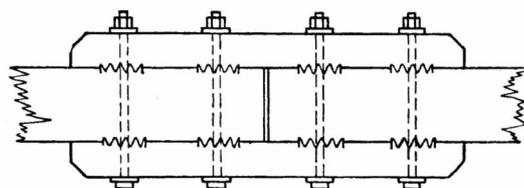


Abb. 2.23 Bolzen zur Lagesicherung von Bulldogdübel [10]

Ein Nachteil von Bolzenverbindungen ist der Schlupf (1 mm Lochspiel). Dieser resultiert aus dem größeren Durchmesser der Bohrung gegenüber dem Bolzen. Aus diesem Problem heraus entwickelte sich der Stabdübel. Da dieser in Löcher eingebracht wurde, die kleiner oder gleich groß waren wie der Stabdübeldurchmesser konnte der Schlupf minimiert und somit steifere Verbindungen erzielt werden.

Der Durchbruch dieser Verbindungsmittels gelang mit der industriellen Fertigung und der gleichzeitigen Berücksichtigung in der DIN 1052. Heute sind Stabdübelverbindungen (ab den 1970er-Jahren) im ingenieurmäßigen Holzbau weit verbreitet.

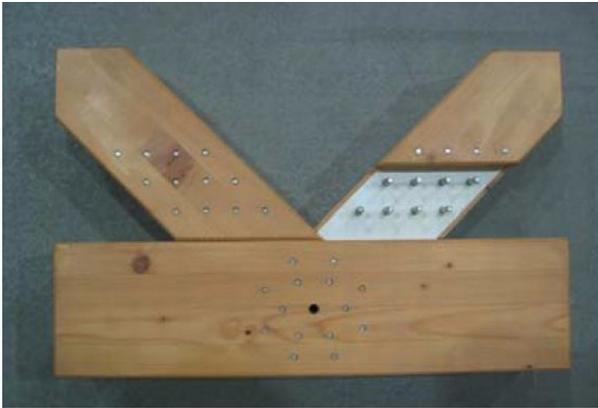


Abb. 2.24 Stabdübelverbindung mit eingeschlitztem Stahlblech [5]

Im Zusammenhang mit Bolzen und Stabdübeln müssen auch eingeschlitzte Knotenbleche erwähnt werden. Im Jahre 1913 wurde das erste Knotenblech aus Gusseisen gefertigt und zum Patent angemeldet. Im Laufe der Jahre wurden zahlreiche Versuche mit unterschiedlichen Materialien (Holz, Sperrholz, Stahl) für die verschiedenen Bleche durchgeführt.

3. 3. 2 Geklebte Verbindungen

Die Klebetechnik zählt zu den ältesten Verbindungsverfahren die sich der Mensch zu Nutze macht. Um 3000 v. Chr. wurde erstmals Leim aus tierischen Häuten hergestellt. Die Sumerer nannten dieses Produkt Segin. Auch bei den Ägyptern wurden Grabgemälde entdeckt, welche den Ablauf der Leimherstellung dokumentierten. Es kamen vermutlich tierische Leime zum Einsatz. 1920 fand man 3500 Jahre alte Leimtafeln, welche bereits aus dem gleichen Hautleim hergestellt waren wie der Anfang des 20. Jahrhunderts übliche Leim. Auch den Griechen war der Leim schon früh bekannt, so schrieb Theophrast um ca. 300 v. Chr. in seiner „Geschichte der Gewächse“:

„Bei der Zimmermannsarbeit hält der Leim am besten die Fichte zusammen. Man sagt, dass sie nicht einmal reiße, wenn sie geleimt sei.“ [3]

Im 17. und 18. Jahrhundert begann sich die Klebstoffindustrie zu entwickeln. Eine erste Veröffentlichung aus dieser Zeit erwähnt die Verwendung von Knoblauch für die Leimherstellung zur Verbindung von Holzteilen. Größere Fortschritte in der Klebetechnik sind dem 19. Jahrhundert zuzuschreiben, wo selbstklebende Massen und Pflaster für medizinische Anwendungen entwickelt und auch eingesetzt wurden. Der Durchbruch für industrielle Anwendungen gelang aber erst am Beginn des 20. Jahrhunderts mit der Entwicklung des ersten selbstklebenden Abdeckbandes. Am Anfang des letzten Jahrhunderts erfolgte die Entstehung von synthetisch hergestellten Polymeren und Harnstoffharzklebstoffe wurde bekannt.

Der Durchbruch des Klebens für konstruktive Anwendungen erfolgte Mitte des letzten Jahrhunderts durch die Erfindung des polyvinylformal-modifizierten Phenolharz-Klebstoffes (Adrian de Bruyne). Die noch heute in der Klebstoffherzeugung verwendeten, wichtigen Polyurethane wurden 1937 von Otto Bayer patentiert.

Diese kurze Zusammenfassung der geschichtlichen Entwicklung der Klebetechnik soll einen Einblick gewähren, welche große Bedeutung die Klebetechnik seit jeher hatte und auch heute noch hat.

3. 3. 2. 1 Brettschichtholzkonstruktionen

Als das erste verklebte Holzbauwerk gilt die Versammlungshalle des King Edward College in Southampton von 1860. Bei dieser Konstruktion wurde die Biegesteifigkeit der Träger durch die Verklebung der einzelnen Lamellen verbessert.



Abb. 2.25 Versammlungshalle des King Edward College in Southampton [19]

Die Weiterentwicklung dieser Technik durch Otto Hetzer führte im Jahre 1906 zur Geburtsstunde der modernen Holz-Leimkonstruktionen. In diesem Jahr erhielt er in Weimar ein Patent für ein gebogenes, verleimtes Holzbauteil.

In der Patentschrift hieß es:

„Gebogene Holzbauteile für vereinigte Dachpfosten und Sparren, dadurch gekennzeichnet, dass zwei oder mehrere in gewünschter Form gebogene Langholzstäbe durch Zwischenfügen eines in Feuchtigkeit nicht löslichen Bindemittels unter Druck zusammengefügt sind.“ [11]

Die von Hetzer verwendeten Klebstoffe bestanden aus Rohstoffen auf natürlicher Basis, speziell Kasein. Mit diesen konnte er gute Verbunde erzielen, jedoch waren sie nicht wasserfest (dieser Sachverhalt steht allerdings im Gegensatz zum Text der Patentschrift) und somit für die Anwendung im Außenbereich ungeeignet. Bis zum Jahr 1910 errichtete Hetzer mit seinen typischen Trägerformen (I-Querschnitte) ungefähr 65 Dachkonstruktionen mit Spannweiten bis zu 45 m.

Durch die Hetzerbauweise war man nicht mehr an die durch die Natur vorgegebenen Stammdurchmesser bzw. daraus herstellbaren Abmessungen des Schnittholzes gebunden.

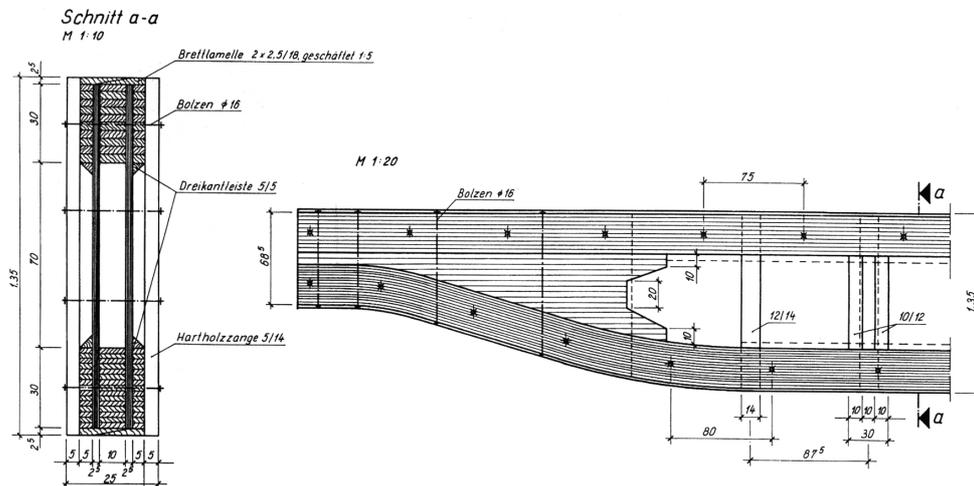


Abb. 2.26 Kranbahnträger einer Lokhalle, geleimter Träger mit Gurten aus Brettschichtholz und Stegen aus Sperrholz [10]

Die Klebetechnik kam ab den 1930er-Jahren, durch die Entwicklung neuer Kunstharzklebstoffe (zunächst primär für die Verwendung im Flugzeugbau) immer häufiger zum Einsatz. Vor allem Firmen, welche bereits mit der Hetzerbauweise vertraut waren, profitierten vom neuen Klebstoff und verbesserten diesen. Durch diesen Entwicklungssprung hielt die Klebebauweise entgeltig Einzug im Holzbau. Dies war gleichzeitig der Beginn der Brettschichtholzkonstruktionen wie wir sie heute kennen. Einen wichtigen Beitrag zum Durchbruch dieser Bauweise lieferte Karl Egner, der zu dieser Zeit Versuche an Rahmenecken und Brettstößen innerhalb von Brettschichtholzquerschnitten an der TH Stuttgart durchführte.

3. 3. 2. 2 Keilzinkung

In den 1940er-Jahren wurde auf Grund der Vorgabe sparsamer mit dem Rohstoff Holz umzugehen intensiv an der Weiterentwicklung und Anwendungserweiterung des Holzleimbaus gearbeitet. Einen großen Anteil hieran hatte Karl Egner von der TH Stuttgart der zwischen 1936 bis 1942 die Stoßausbildung der Brettstöße innerhalb von Brett-schichtholzquerschnitten weiterentwickelte und verfeinerte.

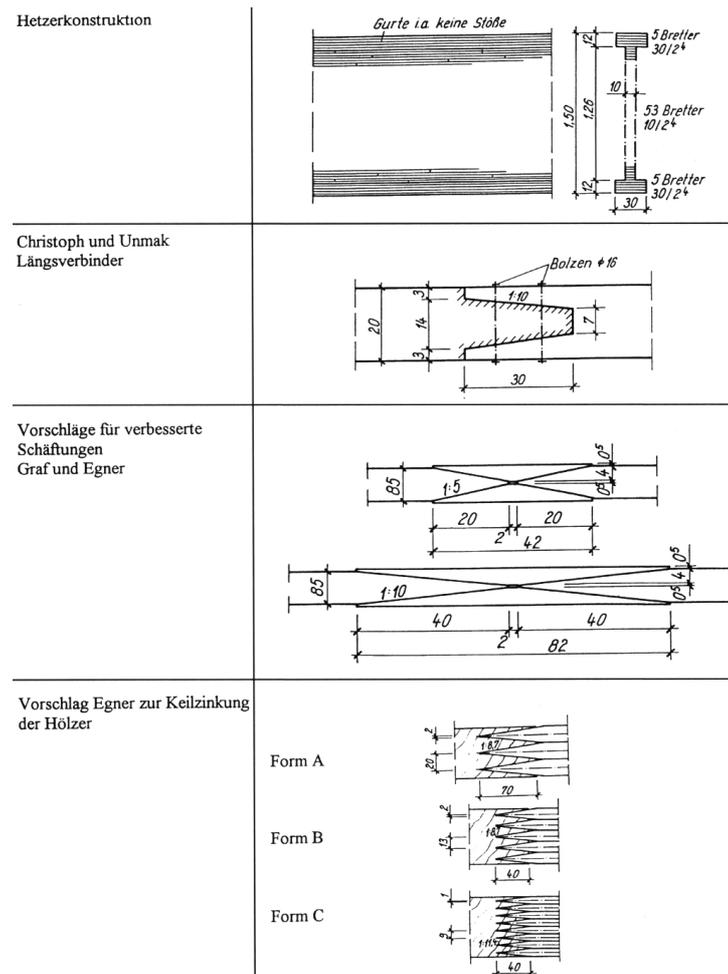


Abb. 2.27 Entwicklungsschritte der Stoßausbildung im Holzleimbau [10]

Hetzer verwendete in seinen Konstruktionen ausschließlich Stumpfstoße in den statisch schwach beanspruchten Zonen. Die Firma Christoph & Unmack, welche mit der Hetzerbauweise vertraut war, entwickelte 1935 eine eigene geleimte Schäftungsverbindung um den Querschnitt variabel gestalten zu können. Zwei Jahre zuvor begann Otto Graf mit Untersuchungen an geleimten Laschenverbindungen und verwies bereits damals auf die große praktische Bedeutung für den Leimbau. Anhand der ersten Versuchsergebnisse stellte Graf fest, dass die Scherfestigkeit in der Klebstoffuge bei Laschenverbindungen von den Abmessungen der Klebstofffläche abhängt. Ausgehend von dieser Erkenntnis wurden weitere Versuche durchgeführt. Im Gegensatz zu den Laschenverbindungen

(Form a und c in Abb. 2.28) klebte Graf nun die Laschen zinkenartig in das Mittelholz ein (Form b und d in Abb. 2.28). Durch diese Maßnahme konnten deutlich höhere Scherfestigkeiten in der Klebstofffuge als bei aufgeklebten Laschenverbindungen erzielt werden. Die Bruchlast konnte ebenfalls um 75% gesteigert werden. Diese Versuchsreihe von Otto Graf wird als Beginn der Keilzinkung angesehen. Wie bereits erwähnt, forschte Karl Egner an dieser Verbindungstechnik weiter und gelangte zu einer Schifftzinkung für Bretter. Ebenfalls regte er zur Entwicklung von speziellen Holzbearbeitungsmaschinen an.

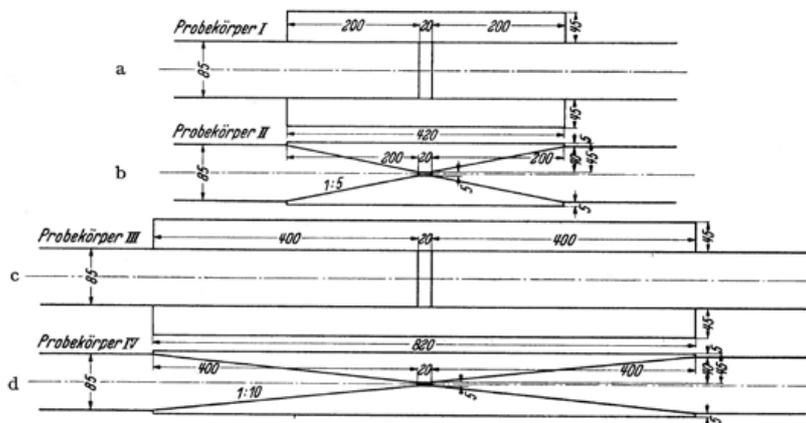


Abb. 2.28 Versuchskörper für Laschenverbindungen von Otto Graf [39]

Am Ende der Untersuchungen von Karl Egner stand die Form C (siehe Abb. 2.27), welche die höchsten Festigkeitswerte aufwies. Grund dafür war die hohe Anzahl an Flankenflächen die zur Verklebung kamen. Damit konnten praktisch endlos lange Brett lamellen hergestellt werden. Schwachstellen des Holzes wurden herausgeschnitten und mittels Keilzinkenverbindung wieder verbunden. In der DIN 68140 (erste Fassung 1958) wurden die Erkenntnisse von Egner in einer speziellen Norm für Keilzinkungen für die Holzbaupraxis zusammengefasst und geregelt.

Heute werden diese von Egner entwickelten Keilzinkenverbindungen auch bei Kanthölzern und bei Rahmeneckausbildungen (Generalkeilzinkenstöße) eingesetzt. Die Spezialfräsmaschinen und das Leimauftragverfahren entwickelten sich in den letzten Jahrzehnten weiter, dadurch entstanden immer leistungsfähigere Zinkungen.

3. 3. 2. 3 Volkersen-Theorie bei Nietverbindungen

Olaf Volkersen untersuchte in seiner Dissertation aus dem Jahre 1944 die Schubkraftverteilung auf die Verbindungselemente langer Laschenverbindungen. Diese Arbeit hatte erheblichen Einfluss auf die Berechnung von Klebeverbindungen. Die darin vorkommenden Theorien und Berechnungsansätze sind auf Klebungen übertragbar. Somit legte Volkersen den Grundstein für weitere Forschungsarbeiten zum Themenbereich Klebeverbindungen. Im Holzbau wurde die „Volkersen-Theorie“ besonders für eingeklebte Gewindestangen angewendet, wie aus dem nächsten Abschnitt ersichtlich wird.

Eine detaillierte Darstellung der Volkersen-Theorie folgt in Kapitel 4.

3. 3. 2. 4 Eingeklebte Gewindestangen

Diese Verbindungstechnik ist im Gegensatz zu den zuvor genannten Verbindungen und Verbindungstypen als recht jung einzustufen. Vor etwa 30 Jahren wurden die ersten experimentellen und theoretischen Untersuchungen durchgeführt. Die ersten eingeklebten Verbindungsmittel waren Gewindestangen, an welchen Tragfähigkeitsversuche bezüglich Einklebmethodik und Versagensarten durchgeführt wurden. Karl Möhler führte diese, insbesondere während der Jahre 1978 – 1981, am Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen der TH Karlsruhe durch. Wurden anfangs noch Gewindestangen mit einem Stabdurchmesser größer als jener der Bohrlöcher verwendet, um einen mechanischen Verbund zwischen Stab und Holz zu erzeugen, kamen ab den 1980er-Jahren reine Klebeverbindungen (Bohrloch > Stabdurchmesser) zur Anwendung. Zum Einsatz kamen bereits damals Epoxidharzklebstoffe. Das Hauptaugenmerk der Untersuchungen lag auf den Verbindungen mit Stahlstäben (Gewindestangen, Bewehrungsstäbe), weniger auf dem Einkleben von faserverstärkten Kunststoffen.

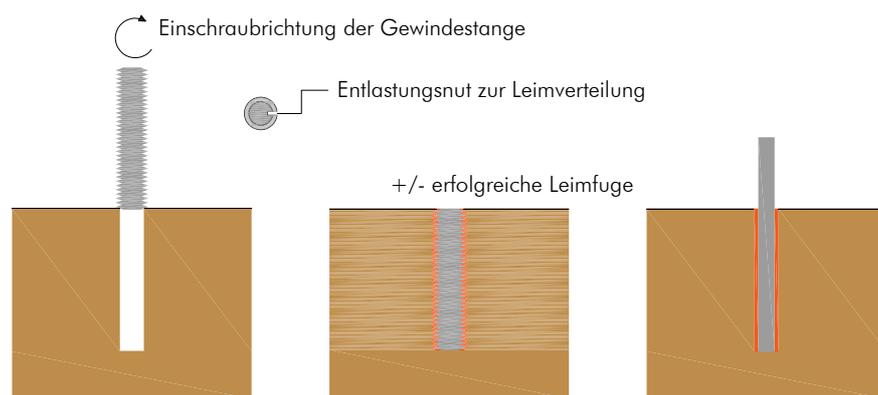


Abb. 2.29 links: Gewindestangendurchmesser > Bohrlochdurchmesser; rechts: Gewindestangendurchmesser < Bohrlochdurchmesser

MÖHLER et al.

Möhler verwendete bei seinen Versuchen Gewindestangen mit einer Längsnut (Abb. 2.29) um den Klebstoff (Resorzinharzklebstoff) besser im Bohrloch verteilen zu können. Er variierte die Verbundlänge zwischen dem 10- bis 20-fachen des Stabdurchmessers und untersuchte den Einfluss der Randabstände und der Abstände der Stäbe untereinander.

Bei Gewindestangen parallel zur Faserrichtung konnte immer sprödes Versagen verbunden mit einem Abfall der mittleren Verbundfestigkeit mit zunehmender Einklebelänge festgestellt werden. Senkrecht zur Faserrichtung versagten eingeklebte Stäbe direkt über dem Einklebegrund in Folge Querkzug und erreichten ungefähr den gleichen Schubspannungswert (5 N/mm^2) wie parallel zu den Fasern des Holzes eingeklebte Stäbe.

MOERS

Moers klebte Gewindestangen faserparallel in Voll- und Brettholz mit einem ungesättigten Polyesterharz ein. Er variierte die Verbundlängen und die Abmessungen der Holzquerschnitte. Die Versuche ergaben ein nahezu elastisches Verhalten bis hin zum schlagartigen Versagen der Verbindung (sprödes Verhalten). Moers stellte dabei eine mittlere Verbundfestigkeit von $8,4 \text{ N/mm}^2$ fest. Die Hölzer rissen oft parallel zum Stab auf, da die gewählten Abmessungen auf Grund der auftretenden Querkzugspannungen versagten.

RIBERHOLT

Riberholt führte Versuche an rechtwinklig und parallel zur Faserrichtung (Voll- und Brett-schichtholz) eingeklebten Stäben an der Technischen Universität von Dänemark durch. Er verwendete dafür folgende Klebstoffe: Epoxidharz, Polyurethanklebstoff und Resorcinharz mit jeweils einer Fugendicke von 1 mm. Weiters variierte er die Randabstände, so wie die Abstände untereinander. Riberholt stellte fest, dass die mittlere Verbundfestigkeit mit steigender Einklebelänge kleiner wurde. Die Verbundfestigkeit von Polyurethanklebstoff (PUR) lagen bei gleicher Einklebelänge über jener von Epoxidharzklebstoff (EPX). Wie bereits aus der Arbeit von Möhler et al. bekannt, besteht kein wesentlicher Unterschied von senkrecht und parallel zur Faserrichtung des Holzes eingeklebten, axial belasteten Stäben. Die Einhaltung einer Holzfeuchte von $u \leq 15\%$ wurde vorausgesetzt. Riberholt führte erstmals eine Unterteilung (bis 200 mm oder größer) der Verbundlängen bei den Bemessungsformeln ein.

KANGAS

Im Gegensatz zu den vorhergenannten Forschern verwendete Kangas nicht Gewindestäbe sondern Betonrippenstähle. Er untersuchte dabei die Einzeltragfähigkeit und die Tragfähigkeit als Gruppe. Die Holzprobekörper waren aus Brettschichtholz und hatten eine Holzfeuchtigkeit $u \leq 15\%$. Weiters wurde auch der Winkel zwischen dem eingeklebten Stab und der Faserrichtung des Holzes zwischen 30° bis 90° variiert. Es kamen ein Polyurethanklebstoff und zwei Epoxidharzsysteme zum Einsatz, wobei einer der Epoxidharzklebstoffe mit Zement gemischt wurde. Der Betonrippenstahl wurde vor dem Verkleben sandgestrahlt und auf 60°C vorgewärmt. Die mittleren Verbundfestigkeiten zeigten in allen Fällen keine wesentliche Abhängigkeit vom Einsatz der verschiedenen Klebstoffe oder der Änderung des Stahl-Holzfasern-Winkels. Aufgrund seiner Forschungsergebnisse stufte Kangas den Unterschied der Verbundfestigkeitswerte zwischen Druck- ($6,7\text{ N/mm}^2$) und Zugbelastung ($6,1\text{ N/mm}^2$) als gering ein. Modifizierte Epoxidharzsysteme versagten dabei in der Regel in der Grenzschicht Klebefuge-Stab. Die Grenzfläche Holz-Klebefuge war bei unveränderten Epoxidsystemen für das Versagen verantwortlich. Bei Probekörpern, welche mit Polyurethanklebstoff mit dem Betonrippstahl verklebt wurden trat vorwiegend ein Kohäsionsversagen der Klebefuge als Versagensmechanismus auf.

HOLLINSKY (1988 – 1993)

Ein Beitrag zum Thema eingeklebte Verbindungsmittel aus Österreich stammt von Hollinsky / TU Wien. In seinem Forschungsvorhaben befasste er sich mit dem Einkleben von Stäben verschiedener Materialien und Art in Brettschichtholz. Die Schwerpunkte waren der Einfluss der Klimabelastung, sowie dem Verbund und die Ermittlung der Verbundspannung entlang der Verbundlänge. Die verwendeten Stäbe waren Gewindestäbe aus Stahl und glasfaserverstärkte Kunststoffstäbe (GFK). Diese wurden mittels Epoxidharzklebstoff senkrecht zur Faserrichtung des Holzes eingeklebt. Jene Proben mit Gewindestäben, die einer unterschiedlichen Klimabelastung über 5 Monate ausgesetzt waren, zeigten nur geringe Abweichungen in der Bruchlast gegenüber den Referenzprobekörpern. Bei den GFK-Stäben waren die Bruchlasten bereits nach der ersten Feucht-Trocken-Wechselagerung viel niedriger angesiedelt. Der Grund hierfür lag nach Hollinsky in der Qualität bzw. Festigkeit der Kunststoffstäbe.

3. 3. 2. 5 Eingeklebte Rohrverbinder

Die Kraftübertragung bei eingeklebten Rohrverbindern beruht auf dem selben Prinzip wie jene eingeklebter Gewindestangen. Beginn die Entwicklung von eingeklebten Gewindestangen vor ca. 30 Jahren, so sind Rohrverbinder als junge Verbindungstechnik anzusehen, da die ersten Forschungstätigkeiten erst Mitte der 1990er-Jahre statt fanden.

SCHREYER

Schreyer untersuchte in seiner Diplomarbeit an der Fachhochschule Wiesbaden Fachbereich Bauingenieurwesen die Tragfähigkeit von Rohrverbindern. Die erste Versuchsreihe umfassten Zug- und Druckbelastungen in Holzfaserrichtung bei Vollholzquerschnitten. Bei den Zugkraftversuchen wurde zusätzlich das Verhalten des Verbindungsmittel in PSL (Parallel Strand Lumber) getestet. Die Verwendung von PSL steigerte die maximal übertragbare Kraft um 10% gegenüber jenen von Vollholzquerschnitten. Der Grund für die Steigerung der maximal übertragbaren Kraft liegt in der „Verzahnungsmöglichkeit“ zwischen Klebstoff und Holzwerkstoff. Bei der zweiten Versuchsreihe wurde die Tragfähigkeit bei Abscherbelastung des Verbindungsmittel bestimmt. Dazu wurde der Rohrverbinder in das Hirnholzende eines Brettschichtholzquerschnitts eingeklebt. Zusätzlich wurden anhand von zwei gleichzeitig belasteten Verbindungsmitteln auch Gruppenwirkungseffekte bei Abscherbelastung untersucht. Auf Abscheren belastete Verbindungen versagten stets auf Querzug normal zur Stabachse, gleich jenen bei Druckbelastung des Rohrverbinders.

BATHON

Bathon von der Rhein Main Hochschule untersucht seit Mitte der 1990er-Jahre das Verhalten von eingeklebten Rohrverbindern an der MPA Wiesbaden. Vorzugsweise werden die Themenbereiche Geometrie, Oberflächenbeschaffenheit, Belastungsart, Randabstände, Materialart und Anordnung des Verbindungsmittels im Holz behandelt. Die bisher durchgeführten Versuche zeigten einen Einfluss der zuvor genannten Parameter auf die Verbindungsmittelkapazität. Die zuletzt getesteten Rohrverbinder wurden aus einem 3 mm starken Stahlrohr (S235JR) herausgefräst, mit einem doppelseitigen Gewinde versehen und abschließend galvanisch verzinkt. Zugversuche, an im Stirnholz eingeklebten Rohrverbindern, zeigten eine ausgeprägte Abhängigkeit von der Oberflächenbeschaffenheit. Weiters wurde ersichtlich, dass eine lineare Steigerung hinsichtlich der Zugkapazität, bei in Gruppen angeordneten Rohrverbindern besteht.



Abb. 2.30 Zugversuch-Prüfkörper und Blockscherversagen bei Verbindungsmittelgruppe eingeklebter Rohrverbinder [19]

3. 3. 2. 6 Eingeklebte Lochbleche

Ebenso wie für die Erforschung des Verhaltens von eingeklebten Rohrverbindern hat sich hauptsächlich Professor Bathon von der Rhein Main Hochschule um die Untersuchungen an eingeklebten Lochblechen bemüht.

BATHON

Ausgehend von den Untersuchungen an Holz-Beton-Verbundkonstruktionen wurden Holz-Holz-Prüfkörper entwickelt, bei denen die Verbindung mittels eingeklebter Streckmetalle erfolgte. Von einer Anwendung dieses Verbindungsmittelsystems in der Praxis wurde in [24] berichtet. Die Versuche an der MPA Wiesbaden beinhalten u.a. Rahmeneck-, Druck- und Zugversuche unter einer Temperaturbelastung. Ausgehend von diesen Untersuchungsergebnissen konnten Bemessungsvorschläge für diesen Verbindungsmitteltyp abgeleitet werden. Um Daten über die Temperaturbeständigkeit von eingeklebten Lochblechen in Holz zu erhalten, wurden Orientierungsversuche durchgeführt. Diese zeigten, dass die Funktionsweise der Klebeverbindung bei Klebefugentemperaturen von bis zu 60°C sichergestellt ist.



Abb. 2.31 Druckscherversuch und Zugversuch in Klimaschrank [19]

3. 3. 2. 7 Flächenhafte Verklebungen

Die Entwicklung von gesperrten Hölzern kann bis 2000 v. Chr. zurückverfolgt werden. Damals wurden in Ägypten bereits Sarkophage aus Sperrhölzern unter Verwendung von Baumharzen, Milch, Blut und Knochen hergestellt.

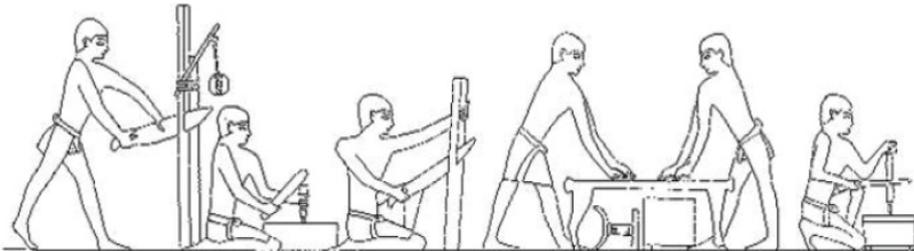


Abb. 2.32 Herstellung von Sperrhölzern im alten Ägypten mittels „Klebstoffen“ aus Baumharz, Milch, Blut, Knochen, etc. [40]

Während der industriellen Revolution im 19. Jahrhundert entwickelten Konstrukteure Maschinen und Anlagen, mit denen die Herstellung von Furnieren ermöglicht wurde. Ebenso hat die Verbesserung der Klebetechnologie (1870: Entdeckung und Entwicklung des Harnstoffes) Anteil an diesem wichtigen Entwicklungsschritt für die Furnierholzerzeugung. Einige Konstruktionen mit flächenhaft verklebten Hölzern entstanden in unterschiedlichen Ländern in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts. In der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts folgte der Bau von Hyparschalen in Deutschland, Großbritannien, Niederlande, USA, Australien, Russland und Estland.

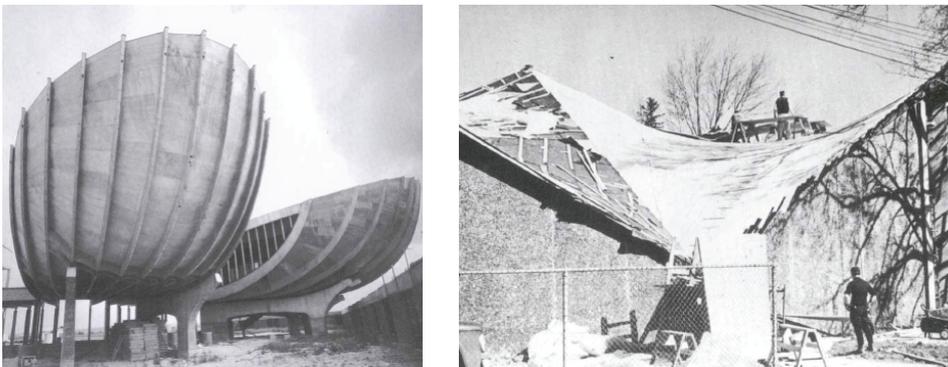


Abb. 2.33 links: Hörsaalgebäude der Uni Reims/Frankreich; rechts: Schwimmhalle der University of Brown/USA [40]

Im Jahre 1989 wurde der Begriff Kreuzlagenholz in den Beuth-Kommentaren und Erläuterungen zur DIN 1052:1988 erwähnt. Dieser Ausdruck wurde dabei in Verbindung mit der Ausbildung von Trägerstegen verwendet. Im selben Jahr benutzte A. Steuerer den Begriff Brettsperrholz ohne eine genauere Definition im Rahmen eines Fortbildungskurses der SAH. Ab dem darauffolgenden Jahr begannen zu diesem Themenbereich Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten auf europäischer Ebene.

Als Ausgangspunkt für die heute bekannten Brettsperrholzprodukte kann das Jahr 1946 angesehen werden. Damals ließ sich der Zimmermeister G. Kämpf aus der Schweiz den Kämpf-Stegträger patentrechtlich schützen. Dieser Träger bestand aus geklebten Brettern, welche in einem Winkel von 5° bis 10° zur Horizontalen (Abb. 2.34) zueinander angeordnet waren. Dieser Trägertyp war im Gegensatz zu anderen Bindersystemen materialsparrend, aber auch arbeitsintensiv. In den 1950er und 1960er Jahren folgten zahlreiche Hallentragwerke mit dieser Trägerform.

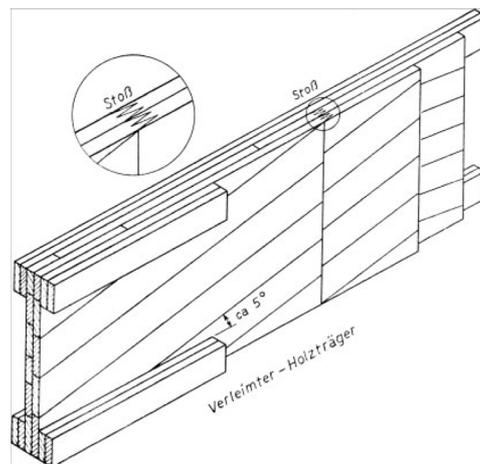


Abb. 2.34 Kämpf-Stegträger [42]

Weiters ist die Schraubenpressverklebung in diesem Abschnitt zu erwähnen. Die relativ junge Geschichte dieser flächenhaften Verklebungstechnik begann ursprünglich mit der Nagelpressverklebung. Diese wurde vorzugsweise angewendet, wenn die Abmessungen der Bauteile für die Fertigung in einer Produktionshalle zu groß waren. Die Verklebung der einzelnen Holzlagen fand somit auf der Baustelle statt. Dabei wurde der benötigte Pressdruck durch das Einschlagen von Nägeln erzielt. Aufgrund der großen Anzahl an benötigten Nägeln, dem hohen Zeitaufwand zur Herstellung und den Erschütterungen beim Einschlagen der Nägel wurde der Nagel als „Verpressmittel“ durch die Schraube ersetzt.



Abb. 2.35 flächenhafte Verklebung mit Hilfe der Schraubenpressverklebung [19]

3. 4 Entwicklung der Klebeverbindungen für andere Bauweisen

[15]; [16]; [17]

3. 4. 1 Natursteinbau und Mauerwerksbau

Die wohl erste bekannte „Klebeverbindung“, die der Mensch eingesetzt hat ist dem Mauerwerksbau zuzuschreiben. Der Mörtel wurde bereits von den Römern zur Stabilisierung ihrer Mauern verwendet. Heute kommen vorzugsweise Dünnbettmörtel zum Einsatz. Basis dieser Klebstoffgruppe, mit der man auch Fliesen und Platten kleben kann, ist Zement der mit Additiven (Kunstharz,...) vergütet wird. Eine Weiterentwicklung auf diesem Sektor ist das Verkleben von Natursteinplatten mit anderen Materialien (z.B. Glas). Ein Klebstoff für eine solche Anwendung kann z.B. Acrylklebstoff sein.

3. 4. 2 Beton und Stahlbetonbau

Das Aufkleben von Verstärkungen (Bleche oder Lamellen) an Stahlbetonteilen ist seit rund 30 Jahren weit verbreitet. Heute kommen dafür Kohlefaserlamellen und ein zementvergüteter Kunstharz zum Einsatz. Der Vorteil dieser Verstärkungsmethode besteht darin, dass sie ohne größere Eingriffe in das bestehende Bauwerk auskommen. Verbunddübel mit einem speziellen Verbundmörtel kommen bei der nachträglichen Befestigung von großen Lasten oder für das nachträgliche Verankern von Bewehrungsstäben zur Anwendung. Diese speziellen Verbundmörtel können in modifizierter Weise auch im Glasbau als lastübertragender Verguß eingesetzt werden.

3. 4. 3 Stahlbau

Das, damals noch in den Kinderschuhen steckende Kleben im Stahlbau wurde in den 1950er-Jahren von der Technologie des Schweißen verdrängt. Heute werden für diesen Zweck Epoxidharze, Acrylate und auch Polyurethane verwendet. Ein Potential für die Zukunft dieser Klebetechnik liegt im Ertüchtigen von Straßenbrücken. Ein bereits übliches Einsatzgebiet von Klebstoffen im Stahlbau stellt das Ausgießen von Anschlußkonstruktionen dar. Auch der hier einzuordnende Fassadenbau profitiert von der Klebetechnologie. Elastische Silikonverklebungen eröffnen den Fassadenbauunternehmen neue Möglichkeiten.

3. 4. 4 Glasbau

Im Glasbau kommen Klebstoffe, wie z.B. Polyvinylbutural (PVB) und Kunstharze bei der Herstellung von Verbundgläsern zum Einsatz. Weitere Anwendungsbereiche sind die Isolierverglasung und der Glasfassadenbau mit Silikonen, welche bei linienförmigen tragenden Verklebungen Stand der Technik sind. Da der Trend im Glasbau in den letzten Jahren eindeutig weg von Halterungen hin zu geklebten Konstruktionen geht besteht hier ein großes Potential für Anwendungen der Klebetechnik.

3. 4. 5 Automobilbau

Die Automobilindustrie betreibt seit Jahrzehnten Forschungstätigkeiten mit dem Schwerpunkt Fügen gleichartiger Teile aus dem selben Material. Hierin besteht der größte Unterschied zur Bautechnik, wo meist unterschiedliche Materialien miteinander verklebt werden sollen.

Heute wird aber auch im Fahrzeugleichtbau nach Klebetechniken gesucht, welche ein Multi-Material-Design zulassen. Der Wunsch des Multi-Material-Design benötigt aber eine genaue Kenntnis über die Leistungsfähigkeit und das Verformungsverhalten der Klebeschicht. Da es praktisch noch keine Kenntnis darüber gibt, werden Untersuchungen in diese Richtung unternommen. Dies ist für den Automobilbau von größerer Bedeutung, da die geforderte Passgenauigkeit eine höhere als im Bauwesen ist. Die Bautechnik kann von diesen erhofften Erkenntnissen jedoch profitieren und in weiterer Folge auf ihre Problemstellungen anwenden.

3. 4. 6 Flugzeugbau

Klebung sind, da es sich dabei um eine leichte Verbindungstechnik handelt, traditionell eine beliebte Verbindungstechnik im Flugzeugbau. Bei größeren Verkehrsflugzeugen kann man alleine durch den Einsatz von Klebstoff anstelle von Nieten bis zu 4 Tonnen an Gewicht sparen. Diese Ersparnis wirkt sich in weiterer Folge positiv auf den Treibstoffverbrauch aus.

Eine Fokker 27 aus dem Jahre 1953 ist jenes Flugzeugmodell bei dem prozentual gesehen der meiste Klebstoff für die Verbindungstechnik eingesetzt wurde. Bei diesem Flugzeug wurden 70% der Verbindungen aus einem Phenolharzklebstoff hergestellt.

Klebstoffe werden im Flugzeugbau in Fly-away- und Maintenance-Produkte eingeteilt. Fly-away-Materialien verbleiben im Flugzeug und unterliegen deswegen höheren Qualitätsanforderungen (Brandschutz, mechanische Beanspruchung,...). Ein Beispiel für ein solches Produkt ist der Epoxidklebstoff der bei Rotorblätter oder dem Leitwerk eingesetzt wird. Maintenance-Klebstoffe verbleiben am Boden und sind somit kein fixer Bestandteil eines Flugzeuges.

3. 5 Zukunft der Verbindungsmittel im Holzbau

[5]; [18]; [19]; [20]; [21]; [22]; [23]; [24]

Die Zukunft der einzelnen Verbindungsmitteltypen wird, den vorliegenden Untersuchungen nach, in der Spezialisierung für gezielte Anwendungen liegen. Jedes Verbindungsmittel hat in unterschiedlichen Anwendungsbereichen und bei speziellen Anforderungen Vorteile, wie aus Abb. 2.36 ersichtlich wird. Neben der maximal aufnehmbaren Belastung können die Vorteile finanzieller Art oder rein durch die Art des technischen Einsatzes begründet sein.

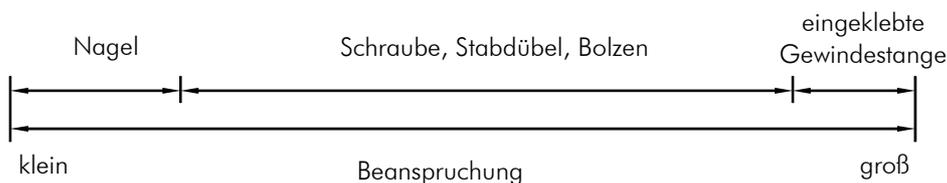


Abb. 2.36 Einsatzgebiet der Verbindungsmittel nach der Größe der Beanspruchung

Schrauben wurden in Abb. 2.36 dem mittleren Beanspruchungsbereich zugeordnet, da sie universell zum Einsatz kommen können. Jedoch darf nicht unerwähnt bleiben, dass Schrauben sehr wohl auch hoch beanspruchbar sind. In die Gruppe der „Hochleistungsverbindungen“ fallen neben den eingeklebten Gewindestangen auch die Rohrverbinder und Lochbleche auf die nun folgend eingegangen wird.

3. 5. 1 Eingeklebte Gewindestange

Bei eingeklebten Gewindestangen handelt es sich im Allgemeinen um eine steife Verbindungstechnik, welche die Möglichkeit bietet, große Einzelkräfte in das Holzbauteil (hauptsächlich Brettschichtholzkonstruktionen) einzuleiten. Die vorzuziehende Beanspruchungsrichtung ist jene in Richtung der Achse des Verbindungsmittel. Bei Beanspruchung auf Abscheren sind die eingeklebten Gewindestangen wie Stabdübelverbindungen zu behandeln. Eine weitere Belastungsart ist die Kombination aus den beiden vorher genannten. Eine Vorgabe bezüglich des Winkels zwischen eingeklebtem Stahlstab und Faserrichtung des Holzes gibt es nicht. Die Durchmesser der Gewindestangen liegen zwischen 10 und 30 mm. Die Länge kann beliebig gewählt werden, wobei bei zu langen Stäben unter Druckbelastung das Ausknicken des Stabes zu berücksichtigen ist. Das Überschreiten einer bestimmten Länge bei Zugbelastung von eingeklebten Stäben bringt keine Steigerung der übertragbaren Kraft mit sich. Siehe dazu Kapitel 4.

Um ein duktilen Verhalten der Verbindung sicherzustellen, werden bei axial belasteten Stäben Querschnittsreduktionen über eine gewisse Länge angeordnet. Damit wird die Möglichkeit eines Sprödbrechversagens des Holzes und Klebstoffes minimiert.



Abb. 2.37 Beispiele für Gewindestangen mit unterschiedlichen Durchmessern [5]

Stahlstäbe, welche in die selbe Gruppe fallen wie Gewindestäbe sind Bewehrungsstäbe und Spezialstangen mit Grobgewinde (Dywidag, Swiss-Gewi). An diese werden die selben Anforderungen gestellt und es besteht auch kein Unterschied in der Handhabung.

3. 5. 1. 1 Anwendungsbereiche

Eingeklebte Gewindestangen finden in folgenden Bereichen Anwendung:

- örtliche Verstärkungsmaßnahme zur Vermeidung / Stabilisierung von Rissen (Ausklinkungen, Lagerbereich, Firstbereich, auf Querkzug beanspruchte Trägerbereiche)
- örtliche Einleitung von großen Kräften
- zur Herstellung eingespannter Stützen im Holzbau
- als Schubverstärkung (Vergleichbar mit der Bügelbewehrung im Stahlbetonbau)
- zur Ausbildung eines biegesteifen Stoßes
- zur Ausbildung von Rahmenecken
- bei Anschlüssen bei Knotenpunkten von Fachwerkträgern
- bei Holz-Beton-Verbundelemente im Brückenbau

3. 5. 1. 2 Herstellung und Einbau

Beim Einbau der Gewindestange können zwei Varianten angewendet werden. Bei der ersten wird zuerst die Stahlstange in die Mitte des Bohrlochs (ev. Platzhalter verwenden) eingesetzt und nachträglich mit Klebstoff verpresst. Das Bohrloch muss dabei mit Einfüll- und Entlüftungslöchern versehen werden. Der Verpressvorgang ist abgeschlossen wenn der Klebstoff ohne Luftblasen aus dem Entlüftungsloch austritt.

Bei der zweiten Variante wird das Loch zuerst mit Klebstoff gefüllt und die Gewindestange nachträglich mittig ins Loch eingesetzt. Zusätzliche Löcher sind dabei nicht erforderlich.

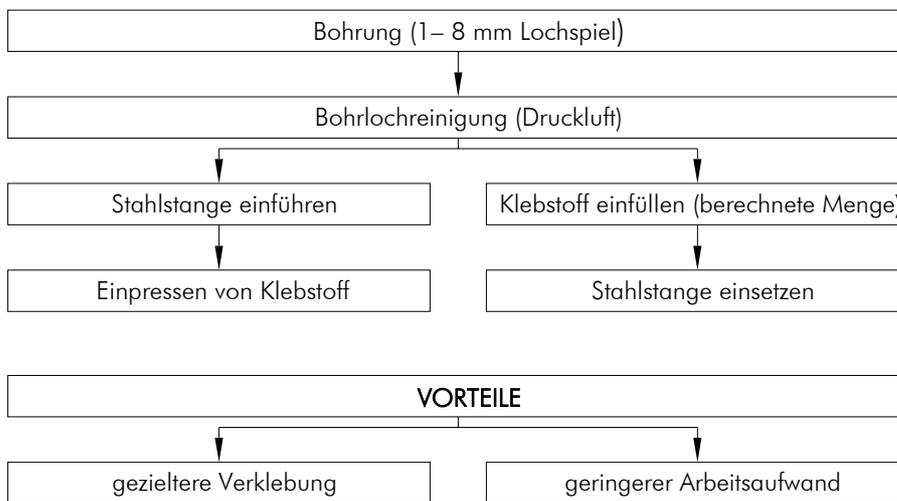


Abb. 2.38 mögliche Varianten zur Herstellung von eingeklebten Gewindestangen

Wie aus Abb. 2.38 ersichtlich, muss, bevor eine der beiden Varianten zur Ausführung kommt, das Bohrloch hergestellt und mit Druckluft gereinigt werden. Die Reinigung des Bohrlochs ist von Nöten, da Holzspäne und Ähnliches die Kraftübertragung zwischen Klebstoff und Bohrlochwandung stören können. Weiters ist sicherzustellen das die gesamte Gewindestange vom Klebstoff umgeben wird, da sonst keine volle Kraftübertragung zu gewährleisten ist. Diese Forderung ist auch in den entsprechenden Normen festgehalten. In beiden Fällen ist die vorgeschriebene Aushärtezeit des Klebstoffes einzuhalten.



Abb. 2.39 Während und nach dem Verpressen der Gewindestangen [20]

3. 5. 2 Eingeklebte Rohrverbinder

Bei eingeklebte Rohrverbindungen handelt es sich um ein noch nicht geregeltes Bauprodukt. Dieses Verbindungsmittel weist die selben Vorzüge, wie eingeklebte Stahlstäbe bei einer deutlich höheren Tragfähigkeit, auf. Bei dieser Verbindungsmittelart, wird im Gegensatz zu den eingeklebten Gewindestangen, sowohl die Adhäsion als auch die mechanische Verzahnung zwischen Stahlteil und Klebstoff zur Kraftübertragung ausgenutzt. Die bevorzugte Belastungsart ist auf Druck und Zug parallel zur Faserrichtung. Jedoch ist auch eine Abscherbeanspruchung z.B. bei einer Stützeinspannung durch Windbelastung oder im Auflagerbereich möglich.

Bei diesen Verbindungsmitteltyp handelt es sich um rohrförmige Verbundanker, die in eine Ringnut im Holz eingeklebt werden. Dazu wurden an der MPA Wiesbaden seit längerer Zeit Untersuchungen durchgeführt. Dabei kommen Rohrverbinder vom Typ HSK-RV-T5 aus S235JR Stahl zum Einsatz. Die 3 mm starken und 125 mm langen Stahlrohre werden mit einem Gewinde an den Oberflächen versehen. Der Durchmesser des Rohres beträgt 48 mm (siehe Abb. 2.41). Um einen Schraubanschluss zu ermöglichen, besitzt die angeschweißte Kopfplatte ein M16 Gewinde. Die Schlitz (Breite: 3 mm, Länge: 100 mm) in Längsrichtung dienen zur besseren Verteilung des Klebers und der damit verbundenen Minimierung der Luftblasen.



Abb. 2.40 Links: Beispiele für Rohrverbinder [19]; Rechts: Unterschied zwischen sandgestrahlter und Gewindeoberfläche [23]

Der große Vorteil dieses Verbindungsmitteltyps liegt in der wesentlich größeren Oberfläche (innen und außen am Rohrverbinder) die zur Kraftübertragung zur Verfügung steht. Durch diese Maßnahme kann eine 3- bis 4-fach höhere Kraft, als bei den Gewindestangen übertragen werden, wenn von den Geometrien ($D > d$) der beiden Verbindungsmitteltypen ausgegangen wird. Anders ausgedrückt bedeutet dies, dass der Rohrverbinder nur ein Viertel der Länge der Gewindestange haben muss, um die selbe Kraft übertragen zu können.

Die entsprechenden Tragfähigkeiten errechnen sich zu

$$R_{ax,d} = \pi \cdot d \cdot l_{ad} \cdot f_{ax} \quad \text{bei Gewindestangen} \quad (2.1)$$

$$R_{ax,d} = \pi \cdot 2 \cdot D \cdot l_{ad} \cdot f_{ax} \quad \text{bei Rohrverbinder} \quad (2.2)$$

Es bedeuten:

- $R_{ax,d}$ Bemessungswertes des Ausziehwiderstandes in N
- d Durchmesser der Gewindestange in mm
- D Außendurchmesser des Rohrverbinders in mm
- l_{ad} Einklebelänge des Verbindungsmittel in mm
- f_{ax} charakteristischer Festigkeitswert in N/mm²

Ein weiterer positiver Effekt ist, dass der Holzquerschnitt durch die Fräsung nur minimal geschwächt wird. Dies ist bei den bis jetzt verwendeten Verbindungsmitteln (Stabdübel, Passbolzen,...) nicht der Fall.

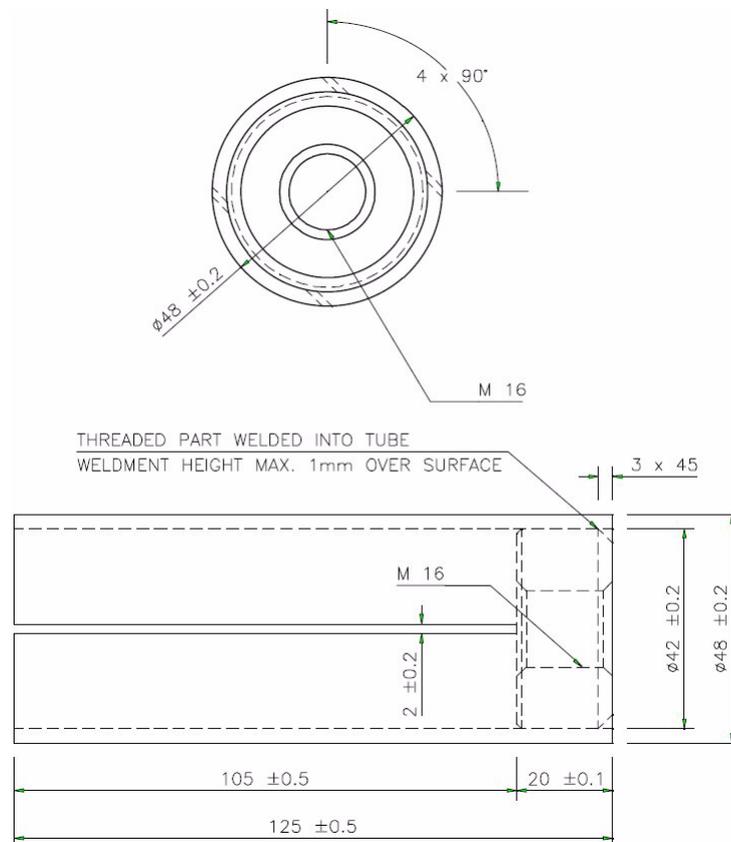


Abb. 2.41 Abmessungen eines Rohrverbinders [18]

3. 5. 2. 1 Anwendungsbereiche

Rohrverbindungen finden in folgenden Bereichen Anwendung:

- bei der Ausbildung von Knotenpunkten
- bei der Ausbildung von Rahmenecken
- zur Herstellung von Stützeinspannungen
- bei Haupt-/Nebenträgeranschlüssen
- bei der örtlichen Einleitung großer Kräfte
- zur Montage von Geländerkonstruktionen

3. 5. 2. 2 Herstellung und Einbau

Bevor der Einbau des Rohrverbinders im Holz betrachtet wird, werden die Unterschiede in der Herstellung der Rohrverbinder angeführt.

Beim ersten Typ des Rohrverbinders wird, um die Verbundwirkung des Klebstoffs mit dem Stahl zu erhöhen der Stahlteil sandgestrahlt. Dabei stellt die Präparierung der Innenseite eine Herausforderung dar, da die Kopfplatte eine Barriere für die Luft darstellt und somit einen Luftpolster bildet.

Der zweite Typ wird nicht sandgestrahlt, sondern es werden Gewindegänge an der Innen- und Aussenseite aufgewalzt. Dadurch wird eine Verbesserung der Verbundwirkung zwischen Stahl und Klebstoff erzielt.

Als erster Schritt bei der Fertigung wird die Ringnut mit einem eigens dafür entwickelten Fräskopf (Abb. 2.42) ausgefräst. Die Holzspäne werden während des Fräsvorganges durch die spiralförmigen Windungen an der Aussenseite des Fräskopfes nach außen befördert.

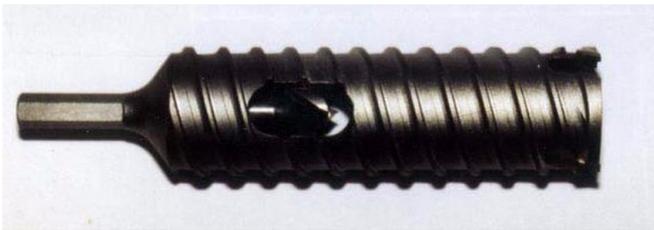


Abb. 2.42 Fräskopfaufsatz für Bohrgerät [18]

Die Tiefe der Bohrung wird dadurch bestimmt, ob man den Abschluss des Rohrverbinders plan mit dem Holz benötigt, oder den Verbinder etwas überstehen (3 bis 5 mm) lassen möchte. Nach dem Reinigen der Ringnut mit Pressluft ist der erste Schritt abgeschlossen.

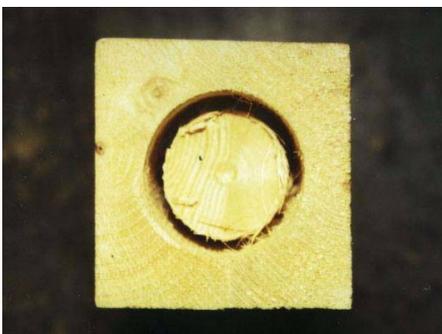


Abb. 2.43 Fräsnut im Stirnholz nach der Fertigstellung [18]

Im zweiten Schritt wird der Klebstoff in die Fräsnut gepumpt. Dabei wird über eine Düse das Bohrloch, vom Boden beginnend mit Klebstoff befüllt. Durch diese Art der Befüllung stellt man eine gleichmäßige Verteilung des Klebstoffs in der Fräsnut sicher. Die durchschnittliche Füllmenge bei einer Verbindung liegt zwischen 60 - 70 cm³. Als Anhaltspunkt für die Füllmenge kann der mittlere Holzapfen dienen. Ist die Oberkante des Holzapfens erreicht, befindet sich ausreichend Klebstoff in der Fräsnut.

Bei dem dritten Schritt wird nun der Rohrverbinder eingesetzt. Dies geschieht unter langsamem Eindrücken von Hand mit gleichzeitigen Drehbewegungen (für eine bessere Verteilung des Klebstoffs). Dabei ist darauf zu achten, dass der Stahlteil mittig in der Fräsnut sitzt, damit die gesamte Oberfläche ausreichend mit Klebstoff benetzt ist.

Als letzter Schritt wird nun nach ungefähr 10 Minuten (bei Raumtemperatur) der herausgedrückte Klebstoff entfernt. Die erste Belastung sollte frühestens nach einer Stunde erfolgen.

3. 5. 3 Eingeklebte Lochbleche

Eingeklebte Lochbleche sind eine kraft- und formschlüssige Verbindungstechnik und stellen eine weitere Möglichkeit zu herkömmlichen kraftschlüssigen Verbindungen dar. Unter einem Lochblech versteht man Stahlformteile, welche in einem bestimmten Raster Lochungen besitzen. Die üblichen Dicken dieser Bleche reichen bis 2,5 mm. Die Durchmesser der Löcher können zwischen 3 und 12 mm variieren. Zudem sind die Lochbleche gut schweißbar und auch verzinkbar. Eine ausreichende Verzinkung wird benötigt um den Korrosionsschutz sicherzustellen.

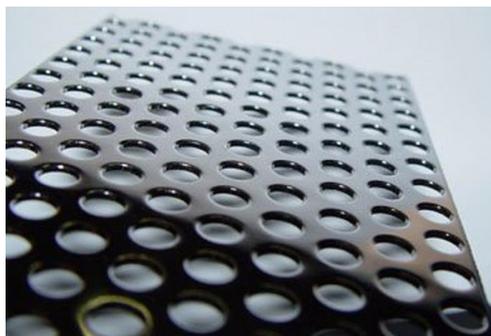


Abb. 2.44 Beispiel für ein Lochblech [48]

Zu diesem Verbindungsmitteltyp liegen noch wenige Versuchs- und Forschungsergebnisse vor. An der MPA Wiesbaden wurden hierzu Untersuchungen, überwiegend an Rahmenecken durchgeführt und Bemessungsvorschläge für eingeklebte Lochbleche aufgrund der gewonnenen Kenntnisse abgeleitet. Weiters wurden an der MPA Wiesbaden Untersuchungen zu Holz-Beton-Verbundkonstruktionen mit Lochblechen durchgeführt. Für diese Verbindungstechnik ist bereits eine bauaufsichtliche Zulassung (Z-9.1-557) vorhanden.

Bei zwei Versuchen an Rahmenecken an der MPA Wiesbaden wurde jeweils ein Versagen des Holzes festgestellt. Die Holz-Stahl-Klebeverbindung blieb jedesmal intakt.



Abb. 2.45 Beispiel eines vorgefertigten biegesteifen Rahmenecks mit Lochblechen [19]

Vergleichbar mit Lochblechen sind Streckmetalle. Dies sind spezielle kaltumgeformte Stahlteile mit definierten Eigenschaften und Abmessungen. Bisher fanden diese Stahlteile in der Holz-Beton-Verbundbauweise ihren Einsatz (sog. HBV-Systeme). Nun werden jedoch auch Versuche mit eingeklebten Streckmetallen (HSK-System) bei Holz-Holz-Verbindungen durchgeführt.

3. 5. 3. 1 Anwendungsbereiche

Eingeklebte Lochbleche finden in folgenden Bereichen Anwendung:

- bei der Ausführung von Knotenpunkten
- in der Ausbildung von Rahmenecken
- bei der Herstellung von Stützeinspannungen

3. 5. 3. 2 Herstellung und Einbau

Im ersten Schritt der Fertigung werden die Schlitz im Holz hergestellt. Als Werkzeug kommt dabei meist eine Handkreissäge zum Einsatz. Die Tiefe und Breite der Fuge ist durch das verwendete Lochblech bestimmt. Der Schlitz muss etwas breiter und tiefer ausgeführt werden, damit das Lochblech komplett vom Klebstoff umgeben werden kann. Zum Abschluss dieses Schrittes wird die Fuge mit Druckluft ausgeblasen um ungewollte Holzspäne, welche die Kraftübertragung zwischen Klebstoff und Holz stören, zu entfernen. Ausgefranste Fasern müssen, ebenso wie bei den Rohrverbindern, nicht entfernt werden, da sie zu einer Traglaststeigerung führen.



Abb. 2.46 Herstellen der Fuge im Holz mit einer Handkreissäge und Befüllen mit Klebstoff [25]

Im zweiten Herstellungsschritt wird nun der Schlitz im Holz mit dem Klebstoff befüllt. Dabei sollte man die Düse der Klebstoffspritzpistole am Boden der Fuge entlangführen, da auf diese Weise ein ungewollter Lufteinschluss vermieden werden kann.

Beim letzten Schritt zur Herstellung einer Verbindung mit eingeklebten Lochblechen werden die Stahlteile von oben, mittig in den mit Klebstoff gefüllten Schlitz, von Hand eingedrückt.



Abb. 2.47 Eindrücken des Lochblechs in die mit Klebstoff gefüllte Fuge von Hand [25]



Regeln der Technik

In diesem Kapitel wird auf die Normung der folgenden eingeklebten Verbindungsmittel eingegangen:

- eingeklebte Gewindestangen
- Rohrverbinder und eingeklebte Lochbleche

Die Analyse der verschiedenen Normen befasst sich mit den Berechnungsformeln und Mindestabstände für die unterschiedlichen Beanspruchungsrichtungen. Weiters wurden konstruktive Hinweise der jeweiligen Normen zusammengefasst.

Ein weiterer Abschnitt ist den grundsätzlichen Leistungsanforderungen und Prüfverfahren der Klebstoffe für tragende Holzbauteile gewidmet. Den Abschluss dieses Kapitels bildet eine Betrachtung der aktuellen Prüfverfahren und Versuchsaufbauten für Klebeverbindungen.

1 Eingeklebte Gewindestangen

[52]; [53]; [54]; [55]

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit der Normung von eingeklebten Gewindestangen im Holzbau.

Folgende Normen wurden dabei einer vergleichenden Betrachtung unterzogen:

- DIN 1052:2008-12
Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken – Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau
Ausgabe: Dezember 2008
- SIA 265:2003
Holzbau
Ausgabe: 2003

- prEN 1995-2 Second draft
Draft Rules for Bonded-in Rods
Ausgabe: Mai 2003
- ÖNORM B 4100-2
Holzbau – Holztragwerke, Teil 2: Berechnung und Ausführung
Ausgabe: März 2004

1. 1 Auszug aus DIN 1052:2008-12

1. 1. 1 Allgemeines

In der DIN 1052:2008-12 findet man unter Punkt 14.3 Festlegungen zu Verbindungen mit eingeklebten Stahlstäben. Hierbei wird nicht zwischen eingeklebten Gewindebolzen (= Gewindestangen) mit metrischem Gewinde (DIN 976-1) und Betonrippstählen (DIN 488-1) mit einem Nenndurchmesser ($6 \text{ mm} \leq d \leq 30 \text{ mm}$) unterschieden. Für Verbindungen mit mehrere Gewindebolzen (Gruppenwirkung), welche in Richtung ihrer Stabachse beansprucht und mit einem anderen Bauteil verschraubt sind, muss durch das Anziehen der Muttern eine gleichmäßige Verteilung der Zugkräfte in den Gewindebolzen gewährleistet werden. Weiters legt DIN 1052:2008-12 fest, dass die maximale Holzfeuchte beim Einkleben der Stahlstäbe höchstens $u=15\%$ betragen darf.

Unter Punkt 14.1 fordert DIN 1052:2008-12 von Herstellern von Klebearbeiten einen Nachweis der Eignung. Was ein solcher Nachweis laut DIN 1052:2008-12 alles inkludiert, kann aus Anhang A der selben Norm entnommen werden. Wird ein Klebstoff verwendet, der nach DIN EN 301:2006-09 und DIN 68141 nicht als geeignet angesehen wird, ist ein gesonderter Nachweis der Eignung über eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung zu erbringen.

Weiters wird unter Punkt 14.1 auf das Reinigen der Bohrlöcher vor dem Einkleben der Stahlstäbe hingewiesen. Unter anderem wird angeführt, dass bei Bohrlochdurchmessern, welche größer als der Außendurchmesser der Stahlstäbe sind, der Klebstoff durch nachträgliches Injizieren eingebracht werden darf. Das nachträgliche Einsetzen der Stahlstange in das bereits teilweise mit Klebstoff gefüllte Bohrloch wird als weitere Variante angeführt. Hierbei ist jedoch sicherzustellen, dass der Klebstoff die Hohlräume zwischen Stahlstab und Bohrlochwandung komplett schließt. Der Eignungsnachweis für den Klebstoff mit den jeweiligen Vorgaben bezüglich Planung und Ausführung der Klebearbeiten ist zu berücksichtigen.

1. 1. 2 Beanspruchung rechtwinklig zur Stabachse

Sind Nachweise für die Tragfähigkeit auf Abscheren bei eingeklebten Stahlstäben zu führen, sind unter Punkt 12.2 entsprechende Regelungen angeführt. Da eine eingeklebte Gewindestange für diesen Nachweis wie ein Stabdübel anzusehen ist, gelten die dort angeführten grundlegenden Gleichungen. Als Durchmesser d ist in den Gleichungen für Betonrippenstähle der Nenndurchmesser d_s einzusetzen. Dabei dürfen die Werte der Lochleibungsfestigkeit nach Punkt 12.3 um 25% erhöht in Rechnung gestellt werden, wenn die Stahlstäbe rechtwinklig zur Faserrichtung des Holzes eingeklebt werden.

Werden Stahlstäbe parallel zur Faserrichtung des Holzes eingeklebt, dürfen die charakteristischen Werte der Lochleibungsfestigkeit mit 10% der Werte für rechtwinklig zur Faserrichtung eingeklebter Stahlstäbe angenommen werden. Liegt der Winkel α zwischen eingeklebtem Stahlstab und der Holzfaserrichtung zwischen 0° und 90° , so kann die Bestimmung des charakteristischen Wertes der Lochleibungsfestigkeit mittels Interpolation erfolgen.

Die Mindestabstände, von rechtwinklig zur Stabachse beanspruchten Stäben kann aus Tab. 3.1 entnommen werden. Eine Darstellung der Bezeichnungen der Mindestabstände ist in Abb. 3.1 angeführt.

	1	2
1	parallel zur Faserrichtung eingeklebte Stahlstäbe	$a_2 = 5 \cdot d$ $a_{2,c} = 2,5 \cdot d$ $a_{2,t} = 4 \cdot d$
2	rechtwinklig zur Faserrichtung eingeklebte Stahlstäbe	$a_1 = (3 + 2 \cdot \cos \alpha) \cdot d$ $a_2 = 3 \cdot d$ $a_{1,t} = 7 \cdot d$ (min. 80mm) $a_{1,c} = 7 \cdot d \cdot \sin \alpha$ (min. $3 \cdot d$) $a_{2,t} = 3 \cdot d$ $a_{2,c} = 3 \cdot d$

Tab. 3.1 Mindestabstände von rechtwinklig zur Stabachse beanspruchten eingeklebten Stahlstäben nach DIN 1052:2008-12

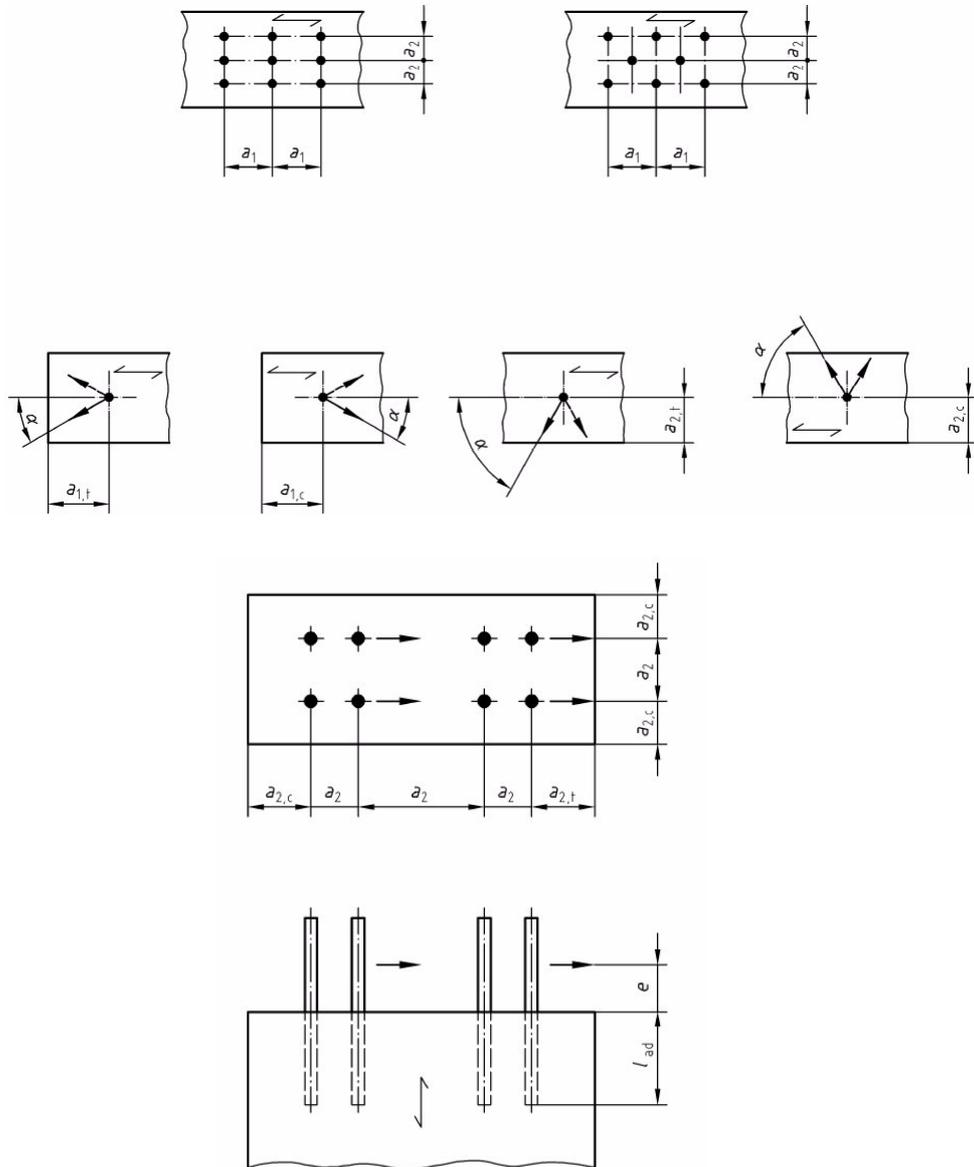


Abb. 3.1 Definition der Mindestabstände der Stahlstäbe nach DIN 1052:2008-12

Besteht ein Abstand e (siehe oben) zwischen der Holzoberfläche und dem Lastangriffspunkt, so hat dies bei der Ermittlung der Tragfähigkeit der Verbindung berücksichtigt zu werden.

1. 1. 3 Beanspruchung in Richtung der Stabachse

Laut DIN 1052 sind bei eingeklebten Stahlstäben, welche in Richtung der Stabachse beansprucht werden, beim Nachweis der Tragfähigkeit folgende Versagensmechanismen zu berücksichtigen:

- Versagen des Stahlstabes,
- Versagen der Klebefuge bzw. des Holzes entlang der Bohrlochwandung und
- Versagen des Holzbauteils.

Falls die Möglichkeit einer ungleichmäßigen Belastung der Verbindung besteht, muss die Tragfähigkeit des Stahlstabes maßgebend für die Gesamttragfähigkeit der Verbindung sein und nicht die Festigkeit der Klebefuge oder die Festigkeit des Holzes. Weiters darf die Fugendicke der Klebeverbindung jenen Wert, der für den Klebstoff im Eignungsnachweis angegeben ist, nicht überschreiten.

Zur Berechnung des Bemessungswertes des Ausziehwiderstandes von eingeklebten Stahlstäben gibt die DIN 1052:2008-12 folgende Gleichung an:

$$R_{ax,d} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{y,d} \cdot A_{ef} \\ \pi \cdot d \cdot l_{ad} \cdot f_{k1,d} \end{array} \right. \quad [N] \quad (3.1)$$

$f_{y,d}$ Bemessungswert der Streckgrenze des Stahlstabes in N/mm²

A_{ef} Spannungsquerschnitt des Stahlstabes in mm²

l_{ad} Einklebelänge des Stahlstabes in mm

$f_{k1,d}$ Bemessungswert $f_{k1,k}$ nach Tab. 3.2 in N/mm²

1	2	3		
		wirksame Einklebelänge l_{ad} des Stahlstabes		
		≤ 250 mm	$250 \text{ mm} < l_{ad} \leq 500$ mm	$500 \text{ mm} < l_{ad} \leq 10\,000$ mm
2	$f_{k1,k}$ Klebefuge zwischen Stahlstab und Bohrlochwandung	4,0	$5,25 - 0,005 \cdot l_{ad}$	$3,5 - 0,0015 \cdot l_{ad}$
3	$f_{k2,k}$ Klebefuge zwischen Trägeroberfläche und Verstärkungsplatte	0,75		
4	$f_{k3,k}$ Klebefuge zwischen Trägeroberfläche und Verstärkungsplatte bei gleichmäßiger Einleitung der Schubspannung	1,50		

Die Angaben der Tabelle dürfen nur angewendet werden, wenn die Eignung des Klebersystems nachgewiesen ist.

Tab. 3.2 Rechenwerte für charakteristische Festigkeitswerte in N/mm² für Klebefugen bei Verstärkungen laut DIN 1052:2008-12

Dabei kann die Einklebelänge $l_{ad,min}$ über folgende Bedingungen ermittelt werden:

$$l_{ad,min} = \max \begin{cases} 0,5 \cdot d^2 \\ 10 \cdot d \end{cases} \quad [\text{mm}] \quad (3.2)$$

d Nenndurchmesser des Stahlstabes, in mm

Zusätzlich zu Glg. (3.1) ist die Zugspannung im Holz am Ende des Stahlstabes, bei parallel zur Faserrichtung des Holzes eingeklebten, zugbeanspruchten Stahlstäben nachzuweisen. Die dabei pro Stab wirksame Querschnittsfläche des Holzes darf nicht größer als $36 \cdot d^2$ angenommen werden. Weiters sind die bei Queranschlüssen verursachten Querspannungen im Bauteil laut DIN 1052:2008-12 nach Punkt 11.1.5 nachzuweisen.

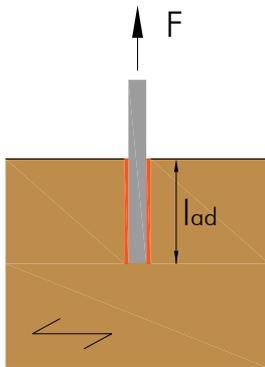


Abb. 3.2 Queranschluss laut DIN 1052:2008-12

Folgende Mindestabstände von in Richtung der Stabachse beanspruchten eingeklebten Stahlstäben sind laut DIN 1052:2008-12 einzuhalten:

	1	2
1	parallel zur Faserrichtung eingeklebte Stahlstäbe	$a_2 = 5 \cdot d$ $a_{2,c} = 2,5 \cdot d$
2	rechtwinklig zur Faserrichtung eingeklebte Stahlstäbe	$a_1 = 4 \cdot d$ $a_2 = 4 \cdot d$ $a_{1,c} = 2,5 \cdot d$ $a_{2,c} = 2,5 \cdot d$

Tab. 3.3 Mindestabstände von in Richtung der Stabachse beanspruchten eingeklebten Stahlstäben

Die entsprechenden Darstellungen der Mindestabstände sind der nachfolgenden Abbildung zu entnehmen.

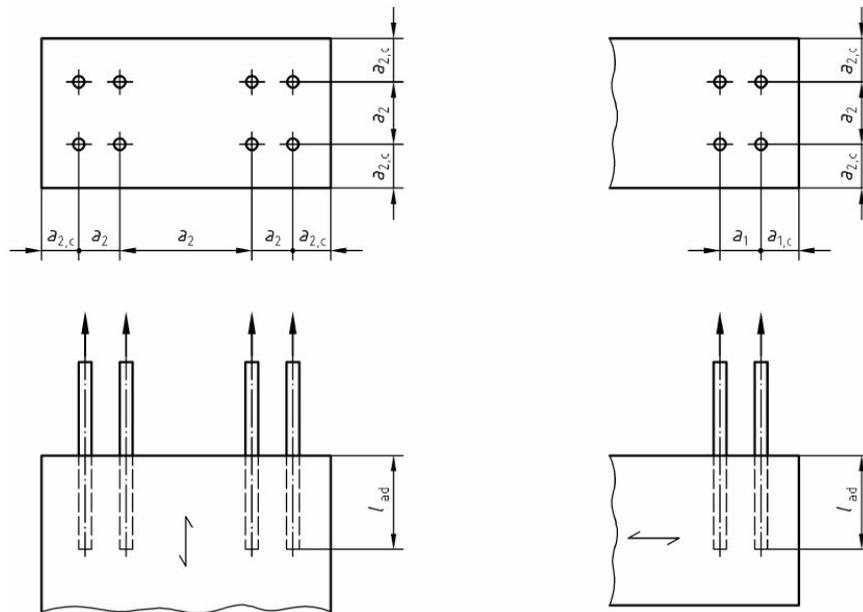


Abb. 3.3 Definition der Mindestabstände der Stahlstäbe nach DIN 1052:2008-12

1. 1. 4 Kombinierte Beanspruchung

Tritt eine gleichzeitige Belastung der Stahlstäbe durch Abscheren und Herausziehen auf, so ist der folgende kombinierte Nachweis zu führen

$$\left(\frac{F_{l\alpha,d}}{R_{l\alpha,d}}\right)^2 + \left(\frac{F_{\alpha x,d}}{R_{\alpha x,d}}\right)^2 \leq 1 \quad (3.3)$$

- $F_{l\alpha,d}$ Bemessungswert der Einwirkung quer zur Stabachse [kN]
- $R_{l\alpha,d}$ Bemessungswert der Tragfähigkeit quer zur Stabachse [kN]
- $F_{\alpha x,d}$ Bemessungswert der Einwirkung in Stabachsenrichtung [kN]
- $R_{\alpha x,d}$ Bemessungswert der Tragfähigkeit in Stabachsenrichtung [kN]

1. 2 Auszug aus SIA 265:2003

1. 2. 1 Allgemeines

Unter Punkt 6.10 der SIA 265:2003 sind Festlegungen zu Verbindungen mit eingeleimten profilierten Stäben angeführt. Dabei wird der Einsatz dieser Stäbe auf Bauteile, die den Feuchteklassen 1 und 2 zuzuordnen sind, beschränkt. Daher gilt es für die Ausführung von eingeklebten Stäben, ein gleichbleibend zuverlässiges Verhalten des Klebstoffes (Kunstharz-Leim bzw. -Mörtel) und seines Verbundes mit dem profilierten Stab und dem Holz, innerhalb der angenommenen Temperatur- und Feuchtebereiche nachzuweisen. Weiters sind Risse und Zwängungen, welche aus einer Holzfeuchteänderung resultieren zu berücksichtigen.

1. 2. 2 Beanspruchung rechtwinklig zur Stabachse

Für rechtwinklig zur Stabachse beanspruchte, eingeklebte profilierte Stäbe gelten die selben Bestimmungen wie für Stabdübel bei dieser Belastungsart. Der einzige Unterschied besteht darin, dass auf Grund der Profilierung ein reduzierter plastischer Biege widerstand einzuführen ist. Die entsprechenden Angaben zur Durchführung der Reduktion sind unter Punkt 6.1.4.4 angeführt.

1. 2. 3 Beanspruchung in Richtung der Stabachse

Laut SIA 265:2003 sind bei eingeleimten Stäben, bei denen die Belastung in Stabrichtung erfolgt, folgende Tragsicherheitsnachweise zu führen:

- Versagen des profilierten Stabs,
- Versagen des Klebstoffes und seines Verbunds mit dem profilierten Stab und dem Holz,
- Versagen des Holzes entlang der Leimfuge,
- Versagen eines Holzteils im Bereich der Verbindung.

Folglich darf zwischen Klebstoff und profilierten Stab nur die mechanische Kraftübertragung in Rechnung gestellt werden. Eine Berücksichtigung der eventuell auftretenden Haftung ist unzulässig. Um eine gleichmäßige Kraftverteilung bei Zugverbindungen auf die Einzelstäbe zu erhalten, muss die Duktilität jedes Einzelstabes ausreichend groß sein. In der Regel wird duktiler Verhalten dadurch erreicht, indem ein Zugversagen des Stabes mit dazugehörigen Verformungen mit ausreichender Sicherheit vor den anderen Versagensmöglichkeiten eintritt. Ist dies nicht gegeben, ist von einer ungleichmäßigen Kraftverteilung auszugehen.

In Bezug auf Druck- und Zugbelastung in Richtung der Stabachse wird laut SIA 265:2003 kein Unterschied gemacht, daher sind die selben Kenngrößen für beide Belastungsrichtungen gültig. Weiters sind folgende Einflussgrößen zu berücksichtigen wenn die Ausziehkraft in Richtung der Stabachse versuchstechnisch an repräsentativen Verbindungen bestimmt wird: Lochdurchmesser und Stabdurchmesser, Einleimlänge, Holzart, Festigkeitsklasse, Rohdichte, Holzfeuchte, Stahlgüte und Profilierung, Eigenschaften des Klebstoffes, Winkel zwischen Stab- und Faserrichtung und Rand- und Zwischenabstände.

1. 2. 4 Kombinierte Beanspruchung

Tritt eine Belastung der eingeklebten profilierten Stäbe sowohl in Schaftrichtung als auch rechtwinklig dazu auf, so muss laut SIA folgende Bedingung eingehalten werden:

$$\left(\frac{F_{ax,d}}{R_{ax,d}}\right)^2 + \left(\frac{F_d}{R_d}\right)^2 \leq 1 \quad (3.4)$$

$F_{ax,d}$	Bemessungswert der Einwirkung in Stabachsenrichtung [kN]
$R_{ax,d}$	Bemessungswert der Tragfähigkeit in Stabachsenrichtung [kN]
F_d	Bemessungswert der Einwirkung quer zur Stabachse [kN]
R_d	Bemessungswert der Tragfähigkeit quer zur Stabachse [kN]

1. 3 Auszug aus prEN 1995-2 Second draft, 2003-05

1. 3. 1 Allgemeines

Der in englischer Sprache verfasste zweite Entwurf der prEN 1995-2:2003-05 befasst sich mit eingeklebten Stäben, die für einen Einsatz in den Nutzungsklassen 1 und 2 vorgesehen sind. Während der gesamten Lebensdauer einer Verbindung mit eingeklebten Stäben muss sichergestellt werden, dass der Klebeverbund zwischen Klebstoff und Stahl bzw. Holz in den vorkommenden Temperatur- und Feuchtebereichen nicht versagt. Als geeignete Stäbe empfiehlt prEN 1995-2:2003-05 Gewindestangen oder Bewehrungsstäbe.

Finden eingeklebte Stäbe in der Nutzungsklasse 2 Anwendung, so hat eine Reduktion der entsprechenden k_{mod} - Werte, wie unter EN 1995-1 Punkt 3.1.3 angegeben, um 20% zu erfolgen. Weiters legt die prEN 1995-2 fest, dass die Bestimmung der Scherfestigkeit der Klebung und deren Verbund mit dem Stahl und Holz anhand von Versuchen zu erfolgen hat.

Zusätzlich zu den zuvor erwähnten Bestimmungen sind folgende Anhaltspunkte für die Herstellung von eingeklebten Stäben angeführt,

- die Bohrlochwandung hat mit scharfem Werkzeug hergestellt zu werden,
- werden Stäbe in einer Gruppe angeordnet, so ist deren gleichmäßiges Anziehen sicherzustellen,
- eine vollkommene Füllung des Bohrloches mit Klebstoff ist zu gewährleisten und
- zum Zeitpunkt des Einklebens der Stäbe darf die Holzfeuchte u nicht mehr als 15% betragen.

1. 3. 2 Beanspruchung rechtwinklig zur Stabachse

1. 3. 2. 1 Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit

Für rechtwinklig zur Stabachse belastete Stäbe verweist die prEN 1995-2:2003-05 auf die EN 1995-1-1 Punkt 8. Als Grundlage können daher die Angaben für rechtwinklig zur Stabachse belastete Stabdübel herangezogen werden.

Nur 10% der Lochleibungsfestigkeit von normal zur Faserrichtung des Holzes eingeklebter Stäbe darf bei parallel zur Faser des Holzes eingeklebten Stäben in Rechnung gestellt werden. Kommen Stäbe unter einem Winkel α zur Holzfasern zur Anwendung, so ist die Ermittlung der Lochleibungsfestigkeit durch eine lineare Interpolation zwischen den Werten für $\alpha=0^\circ$ und $\alpha=90^\circ$ möglich.

1. 3. 2. 2 Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Für Stäbe, welche rechtwinklig zur Holzfaser eingeklebt werden, errechnet man den Verschiebungsmodul K_{ser} in N/mm je Stab aus

$$K_{ser} = 0,04 \cdot d \cdot \rho_{mean}^{1,5} \quad [N/mm] \quad (3.5)$$

Dabei bedeuten:

ρ_{mean} mittlere Rohdichte des Holzes in kg/m³
 d effektiver Durchmesser des Stabes in mm
 Anmerkung: Für Gewindestangen ist der effektive Durchmesser ungefähr 90% des Außendurchmessers; bei Bewehrungsstäben des Nenn-
 durchmessers

Für parallel zur Faserrichtung des Holzes eingeklebte Stäbe errechnet sich K_{ser} aus

$$K_{ser} = 0,08 \cdot d \cdot \rho_{mean}^{1,5} \quad [N/mm] \quad (3.6)$$

Weiters gilt für Stäbe, welche unter einem Winkel α zur Holzfaserichtung eingeklebt sind, dass K_{ser} mittels einer linearen Interpolation bestimmt werden kann.

1. 3. 3 Beanspruchung in Richtung der Stabachse

Die Tragfähigkeit der eingeklebten Stäbe soll laut prEN 1995-2 aufgrund der folgenden möglichen Versagensmechanismen bestimmt werden:

- Versagen des Stahlstabs
- Versagen der Klebung und des Klebeverbunds zum Stahl und Holz
- Versagen des Holzes angrenzend zur Klebung
- Versagen des Holzes (Ausziehen eines ganzen Holzblocks)

Ausgehend von diesen Versagensmechanismen empfiehlt prEN 1995-2:2003-05, dass die Gesamttragfähigkeit der Verbindung durch die Tragfähigkeit des Stahlstabes begrenzt wird.

prEN 1995-2:2003-05 gibt folgende Randabstände und Abstände untereinander an

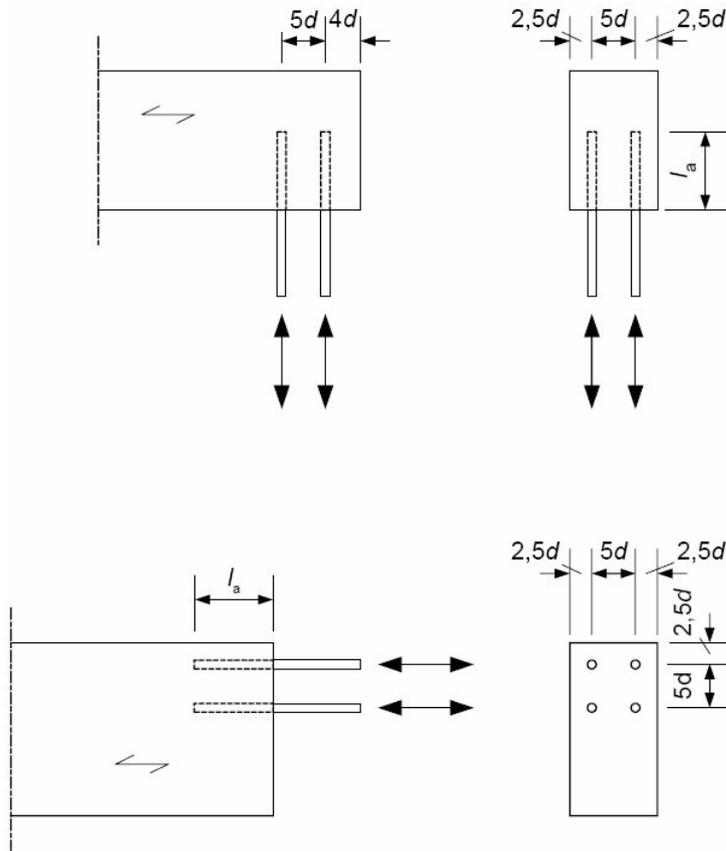


Abb. 3.4 Definition der Mindestabstände der Stahlstäbe nach prEN 1995-2:2003-05

Die minimale Einklebelänge $l_{a,min}$ errechnet sich aus folgender Bedingung:

$$l_{a,min} = \max \begin{cases} 0,5 \cdot d^2 \\ 10 \cdot d \end{cases} \quad (3.7)$$

$l_{a,min}$ minimale Einklebelänge in mm
 d Außendurchmesser des Stabes in mm

Die Variable d bezieht sich entweder auf den Außendurchmesser des Stabes, oder falls die Festigkeit der Klebung nicht maßgebend ist, auf einen äquivalenten Durchmesser d_{equ} . Bei Gewindestangen ist der Außendurchmesser gleich dem Nenn-durchmesser. Für die meisten Bewehrungsstäbe ist der Außendurchmesser um 10% größer als der Nenn-durchmesser.

1. 3. 3. 1 Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit

Der charakteristische axiale Widerstand eines Stahlstabes bei Zugbeanspruchung folgt aus:

$$F_{ax,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{y,k} \cdot A_{ef} \\ \pi \cdot d_{equ} \cdot l_a \cdot f_{ax,k} \cdot \frac{\tanh \omega}{\omega} \end{array} \right. \quad [N] \quad (3.8)$$

mit

$$\omega = \frac{0,016 \cdot l_a}{\sqrt{d_{equ}}} \quad (3.9)$$

- $f_{y,k}$ charakteristische Fließgrenze in N/mm²
- A_{ef} effektiver Stabquerschnitt in mm²
- d_{equ} äquivalente Stabdurchmesser in mm
- l_a Einklebelänge in mm
- $f_{ax,k} = 5,5$ N/mm²

Bei Druckbelastung der Stahlstäbe mit einer Bemessungslast von 300 N/mm² hat zusätzlich eine Stabilitätsuntersuchung auf deren Ausknicken zu erfolgen. Weiters lässt sich die effektive Fläche A_{ef} (Abb. 3.5), welche zur Berechnung des Holzversagen bei parallel zur Holzfaserrichtung eingeklebten Stäben berücksichtigt werden darf, wie folgt ermitteln:

- 3·d von der Mitte des Stabes aus in alle Richtungen,
- die effektive Fläche, wenn zum Rand hin weniger als 3·d und untereinander weniger als 6·d vorhanden sind

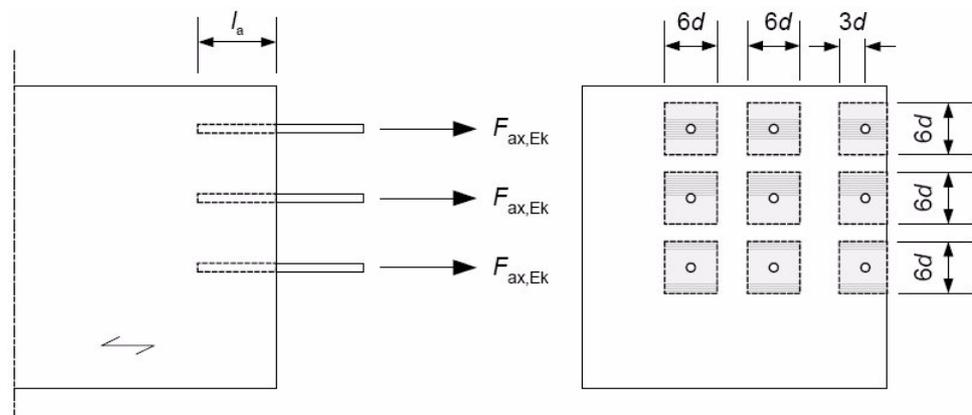


Abb. 3.5 effektive Bruchflächen bei auf Herausziehen beanspruchten, eingeklebten Stäben

Werden mehrere Stäbe parallel zur Faser des Holzes eingeklebt ergibt sich die maximale Tragfähigkeit des einzelnen Stabs zu:

$$F_{\alpha x, Rk} = f_{t, 0, k} \cdot A_{ef} \quad [N] \quad (3.10)$$

$F_{\alpha x, Rk}$ charakteristische Tragfähigkeit eines Stabs in N
 $f_{t, 0, k}$ charakteristische Zugfestigkeit des Holzes in N/mm²
 A_{ef} effektive Bruchfläche des Holzes in mm²

1. 3. 3. 2 Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Der Verschiebungsmodul K_{ser} in N/mm je Stab kann laut prEN 1995-2:2003-05 wie folgt ermittelt werden

$$K_{ser} = 0,004 \cdot d^{1,8} \cdot \rho_{mean}^{1,5} \quad [N/mm] \quad (3.11)$$

d Durchmesser des Stabs in mm
 ρ_{mean} mittlere Rohdichte des Holzes in kg/m³

1. 3. 4 Kombinierte Beanspruchung

Bei kombinierter Beanspruchung sollte folgende Bedingung erfüllt werden

$$\left(\frac{F_{\alpha x, Ed}}{F_{\alpha x, Rd}} \right)^2 + \left(\frac{F_{l\alpha, Ed}}{F_{l\alpha, Rd}} \right)^2 \leq 1 \quad (3.12)$$

$F_{\alpha x, Ed}$ Bemessungswert der Einwirkung in Stabachsenrichtung [kN]
 $F_{\alpha x, Rd}$ Bemessungswert der Tragfähigkeit in Stabachsenrichtung [kN]
 $F_{l\alpha, Ed}$ Bemessungswert der Einwirkung quer zur Stabachse [kN]
 $F_{l\alpha, Rd}$ Bemessungswert der Tragfähigkeit quer zur Stabachse [kN]

1. 4 Auszug aus ÖNORM B 4100-2:2004-03

1. 4. 1 Allgemeines

Unter Punkt 5.2.10 definiert die ÖNORM B 4100-2:2004-03 Regeln für den Gebrauch von in Holz eingeklebten Gewindestangen. Dabei wird als erster Hinweis angegeben, dass der Einsatz von eingeklebten Gewindestangen an direkt bewitterten Oberflächen unzulässig ist.

Weiters sind nur Klebstoffe zulässig, welche fugenfüllende Eigenschaften (z.B. Zwei-Komponenten-Epoxidharzkleber) besitzen. Die Stahlgüten 4.6 bis 8.8 sind laut ÖNORM EN ISO 898-1 Voraussetzung für Gewindestangen mit einem Durchmesser von 8 mm bis 24 mm. Die Bohrlochdurchmesser sind um 15% größer als die Nenn-durchmesser der Gewindestange auszuführen. Die Anforderungen von Punkt 5.2.9 („Verklebungen sind nur dann zulässig, wenn außer geschulten Kräften auch entsprechende Werkseinrichtungen zur Verfügung stehen. Es dürfen nur Klebstoffe verwendet werden, die nach ÖNORM EN 302-1 bis 4 bzw. DIN 68 141 geprüft wurden und die Anforderungen entsprechend ÖNORM EN 301 erfüllen. Die Anweisungen der Klebstoffher-steller sind genauestens einzuhalten.“ [55]) sind für den Einbau und das Aushärten einzuhalten.

Anhand von Konstruktionskriterien und Bemessungsformeln wird die statisch erforderliche Einklebetiefe wie folgt festgelegt:

$$l_{e, \min} = 10 \cdot d \geq 100 \text{ mm} \quad (3.13)$$

d Nenndurchmesser der Gewindestange in mm

1. 4. 2 Beanspruchung rechtwinklig zur Stabachse

Die Bemessung von rechtwinklig zur Schafrichtung belasteten Gewindestangen hat auf die selbe Weise wie für einschnittig beanspruchte Stabdübel (ÖNORM B 4100-2:2004-03 Punkt 5.2.6) zu erfolgen. Erfolgt die Anordnung der Gewindestangen wie in Abb. 3.6, muss die zulässige Übertragungskraft mit 10% der Loch-leibungsfestigkeit parallel zur Faser angesetzt werden.

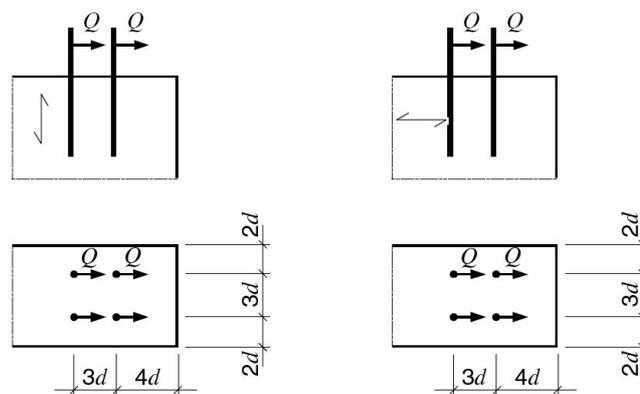


Abb. 3.6 Definition der Mindestabstände der Stahlstäbe nach ÖNORM B 4100-2:2004-03

1. 4. 3 Beanspruchung in Richtung der Stabachse

Für den Nachweis auf Herausziehen der Gewindestangen sind laut ÖNORM B 4100-2:2004-03 die Berechnungsgleichungen von Nagelverbindungen anzuwenden. Die Bemessungsformel für die zulässige Übertragungskraft auf Herausziehen $N_{Z,zul}$ lautet

$$N_{Z,zul} = B_Z \cdot d_n \cdot s_w \quad [N] \quad (3.14)$$

d_n Nageldurchmesser in mm
 s_w wirksame Einschlagtiefe in mm
 B_Z Faktor in N/mm^2 , beträgt für runde Draht- und Maschinenstifte $B_Z = 1,3 N/mm^2$

Die maximal zulässige Übertragungskraft der Klebeverbindung berechnet sich aus:

$$F_{zul} = \min \left\{ \begin{array}{l} A_{sp} \cdot \sigma_{z,zul} \\ \pi \cdot (d \cdot 1,15) \cdot l_a \cdot \tau_{zul} \end{array} \right. \quad [N] \quad (3.15)$$

F_{zul} zulässige Übertragungskraft der Klebeverbindung in N
 A_{sp} Spannungsquerschnitt der Gewindestange in mm^2
 $\sigma_{z,zul}$ zul. Stahlzugspannung der Gewindestange je nach Stahlgüte in N/mm^2
 d Nenndurchmesser der Gewindestange in mm
 $\tau_{z,zul}$ Schubspannung in der Kontaktfläche Klebstoff/Holz in N/mm^2

$$\tau_{zul} = 1,7 \text{ N/mm}^2, \text{ wenn } l_a \leq 250 \text{ mm}$$

$$\tau_{zul} = 2,28 - \frac{l_a}{460}, \text{ wenn } 250 \text{ mm} < l_a \leq 500 \text{ mm}$$

$$\tau_{zul} = 1,52 - \frac{l_a}{1533}, \text{ wenn } 500 \text{ mm} < l_a \leq 1000 \text{ mm}$$

l_a Verankerungslänge in mm

Die Fläche, die zur Kraftübertragung bei parallel zur Faserrichtung angeordnete Gewindestangen herangezogen werden darf, soll maximal eine Seitenlänge von $6 \cdot d$ aufweisen. Diese Fläche wird in weiterer Folge für den Holz-Nettoquerschnittsnachweis verwendet. Erfolgt das Einkleben der Gewindestangen rechtwinklig zur Faserrichtung, sind die Angaben aus dem Kapitel für querzuggefährdete Stabanschlüsse (ÖNORM B 4100-2:2004-03 Punkt 5.2.11.1) zu berücksichtigen.

Die Mindestabstände für in Richtung der Stabachse belastete Gewindestangen sind nach Abb. 3.7 einzuhalten.

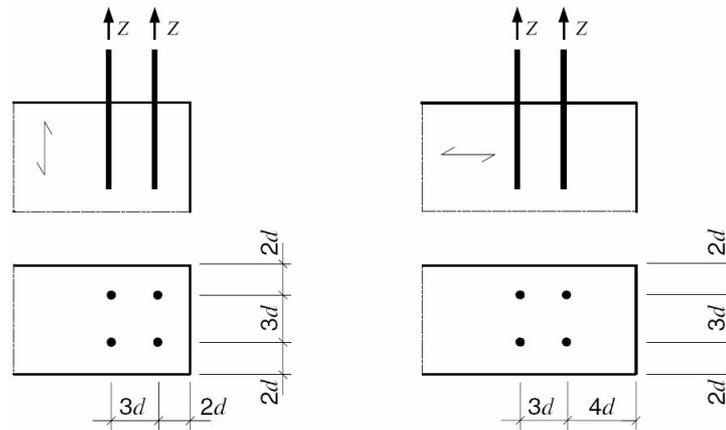


Abb. 3.7 Definition der Mindestabstände der Stahlstäbe nach ÖNORM B 4100-2:2004-03

1. 4. 4 Kombinierte Beanspruchung

Bei eingeklebten Gewindestäben, die gleichzeitig von axialen Kräften und Querkräften beansprucht sind, ist folgender Nachweis zu führen:

$$\left(\frac{F_{N, \text{vor}}}{F_{N, \text{zul}}}\right)^2 + \left(\frac{Q_{\text{vor}}}{Q_{\text{zul}}}\right)^2 \leq 1 \quad (3.16)$$

- $F_{N, \text{vor}}$ Bemessungswert der Einwirkung in Stabachsenrichtung [kN]
- $F_{N, \text{zul}}$ Bemessungswert der Tragfähigkeit in Stabachsenrichtung [kN]
- Q_{vor} Bemessungswert der Einwirkung quer zur Stabachse [kN]
- Q_{zul} Bemessungswert der Tragfähigkeit quer zur Stabachse [kN]

1. 5 Gegenüberstellende Betrachtung und Gemeinsamkeiten der Regelungen in den analysierten Normen

Die Definitionen für eingeklebte Stahlstäbe sind teilweise recht unterschiedlich. So ist beispielsweise nur in der ÖNORM B 4100-2:2004-03 von eingeklebten Gewindestangen die Rede. In DIN 1052:2008-12 hingegen werden die Begriffe Gewindebolzen und Betonrippenstahl verwendet. Den allgemein gültigen Ausdruck eingeklebte profilierte Stäbe verwendet die SIA 265:2003, ähnlich wie in der prEN 1995-2:2003-05 in der eingeklebte Stäbe beschrieben werden.

In DIN 1052:2008-12 und prEN 1995-2:2003-05 wird die maximale Holzfeuchte u beim Einkleben der Stahlstäbe mit maximal 15% beschränkt. In der SIA 265:2003 und ÖNORM B 4100-2:2004-03 hingegen, finden sich dazu keine Angaben. Hinweise, dass eingeklebte Stahlstäbe nur in den Nutzungsklassen 1 und 2 Anwendung finden dürfen, sind nur in der SIA 265:2003 (Feuchteklassen) und der prEN 1995-2:2003-05 (Nutzungsklassen) enthalten. Weiters führt die ÖNORM B 4100-2:2004-03 zu diesem Thema an, dass der Einsatz an bewitterten Oberflächen unzulässig ist.

In allen analysierten Normen wird an den Klebstoff die Anforderung gestellt, dass dieser in der Lage sein muss, über die gesamte Nutzungsdauer der Verbindung den Klebeverbund aufrecht zu erhalten. ÖNORM B 4100-2:2004-03 und DIN 1052:2008-12 stellen darüber hinaus gesonderte Anforderungen an die Klebstoffproduzenten. Zusätzlich zu diesen Anforderungen enthalten die DIN 1052:2008-12 und prEN 1995-2:2003-05 Angaben über die Beschaffenheit des Bohrlochs vor dem Füllen mit Klebstoff.

Eine weitere Gemeinsamkeit aller Normen ist die Behandlung von rechtwinklig zur Stabachse beanspruchter Gewindestangen. Hierbei wird auf die jeweiligen Unterpunkte für die Berechnung von Stabdübel verwiesen. Die SIA 265:2003 gibt zusätzlich an, dass bei Gewindestangen mit einem reduzierten plastischen Biegegewiderstand, aufgrund der Profilierung zu rechnen ist.

Weiters ist in den analysierten Normen, mit Ausnahme der SIA 265:2003 angeführt, dass die Lochleibungsfestigkeit, bei rechtwinklig zur Stabachse beanspruchten Stäben, wenn sie parallel zur Faserrichtung des Holzes eingeklebt sind, zu 10% der Werte von rechtwinklig zur Faser eingeklebten Stäben angenommen werden darf. Für Winkel zwischen 0° und 90° wird auf die Durchführung einer linearen Interpolation hingewiesen.

In der DIN 1052:2008-12 und ÖNORM B 4100-2:2004-03 sind Angaben über die erlaubten Mindestabstände (Tab. 3.4) von rechtwinklig zur Stabachse beanspruchten Stahlstäben angeführt. In der SIA 265 und prEN 1995-2:2003-05 fehlen für diese Belastungsart detaillierte Angaben.

		α_1			α_2		
		α_1	$\alpha_{1,c}$	$\alpha_{1,t}$	α_2	$\alpha_{2,c}$	$\alpha_{2,t}$
DIN 1052	parallel zur Faserrichtung				5·d	2,5·d	4·d
	rechtwinklig zur Faserrichtung	$(3+2 \cdot \cos \alpha) \cdot d$	$7 \cdot d \cdot \sin \alpha$	7·d	3·d	3·d	3·d
ÖNORM B 4100	parallel zur Faserrichtung				3·d	2·d	4·d
	rechtwinklig zur Faserrichtung				3·d	2·d	4·d

Tab. 3.4 Vergleich der Regelungen zu Mindestabständen von rechtwinklig zur Schafrichtung beanspruchten Stäben aus DIN 1052:2008-12 und ÖNORM B 4100-2:2004-03

Für in Richtung der Stabachse belastete Stäbe gibt die ÖNORM B 4100-2:2004-03 zwei zu führende Nachweise an. Ersterer behandelt die eingeleimten Gewindestangen wie Nägel und verweist auf den Nachweis auf Herausziehen. Der Zweite legt die maximal zulässige übertragbare Kraft der Klebefuge fest. In DIN 1052:2008-12 ist der selbe Nachweis für die übertragbare Kraft angegeben, bezeichnet diesen jedoch als Bemessung des Ausziehwiderstandes. Um die zulässigen Schubspannungswerte für die Klebefuge aus ÖNORM B 4100-2:2004-03 mit jenen aus DIN 1052:2008-12 und prEN 1995-2:2003-05 vergleichen zu können, ist eine Anpassung auf charakteristische Werte notwendig. Dies erfolgt mittels eines Umrechnungsbeiwertes (2,1) aus DIN V 20000 – 3.

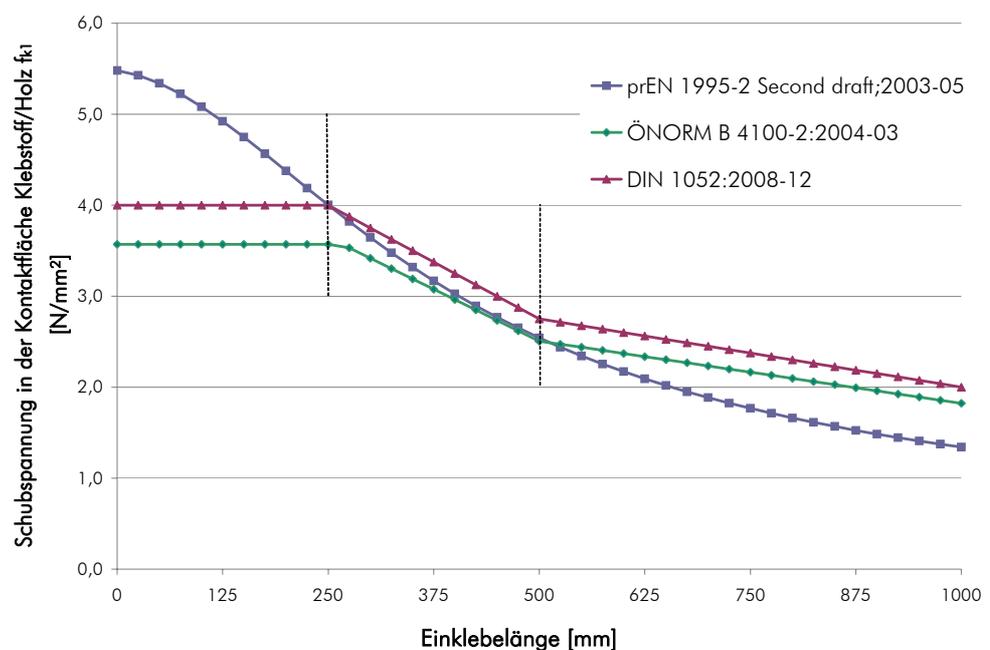


Abb. 3.8 Zusammenhang zwischen der Einklebelänge und der Klebefugenfestigkeit in den unterschiedlichen Normen

Für Berechnungen von Verbindungen mit eingeklebten Gewindestangen wird in der ÖNORM B 4100-2:2004-03 der Nenndurchmesser der Gewindestange mit dem Faktor 1,15 multipliziert. prEN 1995-2:2003-05 gibt ebenso das selbe Nachweisverfahren an, fixiert dabei jedoch den Wert der Schubspannung zwischen Klebstoff und Holz auf $5,5 \text{ N/mm}^2$. Dafür führt diese Norm jedoch den Ausdruck ω ein, welcher vom äquivalenten Stabdurchmesser und der Einklebelänge abhängt. Weiters gibt die ÖNORM B 4100-2:2004-03 nur Funktionswerte für die Klebefugenfestigkeit bis 1000 mm an, daher können darüber hinaus keine Werte ermittelt werden.

In Abb. 3.8 und Abb. 3.9 sind die drei in ÖNORM B 4100-2:2004-03 und DIN 1052:2008-12 angegebenen Bereiche, für die Funktionswerte, gut erkennbar. Die unterschiedlichen Verläufe der Funktionen für ÖNORM B 4100-2:2004-03 und DIN 1052:2008-12 sind auf den Umrechnungsbeiwertes (2,1) zurückzuführen, da die angegebenen Funktionen in den beiden Normen betragsmäßig übereinstimmen. Die in ÖNORM B 4100-2:2004-03 angegebenen zulässigen Schubspannungswerte basieren auf dem deterministischen Sicherheitskonzept, wobei hingegen die charakteristischen Schubspannungswerte aus DIN 1052:2008-12 auf dem semiprobabilistischen Konzept beruhen. Die Schubspannungswerte aus prEN 1995-2:2003-05 basieren ebenfalls auf dem semiprobabilistischen Sicherheitskonzept.

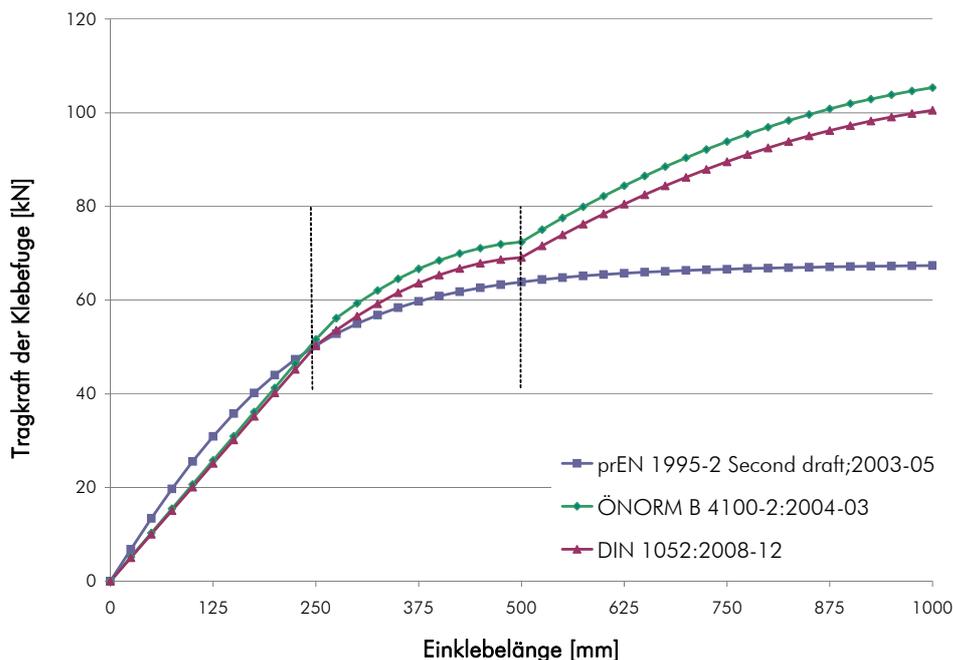


Abb. 3.9 Zusammenhang zwischen der Einklebelänge und der Tragfähigkeit der Klebefuge in den unterschiedlichen Normen (gewählter Nenndurchmesser: $d = 16 \text{ mm}$)

In der SIA 265:2003 wird auf die Angabe von Gleichungen für die Nachweisführung verzichtet. Hingegen werden vier mögliche Versagensformen angeführt und welche Parameter bei einer versuchstechnischen Durchführung, an repräsentativen Verbindungen, zu beachten sind. Weiters wird erwähnt, dass zwischen Druck- und Zugbelastung kein Unterschied besteht und dass die Berücksichtigung der Haftung zwischen Stahl und Klebstoff unzulässig ist.

Angaben über Mindestabstände (Tab. 3.5) von in Richtung der Stabachse beanspruchten eingeklebten Stahlstäben findet man außer in SIA 265:2003 in allen Normen. Diese sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst.

		a ₁			a ₂		
		a ₁	a _{1,c}	a _{1,t}	a ₂	a _{2,c}	a _{2,t}
DIN 1052	parallel zur Faserrichtung				5·d	2,5·d	
	rechtwinklig zur Faserrichtung	4·d	2,5·d		4·d	2,5·d	
prEN 1995-2	parallel zur Faserrichtung				5·d	2,5·d	
	rechtwinklig zur Faserrichtung	5·d	4·d		5·d	2,5·d	
ÖNORM B 4100	parallel zur Faserrichtung				3·d	2·d	
	rechtwinklig zur Faserrichtung	3·d	4·d		3·d	2·d	

Tab. 3.5 Vergleich der Mindestabstände der einzelnen Normen von in Schafrichtung beanspruchten Stäben

Eine Besonderheit der prEN 1995-2:2003-05 ist, dass diese Norm gesonderte Nachweise für den Gebraustauglichkeits- und Tragfähigkeitsnachweis anführt. Dies gilt für beide Belastungsrichtungen des Stabs. Der Nachweis der kombinierten Beanspruchung erfolgt in allen vier Normen auf die selbe Weise. Die Bezeichnungen und Indizes werden dabei in den jeweiligen Normen unterschiedlich gebraucht.

Abschließend kann festgehalten werden, dass eingeleimte Gewindestangen durch den betriebenen jahrelangen Forschungsaufwand bereits Eingang in die Normung im deutschsprachigen Raum gefunden haben. Für die restlichen eingeklebten Verbindungsmittel liegt keine Normung vor. Durch eine Steigerung der Nachfrage an diesen Verbindungsmitteltypen (eingeklebte Rohrverbinder und Lochbleche) seitens der Unternehmen ist jedoch deren Berücksichtigung in den nächsten Jahren zu erwarten. Bevorzugte Einsatzgebiete könnten die lokale Verstärkung und das Einbringen von großen Lasten in Holzkonstruktion darstellen.

Im aktuell gültigen EUROCODE 5 (ÖNORM EN 1995-1-1:2009 und ÖNORM EN 1995-1-2:2009) werden keine Angaben zu eingeklebten Gewindestangen gemacht. Dies hat den Grund, da sich beim EUROCODE-Meeting (TU Delft 2003) die anwesenden Delegierten darauf einigten, dass der damalige Wissensstand und die Forschungsergebnisse nicht ausreichend für die Aufnahme in die europäische Konstruktionsnorm waren.

2 Die Normung von Klebstoffen für tragende Holzbauteile

[56]; [57]; [58]; [59]; [60]; [61]; [62]

In diesem Abschnitt werden die grundsätzlichen Leistungsanforderungen und Prüfverfahren für Klebstoffe nach den europäischen Normen EN 301:2006-08 und EN 302:2004-10 für tragende Holzbauteile betrachtet.

2.1 Allgemeines

EN 301:2006-08 stellt an Klebstoffe, welche in Bauwerken für tragende Zwecke eingesetzt werden, die Anforderung, dass sie so feste und dauerhafte Verbindungen herstellen, dass:

„...die Unversehrtheit der Klebung in der entsprechenden Nutzungsklasse während der erwarteten Lebensdauer des Bauwerks erhalten bleibt.“ [56]

Eine Klassifizierung zweier Klebstofftypen (I und II - nicht näher beschrieben) erfolgt entsprechend ihrer Eignung zum Einsatz in den gegebenen Klimabedingungen wie in Tab. 3.6 dargestellt.

Klebstofftyp	Temperatur	Klima entsprechend	Beispiele	Nutzungsklassen entsprechend der EN 1995-1-1
I	> 50 °C	nicht festgelegt	längerer Einfluss von hohen Temperaturen	1, 2, 3
I	≤ 50 °C	> 85% relative Luftfeuchte bei 20 °C	uneingeschränkte Bewitterung	1, 2, 3
II	≤ 50 °C	≤ 85% relative Luftfeuchte bei 20 °C	beheizte und durchlüftete Gebäude, Schutz gegen Außenbewitterung, kurzzeitige Bewitterung	1, 2

Anmerkung: 85% relative Luftfeuchte und 20 °C ergeben eine Holzfeuchte von ca. 20% in den Nadelhölzern und den meisten Laubhölzern, und eine etwas geringere Feuchte in Holzwerkstoffen

Tab. 3.6 Klebstofftypen für den Einsatz unter verschiedenen Klimabedingungen nach EN 302:2004-10

2.2 Prüfung und Prüfverfahren

Klebstoffe, welche der EN 301:2006-08 entsprechen, müssen gemäß folgenden Prüfverfahren geprüft werden und den Leistungsanforderungen entsprechen:

- Zugscherprüfung
- Delaminierungsprüfung
- Prüfung auf Faserschädigung
- Prüfung nach Schwindbeanspruchung

Bei den oben angeführten Prüfverfahren wird der Klebstoff und Härter unmittelbar vor dem Auftragen gemischt. Das Auftragen sollte nach den Angaben des Herstellers erfolgen. Erfolgt der Auftrag vom Klebstoff und Härter getrennt, so muss jeweils eine Delaminierungsprüfung (EN 302-2) und Faserschädigungsprüfung (EN 302-3) durchgeführt werden.

Weitere Prüfverfahren, zur Ermittlung der Gebrauchseigenschaften des Klebstoffes, können gefordert sein:

- physikalische Eigenschaften des für den Einsatz vorbereiteten Klebstoffes
 - dynamische Viskosität des gebrauchsfertigen Klebstoffes, nach EN 12092
 - pH-Wert der Klebstoffmischung und/oder des Klebstoffes, nach EN 1245
- Einsatz des Klebstoffes
 - Klebstoffauftrag mit der Angabe über die Art des Auftragens (ein- oder zweiseitig) der Komponenten (einzeln oder gemeinsam)
 - durchschnittliche Antrockenzeit in Minuten nach ENV 302-5
 - Gebrauchsdauer (Topfzeit) in Stunden des gebrauchsfertigen Klebstoffes nach EN 302-7
 - Mindestpresszeit in Stunden nach EN 302-6
 - Mindest- und empfohlene Temperatur für den Klebstoffauftrag und die Klebstoffaushärtung
 - Mindestpressdruck .

2. 2. 1 Längszugscherprüfung nach EN 302-1:2004-10

Die Zugscherprüfung findet an verklebten Prüfkörpern aus Buche (*Fagus sylvatica* L) statt. Dabei wird eine einzelne Überlappung, bestehend aus zwei rechteckigen Holzverbindern, mit dünnen und dicken Klebefugen durch eine Längszugkraft bis zum Bruch belastet.

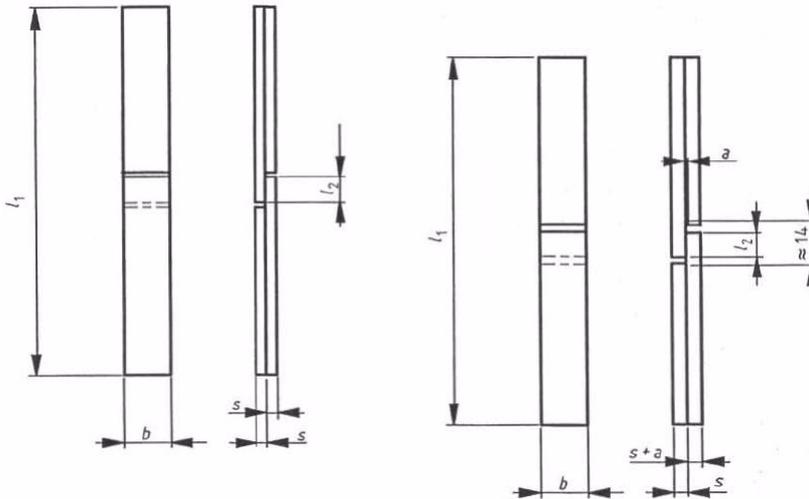


Abb. 3.10 Prüfkörper für Längszugscherprüfung nach EN 302-1:2004-10 [57]

- l_1 (150 ± 5) mm: Gesamtlänge des Prüfkörpers
- b (20,0 ± 0,1) mm: Breite des Prüfkörpers
- l_2 (10,0 ± 0,1) mm: Länge der Überlappung
- s (5,0 ± 0,1) mm: Dicke der Platte
- α 30° bis 90°: Winkel zwischen den Jahrringen und den zu verklebenden Flächen
- a (1,0 ± 0,1) mm: Dicke der dicken Klebstofffuge

Die EN 302-1 legt Mindestwerte (siehe Tab. 3.7), der mittleren Zugscherfestigkeit für dünne (etwa 0,1 mm) und dicke (1,0 ± 0,1 mm) Klebefugen fest.

Nummer der Behandlung	Mindestwerte der mittleren Scherfestigkeit in N/mm ²			
	Fuge 0,1 mm		Fuge 1,0 mm	
	Typ I	Typ II	Typ I	Typ II
A1	10,0	10,0	8,0	8,0
A2	6,0	6,0	4,0	4,0
A3	8,0	8,0	6,4	6,4
A4	6,0	nicht erforderlich	4,0	nicht erforderlich
A5	8,0	nicht erforderlich	6,4	nicht erforderlich

Tab. 3.7 Mindestwerte der mittleren Zugscherfestigkeit für dünne und dicke Klebstofffugen an Prüfkörpern aus Buche in N/mm² nach EN 302-1:2004-10

Unter Punkt 5 und 6 in EN 302-1:2004-10 befinden sich ausführliche Angaben über die erforderliche Prüfeinrichtung und das Prüfverfahren. Die Prüfmaschine muss entweder einen konstanten Belastungsanstieg ($2,0 \pm 0,5$ kN/min) aufrechterhalten können, oder es muss die Möglichkeit für eine konstante Vorschubgeschwindigkeit nach ISO 5893 gegeben sein. Das Prüfverfahren richtet sich nach der in Tab. 3.8 angegebenen Art und Dauer der Behandlung der Prüfkörper.

Bezeichnung	Behandlung
A1	Prüfung direkt nach der 7-Tage-Lagerung im Normalklima [20/65] ^a
A2	4 Tage untergetaucht in Wasser bei (20 ± 5) °C Prüfkörper werden in feuchtem Zustand geprüft
A3	4 Tage untergetaucht in Wasser bei (20 ± 5) °C Konditionierung im Normalklima [20/65] ^a bis zur Ausgangsmasse ^b Prüfkörper werden im trockenem Zustand geprüft
A4	6 h in kochendem Wasser 2 h untergetaucht in Wasser bei (20 ± 5) °C Prüfkörper werden im feuchtem Zustand geprüft
A5	6 h in kochendem Wasser 2 h untergetaucht in Wasser bei (20 ± 5) °C Konditionierung im Normalklima [20/65] ^a bis zur Ausgangsmasse ^b Prüfkörper werden im feuchtem Zustand geprüft
^a Das Normalklima [20/65] ist definiert als Temperatur von (20 ± 2) °C und relative Luftfeuchte von (65 ± 5) % ^b Die Grenzabweichung zur Ausgangsmasse beträgt +2% und -1%	

Tab. 3.8 Art und Dauer der Behandlungsschritte vor einer Zugscherprüfung nach EN 302-1:2004-10

Die Scherfestigkeit der Prüfkörper wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$\text{Scherfestigkeit} = \frac{\text{Bruchkraft}}{200} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (3.17)$$

Die mittlere Scherfestigkeit aus 10 gültigen Prüfungen stellt das Ergebnis der Prüfung dar. Als ungültig werden Prüfungen angesehen, bei denen der Bruch im Holz bei einem Wert unter eines festgelegten Minimums anstatt in der Klebeschicht erfolgt. Weiters gelten Prüfungen, bei welchen die Sichtprüfung ergibt, dass der Klebstoff nicht korrekt aufgetragen war, ebenfalls als ungültig.

2. 2. 2 Delaminierungsprüfung nach EN 302-2:2004-10

Die Delaminierungsprüfung wird an verklebten Prüfkörpern aus Fichte (*Picea abies* L) durchgeführt. Die laminierten Prüfkörper werden vor der Prüfung einem Bewässerungs/Trocknungs-Zyklus unterzogen. Die Bewässerungsvorgänge erfolgen abwechselnd bei hohem und niedrigem (Vakuum-) Druck. Die anschließende Trocknung erfolgt mittels eines Luftstroms mit hoher Geschwindigkeit. Abschließend wird das Ausmaß der Delaminierung der Klebstofffuge bestimmt und in Beziehung zu der Gesamtlänge der Klebefugen an den Hirnholzflächen gesetzt.

Eine Definition für den Begriff Delaminierung lautet:

„Delaminierung ist die Trennung von Einzelschichten in Lagenhölzern (z.B. Brettschichtholz, Brettsperrholz), verursacht durch Versagen (Aufgehen, "Delaminieren") der Klebefuge.“ [49]

Muss eine besondere Eignung der Klebstoffe für Laubhölzer, oder speziell behandeltes Holz, nachgewiesen werden, so muss der verklebte Prüfkörper aus der jeweiligen Holzart hergestellt werden. Die Anforderung an die Beständigkeit gegen Delaminierung, nach den entsprechenden Behandlungen werden in Tab. 3.9 dargestellt.

Behandlungszyklus	Klebstofftyp	Maximale Delamination bei jeder Probe in %
hohe Temperatur	I	5,0
niedrige Temperatur	II	10,0

Tab. 3.9 Anforderung an die Beständigkeit gegen Delaminierung in % nach EN 302-2:2004-10

Um das in EN 302-2:2004-10 unter Punkt 6 definierte Prüfverfahren durchführen zu können, sind folgende Prüfeinrichtungen von Nöten. Ein Druckkessel, der einen Absolutdruck von mindestens 635 kPa standhält, eine Vakuumpumpe zur Reduzierung des Absolutdruckes im Kessel, ein Umluftofen oder eine -kammer um definierte Temperaturen einzuhalten, eine Waage und Werkzeug um die Klebefuge nach der Prüfung auftrennen zu können.

Nach einer definierten Verklebung und einer sieben tägigen Lagerung im Normklima sind die Prüfkörper in den Druckkessel einzubringen und gegen Aufschwimmen zu sichern. Weiters ist sicherzustellen, dass die Hirnholzflächen ungehindert dem Wasser ausgesetzt sind. Anschließend erfolgt ein Verfahren mit hoher (Klebstofftyp I) oder niedriger (Klebstofftyp II) Temperatur. Die beiden Verfahren unterscheiden sich lediglich in der Trocknungszeit, -temperatur und der relativen Luftfeuchte. Die Luftgeschwindigkeit, mit welcher die Prüfkörper umströmt werden ist bei beiden Verfahren die selbe. Ebenso unterscheiden sich die Prüfverfahren, für die Bewässerungsphase im Kessel, nicht.

Die Berechnung der Delaminierung erfolgt für jeden Prüfkörper getrennt und das Ergebnis muss auf 0,1% Prozent genau angegeben werden. Folgende Gleichung wird dazu verwendet

$$D = \frac{l_1}{l_2} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.18)$$

D Delaminierung, in [%]
 l₁ Gesamtlänge der Delaminierung an beiden Hirnholzflächen in mm
 l₂ Gesamtlänge der Klebstoffugen an beiden Hirnholzflächen in mm

2. 2. 3 Prüfung der Querkzugfestigkeit mit Einfluss von Säureschädigung der Holzfasern nach EN 302-3:2006-01

Die Prüfung der Faserschädigung erfolgt mit verklebten Prüfkörpern aus Fichte (*Picea abies* L). Dabei wird die Fugenverbindung zwischen zwei verklebten Hölzern einem definierten Temperatur- und Feuchtezyklus unterworfen und anschließend durch eine Querkzugbeanspruchung bis zum Bruch belastet.

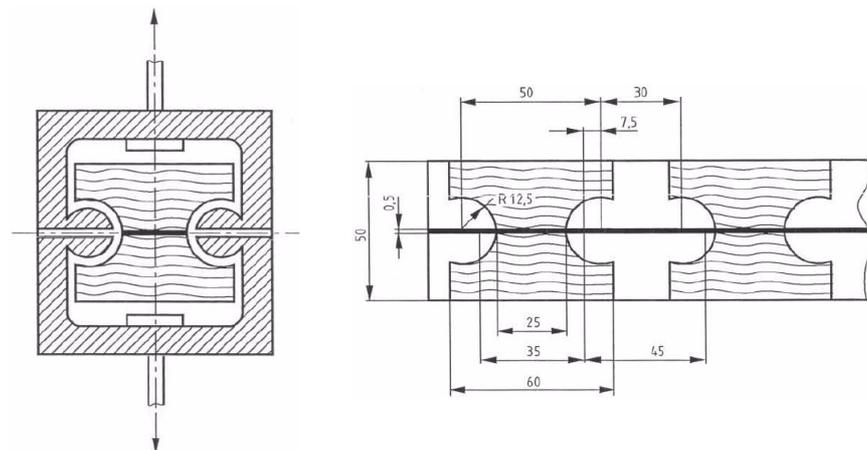


Abb. 3.11 Prüfkörper für Faserschädigungsprüfung nach EN 302-3:2006-01 [59]

Unter Punkt 5 und 6 in der EN 302-3:2006-01 sind Angaben über die notwendige Prüfeinrichtung und das Prüfverfahren angeführt.

Die Prüfmaschine muss entweder einen konstanten Belastungsanstieg (10 ± 1 kN/min) aufrechterhalten können, oder es muss die Möglichkeit für eine konstante Vorschubgeschwindigkeit nach ISO 5893 gegeben sein. Weiters sind spezielle Halterungen (Abb. 3.11), eine Klimakammer und ein luftdichter Glasbehälter notwendig, um die Prüfung durchführen zu können.

Nach einer Lagerung der Holzstücke in einer Klimakammer bis zur Massekonstanz erfolgt die Verklebung, wobei besonders auf die Einhaltung der Klebstoffdicke (0,5 mm) zu achten ist. Anschließend werden die Prüfkörper zwischen sieben und 14 Tagen bei definierten Klimabedingungen gelagert. Danach erfolgt für die Hälfte der Prüfkörper eine Klima- und Wechsellagerung nach den in Tab. 3.10 definierten Bedingungen. Abschließend werden die verklebten Holzstücke in die Prüfmaschine eingebaut und bis zum Bruch belastet.

Teil	Dauer [h]	Temperatur [°C]	relative Luftfeuchte [%]
A	24	50 ± 2	87,5 ± 2,5
B	8	10 ± 2	87,5 ± 2,5
C	16	50 ± 2	≤ 20

Tab. 3.10 Bedingungen für Klima- und Wechsellagerung nach EN 302-3:2006-01

Mit folgender Gleichung wird die Querkzugfestigkeit je Prüfkörper bestimmt

$$f_1 = \frac{F_{\max}}{A} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (3.19)$$

f_1 Querkzugfestigkeit in N/mm²
 F_1 Bruchkraft in N
 A Fläche in mm²

Die mittlere Querkzugfestigkeit wird aus acht gültigen Prüfungen bestimmt und stellt das Ergebnis der Prüfung dar. Als ungültig werden Prüfungen angesehen, bei denen der Bruch im Holz bei einem Wert unter eines festgelegten Minimums anstatt in der Klebeschicht erfolgt. Weiters gelten Prüfungen, bei welchen die Sichtprüfung ergibt, dass der Klebstoff nicht korrekt aufgetragen war, ebenfalls als ungültig.

2. 2. 4 Prüfung des Einflusses von Holzschwindung auf die Scherfestigkeit nach EN 302-4:2004-10

Bei der Prüfung des Einflusses des Holzschwindens auf die Scherfestigkeit kommen verklebte Prüfkörper aus Fichte (*Picea abies* L) zum Einsatz. Die doppelt überlappten Kreuzverbindungen mit einer 0,5 mm dicken Klebstoffuge werden bis zum Bruch mit einer Druck-/Scherkraft belastet. Vor der Belastung erfolgt eine Trockenlagerung ($40 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, $30 \pm 2\%$ relative Luftfeuchte und $0,7 \pm 0,1 \text{ m/s}$ Luftgeschwindigkeit) der Prüfkörper.

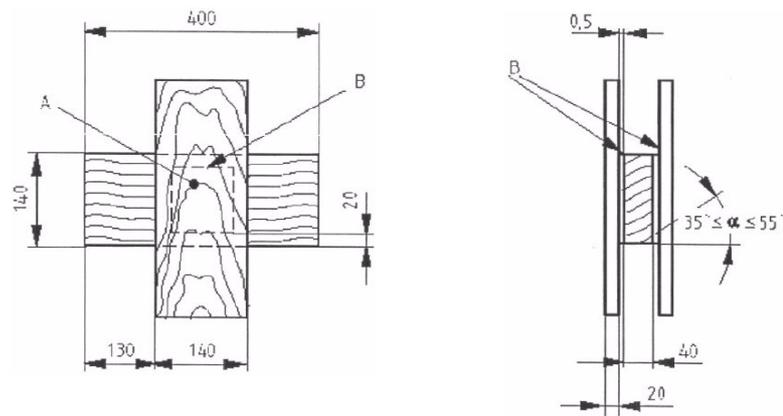


Abb. 3.12 Prüfkörper zur Bestimmung des Einflusses von Holzschwindung auf die Scherfestigkeit nach EN 302-4:2004-10 [60]

- A..... Klebefläche ($100 \pm 0,1$) mm x ($100 \pm 0,1$) mm
 B..... Aluminiumrahmen
 α Winkel des Jahrringverlaufes in Bezug auf die Oberfläche [°]

Die erforderliche Prüfeinrichtung und das Prüfverfahren wird in der EN 302-4:2004-10 unter den Punkten 5 und 6 detailliert beschrieben.

Die Prüfmaschine muss entweder einen konstanten Belastungsanstieg ($20 \pm 5 \text{ kN/min}$) aufrechterhalten können, oder es muss die Möglichkeit für eine konstante Vorschubgeschwindigkeit nach ISO 5893 gegeben sein. Weiters ist eine Klimakammer von Nöten um die Prüfung durchführen zu können.

Bei den unter definierten Bedingungen getrockneten und verklebten Prüfkörper werden die überstehenden Außenlaschen gekürzt und vier zusätzliche Fichtenholzstücke auf die Mittelaschen aufgeklebt, um eine gleichmäßige Belastung sicherzustellen. Nach der oben beschriebenen Trockenlagerung erfolgt noch eine weitere Lagerung der Prüfkörper im Normklima bis zur Prüfung. Abschließend werden die verklebten Holzstücke in die Prüfmaschine eingebaut und über eine passende Prüfplatte (P in Abb. 3.13) bis zum Bruch belastet.

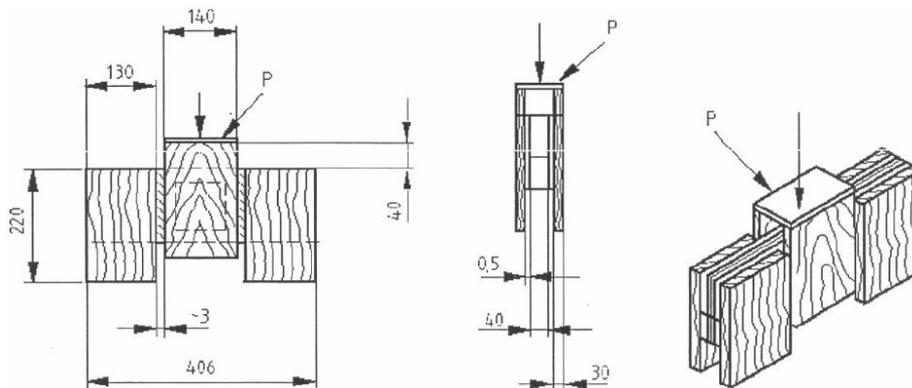


Abb. 3.13 Prüfkörper nach dem Kürzen der Aussenlaschen nach EN 302-4:2004-10 [60]

Die Scherfestigkeiten der Prüfkörper wird wie folgt berechnet:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (3.20)$$

τ Scherfestigkeit in N/mm^2
 F Bruchlast in N
 A Fläche = $20\,000 \text{ mm}^2$

Das Ergebnis der Prüfung wird als, auf $0,1 \text{ N/mm}^2$, gerundeter Mittelwert der Scherfestigkeit von drei Prüfkörper angegeben. Dabei muss die mittlere Scherfestigkeit nach der Schwindbelastung mindestens $1,5 \text{ N/mm}^2$ betragen.

2. 2. 5 Bestimmung der Mindestpresszeit nach EN 302-6:2004-10

In der EN 302-6:2004-10 lautet die Definition des Begriffes Mindestpresszeit: „...kürzeste Presszeit (angegeben als Mittelwert von 10 Einzelergebnissen), die eine Zug-scherfestigkeit von mindestens 4 N/mm^2 bei einer bestimmten Temperatur ergibt.“ [61]

Bei der Bestimmung der Mindestpresszeit werden an überlappten Prüfkörpern aus Buche (*Fagus sylvatica* L) nach unterschiedlichen Abbindezeiten Zugscherprüfungen vorgenommen. Dieser Prüfungsvorgang wird so lange wiederholt, bis die ermittelte Festigkeit einen Wert von 4 N/mm^2 erreicht hat.

Die Anforderungen an Prüfeinrichtung und -verfahren sind den Punkten 6 und 7 der EN 302-6:2004-10 zu entnehmen.

Neben den Prüfeinrichtungen aus EN 302-1:2004-10 ist für die Bestimmung der Mindestpresszeit noch eine Wärmekammer von Nöten. Das Prüfverfahren unterscheidet sich von jenem in EN 302-1:2004-10 nur durch die Pressdauer und Klimabedingungen (Tab. 3.11) vor der Belastung der Prüfkörper.

Gruppe	Temperatur	Pressdauer				
		2 h	4 h	8 h	16 h	24 h
a	15 °C	nicht gefordert	a4	a8	a16	a24
b	20 °C	nicht gefordert	b4	b8	b16	b24
c	30 °C	c2	c4	c8	c16	nicht gefordert

Tab. 3.11 Pressdauer und Klimabedingung nach EN 302-6:2004-10

2. 2. 6 Bestimmung der Gebrauchsdauer nach EN 302-7:2004-10

Die EN 302-7:2004-10 definiert den Begriff Gebrauchsdauer wie folgt: „Dauer, die ein gebrauchsfertiger Klebstoff bei 20°C braucht, bis seine scheinbare Viskosität auf 25 000 mPa·s angestiegen ist.“ [62]

Die Überwachung des Anstiegs der Viskosität eines festgelegten Klebstoffvolumens, bei 20°C, auf 25 000 mPa·s erfolgt mittels eines Brookfield-Viskosimeter. Das Funktionsprinzip, die Beschreibung und Kennwerte dieses Gerätes sind detailliert in EN ISO 2555 angeführt. Der Viskosimeter besteht aus einem Viskosimeterkörper, sieben entnehm- und austauschbaren Spindeln, einer Halterung für das Viskosimeter und einem abnehmbaren Schutzbügel. Weitere erforderliche Prüfeinrichtungen sind ein Becher, ein temperaturgeregeltes Wasserbad und ein Thermometer. Unter Punkt 6 der EN 302-7:2004-10 sind die genauen Anforderungen an die Prüfeinrichtungen angeführt.

Am Beginn des Prüfverfahrens ist der Klebstoff nach den Angaben des Herstellers zu behandeln und mit den Komponenten zu vermischen. Das Viskosimeter muss ebenfalls nach den Angaben des Herstellers eingerichtet werden. Danach muss die vorbereitete Klebstoffmischung von Hand an der Luft und später im Wasserbad gerührt werden. Dabei ist die scheinbare Viskosität in Abständen von 15 Minuten, mittels des Brookfield-Viskosimeter, zu bestimmen.

Die Zeitspanne zwischen t_0 und dem Zeitpunkt, wo die scheinbare Viskosität einen Wert von 25 000 mPa·s erreicht hat, ist aufzuzeichnen. Dieser Zeitabschnitt stellt die Gebrauchsdauer des geprüften Klebstoffs dar.

Die scheinbare Viskosität des geprüften Klebstoffsystems errechnet sich nach folgender Gleichung

$$\eta = k \cdot l \quad [\text{mPa}\cdot\text{s}] \quad (3.21)$$

η Viskosität, in mPa·s

k Koeffizient, der von der verwendeten Kombination aus Drehzahl und Spindel abhängig ist [-]

l der auf der Skala abgelesene Wert [-]

3 Prüfung und Versuchsaufbauten von Klebeverbindungen

[3]; [17]; [26]

Der folgende Abschnitt beschäftigt sich mit den zur Zeit gültigen Klebstoffprüfverfahren – nicht nur den Werkstoff Holz betreffend – und den dabei ermittelbaren Eigenschaften. Bei der folgenden Betrachtung wird das Hauptaugenmerk auf die zerstörenden Prüfverfahren gelegt. Statische und dynamische Langzeitbeanspruchungen, sowie Alterungseinflüsse und deren Prüfmethode finden in diesem Abschnitt keine Berücksichtigung. Für nähere Details wird auf [26] verwiesen.

3.1 Allgemeines

Die Wahl eines Prüfverfahrens zur Ermittlung von Klebstoffkennwerten ist von mehreren Faktoren abhängig. So bestimmen die zu prüfenden Parameter ebenso das Prüfverfahren wie die Möglichkeit einer zerstörenden oder zerstörungsfreien Durchführung. Vor der Wahl des Prüfverfahrens gilt es zu unterscheiden, ob physikalisch definierte Größen (z.B. Glasübergangstemperatur) oder ein komplexes Beanspruchungsverhalten (z.B. Klebefestigkeit der Klebeverbindung) erfasst werden soll.

Die Prüfverfahren mit komplexen Beanspruchungsverhalten, welche auch als „technologische“ Prüfung bekannt sind, haben zum Ziel, bei relativ einfacher Durchführbarkeit die in der Praxis auftretenden Beanspruchungen nachzubilden. Dabei werden meist nicht nur spezifische Stoffeigenschaften ermittelt, sondern ein Eigenschaftsbild. Dies bedeutet, dass in die Prüfung von Klebeschichten nicht nur deren Festigkeitseigenschaften eingehen, sondern auch das Verhalten der Fügeteile und Grenzschicht. Aufgrund der gegenseitigen Abhängigkeiten ist das Einhalten von definierten Prüfverfahren erforderlich. Ein Abweichen von den festgelegten Bedingungen hat zur Folge, dass die Aussagen keine Vergleichsmöglichkeiten zulassen.

Neben den genormten Prüfverfahren in der Klebetechnik, sind ebenfalls anwendungsorientierte Prüfmethode, vorallem zur Qualitätssicherung in Firmen, von Relevanz. Je spezifischer die Wahl des Prüfkörpers und der -methode ist, desto zielsicherer ist die gewonnene Aussage. Dies wird jedoch nicht selten auf Kosten der Vergleichbarkeit mit anderen Ergebnissen „erkauft“.

3. 2 Zerstörende Prüfverfahren

Anhand von zerstörenden Prüfverfahren sind Festigkeitswerte von Klebeverbindungen ermittelbar. Die auf die Klebefläche bezogene Bruchlast stellt dabei das Ergebnis unter den gewählten Randbedingungen dar.

Eine Unterteilung der Prüfverfahren hinsichtlich ihrer Belastungsart erfolgt in statische und dynamische Methoden. Damit gleiche und reproduzierbare Prüfbedingungen geschaffen werden, sind diese Prüfverfahren in Normen festgelegt. Auf die wichtigsten wird nun in weiterer Folge eingegangen.

3. 2. 1 Zugscherbeanspruchung

Die Prüfung von Metallklebeverbindungen auf Zugscherbeanspruchung erfolgt nach ÖNORM EN 1465:2009-06 „Bestimmung der Zugscherfestigkeit hochfester Überlappungsklebungen“. Die Fügeteile werden dabei in Richtung der Klebefläche durch Zugscherkräfte belastet. Eine Ergänzung zu den bereits erwähnten Normen stellt die Norm ISO 17212:2004 „Structural adhesives – Guidelines for the surface preparation of metals and plastics prior to adhesive bonding“ (nur in englischer Fassung erhältlich) dar.

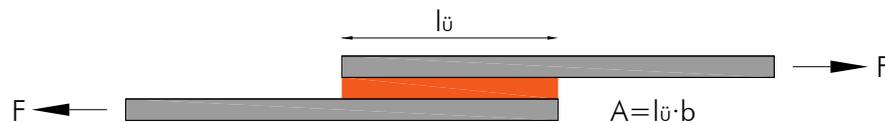


Abb. 3.14 Prüfkörper zur Bestimmung der Zugscherfestigkeit

Als Ergebnis, im Sinne dieser Norm, gilt die Klebefestigkeit τ_B , wobei die höchste im Versuch erzielte Kraft F_{max} auf die Klebefläche A bezogen wird.

$$\tau_B = \frac{F_{max}}{A} \quad [N/mm^2] \quad (3.22)$$

τ_B Klebefestigkeit in N/mm^2
 F_{max} maximale Kraft in N
A Klebefläche in mm^2

Diese zumeist im Zuge der Klebstoffentwicklung durchgeführte Art der Klebstoffprüfung findet ihre Anwendung hauptsächlich in der Beurteilung der Brauchbarkeit und Güte, unter definierten physikalischen und chemischen Beanspruchungseinflüssen.

In der ÖNORM EN 1465:2009-06 wird vorgeschrieben, um eine exzentrische Belastung in der Prüfmaschine zu vermeiden, dass eine Verstärkung der Probe im Bereich der Einspannung mittels Beilagen aus dem selben Material wie die Probe zu erfolgen hat. Wird auf die Beilagen verzichtet, ergeben sich unter den genormten Bedingungen, laut Untersuchungen von Habenicht [26], ca. 2% niedrigere Klebefestigkeitswerte.

3. 2. 2 Schubbeanspruchung

Zur Prüfung von Klebschichten unter reiner Schubbelastung stehen zwei Verfahren zur Auswahl.

Zum einen, durch eine zentrisch angreifende Last mit unendlich steifen Füge­teilen und zum anderen, mittels einer Torsionsbeanspruchung. Beide Prüfverfahren werden mit metallischen Füge­teilen durchgeführt und auf diese wird nun ausführlich eingegangen.

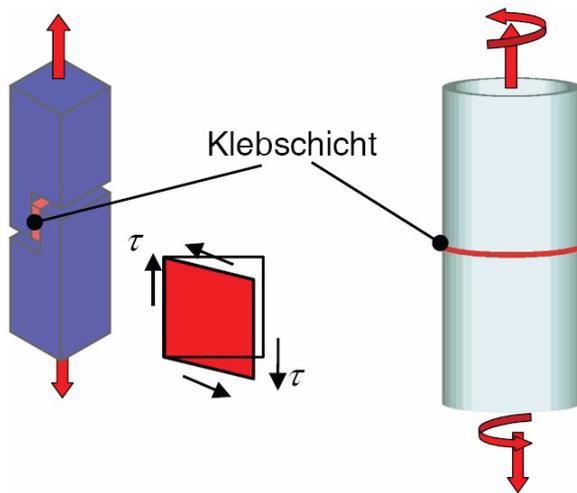


Abb. 3.15 „dicke“ Zugscherprobe und stumpf geklebte Rohrprobe [17]

3. 2. 2. 1 „dicke“ Zugscherprobe

Aufgrund der zentrisch angreifenden Kraft entsteht bei diesem Prüfverfahren keine Biegemomentenbelastung für die Klebschicht. Somit erhält man für die Versuchsdurchführung quasi reine Schubspannungen in der Klebstoffschicht. Durch die Verwendung von dicken Füge­teilen bei gleichzeitig geringer Überlappungslänge wird eine Füge­teil­dehnung ebenso vermieden. Auf diese Weise wird dem Auftreten einer zusätzlichen Schubspannungsspitze in der Klebschicht entgegengewirkt.

Die Anforderungen an diese Prüfmethode und deren Durchführung sind in der Norm ISO 11003-2:2001-12 „Klebstoffe – Bestimmung des Scherverhaltens von Strukturklebstoffen – Teil 2: Scherprüfverfahren für dicke Füge­teile“ festgehalten. Auf Grundlage dieser Norm erfolgt die Ermittlung der Klebschichtkennwerte Schubmodul, Schubfestigkeit, Bruchgleitung, Schubspannungs-Gleitungs-Beziehung und deren alterungsbedingte Einflüsse. Weiters wird dieser Versuch international als Basisversuch angesehen und ist mit dem einachsigen Zugversuch (metallische und nichtmetallische) vergleichbar.

3. 2. 2. 2 Stumpf geklebte Rohrproben

Geklebte Füge­teile mit einer Torsionsbeanspruchung haben keine oder kaum praktische Bedeutung, jedoch ist die prüf­technische Erfassung der Verdrehscherfestigkeit von Interesse. Der Grund hierfür liegt in der sehr homogenen Schubspannungsverteilung in der Klebefuge. Diese gleichmäßige Spannungsverteilung entsteht, indem zwei starre Rohrkörperhälften um ihre Längsachse gegenseitig verdreht werden. Auf diese Weise wird der Einfluss von Biege- und Zugspannung auf die Klebefestigkeit eliminiert. Dies hat weiters zur Folge, dass in den Versuchen, höhere Festigkeitswerte (siehe Abb. 3.16), für den selben Klebstoff, als bei der „dicken“ Zugscherprobe ermittelt werden.

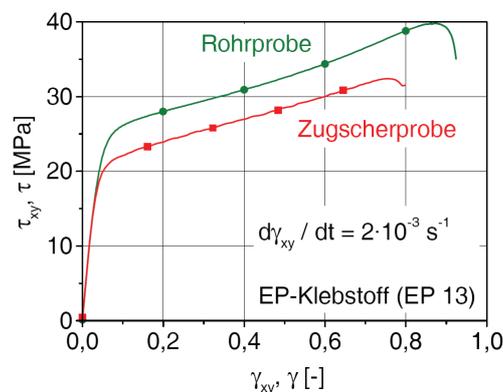


Abb. 3.16 Schubspannungs-Gleitungsverhalten für zähmodifizierten EP-Klebstoff anhand einer Rohr- und Zugscherprobe („dicke“) [17]

Die Definition der Verdrehscherfestigkeit lautet:

$$\tau_v = \frac{M_t}{W_p} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (3.23)$$

mit

$$W_p = \frac{\pi \cdot (D_a^4 - D_i^4)}{16 \cdot D_a} \quad [\text{mm}^3] \quad (3.24)$$

- τ_v Verdrehscherfestigkeit in N/mm²
- W_p Widerstand der Klebung in mm³
- M_t äußere Torsionsmoment in Nmm
- D_a äußere Durchmesser des Rohrs in mm
- D_i innere Durchmesser des Rohrs in mm

Dieses Prüfverfahren ist in ISO 10033-1:2009-09 „Furnierschichtholz (LVL) – Methoden zur Prüfung und Bewertung der Verklebung“ genormt. Aufgrund der aufwendigen Proben­vorbereitung um eine Übereinstimmung der Rotationsachsen der Hohlzylinder und eine definierte Klebstoffschichtdicke sicherzustellen wird jedoch die in ISO 11003-2:2001-12 angeführte Methode bevorzugt. Die anhand der stumpf geklebten Rohrprobe ermittelten Festigkeitswerte sind mit jenen der Torsionsscherfestigkeit τ_T (Abschnitt 3. 2. 5) nicht vergleichbar. Um einer Verwechslung vorzubeugen, werden daher unterschiedliche Indizes verwendet.

3. 2. 3 Zugbeanspruchung

Die Ermittlung der Zugfestigkeit einer Klebeverbindung erfolgt nach ÖNORM EN 15870:2009-07 „Klebstoffe - Bestimmung der Zugfestigkeit von Stumpfklebungen“. Im Gegensatz zur Zugscherprüfung wird die Klebeverbindung bei diesem Prüfverfahren nur durch Normalkräfte (senkrecht zur Klebefläche) beansprucht. Dieser Prüfverfahren liegen relativ gut definierte Spannungsverhältnisse zugrunde. Diese Tatsache ermöglicht eine gute Beurteilung der Kohäsions- und Adhäsionseigenschaften von Klebstoffen.

Ebenfalls wie bei der Torsionsbeanspruchung (Abschnitt 3. 2. 2. 2) ist auf eine Übereinstimmung der Rotationsachsen der Füge Teile zu achten, um keine Verfälschung der Prüfergebnisse zu erzielen.



Abb. 3.17 Probengeometrie zur Bestimmung der Zugfestigkeit

3. 2. 4 Druckscherbeanspruchung

Der in DIN 54 452 festgelegte Druckscherversuch dient der Ermittlung der Scherfestigkeit von Klebstoffen in einer rotationssymmetrischen Klebefuge. Die Belastung erfolgt dabei in axialer Richtung. Die ermittelten Festigkeitswerte des Druckscherversuches zeichnen sich, ähnlich dem Verhalten des Klebstoffes bei der Ermittlung der Verdreh-scherfestigkeit (Abschnitt 3. 2. 2. 2) durch eine homogene Schubspannungsverteilung aus.

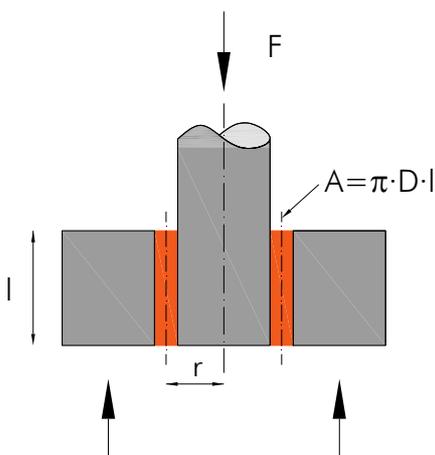


Abb. 3.18 Probengeometrie zur Bestimmung der Druckscherfestigkeit

Die Druckscherfestigkeit τ_D errechnet sich aus der axialen Bruchlast F und der dazugehörigen Scherfläche A im rotationssymmetrischen Fügspalt der Bolzen-Hülse-Klebung.

$$\tau_D = \frac{F_B}{A} = \frac{F_B}{\pi \cdot D \cdot l} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (3.25)$$

τ_D Druckscherfestigkeit in N/mm^2
 F_B Bruchlast in N
 A Scherfläche in mm^2 ; $A = \pi \cdot D \cdot l$
 D Bolzendurchmesser in mm
 l Länge der Hülse in mm

Weiters kann die Ermittlung der Druckscherfestigkeit an zweischnittig überlappten Klebungen mit starren Fügepartnern erfolgen. Diese Art zur Bestimmung der Druckscherfestigkeit wurde bislang jedoch in keiner Norm berücksichtigt.

Die dazugehörige Gleichung lautet

$$\tau_D = \frac{F_B}{2 \cdot l_v \cdot b} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (3.26)$$

τ_D Druckscherfestigkeit in N/mm^2
 F_B Bruchlast in N
 l_v Überlappungslänge in mm
 b Breite der Fügepartner in mm

3. 2. 5 Torsionsbeanspruchung

Die Scherfestigkeit von Klebstoffen in einer rotationssymmetrischen Klebefuge in tangentialer Richtung wird anhand der Prüfmethode aus DIN 54 455 ermittelt. Wie bereits zuvor erwähnt ist die Torsionsscherfestigkeit nicht mit der Verdrehscherfestigkeit aus Abschnitt 3. 2. 2 zu verwechseln.

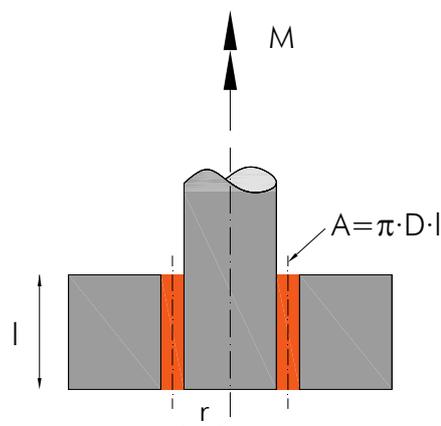


Abb. 3.19 Probengeometrie zur Bestimmung der Torsionsscherfestigkeit

Die Torsionsscherfestigkeit τ_T ermittelt man nach DIN 54 455 aus dem Bruchmoment M_B , dem Fügspaltradius r und der Klebefläche A .

$$\tau_T = \frac{M_B}{r \cdot A} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (3.27)$$

τ_T Torsionsscherfestigkeit in N/mm²
 M_B Bruchmoment in Nmm
 r Radius des Fügspalts in mm
 A Klebefläche in mm²; $A = \pi \cdot D \cdot l$

3. 2. 6 Schälbeanspruchung

Klebeverbindungen sind gegenüber schälenden Kräften sehr empfindlich, weshalb eine Beanspruchung auf diese Weise aus konstruktiven Gesichtspunkten tunlichst vermieden werden sollte. Um das Kohäsions- und Adhäsionsverhalten von Klebstoffen erfassen zu können bieten diese Prüfmethode jedoch Vorteile. Im Gegensatz zu den komplexen Spannungszuständen (Schub- und Normalspannungen) der zuvor erwähnten Belastungsarten, sind Schälspannungen hauptsächlich durch das Auftreten von Normalspannungen charakterisiert.

Für die Bestimmung der Schälfestigkeit gibt es unterschiedliche Prüfverfahren und -normen. Die einzelnen Methoden unterscheiden sich im Wesentlichen nur durch den Schälwinkel. Nachfolgend werden einige Prüfverfahren erwähnt und deren normative Festlegungen angegeben. Auf eine detaillierte Betrachtung wird an dieser Stelle verzichtet und auf [26] verwiesen.

Die wichtigsten Prüfverfahren sind:

- **Winkelschälversuch** nach ÖNORM EN ISO 11339:1996-12 und ÖNORM EN 28510-1:1993-08

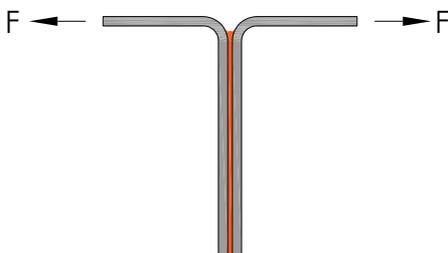


Abb. 3.20 Probenform eines Winkelschälversuchs

- **Rollschälversuch** nach ÖNORM EN 1464:2009-10 und ISO 4578:1997-07

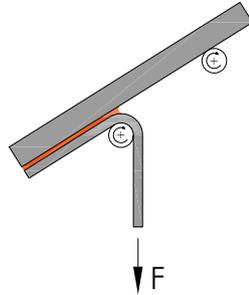


Abb. 3.21 Probenform eines Rollschälversuchs

- **Folienschälversuch** nach ÖNORM EN 28510-2:1993-08

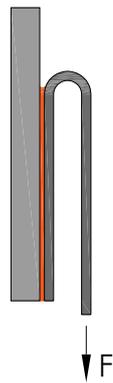


Abb. 3.22 Probenform eines Folienschälversuchs

- **Klettertrommelschälversuch** - keine ÖNORM- und DIN-Normung vorhanden

Die erwähnten Prüfverfahren sind im Gegensatz zum Zugversuch in ihrer Aussage über die Kohäsions- und Adhäsionsfestigkeit der geprüften Klebeverbindungen signifikanter, da die Beanspruchung der Klebefläche nahezu linienartig erfolgt. Weiters sind aufgrund dieser Prüfmethoden Rückschlüsse bezüglich des Verformungsvermögen der Klebstoffschicht möglich. Niedrige Schälspannungswerte sind ein Indikator für sprödes Klebstoffverhalten, im Gegensatz dazu kündigt eine hoher ermittelter Prüfwert ein duktiler Klebeverbindungsverhalten an. Bilden in diesem Fall die Festigkeitswerte keine Grundlage für ein Berechnungsverfahren, so sind die gewonnenen Ergebnisse jedenfalls für vergleichende Betrachtungen wertvoll.

3. 2. 7 Spaltbeanspruchung

Ebenso, wie bei den in Abschnitt 3. 2. 6 erwähnten Schälbeanspruchungen, dienen Versuche mit einer Spaltbeanspruchung der Ermittlung des Kohäsions- und Adhäsionsverhalten von Klebstoffen. Die folgenden Spaltprüfverfahren können als eine Modifikation der Schälversuche angesehen werden. Der wesentliche Unterschied der beiden Prüfmethoden liegt in den dickeren Fügepartnern bei Spaltbeanspruchung. Diese Abweichung hat zur Folge, dass ein Abschälen der Fügeteile aufgrund ihrer Steifigkeit nicht mehr möglich ist und somit eine Spaltbeanspruchung erforderlich wird.

Die wichtigsten Prüfverfahren sind:

- **Biegeschälversuch** nach DIN 54 461

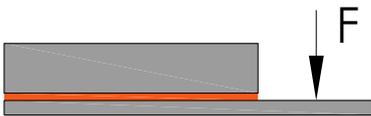


Abb. 3.23 Probenform eines Biegeschälversuchs

- **Keilspaltversuch** nach DIN 65 448, auch bekannt als „Boeing test“

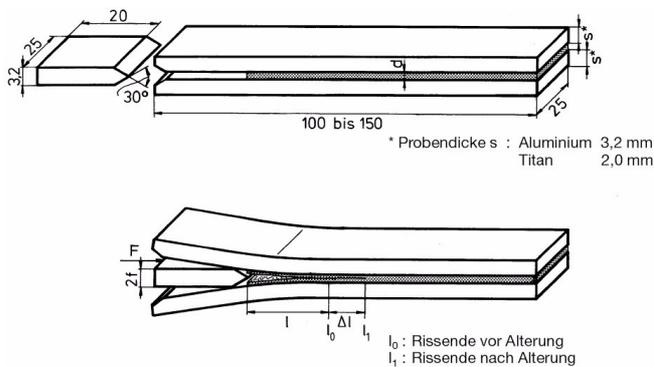


Abb. 3.24 Probenabmessungen für einen Keilspaltversuch [26]

3. 3 Zerstörungsfreie Prüfverfahren

Zerstörungsfreie Prüfverfahren (engl.: *NDT – Non Destructive Testing*) gewinnen neben den in Abschnitt 3. 2 beschriebenen zerstörenden Prüfmethoden immer mehr an Bedeutung. Diese Art der Prüfung erlaubt es, fehlerhafte Stellen in der Klebe- und Grenzschicht frühzeitig zu erkennen und gegebenenfalls auszubessern. Fehler, welche die Festigkeit einer Klebeverbindung negativ beeinflussen können, sind z.B. Lunker, Poren, unzureichende Benetzung der Fügeteiloberfläche und viele weitere.

Der größte Nachteil von zerstörungsfreien Prüfmethoden liegt im Unvermögen, den ermittelten Prüfwerten entsprechende Festigkeitswerte zuzuordnen. Diese Schwäche liegt in der Tatsache begründet, dass die Erfassung von eventuell unterschiedlichen Haftungskräften von den diversen Verfahren nicht möglich ist. Aus diesem Grund kann auf zerstörende Methoden nicht gänzlich verzichtet werden, da in vielen Fällen die verlorene Haftwirkung zwischen Fügeteil und Klebstoffschicht die Schwachstelle der Klebeverbindung verkörpert. Somit kann festgehalten werden, dass ein leistungsfähiges Prüfsystem nur aus einer Kombination von zerstörenden und zerstörungsfreien Verfahren bestehen kann.

3. 3. 1 Verfahren auf Basis mechanischer Vibration

In dieser Gruppe von zerstörungsfreien Prüfverfahren ist vor allem die Ultraschallprüfung zu nennen. Bei diesem Prinzip erfolgt eine Abstrahlung von hochfrequenten Ultraschallimpulsen von einem Sender aus in die zu prüfende Klebstoffuge. Auf der gegenüberliegenden Seite der Klebeverbindung wird ein Empfänger angebracht, welcher die Impulse aufnimmt. Ultraschallwellen breiten sich in fehlerfreien, homogenen Werkstoffen ungehindert und geradlinig aus. Treffen die Wellen jedoch auf eine Fehlstelle in der Klebeschicht, erfolgt mindestens eine teilweise Reflexion und sie gelangen zurück zum Sender. Auf diese Weise sind fehlerhafte Stellen in der Klebstoffschicht zu lokalisieren.

3. 3. 2 Elektrische Verfahren

Eine Kapazitätsmessung stellt die Grundlage dieser Verfahren dar. Die isolierende Klebstoffschicht bildet zusammen mit den metallischen Fügepartnern einen Kondensator. Die Kapazität ändert sich dabei mit der Dicke der Klebefuge und ist umgekehrt proportional zu dieser. Untersuchungen zeigten, dass sich Schwankungen der Klebstoffdicke besonders unterhalb von 0,1 mm außerordentlich stark auf die Kapazität auswirken. Aus diesem Grund sind für dieses zerstörungsfreie Prüfverfahren sehr gleichmäßige Klebeschichtdicken von Nöten. Als Ergebnis dieses Verfahrens wird das Verhältnis der Kapazitäten einer fehlerfreien mit einer fehlerhaften Verklebung ermittelt. Eine Lokalisierung der Fehlstellen ist mit dieser Methode nicht möglich. Für Klebeverbindungen mit industrieller Verwendung wird dieses Verfahren nicht eingesetzt.

3. 3. 3 Thermische Verfahren

Diese Prüfverfahren ermitteln eventuell vorkommende Fehlstellen in der Klebeschicht anhand der Messung der Wärmeleitfähigkeit. Aufgrund der guten Wärmeleitfähigkeit metallischer Fügeteile und einem damit verbundenen schnellen Temperatenausgleich sind außerordentlich empfindliche Messeinrichtungen erforderlich. Durch das Erwärmen einer Seite der Klebeverbindung mit einer Wärmestrahlungsquelle und bei gleichzeitiger Erfassung der Erwärmung der gegenüberliegenden Seite (z.B. mittels eines Infrarot-Strahlungsintensitäts-Messgerät) können thermographische Bilder erstellt werden. Diese gestatten eine Fehlerbewertung hinsichtlich Lage und Art anhand von Soll-Ist-Vergleiche.

3. 3. 4 Strahlungsverfahren

Da dünne Klebeschichten in Klebeverbindungen Röntgenstrahlen gegenüber durchlässig sind, ist dieses Prüfverfahren für die Erfassung von Fehlstellen unbrauchbar.

Die Neutronenradiographie stellt das wohl modernste zerstörungsfreie Verfahren zur Materialprüfung dar. Diese Methode beruht auf dem Durchdringungsvermögen von Neutronen durch Werkstoffe. Anhand der spezifischen Wechselwirkungen mit der Materie entstehen Transmissionsbilder, welche Aufschlüsse über die innere Struktur von Prüfobjekten (Klebstoffschichten) liefern. Das gesamte Prüfsystem besteht aus einer Neutronenquelle und einem Detektor hinter der durchstrahlten Probe. Mittels des Detektors ist eine flächenhafte Darstellung der Probe mit den enthaltenen Fehlstellen möglich. Anhand der empfangenen Intensität der Strahlung sind Rückschlüsse auf die Art, Größe und Lage der Fehlstellen möglich. Nachteil dieses zerstörungsfreien Prüfverfahrens ist der hohe technische und wirtschaftliche Aufwand.

Theorie der mechanischen Verklebung

In diesem Kapitel wird auf theoretische Rechenmodelle zur Berechnung von Laschenverbindungen und rotationssymmetrischen Klebeverbindungen eingegangen. Ausgehend von der sog. „Volkersen-Theorie“ werden weitere Ansätze von einfachen Überlegungen bis zu komplexen Modellen dargestellt und einer vergleichenden Betrachtung unterzogen.

Die angeführten Theorien bilden die Grundlage für die zur Zeit gebräuchlichen Berechnungsmethoden von Klebeverbindungen und gelten nicht nur für den Bereich des Holzbaus. Aus diesem Grund ist deren Kenntnis für theoretische (z.B. in Form von Parameterstudien), aber auch praktische Belange von Interesse.

1 Allgemeines

[27]; [30]

Die einfachste Form der Spannungsberechnung einer überlappenden Klebeverbindung bei reiner Schubbeanspruchung lässt sich in der folgenden Form anschreiben.

$$\tau_m = \frac{F}{l_v \cdot b} \leq \tau_{zul} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.1)$$

- F Kraft in Fügeiteillängsrichtung in N
- l_v Überlappungslänge in mm
- b Fügeiteilbreite in mm
- τ_m mittlere Schubspannung in N/mm²
- τ_{zul} zulässige Zug-Scherbruchfestigkeit in N/mm²

Die Forderung in diesem Nachweis ist, dass die mittlere Schubspannung in der Klebeschicht nicht größer als die Zug-Scherbruchfestigkeit sein darf. Aus theoretischen Festigkeitsanalysen ist jedoch nachweisbar, dass dieser Ansatz falsche Ergebnisse liefert. Grund dafür sind die teils stark ausgeprägten Spannungsspitzen des Schubspannungsverlaufs im Bereich der Überlappungsenden. Begründet kann deren Auftreten durch die

hohen relativen Dehnungsunterschiede (Abb. 4.1) in diesem Bereich werden. Da dies in Glg. (4.1) keine Berücksichtigung findet, ist dieser Bemessungsansatz vielfach nicht ausreichend und zu erweitern, damit die, für die Bemessung maßgebenden Spannungsspitzen mit in die Bemessung der Laschenverbindung eingehen.

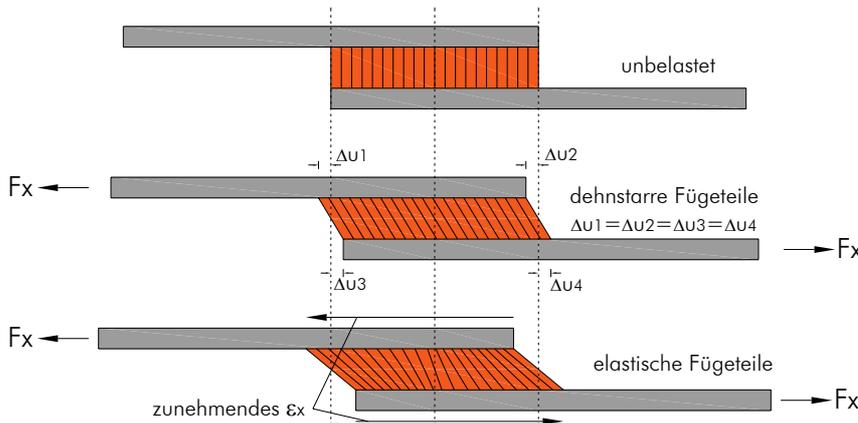


Abb. 4.1 Entstehung eines ungleichförmigen Schubspannungsverlaufs

Abb. 4.1 stellt drei einschnittige Überlappungsklebungen bei unterschiedlichen Belastungszuständen dar. Für die oberste Darstellung befindet sich die gesamte Klebeverbindung im unbelasteten Zustand.

Das mittlere Bild zeigt den Klebeverbund in einem beanspruchten Zustand, welcher durch die äußere Kraft F_x erzeugt wurde. Aufgrund der Annahme dehnstarrer Fügeteile ergeben sich an allen Überlappungsenden die selben Relativverschiebungen ($\Delta u_1 = \Delta u_2 = \Delta u_3 = \Delta u_4$). Anhand der eingezeichneten Linien in der Klebschicht ist erkennbar, dass sich der Klebstoff über die gesamte Überlappungslänge gleichmäßig verformt. Bei diesem Werkstoffverhalten würden keine Spannungsspitzen entstehen und die Schubdeformation des Klebstoffes wäre über die gesamte Länge konstant und es würde eine konstante Schubspannung in der Klebstoffschicht entstehen. Da dies jedoch nicht der Realität entspricht müssen in weiterer Folge elastische Fügeteile angenommen werden.

Bei der letzten Darstellung befindet sich die einschnittige Klebschicht ebenfalls in einem, durch die Beanspruchung verzerrten Zustand. Im Gegensatz zum mittleren Bild wird nun ein elastisches Verhalten der Fügeteile angenommen. Da die Dehnung der Fügeteile in Längsrichtung, ausgehend vom unbelasteten Ende zunimmt, kommt es zu unterschiedlichen Relativverformungen entlang der Überlappung. Dieses Verhalten verdeutlichen die eingetragenen Linien im Bereich der Klebstoffschicht. Die größten Dehnungsunterschiede treten dabei an den beiden Enden der Überlappungsklebung auf. Während der eine Fügeteil noch keine Dehnung erfährt, ist die Normalspannung im anderen bereits auf den selben Wert, wie im „ungestörten“ Bereich angewachsen und somit ist auch die zugehörige maximale Dehnung erreicht. Der mittlere Bereich in Längsrichtung der Klebstoffschicht erfährt, wie aus Abb. 4.1 zu erkennen ist beinahe keine Relativverschiebungen.

2 Rechenmodelle für den flächenhaften Klebeverbund

[14]; [26]; [27]; [28]; [29]; [30]; [31]; [32]

Der folgende Abschnitt gewährt einen Einblick in die unterschiedlichen Rechenmodelle für flächenhafte Klebeverbindungen. Eingangs wird eine Schäftungs-Klebeverbindung betrachtet und analysiert. Danach erfolgt eine ausführliche Darstellung der „Volkersen-Theorie“ mit unterschiedlichen Verbundspannungsansätzen und ergänzenden Parameterstudien.

2.1 Geschäftete Klebeverbindung

Da die Schäftung als Einzelklebefläche bzw. als Keilzinken bei mehreren Klebeflächen eine große Bedeutung für den Holzbau besitzt wird diese Klebeverbindung anfangs anhand einer mechanischen Betrachtung analysiert.

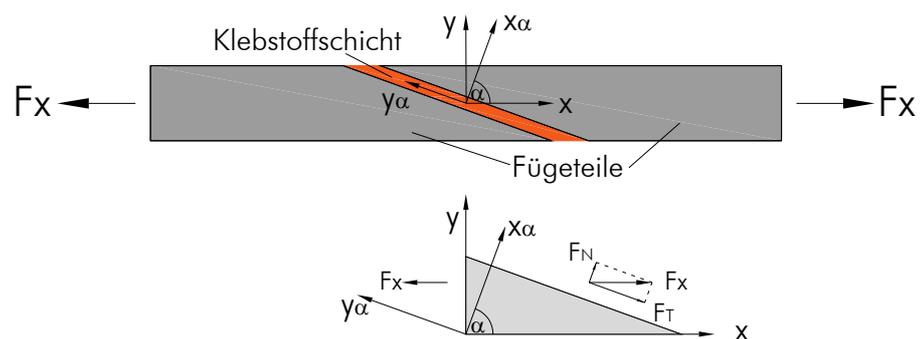


Abb. 4.2 Schäftung und Kräftezerlegung am schrägen Schnitt

Das obere Bild in Abb. 4.2 zeigt die Prinzipskizze einer Schäftung, wobei gut erkennbar ist, dass die Klebeschichtdicke im Gegensatz zu der Fügeteildicke gering ausfällt. Die Richtung des Winkels α ist ebenfalls definiert. Im unteren Teil der Abbildung wird die Kräftezerlegung am schrägen Schnitt durch die Klebstoffschicht dargestellt. Diese Zerlegung wird in weiterer Folge für die Umrechnung der Kraft F_x in Schub- (F_T) und Normalspannungen (F_N) benötigt.

2. 1. 1 Berechnungsablauf

Die Gültigkeit der folgenden mechanischen Beziehungen ist nur für Schäftungen mit Fügepartnern aus dem selben Material gegeben. Besitzen die Fügeteile unterschiedliche Dehnsteifigkeiten ist das Problem statisch unbestimmt und eine Analyse sollte mittels FE-Methode erfolgen.

Unter dem Schäftungswinkel α wird ein Schnitt durch die Klebstoffschicht geführt. Alle weiteren Überlegungen und Betrachtungen zur Schäftung werden auf diesen Schnitt bezogen. Die Schnittflächenorientierung ist durch die Normale x_α gegeben (Abb. 4.2).

- Kraftzerlegung

Die an den Fügeteilen in Längsrichtung angreifende Kraft F_x wird in einem ersten Schritt in eine Normalkraftkomponente F_N senkrecht zur Schnittfläche und eine Schubkraft F_T tangential zur Schnittfläche aufgeteilt.

$$F_N = F_x \cdot \cos \alpha \qquad F_T = F_x \cdot \sin \alpha \qquad (4.2)$$

- Schnittfläche

Die Bestimmung der Schnittfläche A_α ist notwendig um in weiterer Folge auf Spannungen übergehen zu können.

$$A_\alpha = \frac{b \cdot t}{\cos \alpha} = \frac{A}{\cos \alpha} \qquad (4.3)$$

- Normalspannung in der Kleberschicht

$$\sigma_\alpha = \frac{F_N}{A_\alpha} = \frac{F_x \cdot \cos \alpha}{A / \cos \alpha} = \sigma_x \cdot \cos^2 \alpha \qquad (4.4)$$

- Schubspannung in der Kleberschicht

$$\tau_\alpha = \frac{F_T}{A_\alpha} = \frac{F_x \cdot \sin \alpha}{A / \cos \alpha} = \sigma_x \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha = \frac{1}{2} \cdot \sigma_x \cdot \sin 2\alpha \qquad (4.5)$$

2. 1. 2 Parameterstudie

Die Abhängigkeit der Normal- und Schubspannung vom Schäftungswinkel wird aus Abb. 4.3 ersichtlich. Die an den Füge­teilen angreifenden Schnittspannungen σ_x werden dabei ab einem ausreichend großen Schäftungswinkel (rund 85°, Tab. 4.1) fast vollständig (es verbleibt lediglich 5% Normalspannungsanteil) in Schubspannungen umgewandelt. Da die Normalspannungen in der Klebstoffschicht vernachlässigbar klein werden kann dieser Spannungszustand vom Klebstoff gut aufgenommen werden.

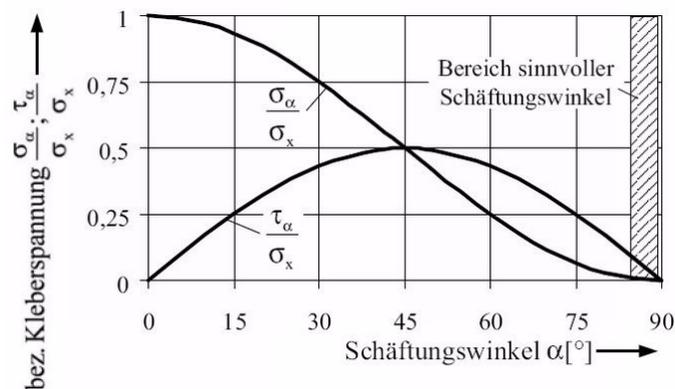


Abb. 4.3 Verlauf der Normal- und Schubspannungen in einer Schäftungsfläche [30]

Eine Spannungsreduktion in der Klebefuge beruht dabei nicht alleine auf der Krafttransformation, sondern ist auch durch die vergrößerte Fläche begründet.

Schäftungsneigung	Schäftungswinkel	σ_α/σ_x	τ_α/σ_x
1:1	45,00	0,50	0,50
1:3	71,57	0,10	0,30
1:5	78,69	0,04	0,19
1:8	82,87	0,02	0,12
1:10	84,29	0,01	0,10
1:15	86,19	~0	0,07
1:20	87,14	~0	0,05

Tab. 4.1 Normal- und Schubspannungen in Abhängigkeit der Schäftungsneigung (gewählt: $\sigma_x = 10$)

Aus Tab. 4.1 ist ersichtlich, dass die optimale Schäftungsneigung im Bereich von 1:10 bis 1:20 liegt, da die auftretenden Schnittspannungen σ_x fast gänzlich über Schubspannungen abgetragen werden. Dies kommt den Eigenschaften des Klebstoffes entgegen. Schäftungsneigungen von 1:20 finden aufgrund des großen Platzbedarfs jedoch eher selten Verwendung. In der Praxis üblich ~ 1:10.

2.2 Differentialgleichung des verschieblichen Verbundes („Volkersen-Theorie“)

Die wichtigste Theorie zur Beschreibung der Beziehung zwischen Spannung und Verschiebung eines verschieblichen Verbundes am differentiellen Element stammt von Volkersen aus dem Jahr 1938 [29].

Dieser Theorie liegt ein mechanisches Modell „Längsgurt-Scheibe“ zugrunde. Volkersen nahm dabei eine Aufteilung der Funktionen zur Lastabtragung wie folgt vor: Die Füge-teile übernehmen die Längssteifigkeit der gesamten Verbindung und übertragen demzufolge die Längskräfte. Die zwischen den Füge-teilen liegende Klebeschicht (Scheibe) trägt Beanspruchungen ausschließlich über Schub- und Querkräfte ab.

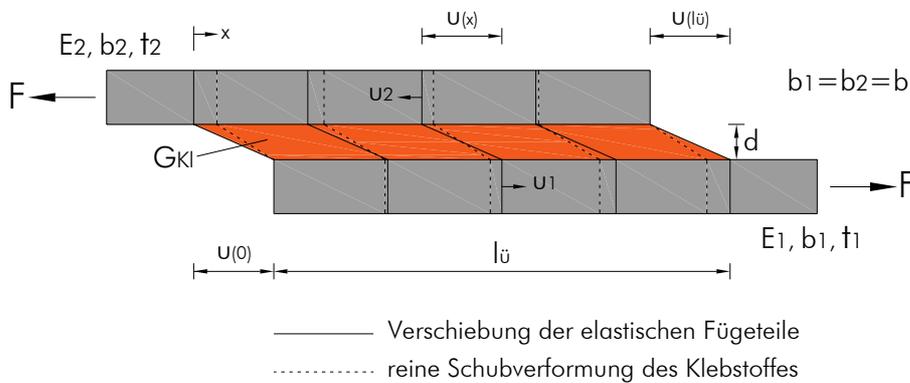


Abb. 4.4 einschnittiges „Längsgurt-Scheiben“-Modell

Weitere Grundannahmen bzw. Randbedingungen dieser Theorie sind:

- ein linear-elastisches Werkstoffverhalten der Füge-teile und Klebstoffschicht,
- die Anteile aus der Biegebeanspruchung vernachlässigbar,
- gleichförmig verteilte Normalspannungen in den Füge-teilen über den gesamten Querschnitt und
- reine Schubbeanspruchung in der Klebstofffuge.

2. 2. 1 Herleitung der Differentialgleichung des verschieblichen Verbundes

In Abb. 4.5 ist der Fügepartner 1 durch die Parameter E_1 und t_1 definiert. Der Fügepartner 2 wird durch E_2 und t_2 charakterisiert. E_i steht für den jeweiligen E-Modul der beiden Fügepartner. Die Variable t_i gibt die zugehörige Dicke der Fügepartner an. Die Breite b und die Überlappungslänge $l_{\bar{v}}$ (hier d_x) der Klebeverbindung sind für beide Fügepartner gültig.

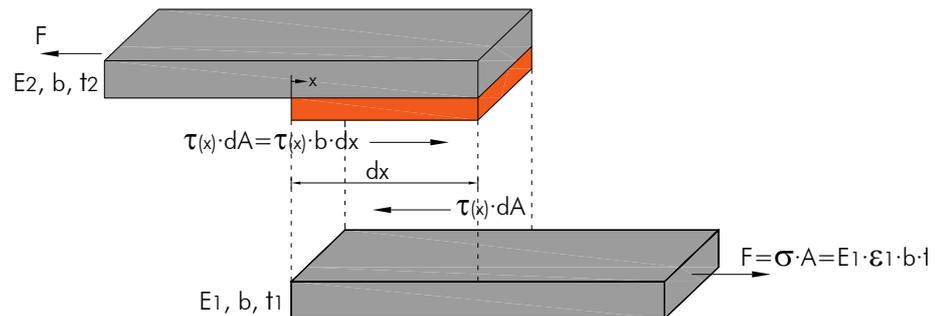


Abb. 4.5 freigeschnittene Elemente einer Klebeverbindung

Anhand der drei Grundbeziehungen der Elastostatik werden nachfolgend die Zusammenhänge für ein differentielles Element aufgestellt:

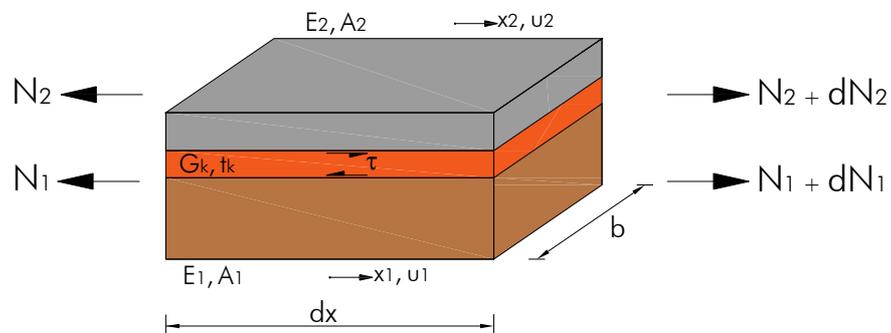


Abb. 4.6 differentielles Element: Fügepartner 1, Fügepartner 2 und Klebstoff

- Kinematische Beziehungen

Die differentielle Verschiebung der Fügepartner (d_{u1} und d_{u2}) wird nach der Länge des differentielles Elements (d_x) abgeleitet. Dadurch erhält man die Dehnung der beiden Fügepartner.

$$\epsilon_1 = \frac{d_{u1}}{d_x} = u'_1 \quad (4.6)$$

$$\epsilon_2 = \frac{d_{u2}}{d_x} = u'_2 \quad (4.7)$$

- Werkstoffgesetze

Die oben ermittelten Dehnungen werden mit dem jeweiligen E-Modul der jeweiligen Fügepartner multipliziert. Somit können die Spannungen (σ_1 und σ_2) in den Fügeteilen ermittelt werden.

$$\sigma_1 = E_1 \cdot u'_1 \quad (4.8)$$

$$\sigma_2 = E_2 \cdot u'_2 \quad (4.9)$$

- Normalkräfte

Unter Verwendung der beiden oben angeschriebenen Gleichungssysteme lassen sich die Normalkräfte (N_1 und N_2) in den Fügepartnern errechnen und es lassen sich die Gleichgewichtsbedingungen für das differentielle Element aufstellen.

$$N_1 = \int_A \sigma_1 \cdot dA_1 = E_1 \cdot A_1 \cdot u'_1 \quad \rightarrow \quad u'_1 = \frac{N_1}{E_1 \cdot A_1} \quad (4.10)$$

$$N_2 = \int_A \sigma_2 \cdot dA_2 = E_2 \cdot A_2 \cdot u'_2 \quad \rightarrow \quad u'_2 = \frac{N_2}{E_2 \cdot A_2} \quad (4.11)$$

Somit ergibt sich für das Gleichgewicht am differentiellen Element.

$$dN_1 + dN_2 = 0 \quad \rightarrow \quad N'_1 + N'_2 = 0 \quad (4.12)$$

$$dN_1 + \tau \cdot b \cdot dx = 0 \quad \rightarrow \quad b \cdot \tau = -N'_1 \quad (4.13)$$

Die Relativverschiebung zwischen den Fügeteilen (Stahl und Holz) in der Klebstoffschicht kann in der nachfolgenden Form angegeben werden.

$$\delta_{\text{rel}} = u_2 - u_1 \quad (4.14)$$

Durch Differenzieren von Glg. (4.14) und Einsetzen von Glg. (4.10) und Glg. (4.11) erhält man

$$\delta'_{\text{rel}} = u'_2 - u'_1 = \frac{N_2}{E_2 \cdot A_2} - \frac{N_1}{E_1 \cdot A_1} \quad (4.15)$$

bzw. unter Verwendung von Glg. (4.13)

$$\delta''_{\text{rel}} = b \cdot \left[\frac{1}{E_2 \cdot A_2} + \frac{1}{E_1 \cdot A_1} \right] \cdot \tau \quad (4.16)$$

Durch Umformen der Glg. (4.16) erhält man unter Berücksichtigung von $\tau = \tau(\delta_{rel})$ die Differentialgleichung des verschieblichen Verbundes:

$$\delta''_{rel} - b \cdot \left[\frac{1}{E_2 \cdot A_2} + \frac{1}{E_1 \cdot A_1} \right] \cdot \tau(\delta_{rel}) = 0 \quad (4.17)$$

Die Lösung dieser Differentialgleichung für einige unterschiedliche Verbundansätze ($\tau(\delta_{rel})$) wird in den nachfolgenden Abschnitten gezeigt. Volkersen berücksichtigte ursprünglich einen linearen Verbundspannungs-Verschiebungsansatz, dessen Ableitung nachfolgend dargestellt wird.

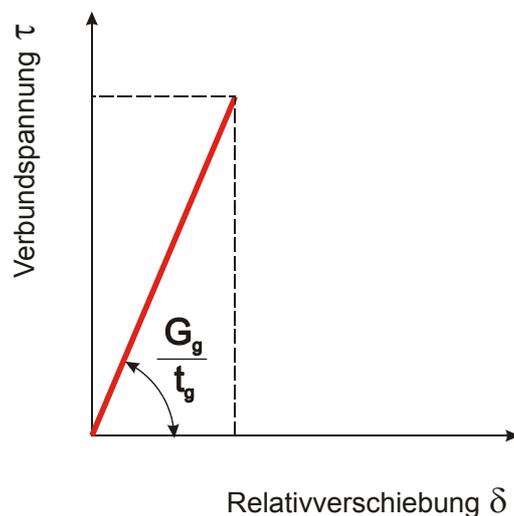


Abb. 4.7 lineare Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehung

Volkersen stellte in seinen Untersuchungen ([28] und [29]) fest, dass bei einschnittigen Überlappingsverbindungen, die nach der Theorie der reinen elastischen Verformung (Abb. 4.7) berechnet wurden, nur bei sehr kleinen Lasten eine ausgeprägte Ungleichförmigkeit der Schubspannungsverteilung vorhanden ist. Die an den Verbundenden entstehenden Spannungsspitzen werden bereits unter üblichen Betriebslasten durch plastische Verformungen beträchtlich abgebaut. Dies setzt sich bis zum Bruch fort.

Unter der Annahme kleiner Schubverzerrungen γ_K in der Klebefuge kann näherungsweise

$$\gamma_K = \tan \frac{\delta_{rel}}{t_K} \approx \frac{\delta_{rel}}{t_K} \quad (4.18)$$

angesetzt werden.

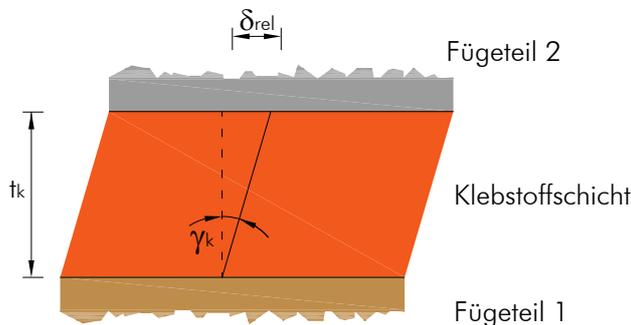


Abb. 4.8 Verschiebung der Fügeteile mit dazugehöriger Schubverzerrung γ_K der Klebstoffschicht

Daraus folgt die lineare Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehung zu

$$\tau_2 = G_K \cdot \gamma_K \approx G_K \cdot \frac{\delta_{rel}}{t_K} \quad (4.19)$$

Durch Einsetzen dieses Ansatzes in Glg. (4.17) erhält man eine homogene Differentialgleichung II. Ordnung der Form

$$\delta''_{rel} - \omega^2 \cdot \delta_{rel} = 0 \quad (4.20)$$

mit dem Parameter ω :

$$\omega^2 = \frac{G_K}{t_K} \cdot b \cdot \left[\frac{1}{E_2 \cdot A_2} + \frac{1}{E_1 \cdot A_1} \right] \quad (4.21)$$

Die allgemeine Lösung dieser Differentialgleichung lautet

$$\delta_{rel} = A \cdot \sinh(\omega \cdot x) + B \cdot \cosh(\omega \cdot x) \quad (4.22)$$

wobei A und B Konstanten zur Berücksichtigung der Randbedingungen sind.

In Abhängigkeit von den jeweils vorliegenden Randbedingungen werden dabei Zug-Druck (engl.: „push-pull“) und Zug-Zug (engl.: „pull-pull“) Konfigurationen unterschieden wie dem weiteren Verlauf dieser Arbeit zu entnehmen ist.

2. 2. 1. 1 Spezielle Lösung mit den Randbedingungen für einen Zug-Druck-Körper

Nachfolgend wird die spezielle Lösung für einen Zug-Druck-Körper hergeleitet und erläutert.

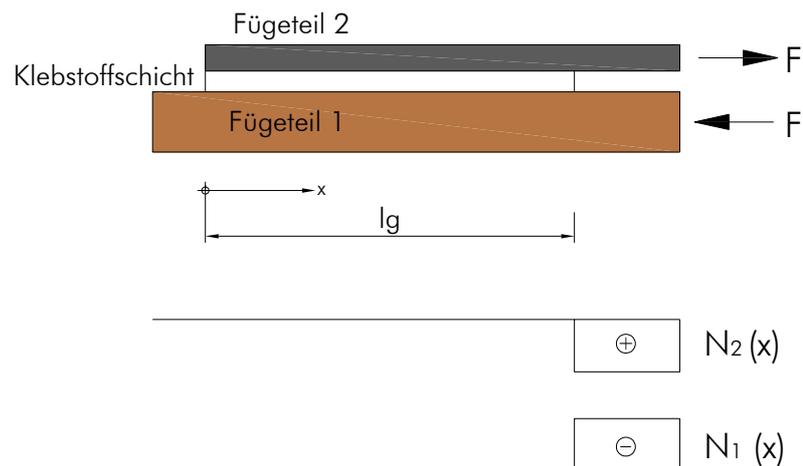


Abb. 4.9 einschnittiger Zug-Druck-Körper

Die Variable x hat ihren Ursprung am unbelasteten Ende des Fügepartners 2 und verläuft von dieser Stelle aus in Richtung der Überlappungsklebung.

Die Randbedingungen für den Zug-Druck-Körper an den Stellen $x=0$ bzw. $x=l_g$ lauten:

$$N_2(x=0) = N_1(x=0) = 0 \quad (4.23)$$

$$N_2(x=l_g) = -N_1(x=l_g) = F \quad (4.24)$$

Mit

$$\delta'_{rel} = A \cdot \omega \cdot \cosh(\omega \cdot x) + B \cdot \omega \cdot \sinh(\omega \cdot x) \text{ bzw.} \quad (4.25)$$

$$\delta'_{rel} = u'_2 - u'_1 = \frac{N_2}{E_2 \cdot A_2} - \frac{N_1}{E_1 \cdot A_1} \quad (4.26)$$

erhält man somit

$$\delta'_{rel}(x=0) = \frac{0}{E_2 \cdot A_2} - \frac{0}{E_1 \cdot A_1} = 0 \quad (4.27)$$

$$\delta'_{rel}(x=0) = 0 = A \cdot \omega \cdot \cosh(\omega \cdot 0) + B \cdot \omega \cdot \sinh(\omega \cdot 0) \quad (4.28)$$

$$\rightarrow A = 0$$

und

$$\delta'_{\text{rel}}(x = l_g) = \frac{F}{E_2 \cdot A_2} - \frac{(-F)}{E_1 \cdot A_1} = F \cdot \left[\frac{1}{E_2 \cdot A_2} + \frac{1}{E_1 \cdot A_1} \right] \quad (4.29)$$

$$\begin{aligned} \delta'_{\text{rel}}(x = l_g) &= F \cdot \left[\frac{1}{E_2 \cdot A_2} + \frac{1}{E_1 \cdot A_1} \right] = & (4.30) \\ &= A \cdot \omega \cdot \cosh(\omega \cdot l_g) + B \cdot \omega \cdot \sinh(\omega \cdot l_g) \end{aligned}$$

$$\rightarrow B = \frac{F}{\omega \cdot \sinh(\omega \cdot l_g)} \cdot \left[\frac{1}{E_2 \cdot A_2} + \frac{1}{E_1 \cdot A_1} \right] \quad (4.31)$$

bzw. nach dem Rückeinsetzen von ω

$$\rightarrow B = \frac{F \cdot t_k \cdot \omega}{G_K \cdot b \cdot \sinh(\omega \cdot l_g)} \quad (4.32)$$

Somit ergibt sich die spezielle Lösung für δ_{rel} , für den Fall des Zug-Druck-Körpers wie folgt

$$\delta_{\text{rel}}(x) = \frac{F \cdot t_k \cdot \omega}{G_K \cdot b} \cdot \frac{\cosh(\omega \cdot x)}{\sinh(\omega \cdot l_g)} \quad (4.33)$$

bzw. in Bezug zur Verschiebung an der Stelle $x = l_g$ in der Darstellung:

$$\delta_{\text{rel}}(x) = \delta_{\text{rel}}(l_g) \cdot \frac{\cosh(\omega \cdot x)}{\cosh(\omega \cdot l_g)} \quad (4.34)$$

Die Schnittkräfte $N_2(x)$ und $N_1(x)$ und deren Verlauf über die Verbundstrecke erhält man mittels Integration von

$$N'_2(x) = \tau(x) \cdot b = \frac{G_K}{t_k} \cdot \delta_{\text{rel}}(x) \cdot b \quad (4.35)$$

mit gleichzeitiger Einführung eines Parameters k zur Berücksichtigung des Steifigkeitsverhältnisses der beteiligten Bauteile

$$k = \frac{E_2 \cdot A_2}{E_1 \cdot A_1} \leq 1 \quad (4.36)$$

zu

$$N_2(x) = -N_1(x) = \delta_{\text{rel}}(l_g) \cdot \frac{\omega \cdot E_2 \cdot A_2}{(1+k)} \cdot \frac{\sinh(\omega \cdot x)}{\cosh(\omega \cdot l_g)} \quad (4.37)$$

Eine Vereinfachung der Glg. (4.37) ist auf Grund der Kenntnis der Kraft an der Stelle $x = l_g$ ($N_2(x=l_g) = F$) in folgender Form möglich

$$N_2(x) = F \cdot \frac{\sinh(\omega \cdot x)}{\sinh(\omega \cdot l_g)} \quad (4.38)$$

Der Verlauf der Verbundspannungen folgt somit aus den Glg. (4.19) und Glg. (4.33) zu

$$\tau(x) = \frac{F \cdot \omega}{b} \cdot \frac{\cosh(\omega \cdot x)}{\sinh(\omega \cdot l_g)} \quad (4.39)$$

2. 2. 1. 2 Spezielle Lösung mit den Randbedingungen für einen Zug-Zug-Körper

In diesem Abschnitt erfolgt eine Herleitung der speziellen Lösung für einen Zug-Zug-Körper mit den dazugehörigen Erläuterungen.

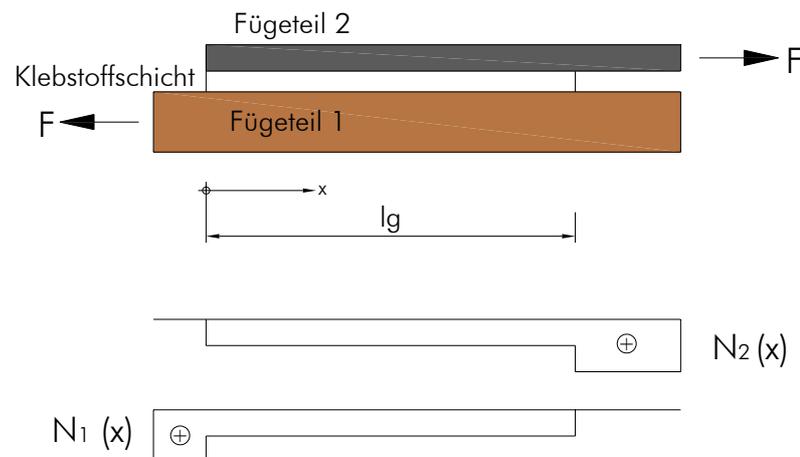


Abb. 4.10 einschnittiger Zug-Zug-Körper

Die Variable x hat den selben Ursprung und Verlauf wie für einen Zug-Druck-Körper.

Die Randbedingungen für den Zug-Zug-Körper an den Stellen $x=0$ bzw. $x=l_g$ lauten

$$N_2(x = 0) = N_1(x = l_g) = 0 \quad (4.40)$$

$$N_2(x = l_g) = N_1(x = 0) = F \quad (4.41)$$

Mit

$$\delta'_{\text{rel}} = A \cdot \omega \cdot \cosh(\omega \cdot x) + B \cdot \omega \cdot \sinh(\omega \cdot x) \quad \text{bzw.} \quad (4.42)$$

$$\delta'_{\text{rel}} = u'_{2'} - u'_{1'} = \frac{N_2}{E_2 \cdot A_2} - \frac{N_1}{E_1 \cdot A_1} \quad (4.43)$$

erhält man somit

$$\delta'_{\text{rel}}(x = 0) = \frac{0}{E_2 \cdot A_2} - \frac{F}{E_1 \cdot A_1} = \frac{(-F)}{E_1 \cdot A_1} \quad (4.44)$$

$$\delta'_{\text{rel}}(x = 0) = \frac{(-F)}{E_1 \cdot A_1} = A \cdot \omega \cdot \cosh(\omega \cdot 0) + B \cdot \omega \cdot \sinh(\omega \cdot 0) \quad (4.45)$$

$$\rightarrow A = \frac{(-F)}{\omega \cdot E_1 \cdot A_1} \quad (4.46)$$

und

$$\delta'_{\text{rel}}(x = l_g) = \frac{F}{E_2 \cdot A_2} - \frac{0}{E_1 \cdot A_1} = \frac{F}{E_2 \cdot A_2} \quad (4.47)$$

$$\delta'_{\text{rel}}(x = l_g) = \frac{F}{E_2 \cdot A_2} = A \cdot \omega \cdot \cosh(\omega \cdot l_g) + B \cdot \omega \cdot \sinh(\omega \cdot l_g) \quad (4.48)$$

$$B = \frac{F}{\omega \cdot \sinh(\omega \cdot l_g)} \cdot \left[\frac{1}{E_2 \cdot A_2} \right] + \frac{F \cdot \cosh(\omega \cdot l_g)}{\omega \cdot \sinh(\omega \cdot l_g)} \cdot \left[\frac{1}{E_1 \cdot A_1} \right] \quad (4.49)$$

bzw. nach dem Rückeinsetzen von ω

$$\rightarrow B = \frac{F \cdot t_K \cdot \omega}{G_K \cdot b_2 \cdot \sinh(\omega \cdot l_g)} \cdot \frac{E_1 \cdot A_1 + E_2 \cdot A_2 \cdot \cosh(\omega \cdot l_g)}{E_1 \cdot A_1 + E_2 \cdot A_2} \quad (4.50)$$

Somit lautet die spezielle Lösung für δ_{rel} , für den Fall des Zug-Zug-Körpers wie folgt

$$\delta_{\text{rel}}(x) = \frac{F \cdot t_K \cdot \omega}{G_K \cdot b \cdot \sinh(\omega \cdot l_g)} \cdot \frac{E_1 \cdot A_1 \cdot \cosh(\omega \cdot x) + E_2 \cdot A_2 \cdot \cosh(\omega \cdot l_g - \omega \cdot x)}{E_1 \cdot A_1 + E_2 \cdot A_2} \quad (4.51)$$

Durch das Einführen des Parameter k

$$k = \frac{E_2 \cdot A_2}{E_1 \cdot A_1} \leq 1 \quad (4.52)$$

für das Steifigkeitsverhältnis der Füge­teile erhält man folgende spezielle Lösung für δ_{rel}

$$\delta_{rel}(x) = \frac{F \cdot t_K \cdot \omega}{G_K \cdot b \cdot \sinh(\omega \cdot l_g)} \cdot \frac{\cosh(\omega \cdot x) + k \cdot \cosh(\omega \cdot (l_g - x))}{1 + k} \quad (4.53)$$

In Bezug auf die Verschiebung an der Stelle $x = l_g$ lautet die Darstellung wie folgt

$$\delta_{rel}(x) = \delta_{rel}(l_g) \cdot \frac{\cosh(\omega \cdot x) + k \cdot \cosh(\omega(l_g - x))}{\cosh(\omega \cdot l_g) + k} \quad (4.54)$$

Die Schnittkräfte $N_2(x)$ und $N_1(x)$ und deren Verlauf über die Verbundstrecke ergeben sich damit zu

$$\begin{aligned} N_2(x) = F - N_1(x) &= \quad (4.55) \\ &= \frac{F}{\sinh(\omega \cdot l_g)} \cdot \frac{\sinh(\omega \cdot x) + k \cdot [\sinh(\omega \cdot l_g) - \sinh(\omega \cdot (l_g - x))]}{1 + k} \end{aligned}$$

Der Verlauf der Verbundspannungen $\tau(x)$ ergibt sich aus den Glg. (4.19) und Glg. (4.51) in folgender Form

$$\tau(x) = \frac{F \cdot \omega}{b} \cdot \frac{\cosh(\omega \cdot x)}{\sinh(\omega \cdot l_g)} \cdot \frac{k \cdot \cosh(\omega \cdot (l_g - x))}{1 + k} \quad (4.56)$$

Aus Glg. (4.56) ist erkennbar, dass die ersten beiden Terme identisch mit der speziellen Lösung für einen Zug-Druck-Körper (Glg. (4.39)) sind. Unterschiede in beiden Gleichungen bestehen lediglich im dritte Term (Abb. 4.11) der Glg. (4.56). Die Ursache hierfür liegt in den verschiedenartigen Randbedingungen hervorgerufen durch die beiden Kraft­einleitungskonfigurationen.

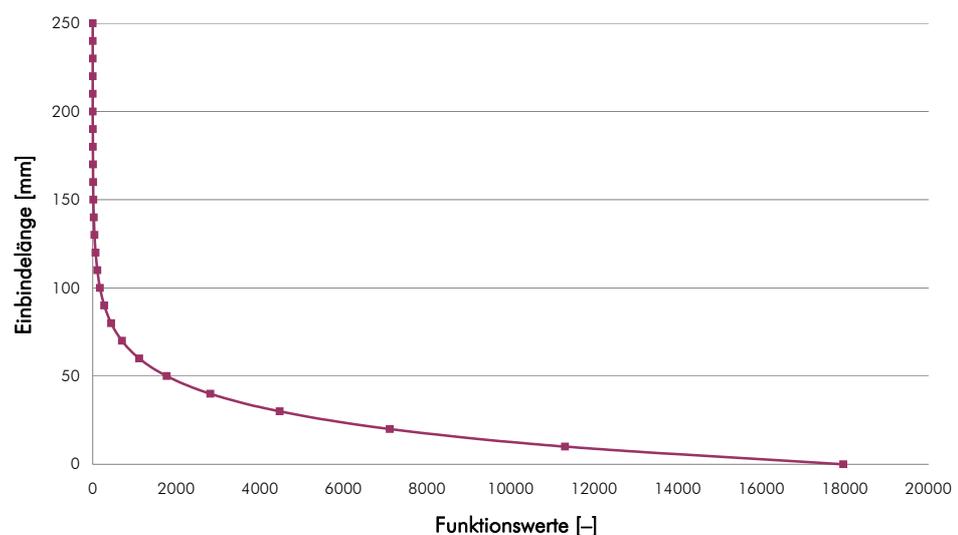


Abb. 4.11 Funktionswerte zur Berücksichtigung der Randbedingungen bei einem Zug-Zug-Körper in Abhängigkeit von k , ω , l_g , und x

2. 2. 2 Vergleichende Betrachtung von Zug-Druck- und Zug-Zug-Körper

Unter diesem Punkt werden die Verläufe der Schubspannung, der Relativverschiebung und der Normalkraft in den Füge­teilen für die beiden Randbedingungssituationen gegenübergestellt.

Um einer Vielzahl an Parametern (Fü­geteilbreite, -dicke usw.) entgegenzuwirken, wurde an­statt einer Überlappungsklebung, ein eingeklebter Stahlstab betrachtet. Diese Annahme ist zulässig, da wie aus Abschnitt 3 ersichtlich, nur minimale Unterschiede ($b = \pi \cdot d$) in den Gleichungen bestehen und somit kein Einfluss auf die Ergebnisse gegeben ist.

Um die unterschiedlichen Verläufe grafisch darstellen zu können wurden folgende Einflussgrößen gewählt, welche für Parameterstudien beliebig verändert werden können:

- Holz: E-Modul: 11.600 N/mm² (GL 24h)
Holzquerschnitt A: $\sim 6d \cdot 6d \approx 2.830 \text{ mm}^2$
Dehnsteifigkeit $(E \cdot A)_{\text{Holz}}$: 32.800.000 N
- Stahl: E-Modul: 210.000 N/mm²
Stabdurchmesser: 10 mm
Dehnsteifigkeit $(E \cdot A)_{\text{Stahl}}$: 16.500.000 N
- Steifigkeitsverhältnis: $k = \frac{E_{\text{St}} \cdot A_{\text{St}}}{E_{\text{H}} \cdot A_{\text{H}}} \approx 0,50$
- Klebstoff: Schubmodul: 1.500 N/mm²
Klebstoffdicke: 2 mm
Verbundlänge: 250 mm

In Abb. 4.12 werden die Schubspannungsverläufe für beide Kräfteinleitungssituationen (engl.: „push-pull“ und „pull-pull“) dargestellt und betrachtet. Aus dem unsymmetrischen Verlauf für den Zug-Zug-Körper ist eine deutlich höhere Schubspannungsspitze am Ende des Füge­teils mit der größeren Dehnsteifigkeit erkennbar. Durch die Kräfteinleitungssituation beim Zug-Druck-Körper ergeben sich am Lastangriffspunkt deutlich höhere Spannungsspitzen als beim Zug-Zug-Körper, welche bis zum unbelasteten Ende hin auf Null zurückgehen. Abb. 4.12 lässt somit den Schluss zu, dass nur rund die halbe Verbundlänge zur Übertragung der Schubspannungen bei einem Zug-Druck-Körper von Nöten ist. Im Gegensatz dazu ist bei einem Zug-Zug-Körper annähernd die gesamte Überlappungslänge (der mittlere Bereich ausgenommen) an der Übertragung der Schubspannungen beteiligt.

Weiters wird ersichtlich, dass die Schubfestigkeit des gewählten Holzes (GL 24h) infolge der auftretenden Spannungsspitzen deutlich überschritten wird. Dies lässt den Schluss zu, dass Holz einen größeren Bereich zur Übertragung der Schubbeanspruchung aktiviert, als angenommen ($6d \cdot 6d$). Weiters stellen sich Umlagerungseffekte entlang der Verbundlänge ein, welche das Tragverhalten ebenfalls positiv beeinflussen. Im Gegensatz dazu liegt die mittlere Schubspannung in der Klebefuge, welche nach Glg. (4.1) berechnet wurde, etwas unter jener des Holzes.

Aus diesen Überlegungen wird deutlich, dass die Schubspannungsverläufe mit diesen Spannungsspitzen in der Realität nicht auftreten können. Daher ist eine Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehung zu wählen, welche das „reale“ Klebstoffverhalten besser abbildet als das linear-elastische, bzw. als jenes der „Volkersen-Theorie“.

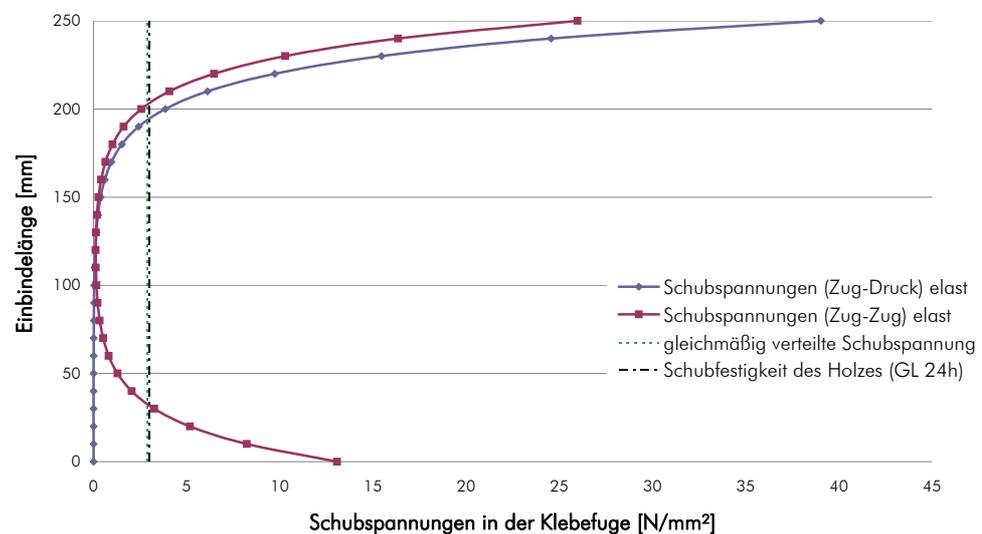


Abb. 4.12 Schubspannungsverlauf in der Klebefuge für einen linear-elastischen Verbundansatz

Abb. 4.13 stellt die Relativverschiebungsverläufe für den Zug-Druck- und Zug-Zug-Körper dar. Es ist gut erkennbar, dass für beide Kräfteinleitungssituationen die selbe maximale Relativverschiebung in der Klebstoffuge auftritt. Je nach Klebstofftyp unterliegt die größtmögliche aufnehmbare Verschiebung dabei großen Schwankungen. So reicht die maximal aufnehmbare Bruchdehnung von 70% (Strukturklebstoffe) bis 300% (elastische Klebstoffe) [30].

Bei der Zug-Druck-Kräfteinleitung ist nur rund die halbe Verbundlänge von Relativverschiebungen betroffen, wobei wiederum nur rund ein Fünftel der gesamten Länge größeren Verformungen unterworfen ist.

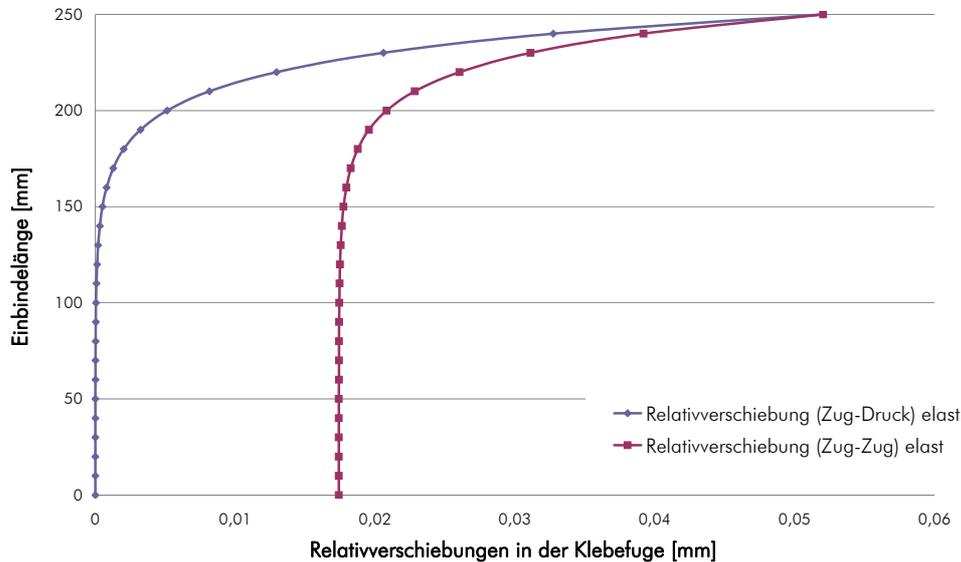


Abb. 4.13 Verlauf der Relativverschiebungen in der Klebefuge für einen linear-elastischen Verbundansatz

Aus Abb. 4.14 ist erkennbar, da der Wendepunkt des Normalkraftverlaufes nicht bei $F/2$ liegt, dass der dehnsteifere Fügepartner bei einem Zug-Zug-Körper mehr zur Abtragung der angreifenden Kraft beiträgt als der dehnweichere. Bei Fügepartnern der selben Dehnsteifigkeit wäre der Wendepunkt des Ankerkraftverlaufes bei $F/2$ anzutreffen (siehe Abb. 4.16). Zusätzlich sind ausgeprägte Spitzen beim Verlauf an den Verbundenden ebenso feststellbar, wie ein Mittelbereich der kaum etwas zur Übertragung der Normalkraft beiträgt.

Weiters ist ersichtlich, dass für die Übertragung einer Kraft in einem Fügepart, mit einer Zug-Druck-Konfiguration, nicht die gesamte Verbundlänge benötigt wird. Näherungsweise die gesamte Kraftübertragung findet im ersten Fünftel, ausgehend von der Kräfteinleitungsstelle, statt. Für beide Kräfteinleitungssituationen wird in Übereinstimmung mit der vorhergehenden Abbildung die selbe maximal übertragbare Normalkraft erreicht. Somit ist ein Zusammenhang zwischen den Abb. 4.12, Abb. 4.13 und Abb. 4.14 eindeutig erkennbar und die Mechanismen sind nachvollziehbar.

Aus den oben beschriebenen Kräfteinleitungssituationen ist der signifikante Einfluss auf das jeweilige Verhalten und Verläufe erkennbar. Dies hat in weiterer Folge bei der Festlegung von Prüfkongfigurationen berücksichtigt zu werden, um eine Vergleichbarkeit der ermittelten Werte zu gewährleisten. Zur Zeit ist es üblich, Schraubenprüfungen an einer „push-pull“ Konfiguration und eingeklebte Gewindestangen an einer „pull-pull“ Konfiguration zu prüfen. Dies führt zu einer eingeschränkten Vergleichbarkeit der jeweiligen im Versuch ermittelten Werte.

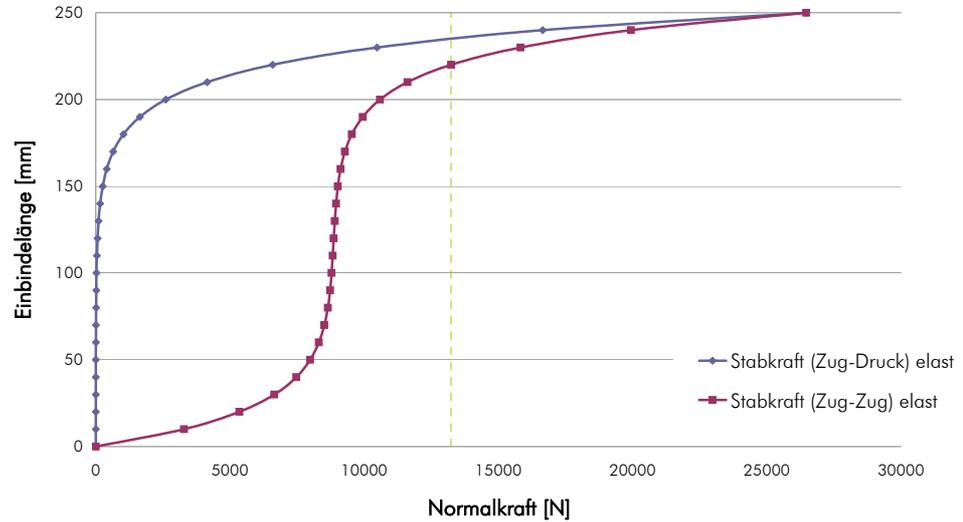


Abb. 4.14 Verlauf der Normalkraft in der Klebefuge bei linear-elastischen Verbundansatz

2. 2. 3 Parameterstudie

Die nachfolgenden Ausführungen sind [30] entnommen und werden an dieser Stelle in kompakter Form wiedergegeben.

Durch eine Beziehung der „Volkersen-Gleichungen“ auf die Normalspannungen in den Fügeiteilen (σ_{Fu}) erhält Schürmann folgenden Ausdruck

$$\frac{\tau_{K,max}}{\sigma_{Fu}} = \frac{t_1}{l_u} \cdot l_u \cdot \sqrt{\frac{G_K}{E_1 \cdot t_1 \cdot t_K \cdot (1+k)}} \quad (4.57)$$

$\tau_{K,max}$ Schubspannungsspitze
 σ_{Fu} Normalspannung in den Fügeiteilen außerhalb des Klebebereichs

Daraus wird deutlich, dass sich die Überlappungslänge (l_u) aus Glg. (4.57) herauskürzt und keinen Einfluss auf die Spannungsspitzen hat.

Durch Gleichsetzen der Fügeiteil-Dehnsteifigkeiten $E_1 \cdot t_1 = E_2 \cdot t_2$ ($k=1$) in Glg. (4.57) erhält man einen Ausdruck, der sich gut für Parameterstudien eignet. Die Schubspannungsspitzen $\tau_{K,max}$ sind demnach von folgenden Größen abhängig

$$\tau_{K,max} = \frac{F}{b} \cdot \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{E \cdot t} \cdot \frac{G_K}{t_K}} \quad (4.58)$$

Mit Glg. (4.58) können nun in weiterer Folge unterschiedliche Parameter variiert und die Auswirkungen beschrieben werden.

- $\tau_{K \max} \sim F$ und $1/b$:

Die Spannungsspitze ist der äußeren, an den Füge­teilen angreifenden Kraft direkt proportional. Eine Senkung der Schubbeanspruchung kann durch eine Vergrößerung der Füge­teilbreite herbeigeführt werden.
- $\tau_{K \max} \sim \sqrt{1/E \cdot t}$:

Die Dehnsteifigkeit der Füge­teile geht unterproportional ein. Durch steifere Füge­teile werden geringere Spannungsspitzen in der Klebeschicht verursacht als bei dehnweiche­ren.
- $\tau_{K \max} \sim \sqrt{1/G_K}$:

Eine weitere Alternative, um die Klebstoffbeanspruchung zu senken, besteht darin einen Klebstoff mit niedrigem Schubmodul zu verwenden. Der Nachteil dieser Variante ist die damit verbundene sehr dehnweiche Fügung.
- $\tau_{K \max} \sim \sqrt{1/t_K}$:

Um die selbe Wirkung wie bei einem schubweichen Klebstoff zu erzielen, kann die Dicke der Klebstoffschicht vergrößert werden. Besonders zu empfehlen ist diese Modifikation des Klebstoffes bei großen Verformungen und Schlagbelastungen. Um auf Grund der Klebeschichtdicke nicht zuviel an Festigkeit zu verlieren, erweisen sich Klebstoffdicken von 0,1 - 0,2 mm als empfehlenswert.
- In Abb. 4.15 ist der Einfluss der Überlappungslänge auf die Spannungsspitzen dargestellt. Folgende Parameter wurden für die linear elastische Rechnung gewählt: $E=210.000 \text{ N/mm}^2$, $t_1=t_2=2 \text{ mm}$, $G_k=1.000 \text{ N/mm}^2$, $t_k=0,1 \text{ mm}$ und $\sigma_{Fu}=30 \text{ N/mm}^2$. Man erkennt, dass sich ab einer Überlappungslänge von rund 46 mm (für die genannten Einflussgrößen) die Spannungsspitzen betragsmäßig auf einem gleichbleibenden Niveau einstellen. Weiters wurde die jeweilige mittlere Klebstoff-Schubspannung durch die strichlierten Linien abgebildet. Daraus ist die Abnahme der mittleren Schubspannung mit zunehmender Überlappungslänge erkennbar. Durch diese Abbildung ist die Problematik weitestgehend erläutert, wenn man nur auf Basis der mittleren Schubspannungen bemisst, und die Spannungsspitzen unbeachtet lässt. Bei hohen Kräften F ist es daher zielführend nicht die Überlappungslänge zu vergrößern, sondern die Breite der Klebeschicht.

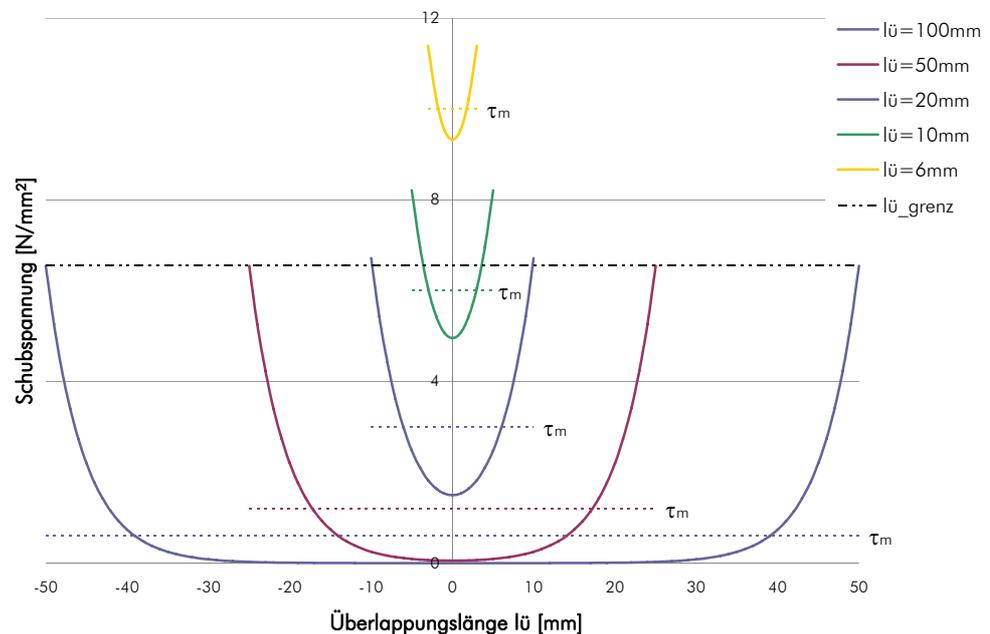


Abb. 4.15 Schubspannungsverläufe in der Klebstoffschicht in Abhängigkeit von der Überlappungslänge bei zugbeanspruchten Überlappungsklebung; $E=210.000 \text{ N/mm}^2$, $t_1=t_2=2 \text{ mm}$, $G_k=1.000 \text{ N/mm}^2$, $t_k=0,1 \text{ mm}$ und $\sigma_{Fu}=30 \text{ N/mm}^2$

- Ein Vorteil von großen Überlappungslängen ist die bessere Möglichkeit zur Klebstoffplastifizierung, wodurch die Schubspannungsspitzen deutlich abgebaut werden können. Um eine ausreichende Umlagerung der Schubspannungen gewährleisten zu können sollte die Überlappungslänge nicht weniger als zwei mal die Grenzlänge (rund 46 mm für die gewählten Parameter) betragen. Die Grenzüberlappungslänge lässt sich dabei aus

$$l_u = 5 \cdot \sqrt{\frac{G_k}{E_1 \cdot t_1 \cdot t_k \cdot (1+k)}} \quad (4.59)$$

berechnen. Nimmt die Klebungskennzahl ρ einen Wert $\rho \geq 5$ an, so folgen die davon abhängigen hyperbolischen Funktionen zu 1. Der Wert der Klebungskennzahl ρ hängt überproportional von der Überlappungslänge ab und es gilt nur für sehr kurze Überlappungslängen $\rho < 5$. Aus diesem Grund ist Glg. (4.59) auf diese Weise darstellbar.

- In Abb. 4.16 ist dargestellt wie sich die Normalspannungen über die Schubspannungen in einem Fügepart aufbauen. Bei langen Überlappungslängen ist erkennbar, dass die Umwandlung nur in den Randzonen stattfindet und dass die Normalspannungen im mittleren Bereich annähernd konstant bleiben. In diesem Abschnitt wird die übertragbare Kraft F auf beide Fügepartner aufgeteilt. Im Gegensatz dazu ist bei kurzen Überlappungslängen ein nahezu linearer Anstieg der Normalspannungen zu erkennen.

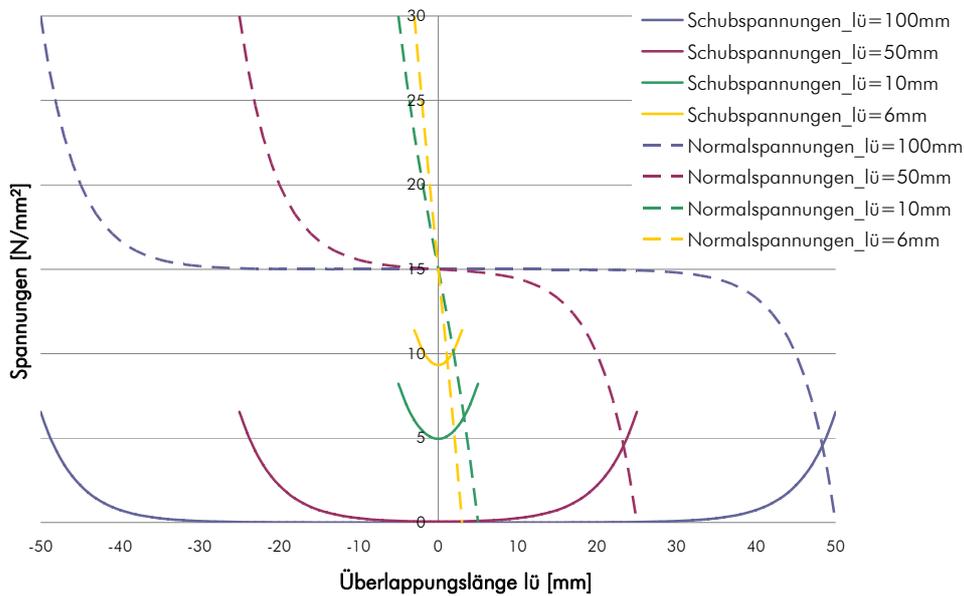


Abb. 4.16 Beziehung zwischen Schub- und Normalspannung in einem Fügepart in Abhängigkeit von der Überlappungslänge; $E=210.000 \text{ N/mm}^2$, $t_1=t_2=2 \text{ mm}$, $G_k=1.000 \text{ N/mm}^2$, $t_k=0,1 \text{ mm}$ und $\sigma_{Fu}=30 \text{ N/mm}^2$

- Durch das Fügen unterschiedlich dicker bzw. dehnsteifer Teile ergibt sich ein unsymmetrischer Schubspannungsverlauf. Am Ende des dehnsteiferen Fügepartners (größere Dicke) ist die höhere Spannungsspitze anzutreffen. Dies lässt sich dadurch begründen, dass der dehnweichere Fügepart bzw. damit auch der Klebstoff in diesem Bereich eine größere Dehnung aufnehmen muss als am Ende mit dem dehnsteiferen Fügepart (Abb. 4.17).

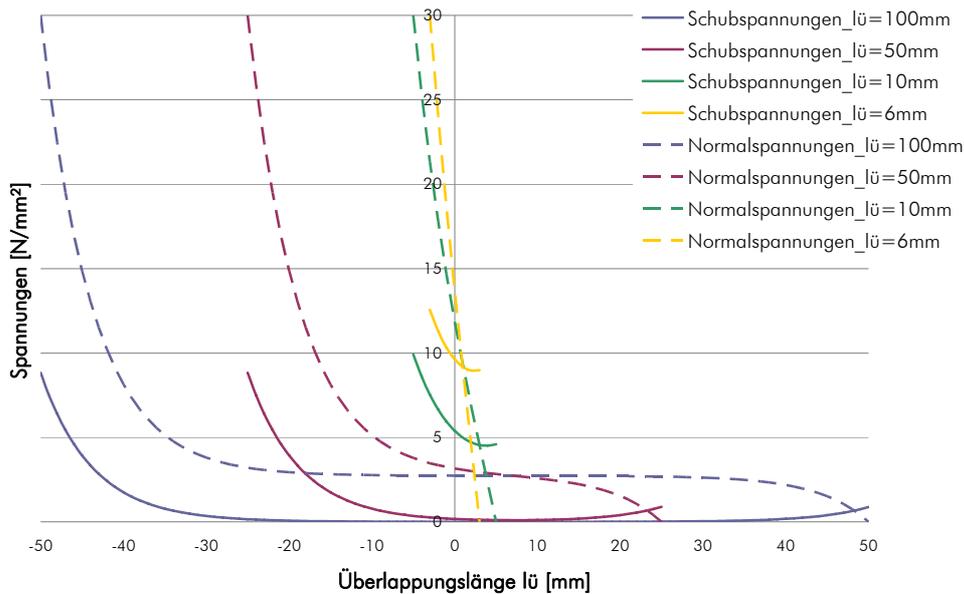


Abb. 4.17 Auswirkung ungleich dicker Fügeparten auf die Schub- und Normalspannung im Klebstoff; $E=210.000 \text{ N/mm}^2$, $t_1=2 \text{ mm}$, $t_2=20 \text{ mm}$, $G_k=1.000 \text{ N/mm}^2$, $t_k=0,1 \text{ mm}$ und $\sigma_{Fu}=30 \text{ N/mm}^2$

- Ein Bruch der Klebung kann eintreten, wenn die Fügeteile relativ dick oder hochfest sind. Im Gegensatz dazu kann ein Versagen der Fügepartner eintreten, wenn die Querschnitte entsprechend klein ausgebildet wurden. Es existiert also ein Grenzwert, bei welchem die Versagensart wechselt (Abb. 4.18). Da eine Reduktion der Spannungsspitzen in der Klebstoffschicht nur unterproportional mit der Fügeteildicke zusammenhängt sind Klebungen nach Möglichkeit eher bei dünnen Fügepartnern anzuwenden.

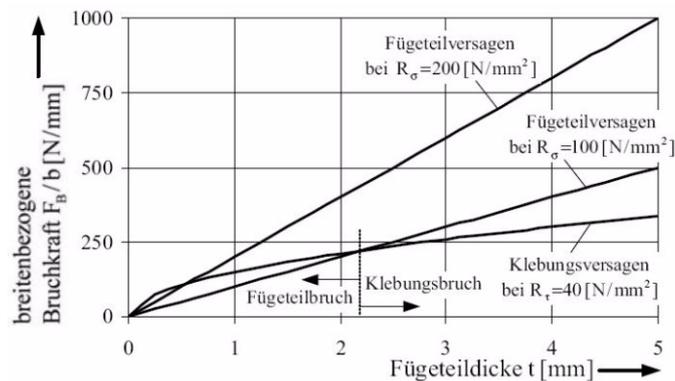


Abb. 4.18 Ermittlung der Versagensart in Abhängigkeit der Fügeteildicke; $E=70.000 \text{ N/mm}^2$, $G_k=1.000 \text{ N/mm}^2$ und $t_k=0,1 \text{ mm}$ [30]

Weitere Parameter, welche das mechanische Verhalten einer Klebung beeinflussen, sind:

- Neben den Parametern der „Volkersen-Gleichung“ werden die Eigenschaften einer Klebeverbindung noch von weiteren Parametern mitbestimmt. Um ausgeprägte Spannungsspitzen an den Enden der Überlappungslänge zu vermeiden, sollten Klebstoffe ein annähernd ideal elastisch-plastisches Werkstoffverhalten und eine hohe Bruchverschiebung aufweisen. Durch das plastische Verhalten des Klebstoffes ist es möglich, die Spannungsspitzen aus den hoch beanspruchten Randzonen in den weniger belasteten Mittelbereich zu verlagern, und somit eine gleichmäßigere Spannungsverteilung in der Klebeverbindung zu erreichen.

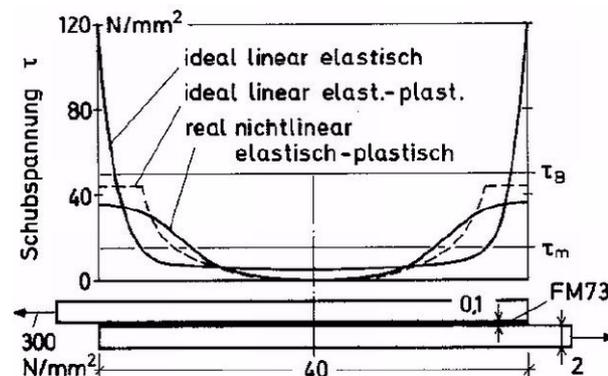


Abb. 4.19 Klebstoffplastizität und deren Auswirkung auf die Schubspannungsverteilung; $t_1=t_2=2 \text{ mm}$, $t_k=0,1 \text{ mm}$, $l_{ij}=40 \text{ mm}$, $\sigma_{Fu}=300 \text{ N/mm}^2$ und Fügeteile aus Aluminium [30]

2. 3 Lösungen der Differentialgleichung des verschieblichen Verbundes für weitere Schubspannungsansätze

In diesem Abschnitt erfolgt eine Betrachtung weiterer Schubspannungsansätze. Dabei wird zwischen analytisch und numerisch lösbaren Ansätzen unterschieden.

2. 3. 1 Analytisch lösbare Ansätze

Als analytisch lösbare Ansätze werden jene Schubspannungsansätze bezeichnet, für welche eine geschlossene Lösung von Hand und in einem angemessenen zeitlichen Rahmen zu finden sind.

2. 3. 1. 1 Exponentieller Ansatz für Zug-Druck-Körper und Zug-Zug-Körper

Um den Einfluss einer nichtlinearen Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehung darzustellen werden diese in der Folge mit der linear-elastischen Lösung und gleichen Voraussetzungen (ein Fügepartner unendlich steif) miteinander verglichen.

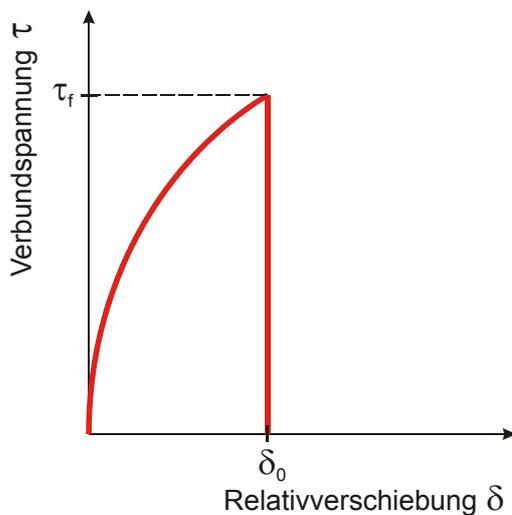


Abb. 4.20 nicht-lineare Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehung

Um die Voraussetzungen für die Lösbarkeit dieses Verbundansatzes zu schaffen werden zu jenen nach Volkersen (Abschnitt 2. 2) zusätzlich folgende Annahmen getroffen:

- ein Fügepartner wird als starr angenommen; alle örtlich auftretenden Verformungen werden rechnerisch der Klebefuge zugewiesen
- Der Koordinatenursprung ($x=0$) befindet sich am Ende der Verbundlänge l_g .

Die mathematische Beschreibung des Verbundansatzes erfolgt in der Form

$$\tau(x) = \tau_f \cdot \left(\frac{\delta_{\text{rel}}(x)}{\delta_0} \right)^\alpha = C_2 \cdot \delta_{\text{rel}}(x)^\alpha \quad \text{für} \quad \delta_{\text{rel}} < \delta_0 \quad (4.60)$$

mit

$$C_2 = \frac{\tau_f}{(\delta_0)^\alpha}, \quad \alpha = 0,36 \quad (4.61)$$

und

$$0 \quad \text{für} \quad \delta_{\text{rel}} \geq \delta_0$$

Aus Glg. (4.17) folgt nun

$$\delta''_{\text{rel}} - \omega^2 \cdot \delta_{\text{rel}} = 0, \quad (4.62)$$

mit

$$\omega^2 = \frac{C_2}{E_2 \cdot t_2} \quad (4.63)$$

Die Relativverschiebung $\delta_{\text{rel}}(x)$ ergibt sich für diesen Fall somit zu

$$\delta_{\text{rel}}(x) = \left[\frac{C_2 \cdot (1 - \alpha)^2}{2 \cdot E_2 \cdot t_2 \cdot (1 + \alpha)} \right]^{\frac{1}{1-\alpha}} \cdot x^{\frac{2}{1-\alpha}}. \quad (4.64)$$

Die Verbundspannung $\tau(x)$ lässt sich aus Glg. (4.60) und Glg. (4.64) bestimmen. Für die Schnittkraft $N_2(x)$ im nicht starren Fügepartner ergibt sich aus Glg. (4.15) nach einmaliger Differentiation von Glg. (4.64):

$$N_2(x) = \frac{2 \cdot E_2 \cdot A_2}{1 - \alpha} \cdot \frac{\delta_{\text{rel}}(x)}{x} \quad (4.65)$$

Alle vorstehenden Gleichungen gelten sowohl für Druck-Zug-, als auch für Zug-Zug-Körper, da ein Fügepartner als starr angenommen wurde.

Nun folgend werden die Verläufe aus Abschnitt 2. 2. 2 mit jenen für den exponentiellen Ansatz gegenübergestellt und die Unterschiede beschrieben. Da die Relativverschiebung an der Kraffeinleitungsstelle für beide Ansätze und unter Verwendung der selben Parameter einen identen Wert ergeben muss, wurde α auf iterative Weise bestimmt. Somit ergab sich ein Wert von 0,36 für α um das exponentielle Verhalten abzubilden.

Auf Grund eines starr angenommenen Fügepartners ähnelt der Schubspannungsverlauf für den exponentiellen Fall jenen für den Zug-Druck-Körper. Die geringen Abweichun-

gen vom linear-elastischen Verlauf sind mit dem Wert α erklärbar. Weiters ist aus Abb. 4.21 erkennbar, dass sich beim nicht-linearen Verlauf etwas höhere Spannungsspitzen ausbilden.

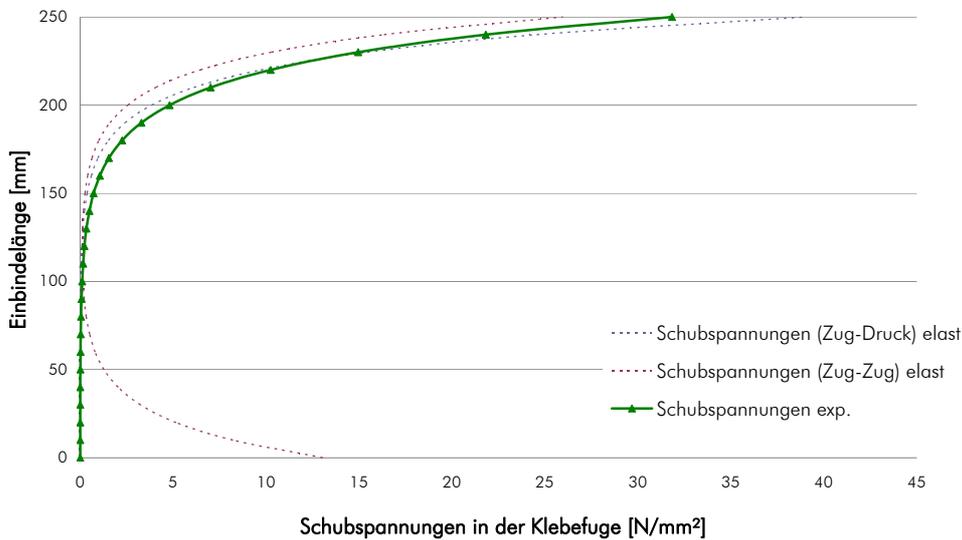


Abb. 4.21 Schubspannsverlauf in der Klebefuge mit einem exponentiellen Verbundansatz

Der in Abb. 4.22 dargestellte Verlauf für die Relativverschiebungen in der Klebefuge stellt den größten Unterschied der beiden Verbundansätzen dar. Das Verhalten des exponentiellen Ansatzes ähnelt zwar wieder jenem des Druck-Zug-Körpers, jedoch stellen sich nun Relativverschiebungen über einen erheblich längeren Teil der Klebstoffuge ein. Traten beim linear-elastischen Verbundansatz nur etwa über die halbe Länge des Klebeverbunds Relativverschiebungen auf, so unterliegen nun rund vier Fünftel der Verbundlänge Relativverschiebungen.

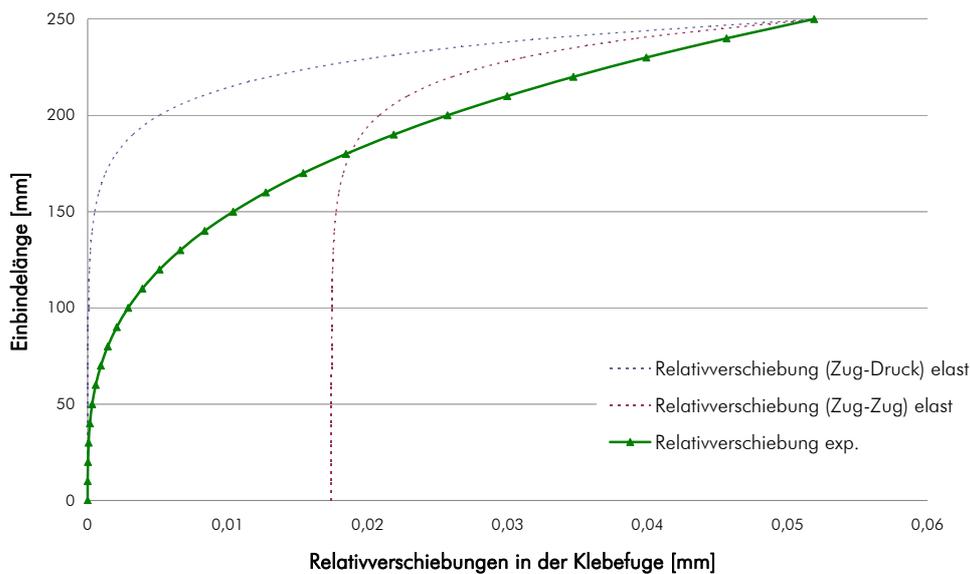


Abb. 4.22 Verlauf der Relativverschiebungen in der Klebefuge für einen exponentiellen Verbundansatz

Abb. 4.23 zeigt den Kraftverlauf in den Füge­teilen für den exponentiellen Ansatz im Vergleich zum linear-elastischen Ansatz. Es ist zu erkennen, dass nur minimale Unterschiede zwischen dem nicht-linearen Ansatz und dem Zug-Druck-Körper mit dem linear-elastischen Ansatz bestehen.

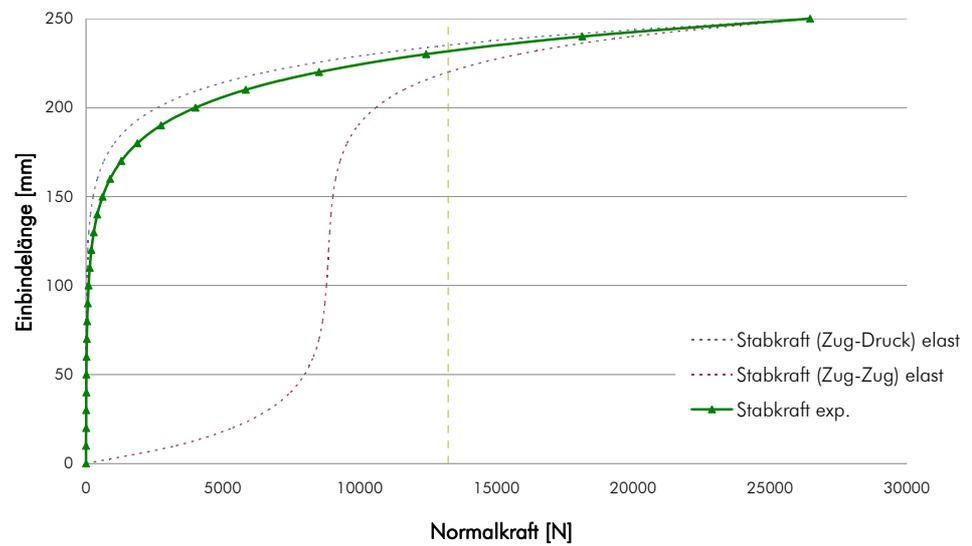


Abb. 4.23 Verlauf der Normalkraft in der Klebefuge mit einem exponentiellen Verbundansatz

2. 3. 1. 2 Bilinearer Ansatz für Zug-Druck-Körper

Diese Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehung ist in der nachfolgenden Abb. 4.24 dargestellt.

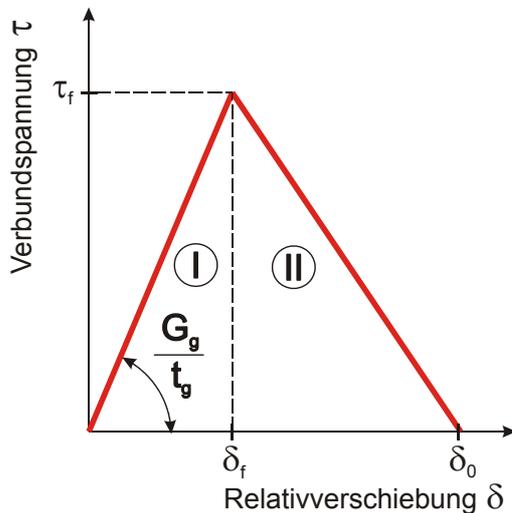


Abb. 4.24 bilineare Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehung

Sie erlaubt die näherungsweise Betrachtung unter Miteinbeziehung des entfestigenden Verhaltens einer Klebeverbindung und den damit verbundenen Abbau der Spannungsspitzen. Bei diesem Ansatz erreichen die Verbundspannungen am belasteten Stabende ($x=l_g$) zuerst ein Maximum, sodass die Schubspannungen bei weiterer Steigerung der beanspruchenden Kraft wieder abfallen. Das Verbundspannungsmaximum breitet sich dabei in Richtung des unbelasteten Stabendes ($x=0$) aus. Lösungen zu diesem Verhalten wurden z.B. von Wernersson [33] an Holz-Holz-Probekörpern und von Holzenkämpfer [31] für aufgeklebte Stahllaschen auf Betonträgern angegeben.

Zur Ermittlung einer analytischen Lösung wird der Verbundbereich dabei vorteilhafterweise in zwei Bereiche eingeteilt.

- Bereich I:
Zone mit linear-elastischem Verbundverhalten
Die Gleichungen für diesen Bereich sind analog zu den in Abschnitt 2. 2. 1. 1 hergeleiteten zu übernehmen.
- Bereich II:
Zone mit entfestigendem Verbundverhalten

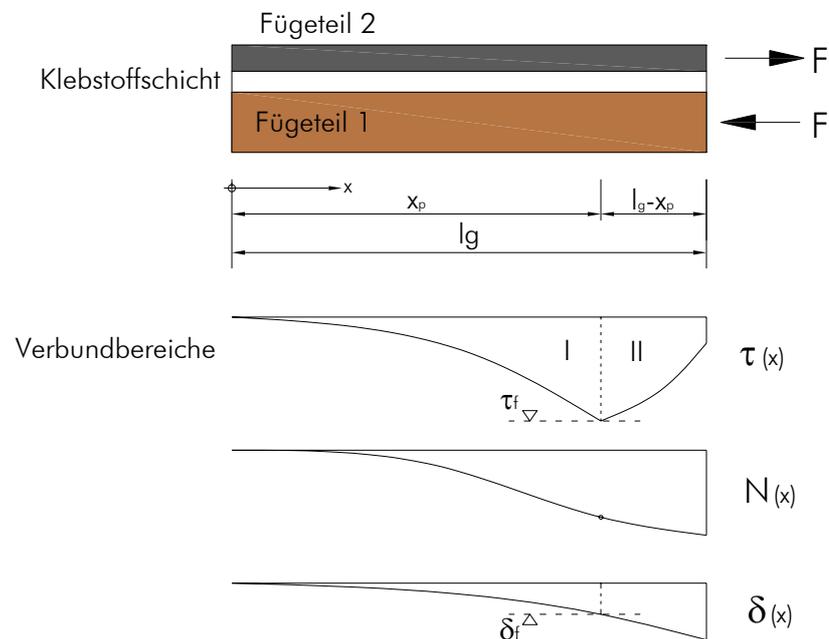


Abb. 4.25 Verbundspannungs-, Normalkraft- und Relativverschiebungsverlauf für einen Zug-Druck-Körper

Ausgehend von der Differentialgleichung des verschieblichen Verbundes (Glg. (4.17)) wird nun folgend die Spannungs-Dehnungs-Beziehung hergeleitet.

Randbedingungen für den Bereich I:

$$N_2(x = 0) = N_1(x = 0) = 0 \quad (4.66)$$

$$\delta_{rel}(x = x_p) = \delta_1 \quad (4.67)$$

Die Relativverschiebung für den Bereich I ergibt sich somit zu

$$\delta_{rel;I}(x) = \delta_f \cdot \frac{\cosh(\omega \cdot x)}{\cosh(\omega \cdot x_p)} \quad \text{für } x \leq x_p \quad (4.68)$$

Für den Bereich II lautet die Verbundspannung-Verschiebungs-Beziehung wie folgt

$$\tau_{II}(x) = \frac{G_K}{t_K} \cdot \delta_f \cdot \frac{\delta_0 - \delta_{rel;II}(x)}{\delta_0 - \delta_f} \quad \text{für } x > x_p \quad (4.69)$$

Durch Einsetzen dieses Ansatzes in Glg. (4.17) erhält man für Bereich II eine inhomogene Differentialgleichung II. Ordnung

$$\delta''_{rel;II}(x) + \omega^2 \cdot \frac{\delta_f}{\delta_0 - \delta_f} \cdot \delta_{rel;II}(x) = \omega^2 \cdot \frac{\delta_f}{\delta_0 - \delta_f} \cdot \delta_0 \quad (4.70)$$

Mit der Substitution

$$\lambda^2 = \frac{\delta_f}{\delta_0 - \delta_f} \quad (4.71)$$

lässt sich diese Differentialgleichung wie folgt darstellen

$$\delta''_{rel;II}(x) + \omega^2 \cdot \lambda^2 \cdot \delta_{rel;II}(x) = \omega^2 \cdot \lambda^2 \cdot \delta_0 . \quad (4.72)$$

Deren allgemeine Lösung lautet

$$\delta_{rel;II}(x) = A_{II} \cdot \sin(\omega^2 \cdot \lambda^2 \cdot x) + B_{II} \cdot \cos(\omega^2 \cdot \lambda^2 \cdot x) + \delta_0 . \quad (4.73)$$

Folgende Randbedingung kann an der Stelle $x = x_p$ angegeben werden

$$\delta_{rel;II}(x_p) = \delta_f . \quad (4.74)$$

Zwischen Bereich I und II muss aus Kompatibilitätsgründen folgende Übergangsbedingung erfüllt werden

$$\delta'_{rel;I}(x = x_p) = \delta'_{rel;II}(x = x_p) . \quad (4.75)$$

Nach der Bestimmung der Koeffizienten A_{II} und B_{II} ergibt sich die spezielle Lösung der Glg. (4.73) zu

$$\delta_{rel;II}(x) = \delta_0 - (\delta_0 - \delta_f) \cdot [\cos(\omega \cdot \lambda \cdot (x - x_p)) - \lambda \cdot \tanh(\omega \cdot x_p) \cdot \sin(\omega \cdot \lambda \cdot (x - x_p))] . \quad (4.76)$$

Nach einmaligem Differenzieren von Glg. (4.76) und einer Einarbeitung der Randbedingung für die Dehnsteifigkeit des Verbundes

$$\delta'_{II}(x = l_g) = F \cdot \frac{(1 + k)}{E_2 \cdot A_2} \quad (4.77)$$

erhält man eine Gleichung für die vom Klebeverbund aufnehmbare Kraft F

$$F = \frac{E_2 \cdot A_2 \cdot \omega}{(1 + k)} \cdot [\lambda \cdot (\delta_0 - \delta_f) \cdot \sin(\omega \cdot \lambda \cdot (l_g - x_p)) + \delta_f \cdot \tanh(\omega \cdot x_p) \cdot \cos(\omega \cdot \lambda \cdot (l_g - x_p))] . \quad (4.78)$$

Da in Glg. (4.78) außer der maximal aufnehmbaren Kraft F auch die Länge des linear-elastischen Bereiches x_p unbekannt ist, kann diese noch nicht explizit aufgelöst werden.

Durch eine Festlegung für den Wert x_p lässt sich eine maximal vom Verbund aufnehmbare Kraft ermitteln oder umgekehrt ausgedrückt, lässt sich die Länge von x_p durch die Größe von F bestimmen.

Durch Differenzieren von Glg. (4.78) nach x_p und gleichzeitigem Erfüllen der Randbedingung

$$\frac{\partial F(x_p)}{\partial x_p} = 0 \quad (4.79)$$

kann die maximal vom Verbund aufnehmbare Kraft ermittelt werden zu

$$\begin{aligned} \frac{\partial F(x_p)}{\partial x_p} = & \tau_f \cdot b_2 \cdot (1 + k) \cdot \tanh(\omega \cdot x_p) \cdot \\ & \cdot [\lambda \cdot \sin(\omega \cdot \lambda \cdot (l_g - x_p)) - \cos(\omega \cdot \lambda \cdot (l_g - x_p)) \cdot \tanh(\omega \cdot x_p)] = 0. \end{aligned} \quad (4.80)$$

Abgesehen von der trivialen Lösung $x_p = 0$, wird diese Gleichung nur dann ident erfüllt, wenn sich der Ausdruck in der eckigen Klammer zu Null ergibt, d.h. wenn

$$\tanh(\omega \cdot x_p) = \lambda \cdot \tan(\omega \cdot \lambda \cdot (l_g - x_p)) \quad (4.81)$$

wird.

Damit kann die Stelle x_p für die vom Verbund aufnehmbare Maximalkraft F_{\max} bestimmt werden. Durch Einsetzen von Glg. (4.81) in Glg. (4.78) folgt die maximal übertragbare Kraft F_{\max} bei Verwendung eines bi-linearen, entfestigenden Verbundansatzes zu

$$\max F = \omega \cdot \lambda \cdot \delta_0 \cdot \frac{E_2 \cdot A_2}{(1 + k)} \cdot \sin(\omega \cdot \lambda \cdot (l_g - x_p)) . \quad (4.82)$$

Mit den Ergebnis der Untersuchungen von Ottoson/Olsson [32] konnten diese nachweisen, dass bei Erreichen der maximalen Verbundlast gerade

$$\delta_{\text{rel;II}}(x = l_g) = \delta_0 \quad (4.83)$$

gilt.

Durch Einsetzen dieser Bedingung in Glg. (4.76) und unter Verwendung von Glg. (4.81) kann die maximal übertragbare Verbundkraft auch in der nachfolgenden Form angeschrieben werden

$$\max F = \sqrt{\tau_f \cdot \delta_0 \cdot b \cdot \frac{E_2 \cdot A_2}{(1 + k)}} . \quad (4.84)$$

Wird die Gültigkeit des bi-linearen entfestigenden Verbundansatzes vorausgesetzt, kann diese Kraft nicht überschritten werden.

2. 3. 1. 3 Bilinearer Ansatz für Zug-Zug-Körper für einen speziellen Fall

Der bilineare Verbundspannungs-Verschiebungs-Ansatz ist für einen Zug-Zug-Körper mit unterschiedlichen Dehnsteifigkeiten der Fügeiteile nur mit großem analytischen Aufwand lösbar. Demzufolge werden in diesem Abschnitt spezielle Annahmen getroffen um eine geschlossene Lösung zu ermöglichen.

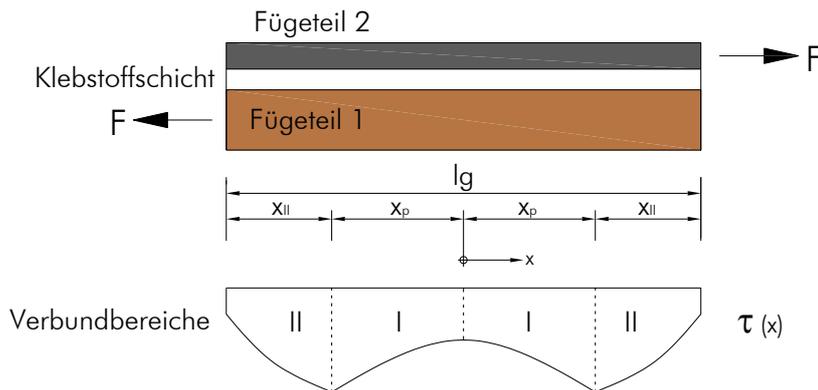


Abb. 4.26 Verbundspannungsverlauf für einen Zug-Zug-Körper mit speziellen Voraussetzungen

Ausgehend von der „Volkersen-Theorie“ ist in [32] von Ottosen/Olsson ein detaillierter Lösungsweg für einen bilinearen Ansatz und einem Zug-Zug-Körper beschrieben worden. Die beiden Autoren setzten den speziellen Fall gleicher Dehnsteifigkeiten für beide Fügeiteile

$$E_1 \cdot t_1 = E_2 \cdot t_2 \tag{4.85}$$

für ihre Berechnung voraus. Dadurch kann eine zusätzliche Gleichung aufgrund der Symmetrieeigenschaften gewonnen werden, welche in weiterer Folge die analytische Betrachtung ermöglicht.

Die allgemeine Lösung der Differentialgleichung für die Verbundspannung lautet

$$\tau(x) = A \cdot \sin(\omega \cdot x) + B \cdot \cos(\omega \cdot x) \text{ für } x_p \leq x \leq \frac{l}{2} . \tag{4.86}$$

Die spezielle Lösung für $\tau(x)$ lautet:

$$\tau = \frac{1}{\omega \cdot \cos \omega \cdot \left(\frac{l}{2} - x_p\right)} \cdot \left[\tau_f \cdot \omega \cdot \cos \omega \cdot \left(\frac{l}{2} - x\right) + Q \cdot \sin \omega \cdot (x - x_p) \right] \tag{4.87}$$

mit

$$Q = \frac{F \cdot G_K}{t_K \cdot b \cdot E_1 \cdot t_1} = \frac{F \cdot G_K}{t_K \cdot b \cdot E_2 \cdot t_2} \quad (4.88)$$

und

$$\omega^2 = \frac{G_K}{t_K} \cdot b \cdot \left[\frac{1}{E_1 \cdot A_1} + \frac{1}{E_2 \cdot A_2} \right] \quad (4.89)$$

Die maximale Kraft F_{\max} ergibt sich zu

$$F_{\max} = -t_K \cdot b \cdot E_1 \cdot t_1 \cdot \frac{\tau_f}{G_K} \cdot \omega \cdot \left(1 + \frac{-\omega^2}{\omega^2} \right) \cdot \sin \omega \cdot \left(\frac{l}{2} - x_p \right) . \quad (4.90)$$

Für die nachfolgende Betrachtung der Schubspannungen entlang der Klebstoffuge wurden die selben Parameter wie unter Abschnitt 2. 2. 2 gewählt.

In Abb. 4.27 sind die Schubspannungsverläufe von Zug-Druck- und Zug-Zug-Körpern abgebildet. Bei den ausgezogenen Linien handelt es sich um Verbundspannungsverläufe unter Berücksichtigung eines bilinearen Verbundansatzes mit Entfestigung. Um diese Verläufe mit jenen aus Abschnitt 2. 2. 1. 1 und Abschnitt 2. 2. 1. 2 gegenüberstellen zu können ist auch für diese die Einhaltung der Bedingungen von Glg. (4.85) für beide Krafteinleitungsvarianten Voraussetzung.

An beiden Verläufen ist der theoretisch vorhersagbare Verlauf gut erkennbar. Die Schubspannungsspitzen liegen deutlich unter jenen mit einem linear-elastischen Verbundansatz.

Ebenfalls liegen die Spannungsspitzen unter den durchschnittlichen Schubfestigkeiten von warm (20 bis 30 N/mm²) oder kalt (18 bis 25 N/mm²) abbindenden Klebstoffen nach Klein [27] für die gewählten Parameter. Die gleichmäßig verteilte Schubspannung errechnet sich aus Glg. (4.1) und liegt etwas unter jener des Holzes (GL 24h).

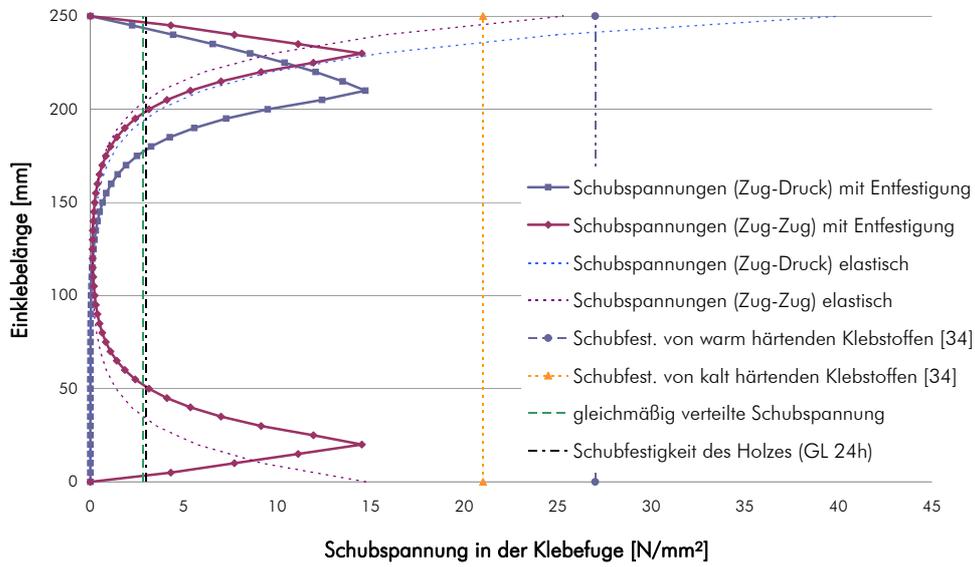


Abb. 4.27 Schubspannungsverlauf in der Klebefuge für einen bilinearen Verbundansatz mit Entfestigung

2. 3. 2 Numerische Lösungen der Verbundspannungsansätze

Für die nachfolgend dargestellten Verbundspannungsansätze ist eine geschlossene Lösung im Allgemeinen nicht mehr möglich bzw. zu aufwändig. Um dennoch zu Aussagen zu gelangen können numerische Verfahren angewendet werden.

Pörtner gibt in seiner Dissertation [14] ein Flussdiagramm an, dass die numerische Lösung beliebiger Verbundspannungsansätze für eingeklebte Gewindestangen ermöglicht die, wie noch gezeigt wird, dem bereits hergeleiteten Formelaufbau dienen. Damit ist die iterative Lösungen für Verschiebungs-, Spannungs-, und Kraftverteilungen von Bruch- und auch Vorbruchzuständen bei beliebigen Verbundlängen möglich.

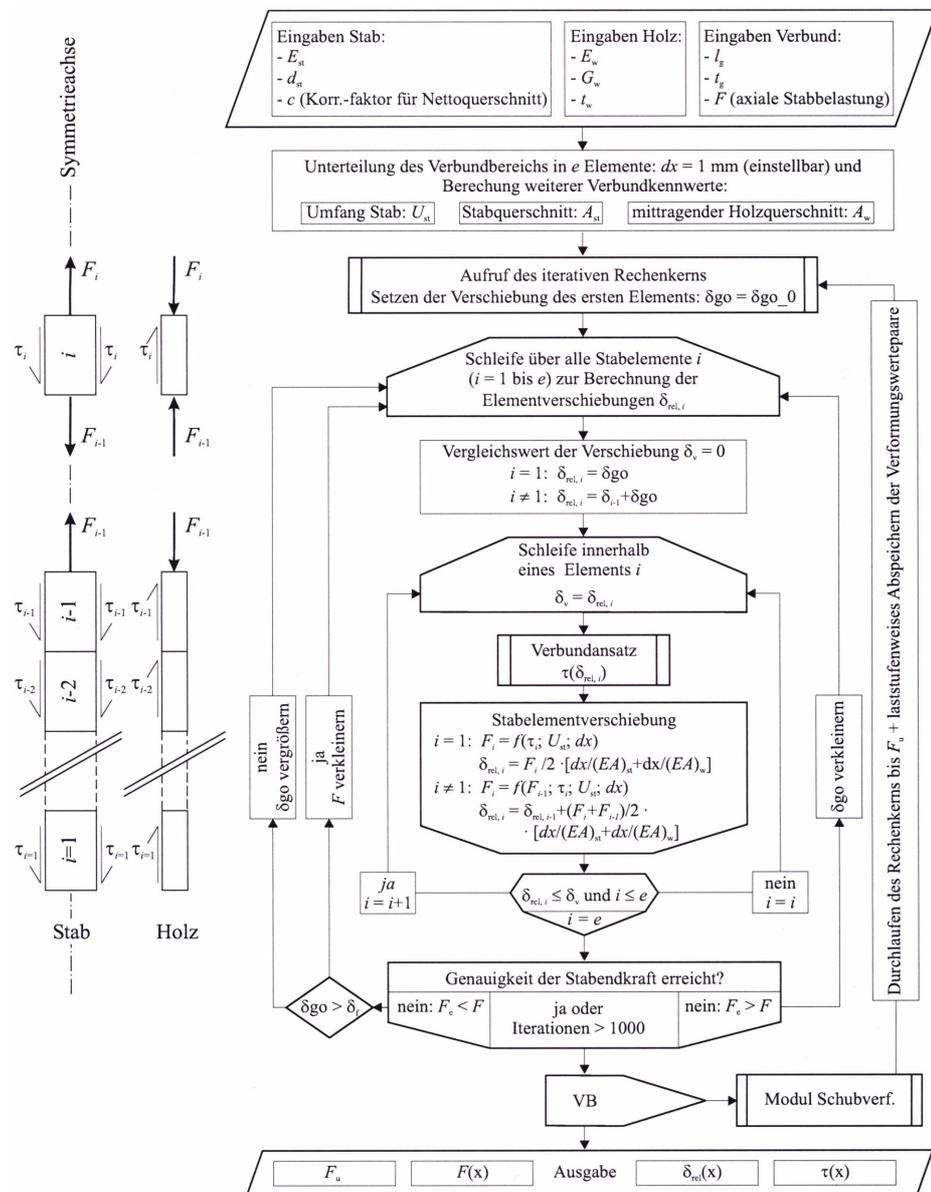


Abb. 4.28 Flussdiagramm zum Rechenalgorithmus des Programms von Pörtner [14]

2. 3. 2. 1 Bilinearer Ansatz für Zug-Zug-Körper für den allgemeinen Fall

Bei unterschiedlichen Dehnsteifigkeiten der Fügepartner eines Zug-Zug-Körpers ist beim bilinearen Ansatz ein erheblich größerer analytischer Aufwand von Nöten als für den unter Abschnitt 2. 3. 1. 3 beschriebenen Fall ($E_1 \cdot t_1 = E_2 \cdot t_2$). Der Grund hierfür liegt in der nicht nutzbaren Symmetriebedingung der Schubspannungsverteilung, wie beim Lösungsweg für gleiche Dehnsteifigkeiten der Fügeteile. Infolgedessen tritt eine unterschiedlich starke Verschiebung der Bereichsgrenzen rechts und links der Stoßmitte auf (siehe Abb. 4.29).

Die maximale Schubspannung (τ_{max}) tritt jeweils am Übergang von Bereich I zu Bereich II auf. Der Abstand x_{p1} und x_{p2} wird vom Übergang der beiden Bereiche (I) mit linear-elastischen Verhalten aus gezählt.

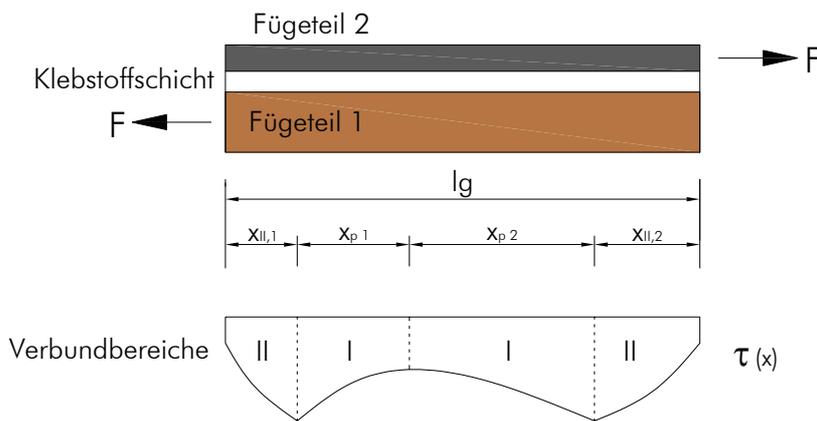


Abb. 4.29 Verbundspannungsverlauf für einen Zug-Zug-Körper

2. 3. 2. 2 Elastisch-plastischer Ansatz

Bei diesem Ansatz wird die Entfestigung des Klebstoffes durch ein Plastifizierungsplateau abgebildet. Somit teilt sich der Verlauf der Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehung in zwei Abschnitte auf.

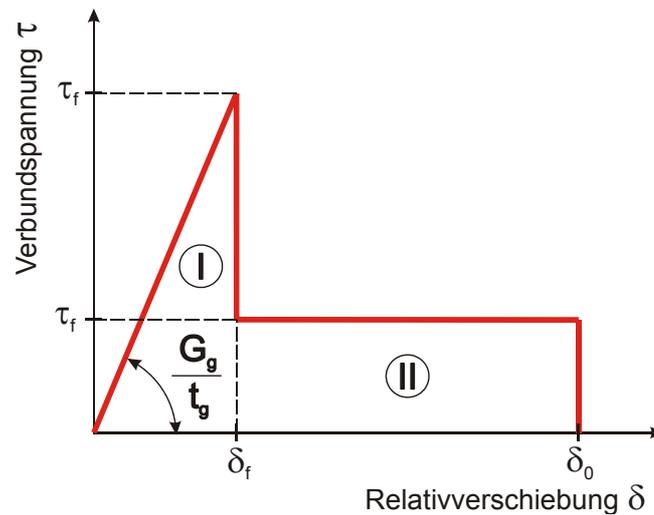


Abb. 4.30 elastisch-plastische Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehung

Diese sind

- Verbundbereich I: Zone mit linear-elastischem Verbundverhalten

$$\delta_{rel} < \delta_f$$
- Verbundbereich II: Zone mit konstantem entfestigenden Verbundverhalten

$$\delta_f \leq \delta_{rel} < \delta_0$$

2. 3. 2. 3 Trilinearer Ansatz mit Entfestigung

Der trilineare Ansatz erlaubt eine recht detaillierte Abbildung des realen Klebstoffverhaltens. Als Nachteil muss jedoch die Formulierung mit drei linearen Teilbereichen mit den entsprechenden Parametern und Formulierungen der Übergangsbereiche hingenommen werden.

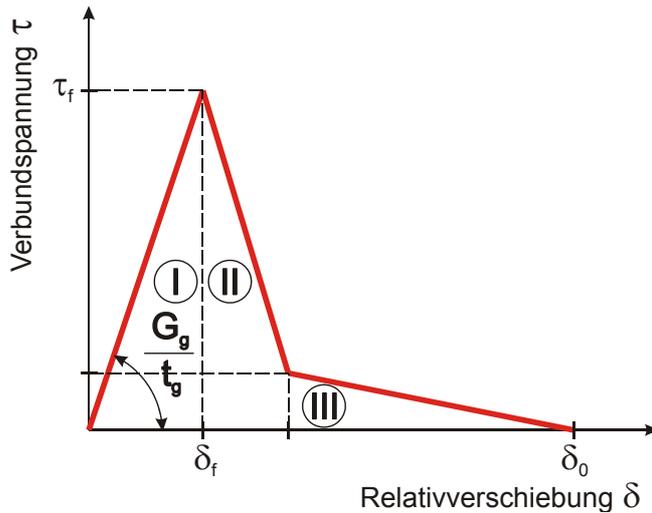


Abb. 4.31 trilineare Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehung mit Entfestigung

2. 3. 2. 4 Exponentieller Ansatz mit Entfestigung

Wie aus Versuchen an Klebstoffproben im Zug-Scherversuch bekannt ist, bildet dieser Verbundspannungs-Verschiebungs-Ansatz das Klebstoffverhalten unter reiner Schubbeanspruchung am realistischsten ab.

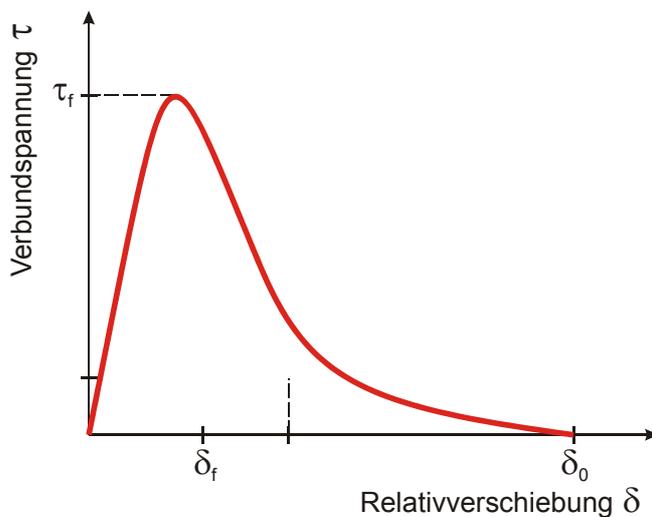


Abb. 4.32 exponentielle Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehung mit Entfestigung

3 Weitere Rechenmodelle für Klebeverbindungen

[14]; [26]; [35]; [36]; [45]

Die folgenden Abschnitte geben einen Überblick über weitere mögliche Betrachtungsweisen und Rechenmodelle für Klebeverbindungen.

3.1 Rechenmodell für den rotationssymmetrischen Klebeverbund

Nachfolgend wird kurz auf den rotationssymmetrischen Klebeverbund eingegangen.

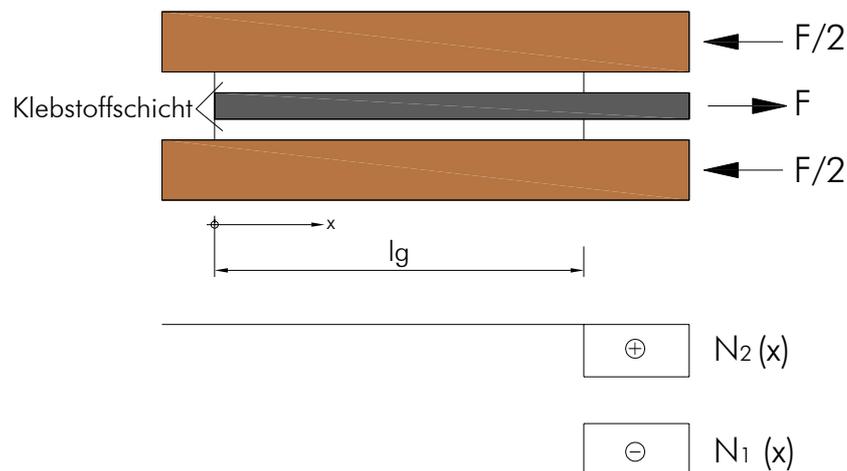


Abb. 4.33 rotationssymmetrischer Zug-Druck-Körpers

Dies ist aufgrund der Tatsache möglich, weil in den Herleitungen und Gleichungen des Abschnitts 2 für den flächenhaften Klebeverbund lediglich der Ausdruck b durch $\pi \cdot d$ ersetzt werden muss, um die entsprechenden Gleichungen für rotationssymmetrische Klebeverbindungen zu erhalten.

Exemplarisch wird nun die Verbundspannung für den unter Abb. 4.33 dargestellten Zug-Druck-Körper angeschrieben (vergleiche mit Glg. (4.39))

$$\tau(x) = \frac{F \cdot \omega}{\pi \cdot d} \cdot \frac{\cosh(\omega \cdot x)}{\sinh(\omega \cdot l_g)} \quad (4.91)$$

3.2 Erweiterte Rechenmodelle für den Klebeverbund

Im folgenden Abschnitt werden „verfeinerte“ Rechenmodelle für den Klebeverbund angegeben, die basierend auf der „Volkersen-Theorie“ einzelne Grundannahmen verallgemeinern und damit eine realitätsnähere Betrachtung erlauben.

3.2.1 Spannungsverteilung nach Goland und Reissner

Goland und Reissner [45] berücksichtigen außer dem Kräftegleichgewicht in Beanspruchungsrichtung auch jenes senkrecht dazu, sowie die, in den Fügeteilen auftretenden Biegemomente aufgrund der exzentrischen Krafteinleitung. Durch diese Vorgangsweise kommt die Spannungsberechnung den Verhältnissen der Realität näher als jene nach Volkersen, da in vielen Fällen Normalkräfte (Schälspannungen), welche durch Biegemomente verursacht werden, den Bruch der Klebstoffschicht einleiten.

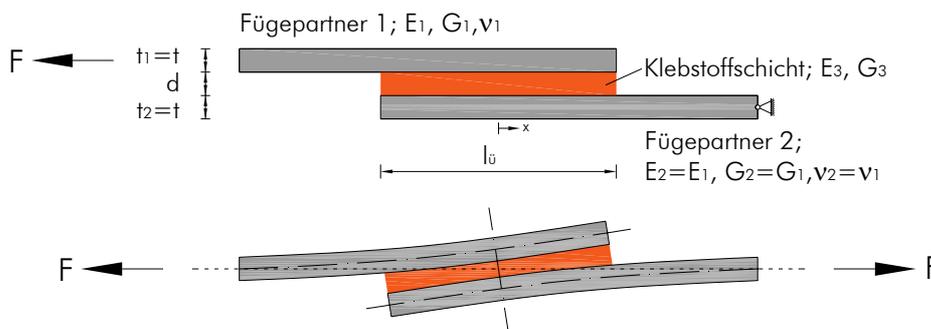


Abb. 4.34 einschnittige Überlappungsklebung Goland und Reissner Annahmen

Die in Abb. 4.34 dargestellten Werkstoffparameter fanden in den Berechnungen von Goland und Reissner Berücksichtigung. Es ist zu erkennen, dass bei diesem Berechnungsansatz den Fügeteilen Schubmodule und Querdehnzahlen zugewiesen wurden. Die Klebstoffschicht wird im Gegensatz zu der „Volkersen-Theorie“ zusätzlich durch einen E-Modul beschrieben. Die Berücksichtigung dieser Werkstoffeigenschaften in Kombination mit der Exzentrizität der Krafteinleitung führt zu Schälspannungen in der Klebstoffschicht und entsprechenden Verformungen der Fügeteile.

Um somit die Exzentrizität der Einleitung der Schubspannung (Abb. 4.34 unteres Bild) im Berechnungsansatz berücksichtigen zu können führten Goland und Reissner einen Faktor k in ihren Ableitungen ein. Dieser Biegemomentenfaktor k bezieht die Biegemomente in den Fügeteilen (M_0) auf die angreifende Kraft in Längsrichtung.

$$M_0 = \frac{k \cdot F \cdot d}{2} \quad (4.92)$$

$$\tau_{B, \max} = \tau_B \cdot \left[\frac{1 + 3 \cdot k}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot G_3 \cdot l_u^2}{E_{1,2} \cdot s \cdot d}} \cdot \coth \sqrt{\frac{2 \cdot G_3 \cdot l_u^2}{E_{1,2} \cdot s \cdot d}} + \frac{3}{4} \cdot (1 - k) \right] \quad (4.93)$$

- τ_B mittlere Klebefestigkeit in N/mm²
- k Biegemomentenfaktor [-]
- s Dicke der Fügeteile in mm
- d Dicke der Klebstoffschicht in mm

Tritt keine Verformung des Fügeteils ein, wird der Faktor $k = 1$ und die Gleichung nimmt eine der „Volkersen-Gleichung“ ähnliche Form an. Durch eine Steigerung der Biegebeanspruchung geht der Wert k gegen den Grenzwert Null. Abb. 4.35 stellt den Einfluss des Biegemomentenfaktors k auf die maximal erreichbare Schubspannung in der Klebefuge dar. Es wird daraus ersichtlich, dass mit einer Zunahme der Fügeteilverformung (Abnahme von k) die Schubspannungsspitzen an den Überlappungsenden abnehmen. Goland und Reissner untersuchten in ihren Forschungsarbeiten diesen Einfluss anhand von biegestarren und -weichen Klebstoffschichten.

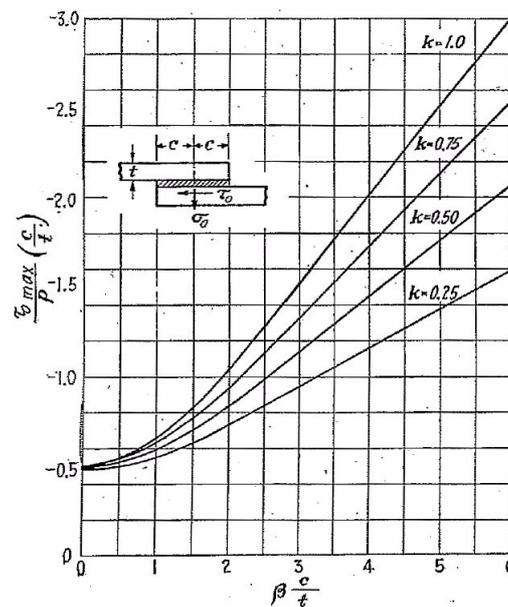


Abb. 4.35 maximale Schubspannung in der Klebefuge in Abhängigkeit des Biegemomentenfaktors k für einen biegeweichen Klebstoff [45]

Aus Abb. 4.36 geht hervor, dass sich an den Überlappungsenden höhere Werte für die Maximalspannung ergeben als nach der „Volkersen-Theorie“.

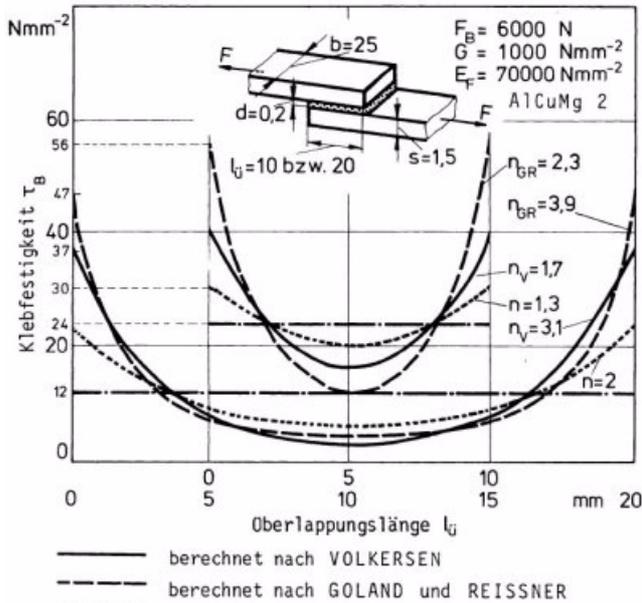


Abb. 4.36 Vergleich unterschiedlicher Ansätze zur Berechnung der Spannungsverteilung in der Klebefuge [26]

Eine detaillierte Herleitung der Berechnungsansätze und eine dazugehörige Erläuterung ist [45] zu entnehmen.

3. 2. 2 Spannungsverteilung nach Hart-Smith

Hart-Smith [36] erweitert den Ansatz von Goland und Reissner bei der Einbeziehung der Randbedingungen, indem er den Einfluss der Klebstoffschicht auf die Fügeteilbiegung mit einbezieht. Weiters berücksichtigt Hart-Smith in seiner Arbeit die Anisotropie unterschiedlicher Fügeteile (faserverstärkte Verbundwerkstoffe für den Flugzeugbau) durch entsprechende Korrekturfaktoren im Berechnungsansatz.

Der Berechnungsvorgang für eine einschnittige Überlappungsklebung mit den Annahmen nach Hart-Smith wird nun folgend kurz erläutert. Die mathematischen Zusammenhänge können [36] entnommen werden.

Hart-Smith unterteilt in seinen Berechnungen die unsymmetrische Überlappungsklebung in vier Bereiche (Abb. 4.37) und geht von Fügepartnern mit dem selben Geometrien und Materialkennwerten aus. Um die Gültigkeit seiner Betrachtungen auch für faserverstärkte Verbundwerkstoffe gewährleisten zu können führte Hart-Smith einen Faktor k_B ein, der es ermöglicht die Dehn- getrennt von der Biegesteifigkeit zu berücksichtigen.

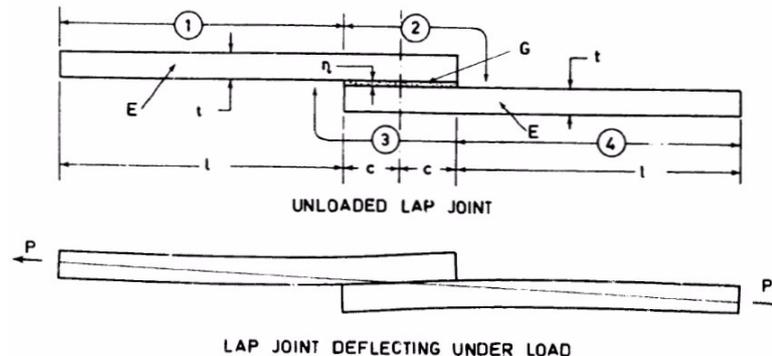


Abb. 4.37 einschnittige Überlappungsklebung mit Einteilung in vier Bereiche nach Hart-Smith und Verformung unter Last [36]

Hart-Smith erhält in seiner Arbeit nach mehreren Rechenschritten eine allgemeine Lösung der Differentialgleichung, welche Glg. (4.22) ähnelt. Die beiden Gleichungen unterscheiden sich nur durch den letzten Term, der aus der Berücksichtigung der Momentenbeanspruchung resultiert. Zum Abschluss seiner Berechnungen erhält Hart-Smith folgende Gleichung für die maximale Schubspannung,

$$\tau_{\max} = \tau_{\text{av}} + \tau_{\text{av}} \cdot \left[1 + \frac{3 \cdot k \cdot (1 - \nu^2)}{k_B} \cdot \left(1 + \frac{\eta}{t} \right) \right] \cdot \left[\frac{\lambda^2}{4 \cdot \lambda'^2} \right] \cdot \left[\frac{2 \cdot \lambda' \cdot c}{\tanh(2 \cdot \lambda' \cdot c)} - 1 \right] \quad (4.94)$$

- τ_{av} mittlere Schubspannung in N/mm²
- k_B Faktor für getrennte Berücksichtigung von Dehn- und Biegesteifigkeit [-]
- t Dicke der Fügeteile in mm
- η Dicke der Klebstoffschicht in mm
- λ Verhältnis zwischen Schub- (in der Klebeschicht) und E-Modul (im Fügeteil) [-]
- λ' Faktor für getrennte Berücksichtigung von Dehn- und Biegesteifigkeit bei faserverstärkten Verbundwerkstoffen [-]
- c halbe Überlappungslänge in mm

aus der sich für isotrope Fügeteile die Lösung nach Goland und Reissner (Glg. (4.93)) ergibt. Die Variable λ stellt in Glg. (4.94) ein Verhältnis zwischen Schub- (in der Klebeschicht) und E-Modul (im Fügeteil) dar und λ' wird für die getrennte Betrachtung von Dehnsteifigkeit und Biegesteifigkeit bei faserverstärkte Verbundwerkstoffe eingeführt.

3. 2. 3 Spannungverteilung nach Braig

[26]

Braig nahm in seiner Forschungsarbeit eine Modifizierung des Ansatzes zur Bestimmung des Exzentrizitätsfaktors vor. Dabei wird der Einfluss der Klebeschichtgleitung und der Schubspannungsverteilung bei nichtlinearem Verhalten des Klebstoffes berücksichtigt. Braig ermittelte aus der Beanspruchung zum Zeitpunkt des Bruchs des Klebstoffes die Vergleichsspannungen anhand der Normalspannungs-, Schubspannungs- und Gestaltänderungs-Hypothese. Dabei ging er von experimentell festgestellten Bruchwerten aus.

Aus den Untersuchungsergebnissen wird ersichtlich, dass es zu höheren Gleitungen kommt, wenn man die Überlappungslänge bei nichtlinearen Spannungs-Verformungsverhalten erhöht. Weiters erkannte Braig, dass das Erreichen einer klebstoffspezifischen Hauptspannung zum Auslösen des Bruches führt.

3. 2. 4 Spannungverteilung nach Glahn

[26]

Glahn untersuchte in seiner Arbeit die Einflüsse der Viskoelastizität auf den Klebeverbund durch zwei unterschiedliche Näherungsverfahren. Beiden Verfahren liegt eine Reduktion der Spannungen in der Klebstoffschicht infolge der Viskoelastizität zugrunde. Der Abnahme der Spannungen steht dabei ein Anwachsen der Schubverformungen im Klebstoff gegenüber.

3. 2. 5 Spannungverteilung nach Hahn

[26]

Hahn stellte ein Berechnungsverfahren vor, welches eine Abschätzung der maximalen Fügeteilbeanspruchung ermöglicht. Dabei wurde eine spannungs- und verformungsbezogene Betrachtungsweise zugrundegelegt. Diese Betrachtungsweise hat den Vorteil, dass die Spannungen in den Fügeteilen und im Klebstoff getrennt ermittelbar und mit den zulässigen Werten je Werkstoff vergleichbar sind. Eine grundlegende Voraussetzung dieses Verfahrens ist die Beschränkung der zulässigen Beanspruchungen auf die werkstoffspezifischen Eigenschaften der Fügeteile und der Klebstoffschicht.

3. 2. 6 Spannungverteilung nach Roberts

[26]

Roberts geht in seinen Untersuchungen von Fügeteilen aus, die das selbe Verhalten wie Biegebalken aufweisen und von einer vernachlässigbar geringen Klebstoffschichtdicke haben. Dabei wird Homogenität und Isotropie der Fügeteile und der Klebstoffschicht vorausgesetzt. Eine Besonderheit des Berechnungsverfahrens nach Roberts ist die Möglichkeit zur Berücksichtigung unterschiedlicher Geometrieformen für das Klebefugende. So kann ein Wulst, welcher zum Beispiel durch austretenden Klebstoff entsteht rechnerisch berücksichtigt werden.

Weitere Untersuchungen und Ansätze zur Berechnung der Spannungsverteilung in einer Klebeschicht unterschiedlicher Autoren können [26] entnommen werden.

4 Bruchmechanische Ansätze

[14]; [33]; [34]

Die bruchmechanischen Grundlagen und die Herleitung der linear-elastischen Bruchmechanik im folgenden Abschnitt sind den Arbeiten von Gustafsson [34] und Pörtner [14] entnommen und werden nachfolgend in kompakter Form dargestellt.

4.1 Allgemeines

Bei den nun folgenden Betrachtungen wird vom Auftreten einer „reinen“ Schubspannungsbeanspruchung in der Klebeschicht ausgegangen. Um die Klebstoffschicht einer Spannungsanalyse unterziehen zu können ist eine Modellierung der selbigen auf drei unterschiedliche Arten möglich. Diese kann entweder

- als Kontaktfläche ohne eine Dicke, wobei die Eigenschaften nur durch die Festigkeit oder die Bruchenergie beschrieben werden,
- als Schicht, in der die Spannungen in der Dickenrichtung konstant angenommen werden oder
- als ein Volumenelement, bei dem keine Einschränkungen bezüglich Spannungsverteilung und Belastung besteht

untersucht werden.

Aus unterschiedlichen Gründen ist die Modellierung der Klebstoffschicht als Kontaktfläche oder Volumenelement für weitere Betrachtungen in diesem Abschnitt nicht zielführend, weshalb die Klebefuge als Schicht mit konstanten Spannungen in Dickenrichtung angenommen wird.

Somit ergibt sich für eine Klebstoffschicht unter „reiner“ Schubbeanspruchung ein Verbundspannungs-Verschiebungs-Ansatz (Abb. 4.38) mit folgenden Parametern

- Verbundspannungsspitze τ_f ,
- zugehörige Verschiebung δ_f ,
- maximal ertragbare Verschiebung δ_0 und
- Bruchenergie G_f .

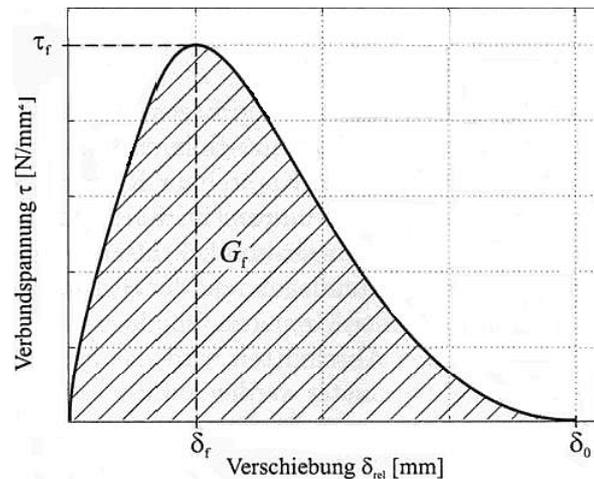


Abb. 4.38 Verbundspannungs-Verschiebungs-Ansatz mit den Verbundansatzparametern τ_f , δ_f , δ_0 und G_f [14]

4.2 Bruchmechanische Grundlagen

Ein Bruchversagen ist dadurch gekennzeichnet, dass sich Körper oder Verbunde in zwei oder mehrere Bruchstücke trennen. Die dabei neu entstehenden Oberflächen werden allgemein als Bruchflächen bezeichnet. Bindungskräfte im Körper oder entlang eines Verbundes leisten bei der Trennung der Oberflächen eine negative materialspezifische Arbeit. Aus Versuchen ist bekannt, dass für die Bildung von Bruchflächen hauptsächlich zwei Bruchformen verantwortlich sind.

Die Normalflächige wird dabei von Hauptnormalspannungen hervorgerufen, wo hingegen der scherflächige Bruch durch Schubspannungen, die einen kritischen Wert erreichen, ausgelöst wird. Je nach Spannungszustand und Materialverhalten sind verschiedenste Mischformen möglich.

Das Risswachstum bei einem Bruchvorgang steht immer in Verbindung mit einer Rissentwicklung. Durch das Ende der Rissausweitung oder durch ein totales Bruchversagen des Verbundes ist dieser abgeschlossen. Zur Beschreibung dieses Vorgangs eignen sich die Bindungskräfte und deren verrichtete Arbeit bei der Entstehung einer neuen Bruchoberfläche. Somit ist die Bruchenergie G_f einer Klebeverbindung als jene Energie definiert,

„...die notwendig ist, um eine sich im Verbund befindliche Oberfläche vom unbelasteten in den komplett getrennten Zustand zu überführen“. [14]

Für den Fall der reinen Schubbeanspruchung lautet die Gleichung

$$G_f = \int_0^{\delta_0} \tau \, d\delta \quad (4.95)$$

G_f Bruchenergie in N/mm
 τ Schubspannung in N/mm²
 $d\delta$ Bruchverschiebung in mm

In Abb. 4.38 entspricht die Fläche unter der Kurve des Verbundansatzes der Bruchenergie G_f . Alternativ ist diese durch Versuche bestimmbar, wobei die verrichtete Arbeit der äußeren Last ermittelt werden kann.

4. 2. 1 Linear-elastische Bruchmechanik

Die linear-elastische Bruchmechanik (LEBM) setzt für das mechanische Verhalten eines rissbehafteten Körpers, in seiner Gesamtheit linear elastisches Verhalten voraus. Als rissbehaftet werden hier angenommene, hypothetische Risse sehr kleiner Größe bezeichnet. Diese entsprechen dem im Material immer vorhandenen Mikrorissen oder Defekten. Aus makroskopischer Sicht müssen dazu nichtlineare Vorgänge vernachlässigbar sein. Aus diesem Grund eignet sich die lineare Bruchmechanik vorallem zur Abbildung des Sprödbruches. Um die Anwendbarkeit der linearen Bruchmechanik gewährleisten zu können, müssen die Prozesszonen (Bereich um eine Rissfront) im Vergleich zu allen anderen, den Körper beschreibenden Abmessungen vernachlässigbar klein sein.

Die Festigkeit bzw. das Versagen eines Materials ist häufig, in Abhängigkeit der Problemstellung durch eine Fließ- oder Bruchgrenze gekennzeichnet. Die drastische Änderung des Materialverhaltens ist bei beiden Grenzen stark ausgeprägt. Wird bei duktilem Verhalten die Fließgrenze überschritten, treten plastische Deformationen auf. Ein Erreichen der Bruchgrenze ist in diesem Fall erst nach großen inelastischen Deformationen gegeben. Sprödes Bruchverhalten zeichnet sich im Gegensatz dazu dadurch aus, dass vor dem Bruchversagen keine bemerkbare inelastische Deformation auftritt.

4. 2. 2 Berechnung der Verbundbruchkraft

Die LEBM setzt voraus, dass durch eine fortschreitende Risszone konstanter Gestalt und Größe der Bruch eintritt. Die Dimension dieser Risszone muss im Gegensatz zu der Länge der Verbundzone klein sein.

Die folgenden Betrachtungen und die dazugehörigen Gleichungen wurden für einen eingeklebten Gewindestab hergeleitet und dargestellt.

Schreitet ein Riss der Länge a um da fort, wird genau jene Energie dissipiert, die benötigt wird um eine Fläche $\pi \cdot d \cdot da$ vollständig zu Entkoppeln bzw. deren Oberflächen zu trennen. Somit kann die Energie G_c der Bruchenergie G_f gleichgesetzt werden. G_c ist dabei als jene Energiemenge definiert, welche während des Rissfortschritts dissipiert wird.

Angewandt auf einen Zug-Zug-Körper hat ein Fortschreiten des Risses a um da eine Änderung der Nachgiebigkeit C um den Betrag dC zur Folge, d.h. es gilt

$$dC = \frac{da}{E_2 \cdot A_2} - \frac{da}{E_2 \cdot A_2 + E_1 \cdot A_1} \quad (4.96)$$

Die der Glg. (4.96) zugehörigen Änderung der potentiellen Energie dW lautet:

$$dW = -\frac{1}{2} \cdot F^2 \cdot dC \quad (4.97)$$

Eine kritische Größe der angreifenden Kraft F ist erreicht, d.h. die Stabilität des Risses ist nicht mehr gegeben, wenn

$$- dW = G_f \cdot dA = G_f \cdot \pi \cdot d \cdot da \quad (4.98)$$

wird.

Durch das Einführen des Parameters

$$k = \frac{E_2 \cdot A_2}{E_1 \cdot A_1} \leq 1 \quad \text{bzw.} \quad (4.99)$$

$$\bar{k} = \frac{E_1 \cdot A_1}{E_2 \cdot A_2} \leq 1 \quad (4.100)$$

erhält man für den Zug-Zug-Körper aus Glg. (4.96) bis Glg. (4.98) die maximale Traglast des Verbundes F_{\max} zu:

$$\begin{aligned} F_{\max} &= \sqrt{2 \cdot G_f \cdot \pi \cdot d \cdot E_2 \cdot A_2 \cdot (1 + k)} = \\ &= \sqrt{2 \cdot G_f \cdot \pi \cdot d \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot (1 + \bar{k})} \end{aligned} \quad (4.101)$$

Die maximale Traglast des Verbundes F_{\max} für einen Zug-Druck-Körper ergibt sich zu:

$$F_{\max} = \sqrt{\frac{2 \cdot G_f \cdot \pi \cdot d \cdot E_2 \cdot A_2}{(1+k)}} = \sqrt{\frac{2 \cdot G_f \cdot \pi \cdot d \cdot E_1 \cdot A_1}{(1+\bar{k})}} \quad (4.102)$$

Aus Glg. (4.101) und Glg. (4.102) wird ersichtlich, dass die maximalen Traglasten der Verbunde von den Dehnsteifigkeiten der Fügepartner und der Bruchenergie abhängen, die Verbundlänge der Klebeverbindung jedoch keinen Einfluss besitzt. Vergleicht man nun Glg. (4.84) mit Glg. (4.102) erkennt man, dass die maximalen Kräfte, welche mittels unterschiedlicher Verbundansätze für die selbe Bruchenergie ermittelt wurden, für große Verbundlängen ident mit jenen nach der LEBM sind.

Für einen einfachen Überlappungsstoß (Breite b , Fügepartdicken t_1 und t_2 , Elastizitätsmoduln E_1 und E_2) mit beliebiger Verbundansatzfunktion lässt sich Glg. (4.102) bezogen auf die ideal plastisch aufnehmbare Kraft wie folgt darstellen:

$$\frac{F_{\max}}{\tau_f \cdot b \cdot l_g} = \sqrt{\frac{G_f \cdot E_1 \cdot t_1}{\tau_f^2 \cdot l_g^2} \cdot \frac{2}{(1+k)}} \quad (4.103)$$

Die maximale Verbundtragfähigkeit wird von neun Parametern (E_1 , E_2 , t_1 , t_2 , b , l_g , τ_f und G_f) beeinflusst, welche die Material- und Geometrieigenschaften der Fügepartner definieren und einer den Verlauf eines beliebigen Verbundansatzes beschreibenden Funktion g . Aus Glg. (4.103) lässt sich für den Fall maximaler Verbundlast erkennen, dass eine Darstellung der bezogenen (normierten) Verbundtragfähigkeit eines Klebeverbundes als Funktion mit drei Variablen möglich ist

$$\frac{F_{\max}}{\tau_f \cdot b \cdot l_g} = f\left[\frac{\tau_f^2 \cdot l_g^2}{G_f \cdot E_1 \cdot t_1}, k, g\right] \quad (4.104)$$

Für Klebeverbindungen bei denen das Steifigkeitsverhältnis k der Fügepartner konstant ist und der Verbundansatz g eine gleichbleibende Form besitzt, vereinfacht sich die obige Beziehung wie folgt

$$\frac{F_{\max}}{\tau_f \cdot b \cdot l_g} = f\left[\frac{\tau_f^2 \cdot l_g^2}{G_f \cdot E_1 \cdot t_1}\right] = f[\lambda_s] \quad (4.105)$$

Der Sinn dieser Darstellung liegt in der Möglichkeit, vorliegende Verbundproblematiken alleine über die Größe des Sprödigkeitsgrades λ_s einzuordnen. Die Möglichkeiten werden durch die Grenzen des ideal plastischen (Kurve a) und spröden Verhaltens (Kurve b) beschränkt.

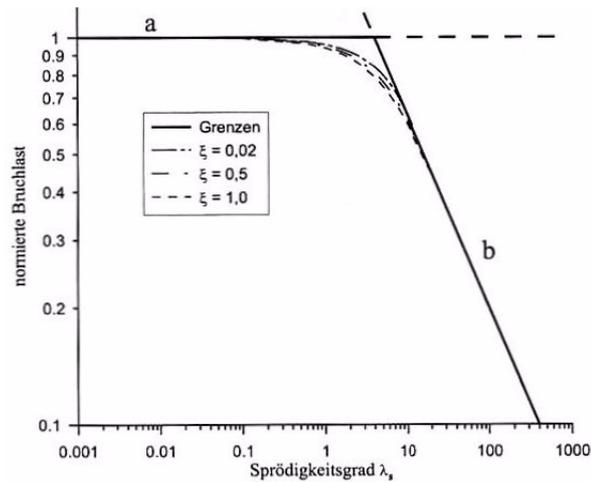


Abb. 4.39 normierte Bruchlastkurven für unterschiedliche Verbundspannungsansätze ξ [14]

In Abb. 4.39 sind normierte Bruchlasten für unterschiedliche, die Verbindung charakterisierende Sprödigkeitsgrade λ_s und Verbundspannungsansätze (Abb. 4.40) in doppelt logarithmischer Form dargestellt. Das Steifigkeitsverhältnis der Fügeiteile wurde dabei mit $k=1$ festgelegt.

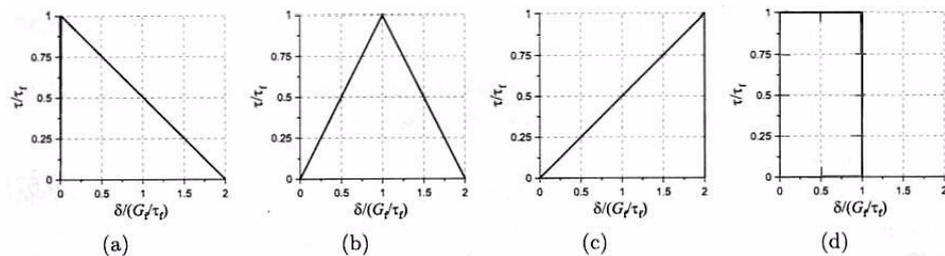


Abb. 4.40 normierte Verbundansätze unterschiedlicher Form: a) $\xi=0,02$; b) $\xi=1,0$; c) linear elastisch; d) ideal plastisch [14]

ξ beschreibt in Abb. 4.40 die normierte Schubverzerrung für $\tau/\tau_f=1$.

Folgende Beziehungen sind erkennbar:

- Für kleine Sprödigkeitsgrade λ_s ist duktiles Verbundverhalten gegeben. Eine Begrenzung der Traglast F_{\max} erfolgt durch eine vollständig plastifizierte Verbindung (Kurve a in Abb. 4.39). Die Verbundfestigkeit wird dabei nur durch die lokale Schubfestigkeit τ_f gesteuert.
- Sprödes Verhalten des Verbundes tritt bei großen Sprödigkeitsgraden λ_s ein. Die maximal übertragbare Kraft F_{\max} ist mit der Kurve b (Abb. 4.39) ident. Der die Verbundfestigkeit bestimmende Parameter ist die Bruchenergie G_f .
- Im Übergangsbereich von duktilen zu sprödem Verhalten hängt die Größe von F_{\max} von den Parametern τ_f und G_f ab.

5 Probleme bei numerischen Berechnungen

Pörtner stellte in seiner Arbeit [14] numerische Untersuchungen an eingeklebten Stäben an, um Aufschlüsse über den räumlichen Kräfteverlauf zu erhalten. Auf die Probleme dieser numerischen Betrachtungsweise wird in diesem Abschnitt kurz eingegangen.

5.1 Spannungsspitzen

Um eine realitätsnahe Abbildung der Verformungen im Krafterleitungsbereich und entlang der Verbundstrecke gewährleisten zu können ist in diesem Bereich ein sehr engmaschiges Netz (Abb. 4.41) gewählt worden. Der Grund hierfür sind die auftretenden Schubspannungsspitzen (z.B. Abb. 4.12) im Einleitungsbereich der Kraft in die Klebeverbundzone.

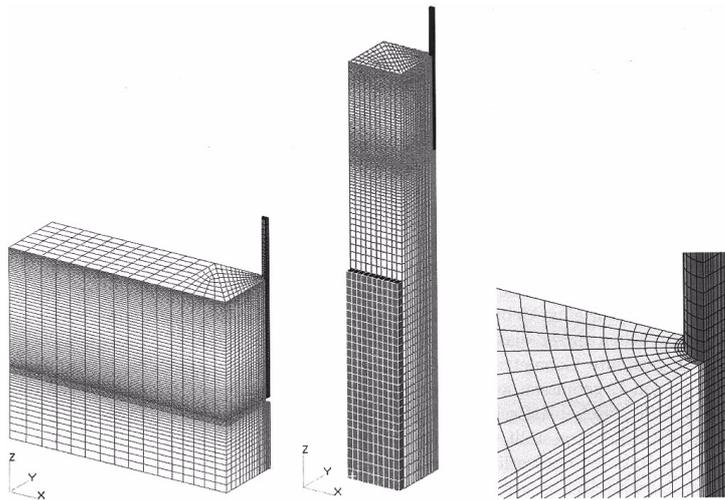


Abb. 4.41 FEM-Modelle der Prüfkörper aus [14] unter Ausnutzung der Symmetrieeigenschaften

5.2 Abbildungsmöglichkeiten

Die Materialien der Fügepartner wurden als dreidimensional orthotrope Werkstoffe modelliert, was ihren mechanischen Eigenschaften entspricht. Die Modellierung der Klebefuge erfolgte dementsprechend als isotroper Werkstoff. Weiters wurden Symmetrieeigenschaften entlang der Stablängsrichtung ausgenutzt, sodass nur mehr die numerische Betrachtung eines Viertels der Gesamtstruktur (Abb. 4.41) von Nöten war.

Das aus Versuchen von Pörtner ermittelte elastisch-plastische Verhalten der Klebefuge, ermöglicht einen Abbau der Spannungsspitzen und eine vergleichmäßigte Verbundspannungsverteilung entlang der Verbundlänge. Dieses Verhalten ist im Rahmen von FEM-Berechnungen nur mittels eines nichtlinearen Materialgesetzes modellierbar.

Des Öfteren ist ein einfaches, elastisch-plastisches Werkstoffmodell ausreichend um die Spannungs-Verzerrungszustände einer Klebstoffschicht ermitteln zu können. Der Grund hierfür liegt in der Möglichkeit, die elastischen Eigenschaften der Klebefuge mittels zwei oder drei Werkstoffdaten (Schub-, E-Modul und Querdehnzahl) beschreiben zu können. Die Festigkeit eines Materials wird in den FEM-Modellen häufig durch die Fließgrenze gekennzeichnet. Das Versagen des Werkstoffes wird, abhängig von der Problemstellung, meist durch die Bruchgrenze definiert.

Um den, bei der Beanspruchung des Verbundes entstehenden mehrachsigen Spannungszustand in einer Klebefuge abbilden zu können, ist eine geeignete Fließbedingung zur Beschreibung der Grenzzustände von Nöten.

Pörtner wählte zur Modellierung der Klebefuge im Rahmen seiner Arbeit zwei unterschiedliche Herangehensweisen:

- Ein linear-elastisches Verhalten, um das prinzipielle Verbundverhalten zu modellieren
- Ein ideal elastisch-plastisches Verhalten um die Darstellbarkeit von Schubspannungsverteilungen entlang der Verbundlänge zu ermöglichen.

Abschließend wird noch auf den Vergleich von linear-elastischer FEM-Berechnung mit Versuchsergebnissen eingegangen. Abb. 4.42 stellt für einen Probekörper mit 100 mm Verbundlänge die Last-Verformungskurven aus Versuchen und einem FEM-Modell gegenüber. Dabei ist eine gute Übereinstimmung der Kurven bis zu rund 50% der Bruchlast gegeben. Im oberen Bereich der Kurven, aus den Versuchen, kommen nichtlineare Effekte in der Klebefuge und im Holz zum Tragen. Diese Verformung des Prüfkörpers kann durch das gewählte Modell nicht mehr realitätsnah abgebildet werden und es stößt somit an seine Grenzen. Um die Verschiebung in der Klebefuge besser modellieren zu können, wäre in weiterer Folge ein nichtlinearer Ansatz zu wählen.

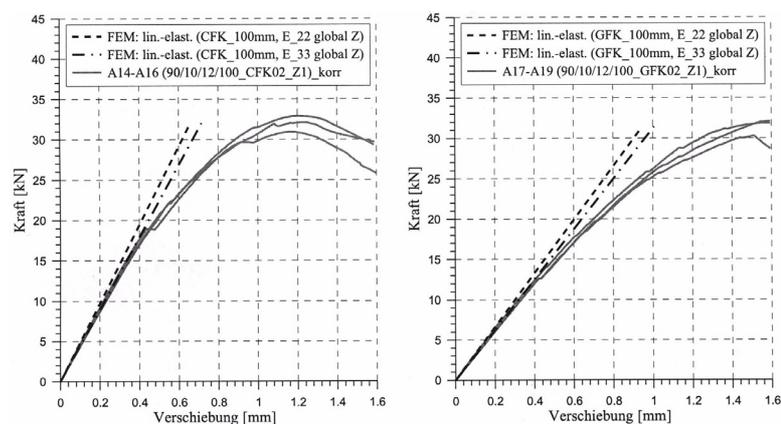


Abb. 4.42 Gegenüberstellung von Versuchsergebnissen und linear-elastischer FEM-Berechnung [14]

6 Einflussparameter auf die Festigkeitseigenschaften von Klebeverbindungen im Holzbau

[3]; [9]; [26]; [37]; [38]

Mechanische Beanspruchungen sind nicht die einzigen, welche bei Klebeverbindungen von Holz zu beachten sind. So spielt z.B. die Temperaturbelastung bei einem Brand ebenso eine wichtige Rolle, wie auch die durch Klimawechsel hervorgerufenen Beanspruchungen der Klebefuge.

Aus diesem Grund werden nun im folgenden Abschnitt die Einflüsse von

- Feuchte,
- Temperatur und
- Zeit

auf die Festigkeitseigenschaften von Klebeverbindungen im Holzbau kurz erläutert.

6.1 Feuchte

6.1.1 Allgemeines

Der Feuchtegehalt im Holz und in der Verklebung ist vom Umgebungsklima abhängig und unterliegt ständigen Änderungen. Abweichend vom Normklima (20°C und 65% rel. Luftfeuchte) sind extreme Klimasituationen für Holzklebeverbindungen möglich. So ist eine relative Luftfeuchte von nur 20% in beheizten Räumen im Winter möglich, wobei die Temperatur auf bis zu 27°C (bei Parkett mit Fussbodenheizung) steigen kann. Im Gegensatz dazu ist im Sommer eine relative Luftfeuchte von 80% möglich. Bei großen Holzquerschnitten (z.B. Brettschichtholz) entsteht ein ungleichmäßiges Feuchteprofil und führt somit zu Zwängungsspannungen.

Weiters können Schubspannungen in den Klebefugen durch Quellen und Schwinden des Holzes entstehen. Diese, durch die Veränderung der Holzfeuchte hervorgerufenen Spannungen können erhebliche Größen erreichen. Auch die Klebstoffschicht nimmt Wasser auf und es kommt somit auch in der Klebefuge zu Quell- und Schwinderscheinungen.

Eine Klebeverbindung gänzlich vor der Wasseraufnahme zu schützen ist nahezu unmöglich, da folgende Mechanismen zu einer Aufnahme von Wasser in der Klebeschicht führen

- Eindiffundieren in die Klebstoffschicht ausgehend von den frei bewitterten Rändern,

- Transport entlang der Füge teil-Klebstoff-Grenzschicht mittels Kapillarwirkung,
- Oberflächendiffusion durch kapillare Wirkung entlang von Rissen (Schwindrisse) und
- Eindiffundieren in die Klebstoffschicht aufgrund von durchlässigen Fügepartnern.

Aus den oben genannten Möglichkeiten zur Wasseraufnahme der Klebstoffschicht stellte Brockmann [3] folgende mögliche Effekte fest

- Plastifizierung des Polymers durch die Wasseraufnahme
- mögliches Ablösen des Klebstoffes vom Substrat aufgrund des Wassers
- Die geschätzte Verminderung der Zeitstandfestigkeit einer Klebeverbindung kann dabei 50 bis 70% gegenüber der Kurzzeitfestigkeit betragen.

6. 1. 2 Versuche

6. 1. 2. 1 Versuchsmaterialien und -methodik

Niemz und Allenspach führten in [37] Versuche zur Bestimmung der Zugscherfestigkeit nach EN 205 an Harnstoffharz, PVA- und 1K-PUR-Klebstoff durch. Auf diese Versuchsergebnisse wird nun folgend eingegangen.

Alle Zugscherversuche nach EN 205 wurden an Probekörpern aus Rotbuche durchgeführt. Deren Verklebung erfolgte nach Erreichen der Gleichgewichtsfeuchte im Normal Klima bei 20°C und 65% rel. Luftfeuchte. Die Prüfkörperherstellung und -behandlung erfolgte gemäß den Angaben der EN 205. Die Holzfeuchtebestimmung erfolgte mittels Darmmethode direkt im Anschluss an die Prüfung.

6. 1. 2. 2 Versuchsergebnisse

Die Autoren ermittelten durch die Versuche die Scherfestigkeit, die Brucharbeit bei Maximalkraft (gibt Auskunft über die Zähigkeit der Verklebung), die Dehnung bei maximaler Kraft und schätzten den Holzbruchanteil ab.

Bei einer Erhöhung der Holzfeuchte wurde aus den Ergebnissen eine deutliche Senkung der Scherfestigkeit ersichtlich, insbesondere bei PVA (Abb. 4.43). Bei dem untersuchten 1K-PUR-Klebstoff zeichnete sich deutlich ein sinkender Holzbruchanteil mit steigender Holzfeuchte ab. Im oberen Feuchtebereich ist ebenfalls ein Sinken der Bruchdehnung und Brucharbeit erkennbar.

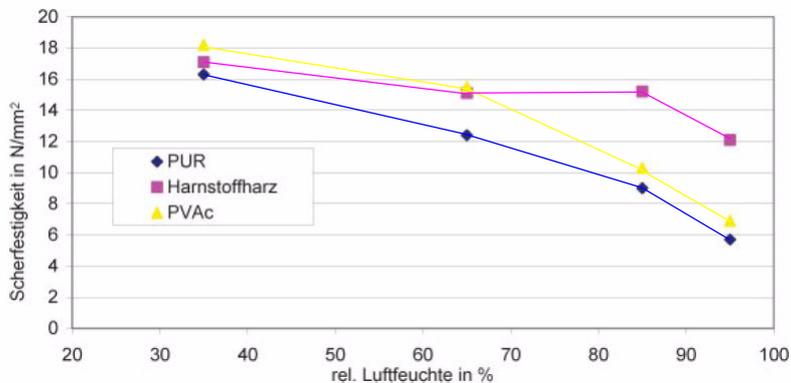


Abb. 4.43 Scherfestigkeit an Versuchskörpern nach EN 205 als Funktion der relativen Luftfeuchte [37]

Eine zunehmende Holzfeuchte bewirkte auch eine Abnahme der Scherfestigkeit des Holzes. Der Anstieg der Scherfestigkeit des verklebten Holzes, bei einer Senkung der rel. Luftfeuchte von 65% auf 35% liegt neben der erhöhten Festigkeit des Holzes in den durch das Schwinden entstehenden Druckspannungen (eine Art Vorspannung der Klebefuge) begründet. Eine Erhöhung des Holzbruchanteils ist aus Abb. 4.44 deutlich erkennbar.

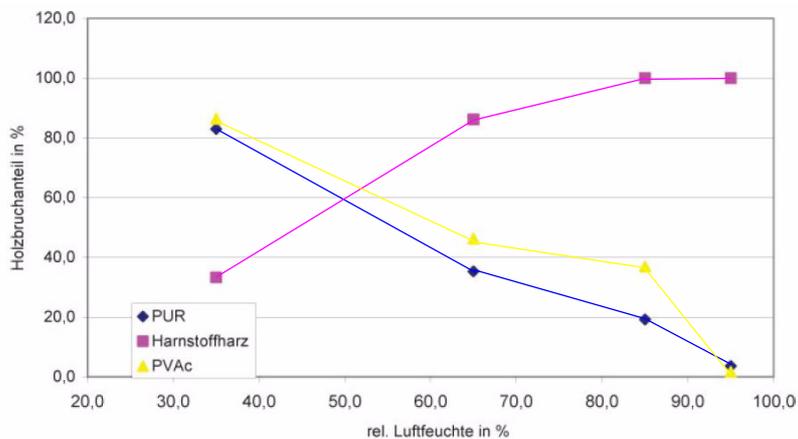


Abb. 4.44 Holzbruchanteil an Versuchskörpern nach EN 205 als Funktion der relativen Luftfeuchte [37]

6. 2 Temperatur

6. 2. 1 Allgemein

Der Einfluss der Temperatur auf verklebte Holzbauteile wurde in unterschiedlichen Arbeiten untersucht und dargestellt. Es konnte ein deutlicher Einfluss auf die Scherfestigkeit bei zunehmender Temperatur festgestellt werden. Die Versuche zeigten weiter, dass deutliche Unterschiede zwischen den Klebstoffsystemen bestehen. Auch innerhalb eines Klebstoffsystems sind zum Teil beträchtliche Unterschiede feststellbar.

Setzt man Klebeverbindungen niedrigen Temperaturen aus, kann es zu spröden Versagen kommen. Dieses Verhalten gilt vor allem für Klebstoffe auf Polymerbasis. Ein bis Heute weitgehend unerforschtes Thema ist das Verhalten von Klebstoffen im Brandfall. Dazu sind noch weitere Forschungsarbeiten erforderlich.

6. 2. 2 Versuche und Ergebnisse

6. 2. 2. 1 Versuchsmaterial und -methodik

Es gelten die selben Angaben wie unter Abschnitt 6. 1. 2. 1 erwähnt. Ergänzend zu diesen ist festzuhalten, dass die Probekörper vor der Prüfung des Einflusses der Temperatur zwei Stunden in einen Trockenschrank (auf die jeweilige Prüftemperatur vorgewärmt) gelegt wurden. Um einer Trocknung der Probekörper entgegen zu wirken, wurden diese bis zu 80°C in luftdicht abgeschlossenen Kunststoffbeuteln gelagert. Somit konnte eine Überlagerung des Einflusses der Holzfeuchte vermieden werden. Die Prüfung zur Ermittlung des Temperatureinflusses auf die Scherfestigkeit erfolgte direkt nach der Entnahme aus dem Klimaschrank im noch heißen Zustand.

6. 2. 2. 2 Versuchsergebnisse

Aus den Versuchen von Niemz und Allenspach ist erkennbar, dass die Scherfestigkeit mit zunehmender Temperatur stark absinkt (Abb. 4.45 und Abb. 4.46). Dieses Verhalten dürfte durch die Erweichung des Klebstoffes begründet sein. Am deutlichsten ist der Abfall der Scherfestigkeit bei dem PVA-Klebstoff auszumachen.

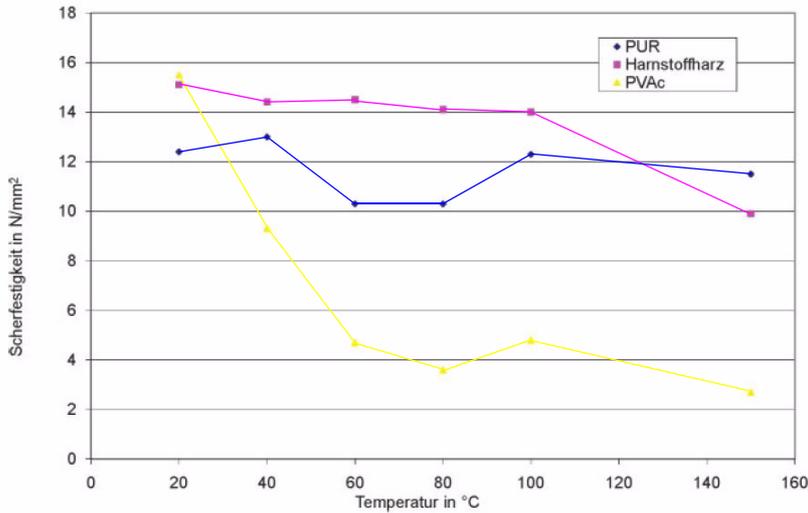


Abb. 4.45 Scherfestigkeit an Versuchskörpern nach EN 205 als Funktion der Temperatur [37]

Nach einem raschen anfänglichen Abfall der Scherfestigkeit stabilisiert sich der PUR-Klebstoff im oberen Temperaturbereich, was möglicherweise auf die Modifikation des Klebstoffes mit Kreide zurückzuführen ist. Die Scherfestigkeit von Harnstoffharz fällt ebenso bei hohen Temperaturen ab.

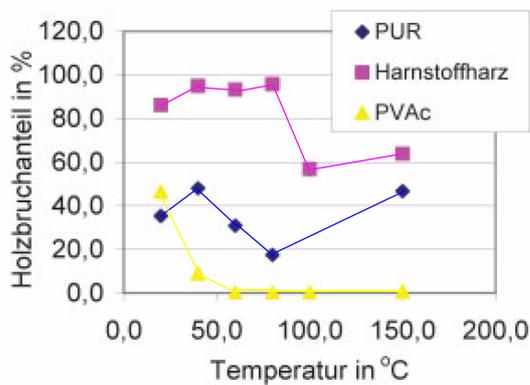


Abb. 4.46 Holzbruchanteil an Versuchskörpern nach EN 205 als Funktion der Temperatur [37]

Bei allen geprüften Klebstoffen kam es bei hohen Temperaturen zu Zersetzungserscheinungen. Dieser nachteilige Effekt ist aus der Heißlagerung von harnstoffharzverleimten Spanplatten bekannt.

6.3 Zeit

Für die Bemessung von Klebeverbindungen ist das Verhalten eines Klebstoffes unter statischen Belastungen über größere Zeiträume von großer Bedeutung. Im Vergleich dazu ist die statische Kurzzeitfestigkeit, welche die Basis entsprechender Prüfverfahren (zügige Belastung der Klebeverbindung bis zum Bruch) darstellt, von geringerer Bedeutsamkeit. Da Klebstoffe ähnliche Eigenschaften aufweisen wie Kunststoffe, ist bei statischer Langzeitbeanspruchung mit dem Auftreten von Kriechvorgängen zu rechnen.

Der Kriechvorgang wird wesentlich von den Einflussgrößen Temperatur, Belastungshöhe und -geschwindigkeit, Füge Teileigenschaften und dem chemischen Aufbau der Klebstoffschicht (Vernetzungsgrad) beeinflusst.

Tritt bei Kriechvorgängen eine Überschreitung der Verformungsmöglichkeit der Klebeschicht ein, führt dies in weiterer Folge zum Bruch der Klebeverbindung.

Es kann grundsätzlich davon ausgegangen werden, dass es zur Abnahme der statischen Festigkeit einer Klebeverbindung unter Scher- bzw. Zugscherbeanspruchung mit der Zunahme der Belastungszeit kommt. Um dieses Verhalten für die Bemessung von Klebeverbindungen berücksichtigen zu können ist die Zeitstandfestigkeit des Klebstoffes nach DIN 53 284 zu ermitteln.

Die statische Langzeitbeanspruchung kann wie folgt unterschieden werden:

- **Zeitstand-Klebefestigkeit $\tau_{B/t}$:** Bei dieser Festigkeit kommt es nach Ablauf einer bestimmten Zeit t zu einer Trennung der Füge Teile. Dabei wird eine ruhende Zugkraft F auf eine Klebefläche A bezogen.

$$\tau_{B/t} = \frac{F}{A} \quad (4.106)$$

- **Dauerstand-Klebefestigkeit τ_{∞} :** Diese Festigkeit resultiert aus der größten ruhenden Zugkraft F , die auf eine Klebefläche A bezogen und ohne Trennung der Füge Teile ertragen werden kann.

$$\tau_{\infty} = \frac{F}{A} \quad (4.107)$$

Schematisch sind diese beiden Festigkeiten in Abb. 4.47 dargestellt.

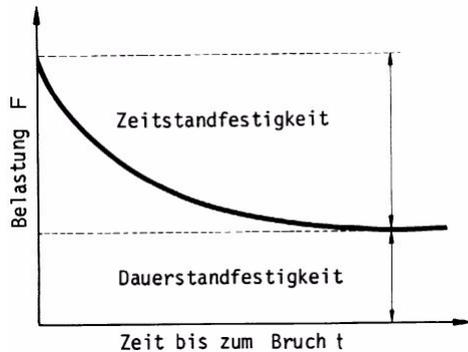


Abb. 4.47 Zeitstand- und Dauerstandfestigkeit in Abhängigkeit der Zeit [26]

Bei reiner mechanischer Beanspruchung kann davon ausgegangen werden, dass die Werte der Dauerstandfestigkeit von Klebstoffen nur etwa 50 bis 70% der statischen Kurzzeitfestigkeit erreichen. Somit ist die Möglichkeit eines Bruches durch eine Zeitstandbelastung bereits bei erheblich geringeren Lasten als bei der statischen Bruchlast bei Kurzzeitbeanspruchung gegeben. Geklebte Konstruktionen weisen daher einen Zusammenhang zwischen der Belastungshöhe und der zu erwartenden Lebensdauer auf. Mit steigender Belastung sinkt die Lebensdauer.

Die Zeitstandfestigkeit hängt neben der mechanischen Belastung noch maßgeblich vom Kriechverlauf, der -geschwindigkeit und den Umgebungseinflüssen ab. Durch diese Einflüsse findet je nach Art und Höhe eine weitere Minderung der Festigkeitswerte statt. Demnach sind Klebstoffe, welche eine verformungsarme Klebeschicht ausbilden, bei hohen geforderten Zeitstand- bzw. Dauerstandfestigkeiten vorzuziehen.

Schlussbetrachtung und Ausblick

Der moderne Ingenieurholzbau benötigt effiziente und leistungsfähige Verbindungsmittel um beim Auftreten großer Lasten konkurrenzfähig zu sein. Die klassischen Verbindungsmittel im konstruktiven Holzbau wie Nägel, Dübel, Schrauben und Bolzen können nur noch in begrenzter Weise die Anforderungen der heutigen Zeit erfüllen. Aus diesem Grund wurden im Rahmen dieser Masterarbeit theoretische Untersuchungen zum mechanischen Verhalten von Klebeverbindungen im Holzbau durchgeführt. Diese Analyse hatte den Zweck eine Grundlage für weiterführende Betrachtungen und Forschungsarbeiten bereitzustellen.

Anschließend an die einführende Betrachtung des Themenbereichs „Kleben und Klebstoffe“, erfolgte in Kapitel 2 eine ausführliche historische Betrachtung der Entwicklungsgeschichte von Verbindungstechniken im Holzbau. Dabei wurde besonderes Augenmerk auf die ingenieurmäßigen Verbindungen gelegt. Den Abschluss dieses Kapitels stellt ein Überblick über Klebetechniken anderer Bauweisen, sowie eine detaillierte Betrachtung der „Hochleistungsverbindungsmittel“ (eingeklebte Gewindestange, Rohrverbinder und eingeklebte Lochbleche) der Zukunft dar.

Kapitel 3 diente der Zusammenfassung und einer vergleichenden Gegenüberstellung der aktuell gültigen Normen für den Themenbereich Klebeverbindungen und Klebstoffprüfungen. Einführend erfolgte eine Kurzfassung der Normenpassagen für eingeklebte Gewindestangen. Auf eine selbige, musste für eingeklebte Lochbleche und Rohrverbinder verzichtet werden, da diese als recht junge Verbindungstechnik anzusehen sind und noch keine Berücksichtigung in den entsprechenden Normen fanden. Einen weiteren Schwerpunkt dieses Kapitels stellte die Analyse der Normung von Holzklebstoffen für tragende Bauteile nach EN 301:2004-10 und EN 302:2004-10 dar. Abschließend erfolgte eine kurze Beschreibung der wichtigsten allgemein gültigen Klebstoffprüfverfahren.

Die Ermittlung des Schubspannungsverlaufes entlang der Klebefuge von Laschenverbindungen bzw. eingeklebten Verbindungsmittel stellte den Hauptteil des vierten Kapitels und der vorliegenden Masterarbeit dar. Nach einer anfänglichen Betrachtung einer Schäftungsverbindung erfolgte eine ausführliche und detaillierte Herleitung der Differentialgleichung des verschieblichen Verbundes („Volkersen-Theorie“). Anhand dieser wur-

den in weiterer Folge unterschiedliche Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehungen angewendet und teils vergleichend gegenübergestellt. Weiters wurde auf die verschiedenen Kraffteinleitungssituationen („pull-pull“, „push-pull“) eingegangen. Eine modifizierte „Volkersen-Gleichungen“ wurde anschließend für eine Parameterstudie verwendet um die unterschiedlichen Einflüsse auf den Spannungsverlauf in einer Klebeverbindung darzustellen. Ein weiterer Abschnitt dieses Kapitel beschäftigte sich mit erweiterten Rechenmodellen für Klebeverbindungen bei denen neben der Schubspannung auch die, durch ausmittigen Kraftangriff bzw. die biegeweichen Klebepartner, auftretenden Schälspannungen berücksichtigt werden. Ebenfalls in diesem Kapitel zu finden sind bruchmechanische Ansätze zur Berechnung von Klebeverbindungen und die auftretenden Probleme bei der Berechnung mit numerischen Methoden. Den Abschluss dieses Kapitels stellt eine Kurzbetrachtung der festigkeitsbeeinflussenden Faktoren (Zeit, Temperatur und Feuchte) dar.

Um in Zukunft eine zielführende Berechnung von Klebeverbindungen (nicht nur im Holzbau) gewährleisten zu können, sind weitere Untersuchungen und Forschungsarbeiten hinsichtlich der Spannungsverteilung entlang der Klebefuge von Nöten. Unter anderem muss die Berücksichtigung von Momentenbeanspruchungen der Klebeverbindungen erfolgen, wie auch jene der festigkeitsbestimmenden Faktoren Zeit, Temperatur und Feuchte. Weiters sollen genaue Modellierbarkeiten für numerische Programme geschaffen werden, um so das Klebeverbindungsverhalten realitätsnah vorhersagen zu können.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die gewonnenen Erkenntnisse dieser Masterarbeit den Schluss zulassen, dass Klebeverbindungen im Holzbau das Potenzial besitzen als Pendant zur Schweißverbindung im Stahlbau zu gelten. Dies liegt darin begründet, dass Klebeverbindungen die Charakteristik von starren sowie kraft- und formschlüssigen Verbindungen aufweisen. Nicht unerwähnt bleiben soll, dass dazu jedoch noch weitere Untersuchungen bzw. Forschungsarbeiten notwendig sind, um eine sichere und zuverlässige, sowie effiziente Berechnung und Planung mit dieser Verbindungstechnik zu ermöglichen.

1 Veröffentlichungen

- [1] HABENICHT, G.:
„Kleben - erfolgreich und fehlerfrei“,
5. überarb. und erg. Auflage, Wiesbaden: Vieweg+Teubner 2008
- [2] MOMBÄCHER, R.:
„Holz-Lexikon, Nachschlagewerk für die Holz- und Forstwirtschaft“
3. völlig neu bearbeitete Auflage, Stuttgart: DRW-Verlag 1988
- [3] BROCKMANN, W.; GEIß, P.L.; KLINGEN, J.; SCHRÖDER, B.:
„Klebtechnik, Klebstoffe, Anwendungen und Verfahren“,
Weinheim: Wiley-VCH Verlag 2005
- [4] SCHICKHOFER, G.:
„Holzbau, Der Roh- und Werkstoff Holz“,
Skriptum an der TU Graz - Version 1.2, Graz: 2005
- [5] SCHICKHOFER, G.:
„Holzbau, Nachweisführungen für Konstruktionen aus Holz“,
Skriptum an der TU Graz - Version 1.2, Graz: 2005
- [6] NEUHAUS, H.:
„Ingenieurholzbau“,
2. vollst. überarb. Auflage, Wiesbaden: Vieweg+Teubner 2009
- [7] KUHWEIDE, P.; WAGNER, G.; WIEGAND, T.:
„Konstruktive Vollholzprodukte, Informationsdienst Holz“,
Holzbau Handbuch, Reihe 4, Teil 2, Folge 3, Düsseldorf: 2000

-
- [8] RADOVIC, B.; CHERET, P.; HEIM, F.:
„Konstruktive Holzwerkstoffe, Informationsdienst Holz“,
Holzbau Handbuch, Reihe 4, Teil 4, Folge 1, Düsseldorf: 2000
- [9] DUNKY, M.; NIEMZ, P.:
„Holzwerkstoffe und Leime“,
Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag 2002
- [10] CIRE, A.; KUHWEIDE, P.; NEUENHAGEN, H.; RUG, W.; TITZE, K.; WALTER, E.:
„100 Jahre Bund Deutscher Zimmermeister“,
1. Auflage, Berlin: Zentralverband des Deutschen Baugewerbes e.V. 2003
- [11] GERNER, M.:
„Entwicklung der Holzverbindungen“,
Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2000
- [12] PECH, A.; HOLLINSKY, K.:
„Dachstühle“,
Wien, New York: Springer Verlag 2005
- [13] FONROBERT, F.; STOY, W.:
„Holz-Nagelbau“,
Berlin: Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn 1960
- [14] PÖRTNER, C.:
„Untersuchungen zum Verbund zwischen eingeklebten stiftförmigen faser-
verstärkten Kunststoffen und Holz“,
Dissertation an der Universität Kassel, Kassel: 2005
- [15] BUCAK, Ö.; HAGL, A.:
„Kleben im Bauwesen - gestern, heute, morgen“,
in: Stahlbau 75, Heft 6 2006
- [16] LADNER, M.; WEDER, C.:
„Geklebte Bewehrung im Stahlbetonbau“,
in: Bericht Nr. 206 der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Versuchs-
anstalt 1981
- [17] SCHLIMMER, M.:
„Berechnung und Auslegung von Klebeverbindungen“,
in: adhäsion - Kleben&Dichten, Zusammenstellung von 05/2004 bis 03/
2005
- [18] SCHREYER, A.:
„Determination of the Capacities of a new Composite Timber-Steel Con-
nection System, the TiSCo“,
Diplomarbeit an der Fachhochschule Wiesbaden, Wiesbaden: 1998
-

- [19] SCHWANER, K.:
„Zukunft Holz - Statusbericht zum aktuellen Stand der Verwendung von Holz und Holzprodukten im Bauwesen und Evaluierung künftiger Entwicklungspotenziale“,
Institut für Holzbau - Hochschule Biberach, Biberach: 2009
- [20] SCHICKHOFER, G.; PIRNBACHER, G.:
„Verbindungstechnik im Ingenieurholzbau“,
in 6. Grazer Holzbau-Fachtagung, holz.bau.forschungs.gmbh; Graz: Verlag der Technischen Universität Graz 2007
- [21] BLAß, H. J.; GÖRLACHER, R.; STECK, G.:
„Bemessung und Baustoffe“,
Step 1 - Holzbauwerke nach Eurocode 5; Düsseldorf: Fachverlag Holz 1995
- [22] LIPPERT, P.:
„Rahmenecken aus Holz mit eingeklebten Gewindestangen“,
Dissertation an der Universität Stuttgart, Stuttgart: 2002
- [23] SCHREYER, A.; BATHON, L. A.; PRION, H. G. L.:
„Determination of the Capacities of a new Composite Timber-Steel Connector System“,
Fachbeitrag aus dem Tagungsband WCTE 2000 – World Conference on Timber Engineering, Whistler: 2000
- [24] BATHON, L. A.; BLETZ, O.:
„In Holz eingeklebte Verbindungsmittel aus Metall“,
Beitrag aus dem Fachmagazin die neue quadriga 2/2008, Wolnzach: 2008
- [25] BLETZ, O.:
„Holz-Beton-Verbundkonstruktionen“,
Präsentation zum Thema Baukonstruktion, MPA Wiesbaden - Abteilung Holz, Wiesbaden: 2009
- [26] HABENICHT, G.:
„Kleben - Grundlagen, Technologien, Anwendungen“,
6. aktualisierte Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer Verlag 2009
- [27] KLEIN, B.:
„Leichtbau - Konstruktion“,
8. überarb. und erw. Auflage, Wiesbaden: Vieweg+Teubner 2009

- [28] VOLKERSEN, O.:
„Die Schubkraftverteilung auf die Verbindungselemente langer Laschenverbindungen“,
Dissertation an der Technischen Hochschule Wien, Wien: 1943
- [29] VOLKERSEN, O.:
„Die Schubkraftverteilung in Leim-, Niet- und Bolzenverbindungen“,
Teil 1 bis 3, Beitrag aus Energie und Technik, 1953
- [30] SCHÜRMAN, H.:
„Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden“,
Berlin, Heidelberg: Springer Verlag 2005
- [31] HOLZENKÄMPFER, P.:
„Ingenieurmodelle des Verbunds geklebter Bewehrung für Betonbauteile“,
Dissertation an der Technischen Universität Braunschweig, Braunschweig:
1994
- [32] OTTOSEN, N. S.; OLSSON, K.:
„Hardening/Softening Plastic Analysis of Adhesive Joint“,
Beitrag aus dem Journal of Engineering Mechanics, 01/1988
- [33] WERNERSSON, H.:
„Fracture Characterization of Wood Adhesive Joints“,
Doctoral Thesis, Division of Structural Mechanics, Lund University, Lund:
1994
- [34] GUSTAFSSON, P.J.; WERNERSSON, H.:
„Modelling, Testing and Strength Analysis of Adhesive Bonds in Pure Shear“,
Department of Structural Mechanics, Lund Institute of Technology, Sweden
- [35] AICHER, S.:
„Structural Adhesive Joints Including Glued In Bolts“,
Beitrag zum Buch Timber Engineering, Chichester: John Wiley & Sons Ltd
2003
- [36] HART-SMITH, L.J.:
„Adhesive-Bonded Single-lap Joints“,
Technical Report for the NASA, Long Beach, California: 1973
- [37] NIEMZ, P.; ALLENSPACH, K.:
„Untersuchungen zum Einfluss von Temperatur und Holzfeuchte auf das
Versagensverhalten von ausgewählten Klebstoffen bei Zugscherbeanspruchung“,
Artikel aus der Fachzeitschrift Bauphysik, Ernst & Sohn: Heft 5 2009

- [38] CUSTODIO, J.; BROUGHTON, J.G.:
„Factors Influencing Bond Performance“,
Article for COST Action E34 - Bonding of wood, 08/2007
- [39] PERTSCHI, O.:
„Zum Gedenken an Otto Graf, universeller Bauforscher in Stuttgart“,
Reden und Aufsätze zur Abschiedsvorlesung von Prof. Dr.-Ing. H.-W. Reinhardt am 4. Juli 2006, Stuttgart 2006
- [40] SCHICKHOFER, G.:
„Brettsper Holz – ein Blick auf Forschung und Entwicklung“,
Präsentation – Grazer Holzbau Fachtagung – 5. GraHFT'06, Graz: 2006
- [41] RADOVIC, B.:
„Moderne Verklebungstechniken im Holzbau“,
Beitrag aus „Ingenieurholzbau; Karlsruher Tage 2003“, Karlsruhe: 2003
- [42] VOORMANN, F.; PFEIFER, M.:
„Die Kämpf-Stegträger der Eissporthalle Bad Reichenhall“,
Beitrag aus Fachzeitschrift Bautechnik, Berlin: 2007
- [43] ONUSSEIT, H.:
„Klebstoffe der Natur: Anwendung und Perspektive für die Technik“,
Artikel aus der Fachzeitschrift „Biologie in unserer Zeit“, Wiley-VCH Verlag:
Heft 5 2004
- [44] NACHTIGALL, W.:
„Biologisches Design - Systematischer Katalog für Bionisches Gestalten“,
Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag 2005
- [45] GOLAND, M.; REISSNER, E.:
„The Stresses in Cemented Joints“,
Article for Journal of Applied Mechanics, 03/1944
- [46] RICHTER, K.:
„Klebstofftechnologie“,
Präsentation im Rahmen der Lehrveranstaltung Klebetechnologie und Holzwerkstoffe an der TU Graz, 2009

2 Internet

- [47] Leim
http://www.baubegriffe.com/L_Das_kleine_Baulexikon/_das_kleine_baulexikon.html
Datum des Zugriffs 20.01.2010 um 14:00 Uhr
- [48] Lochblech
<http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Lochblech.jpg&filetimestamp=20080827191013>
Datum des Zugriffs 19.02.2010 um 11:00 Uhr
- [49] Delaminierung
<http://www.holzlexikon.de/>
Datum des Zugriffs 18.05.2010 um 11:40 Uhr
- [50] Nestbau Feldwespe
http://www.landwirtschaft-mlr.baden-wuerttemberg.de/servlet/PB//show/1250750/lvwo_GallischeFeldwespe2.jpg
Datum des Zugriffs 07.05.2010 um 11:40 Uhr
- [51] Miesmuschel Klebstoff
<http://www.alsa.at/static/images/chemiereport/Miesmuschel.jpg>
Datum des Zugriffs 07.05.2010 um 12:40 Uhr

3 Normen

- [52] DIN 1052:2008-12
„Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken - Allgemeine Bemessungsgrundregeln und Bemessungsgrundregeln für den Hochbau“
- [53] SIA 265:2003 Bauwesen
„Holzbau“
- [54] prEN 1995-2 Second draft
„Draft Rules For Bonded-in Rods“
- [55] ÖNORM B 4100-2:2004
„Holzbau - Holztragwerke, Teil 2: Berechnung und Ausführung“
- [56] ÖNORM EN 301:2006-08
„Klebstoffe für tragende Holzbauteile - Phenoplaste und Aminoplaste - Klassifizierung und Leistungsanforderungen“
- [57] ÖNORM EN 302-1:2004-10
„Klebstoffe für tragende Holzbauteile - Prüfverfahren - Teil 1: Bestimmung der Längszugscherfestigkeit“
- [58] ÖNORM EN 302-2:2004-10
„Klebstoffe für tragende Holzbauteile - Prüfverfahren - Teil 2: Bestimmung der Delaminierungsbeständigkeit“
- [59] ÖNORM EN 302-3:2006-01
„Klebstoffe für tragende Holzbauteile - Prüfverfahren - Teil 3: Bestimmung des Einflusses von Säureschädigung der Holzfasern durch Temperatur- und Feuchtezyklen auf die Querkzugfestigkeit“
- [60] ÖNORM EN 302-4:2004-10
„Klebstoffe für tragende Holzbauteile - Prüfverfahren - Teil 4: Bestimmung des Einflusses von Holzschwindung auf die Scherfestigkeit“
- [61] ÖNORM EN 302-6:2004-10
„Klebstoffe für tragende Holzbauteile - Prüfverfahren - Teil 6: Bestimmung der Mindestpresszeit“
- [62] ÖNORM EN 302-7:2004-10
„Klebstoffe für tragende Holzbauteile - Prüfverfahren - Teil 7: Bestimmung der Gebrauchsdauer“

Dies ist eine Veröffentlichung des

FACHBEREICHS INGENIEURBAUKUNST (IBK) AN DER TU GRAZ

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst umfasst die dem konstruktiven Ingenieurbau nahe stehenden Institute für Baustatik, Betonbau, Stahlbau & Flächentragwerke, Holzbau & Holztechnologie, Materialprüfung & Baustofftechnologie, Baubetrieb & Bauwirtschaft, Hochbau & Industriebau, Bauinformatik und Allgemeine Mechanik der Fakultät für Bauingenieurwissenschaften an der Technischen Universität Graz.

Dem Fachbereich Ingenieurbaukunst ist das Bautechnikzentrum (BTZ) zugeordnet, welches als gemeinsame hochmoderne Laboreinrichtung zur Durchführung der experimentellen Forschung aller beteiligten Institute dient. Es umfasst die drei Laboreinheiten für konstruktiven Ingenieurbau, für Bauphysik und für Baustofftechnologie.

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst kooperiert im gemeinsamen Forschungsschwerpunkt „Advanced Construction Technology“. Dieser Forschungsschwerpunkt umfasst sowohl Grundlagen- als auch praxisorientierte Forschungs- und Entwicklungsprogramme.

Weitere Forschungs- und Entwicklungskooperationen bestehen mit anderen Instituten der Fakultät, insbesondere mit der Gruppe Geotechnik, sowie nationalen und internationalen Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft.

Die Lehrinhalte des Fachbereichs Ingenieurbaukunst sind aufeinander abgestimmt. Aus gemeinsam betreuten Projektarbeiten und gemeinsamen Prüfungen innerhalb der Fachmodule können alle Beteiligten einen optimalen Nutzen ziehen.

Durch den gemeinsamen, einheitlichen Auftritt in der Öffentlichkeit präsentiert sich der Fachbereich Ingenieurbaukunst als moderne Lehr- und Forschungsgemeinschaft, welche die Ziele und Visionen der TU Graz umsetzt.

Nummerierungssystematik der Schriftenreihe

S - Skripten, Vorlesungsunterlagen | F - Forschungsberichte
V - Vorträge, Tagungen | D - Diplomarbeiten

Institutskennzahl:

1 - Allgemeine Mechanik | 2 - Baustatik | 3 - Betonbau
4 - Holzbau & Holztechnologie | 5 - Stahlbau & Flächentragwerke
6 - Materialprüfung & Baustofftechnologie | 7 - Baubetrieb & Bauwirtschaft
8 - Hochbau & Industriebau | 9 - Bauinformatik

Fortlaufende Nummer pro Reihe und Institut / Jahreszahl