

AUS LEHRE
UND FORSCHUNG

ABHANDLUNGEN UND BERICHTE

HEFT 3



ABTEILUNG FÜR BAUINGENIEURWESEN

TECHNISCHE HOCHSCHULE FRIDERICIANA

KARLSRUHE

ABTEILUNG FÜR BAUINGENIEURWESEN
TECHNISCHE HOCHSCHULE FRIDERICIANA
KARLSRUHE

AUS LEHRE
UND FORSCHUNG

ABHANDLUNGEN UND BERICHTE

HEFT 3

Herausgegeben
unter dem Dekanat des o. Professors für Geodäsie
DR.-ING. HEINRICH LICHTÉ
bearbeitet von dem o. Professor für Straßen- und Eisenbahnwesen
DR.-ING., DR.-ING. E. H. FRIEDRICH RAAB
aus Anlaß der Vollendung des 70. Lebensjahres
des o. Professors für Geodäsie, Photogrammetrie und
sphärische Astronomie
DR.-ING. HEINRICH MERKEL
sowie des o. Professors für Wasserbau und Wasserwirtschaft
DR.-ING., DR.-ING. E. H. HEINRICH WITTMANN

Lehrstuhl für
Ingenieurholzbau u. Baukonstruktionen
Techn. Hochschule Karlsruhe

A 13

Inhalt

Professor Dr.-Ing. Heinrich Merkel 70 Jahre alt	6
Professor Dr.-Ing., Dr.-Ing. E. h. Heinrich Witmann 70 Jahre alt	16
<i>Professor Dr.-Ing. Walter Bienes</i>	
„Über die Wasserrückhaltung des Bodens in Trockenzeiten“	25
<i>Professor Dr.-Ing., Dr.-Ing. E. h. Paul Böss</i>	
„Die heutige Beziehung des wasserbaulichen Versuchswesens zur Praxis“	35
<i>Privatdozent Dr.-Ing. Nikola Dimitrov</i>	
„Plasizität und Verformung“	49
<i>Professor Dr.-Ing. Bernhard Fritz</i>	
„Ein zentral vorspannbares, stählernes Hängedach“	70
<i>Professor Dr.-Ing. Gotthard Franz</i>	
„Untersuchungen von Flächenragwerken mit Hilfe der Spannungsoptik“	85
<i>Professor Dr.-Ing. Karl Möhler</i>	
„Elastizitätstheoretische Untersuchung der Nagelverbindungen insbesondere im Hinblick auf die Stahlblech-Holzanzelung“	103

Erschienen im Carl Röhrig Verlag, Darmstadt, Holzhofallee 33

September 1959, Verlagsnummer 5962

Herstellung: Druckhaus Darmstadt GmbH, Darmstadt, Schöffersstraße 15

Printed in Germany

Professor Dr.-Ing. E. h. Friedrich Raab 117
 „Die Schadgaskonzentration in Stollen und Tunneln“

Professor Dr.-Ing. Karl Otto Raab
 „Ortung von Luftbildaufnahmen durch gegenseitige Orientierung
 geometrischer Gebilde im ebenen Feld“ 127

Professor Dr.-Ing. Otto Steinhardt
 „Mathematik und Bautechnik“ 144

Professor Dr.-Ing. Wilhelm Strickler
 „Die konstruktive Stadtplanung und ihre Beziehung zur Landesplanung“ 153

Oberregierungsrat Dipl.-Ing. Wieser
 „Die Flurbereinigung“ 163



HEINRICH MERKEL

geboren am 28. Oktober 1889 in Ludwigshafen
o. Professor für Geodäsie, Photogrammetrie und sphärische Astronomie

Ein weiteres wichtiges Anwendungsgebiet des Reflexions-Verfahrens ist die Messung von Dehnungen an der Oberfläche undurchsichtiger Körper aus Stahl oder Beton durch Bekleben mit den beschriebenen verspiegelten Deckschichten. Da deren Elastizitätszahl bekannt ist, kann von den gemessenen Spannungen unmittelbar auf die Dehnungen des Trägerstoffes geschlossen werden. Diese können bis in den plastischen Bereich hinein verfolgt werden, da das Hookesche Gesetz für gewisse Kunststoffe bis zu Dehnungen von einigen Prozenten gilt.

LITERATUR

- [1] Oppel, G.: Polarisationsoptische Untersuchung räumlicher Spannungs- und Dehnungszustände. Forsch. Ing. Wesen Bd. 7, 1936, S. 240
- [2] Hetényi, M.: The Fundamentals of three-dimensional Photoelasticity, J. a. M. 1938, S. 240
- [3] Frocht, M. M.: Photoelasticity, New York/London 1946, 1948
- [4] Föppl, L. und R. Hiltner: Die neue spannungsoptische Apparatur des Mechanisch-technischen Laboratoriums der Technischen Hochschule München. Bauingenieur 20, 1939, S. 231
- [5] Hirschfeld, K.: Spannungsoptische Untersuchung von Platten. Bauingenieur 25, 1950, S. 455
- [6] Favre, H. und B. Gilg: Sur une méthode purement optique pour la mesure directe des moments dans les plaques minces flexées. Schweiz. Bauzng. Bd. 68, 1950, S. 253, 265
- [7] Schwieger, H. und G. Haberland: Bestimmung des Biegezustandes elastischer, quadratischer Platten, Bautechnik, 8, 1954, S. 358
- [8] Goodier, J. N. und G. H. Lee: An extension of the photoelastic method of stress measurement to plates in transverse bending. J. a. M. 1941, S. A 27
- [9] Franz, G.: Die Brücke für die Umgehungsstraße Badarach über die Eisenbahngleise der Linken Rheinfurthahn. Bauingenieur 29, 1954, S. 182
- [10] Pockels, F.: Lehrbuch der Kristallographie, Leipzig 1906, S. 267 ff.
- [11] Drucker, D. C.: Photoelastic Separation of Principal Stresses by oblique Incidence, J. a. M. 1943, S. A 156
- [12] Franz, G.: Grundsätzliches zum Vorspannen von Flächentragwerken. B. u. S. 1953, S. 78, 120, 140
- [13] Teape, W.: Beitrag zur spannungsoptischen Untersuchung von Schalen. Diss. T. H. Karlsruhe, 1959

Elastizitätstheoretische Untersuchung der Nagelverbindungen insbesondere im Hinblick auf die Stahlblech-Holz nagelung

VON PROFESSOR DR.-ING. KARL MÖHLER

1. ALLGEMEINES ÜBER DIE NAGELVERBINDUNG

Der Nagel ist heute im Holzbau das am häufigsten zur Anwendung gelangende Verbindungsmittel, auch bei tragenden Konstruktionen. Insbesondere für die Verbindung dünner Holzquerschnitte, wie Bretter und Bohlen — miteinander oder mit stärkeren Hölzern — kann die Nagelung mit Vorteil angewendet werden. Obwohl der Nagel als eines der ältesten Holzverbindungsmitel angesehen werden muß, war er als tragendes Verbindungsmittel vor allem in Deutschland lange Zeit in Vergessenheit geraten; er wurde nur als Befestigungsmittel für Holzteile, z. B. beim Brückenbelag oder bei Gerüsten benutzt, man hat ihn aber keineswegs zur Übertragung von Kräften herangezogen. In der Verpackungsindustrie spielte er schon frühzeitig eine ausschlaggebende Rolle, wobei man schon lange zur maschinellen Nagelung für gewisse Serienfertigungen übergegangen ist.

In der 2. Hälfte des 16. Jahrhunderts erhielt der Nagel im Holzbau des Bauhandwerkes durch den Franzosen Philibert de l'Orme (1561) zum ersten Male eine erhöhte Bedeutung. Die von ihm erfundene Bauart von Bohlendächern benutzt einzelne hochkant stehende Bohlen, die durch Nagelung zu einem Träger zusammengefügt werden. In Deutschland wird um 1800 der genagelte Bohlenbinder und -balken angewendet, der aber bis vor etwa 30 Jahren nur in geringem Umfange zur Verwendung gelangte.

Da keinerlei Veröffentlichungen über die Berechnung der Nägel bei diesen Sonderbauweisen erschienen, wurde der Nagel noch bis vor 25 Jahren in der einschlägigen Holzbauliteratur unter den tragenden Holzverbindungsmiteln nicht erwähnt. Selbst beim 1. Entwurf der Holzbauvorschriften für das Normblatt DIN 1052 vom Jahre 1933 war vorgesehen, die Verwendung von Nägeln für tragende Holzbauteile zu verbieten, da man über die Tragfähigkeit einer Nagelverbindung und ihre zweckmäßige konstruktive Ausbildung so gut wie gar nichts wußte.

Durch die in den dreißiger Jahren von Stoy, Gaber u. a. durchgeführten Versuche wurden in wenigen Jahren die Voraussetzungen geschaffen, die eine Aufnahme der Nagelverbindung als vollwertiges tragendes Verbindungsmittel in die Berechnungsvorschriften für Holzbauwerke (DIN

1052) ermöglichte. Damit war der Bereich des ingenieurmäßigen Holzbaues durch ein sehr entwicklungsfähiges Gebiet erweitert. In kurzer Zeit waren die typischen Tragwerksformen des Holznagelbaues, nämlich der verbretterte Vollwandträger und der aus Brettern oder Bohlen bestehende Gittertrachwerkträger, besonders durch die Arbeiten von G a b e r s, zur allgemeinen Anwendung gekommen. Während und nach dem Kriege entstanden unter den zahllosen Tragwerken des Hochbaues die Großkonstruktionen des Nagel-Brückenbaues, welche, durch die besonderen Bedingungen auf dem Baustoffmarkt begünstigt, stellenweise sogar Aufgaben des Stahlbrückenbaues übernehmen mußten.

Während die Bestimmungen über die Berechnung und konstruktive Ausbildung der Nagelverbindungen aus dem Jahre 1938 mit geringen Änderungen oder Ergänzungen auch heute noch gelten, sind bei den verschiedenartigsten Konstruktionsformen des normalen Nagelbaues und insbesondere bei Verbundkonstruktionen, bei denen Stahlbleche oder plattenförmige Holzwerkstoffe, wie Sperrhölzer, Holzfasersplatten u. dgl. durch Nagelung mit Vollhölzern verbunden werden müssen, eine Reihe von Fragen aufgetreten, die es erforderlich machten, sich mit der Wirkungsweise der Nagelverbindung erneut eingehend zu beschäftigen. Insbesondere wurde die Vorschrift über die Beschränkung der Holzdicke für einen bestimmten Nageldurchmesser oft als konstruktiv sehr hemmend empfunden, zumal auch im Hinblick auf die Verwendung der Nagelung mit vorgebohrten Löchern diese Bestimmung nicht immer gerechtfertigt erscheint. Einige Forscher, insbesondere in Schweden und Norwegen, versuchten die Wirkungsweise der Nagelverbindung durch Betrachtung der bei Erreichen der statischen Höchstlast gegebenen Verhältnisse zu klären, da in diesem Zustande sowohl der Nagel wie auch das Holz eine vollständige Plastizierung aufweisen. Sie gingen dabei von dem nach Erreichen der Höchstlast vorliegenden Verformungsbild des Nagels und des Holzes aus. Unsere Beobachtungen über das Dauerstandsverhalten von Nagelverbindungen ließen es aber als zutreffender erscheinen, die Verhältnisse einer Nagelverbindung im elastischen Bereich zu untersuchen, da der Übergang vom elastischen zum plastischen Zustand praktisch als die obere Grenze derjenigen Belastung angesehen werden muß, welche bei den gegebenen Verhältnissen des Hochbaues, bei dem normalerweise eine Dauerstandsbelastung vorliegt, überhaupt aufgebracht werden darf, wenn unzulässige Verformungen, die überwiegend bleibender Natur sind, vermieden werden sollen. Es sollen daher im folgenden durch elastizitätstheoretische Untersuchungen ein- und zweischnittriger Stahlblech-Holznagelverbindungen die Grenzen der Belastbarkeit ermittelt werden, bei denen je nach den Abmessungen entweder im Holz oder im Nagelwerkstoff die Grenze des elastischen Bereiches vorliegt. Eine Übertragung der Ergebnisse auf die normale Nagelung erscheint in gewissem Umfange möglich.

2. DIE WIRKUNGSWEISE DER NAGELVERBINDUNG

Der in das Holz eingeschlagene Nagel kann als allseitig nachgiebig gebetteter Träger betrachtet werden, der bei Belastung Verbiegungen erleidet, während das Holz entsprechende Eindrückungen erfährt. Diese Lochleibungsdrücke stellen die Belastungen des Nagels dar. Das Verhalten einer Nagelverbindung wird somit durch das Verformungsverhalten des Nagels und die Nachgiebigkeit des Holzes bei Lochleibungsbeanspruchung bestimmt sein.

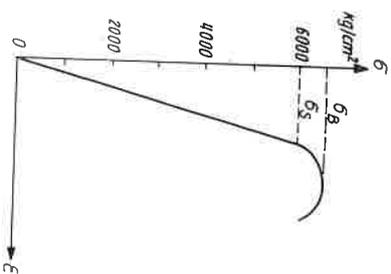


Bild 1: Spannungslinie des Nagelmaterials.

Nägels werden im allgemeinen aus gezogenem Thomastahl hergestellt mit einer Zugfestigkeit von 6500 bis 8000 kg/cm^2 je nach dem Nageldurchmesser, wobei die Streckgrenze meist bei etwa 95% der Bruchdehnungslinie liegt. Bei Zugbeanspruchung ergibt sich somit eine Spannungslinie nach Bild 1, während der auf Biegung beanspruchte Nagel ein Verhalten nach Bild 2 aufweist.

Bis zur Erreichung der Randspannung σ_s im Nagelschaft wird also der Nagel sich entsprechend seiner Biegesteifigkeit EJ verformen. Das maximal aufnehmbare Biegemoment M_{max} ist durch das vollständige Plastizieren des Querschnittes gekennzeichnet und beträgt beim runden Querschnitt das 1,67-fache von M_s .

Das Verhalten des Holzes bei reiner Lochleibungsbeanspruchung unter einer zylindrischen Druckfläche wurde schon mehrfach, auch von Gaber, untersucht. Je nach der Holzart, der Beschaffenheit und dem Feuchtigkeitsgehalt, ergeben sich Lastendruckungslinien nach Bild 3, wie sie beim Eindringen biegegesteifter Stahlzylinder erhalten wurden. Der tatsächliche Verlauf, bei dem die Eindrückungen im allgemeinen bei höheren Belastungen nicht mehr verhältnismäßig dem Lochleibungsdruck erfolgen, kann angenähert durch ein ideal-elastisch-plastisches Verhalten

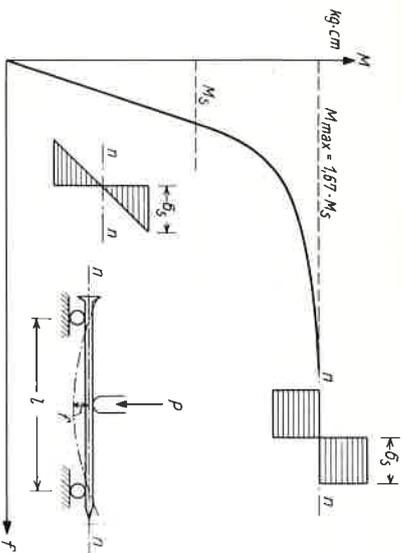


Bild 2: Durchbiegungsverlauf bei Belastung des Nagels als Träger auf 2 Stützen.

ersetzt werden, bei dem bis zur Höhe von σ_{IB} mit einer konstanten Betzungsziffer C gerechnet wird.

$$C = \frac{d\sigma}{d\delta} \left[\frac{\text{kg/cm}^3}{\text{cm}} \right]$$

Beim Eindringen biegesteifer Stahlzylinder in Nadelholz wurde die Betzungsziffer C nach Versuchen von Gaber bei Fichten- und Tannenholz zu 3000 kg/cm^3 als praktisch unterer Grenzwert festgelegt. Während neuerdings bei den theoretischen Traglastuntersuchungen der Nagel-

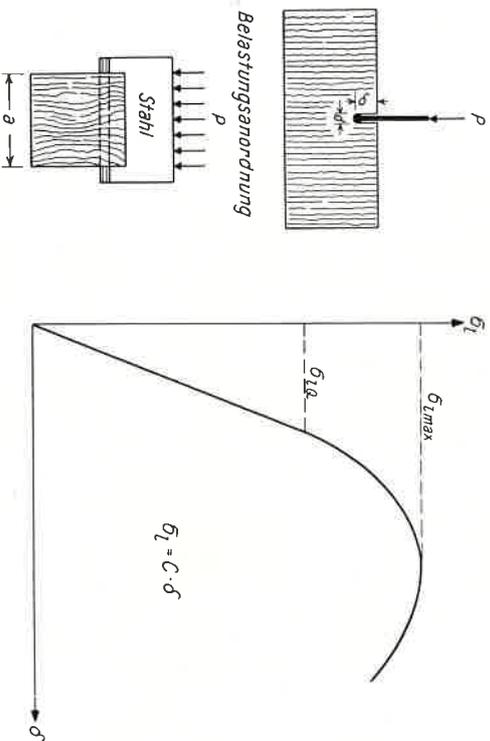


Bild 3: Lastandrückungsverlauf bei Lochleibungsbelastung des Holzes durch einen biegesteifen Stahlzylinder.

verbindungen die bei voller Plastifizierung des Nagelschaftes oder des Holzertes bzw. beider Teile vorliegenden Zustände für die Bestimmung der Hochlast herangezogen wurden, wobei allerdings Reibungseinflüsse, Einspannwirkungen des Kopfes und sonstige Nebeneinflüsse vernachlässigt wurden, ist u. E. derjenige Belastungszustand von ausschlaggebender Bedeutung, bei welchem entweder die Leibungsfestigkeit des Holzes an irgendeiner Stelle oder die Streckgrenze des Nagelmaterials infolge Biegebeanspruchung erreicht wird. Die Versuche zeigen, daß diese Zustände zwar noch keineswegs die obere Traggrenze einer Nagelverbindung darstellen, daß aber von dieser Lastgröße ab die Verformungen rasch anwachsen und praktisch vollständig aus bleibenden Verformungen bestehen. Da wenig oberhalb dieser Belastungsgrenze bereits eine Dauerstandsbelastung zu weitgehenden Formänderungen führen kann, erscheint es erforderlich, die Bemessung der Nagelverbindungen mehr als bisher gerade auf diese Belastungsgrenzen auszurichten. Hierbei muß auch der Einfluß verschiedener Holzdicke a und damit verschiedener Nagelschlankheit $\lambda = a:d$ bei den ein- und zweischnittigen Verbindungen untersucht werden, um die Änderungen der als maßgebend angesehenen Grenzwerte gegebenenfalls bei der Festsatzung der zulässigen Belastungen berücksichtigen zu können.

Im folgenden wird der Gang der Untersuchung an dem Beispiel der Stahlblech-Holz nagelung vorgeführt, deren Ergebnisse auch mit einer gewissen Annäherung auf die normale Nagelung übertragen werden können.

3. BERECHNUNG DER GRENZWERTE BEI DER STAHLBLECH-HOLZ NAGELUNG

Die Stahlblech-Holz nagelung kann normalerweise in 3 verschiedenen Anordnungen zur Verwendung kommen, nämlich

- a) als zweischnittige Verbindung mit zwei außenliegenden Stahlaschen nach Bild 4,

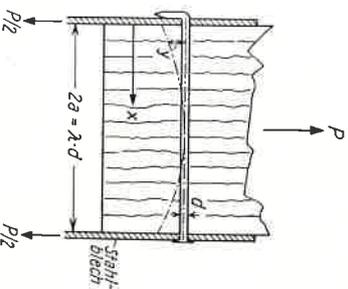


Bild 4: Zweischnittige Stahlblech-Holz nagelung mit außenliegenden Stahlaschen.

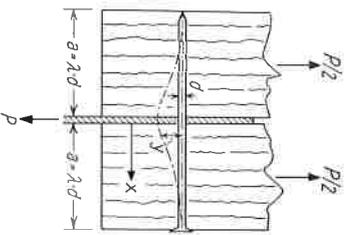


Bild 5: Zweischnittige Stahlblech-Holz-nagelung mit zwischenliegender Stahlflasche.

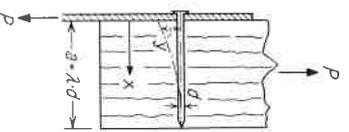


Bild 6: Einschnittige Stahlblech-Holz-nagelung.

- b) als zweischnittige Verbindung mit einer zwischen 2 Hölzern liegenden Stahlflasche nach Bild 5,
 c) als einschnittige Verbindung mit einer auf dem Holz aufliegenden Stahlflasche nach Bild 6.

Die Anwendung nach Bild 4 ist bei der Nagelung selten, weil bei dicken Blechen ein Durchbohren beider Bleche einschließlich des Holzes auf die ganze Länge notwendig wird. Bei dünnen Blechen kann der Nagel zwar ohne Vorbohren durch beide Bleche gerieben werden, die Nagelspitze müßte aber umgeschlagen werden, was nicht immer möglich ist oder gar gefährlich werden könnte. Da dieser Fall aber bei Bolzenverbindungen öfters vorkommt und auch für die Behandlung der zweischnittigen normalen Nagelung von Wichtigkeit ist, wollen wir auch hier die Lösungen ansprechen.

Unter der Annahme eines elastischen Verhaltens des Holzes bei Lochleibungsbeanspruchung ist die Einsenkung y des Nagelschaftes an jeder Stelle proportional der Belastung p .

$$p = d \cdot \sigma_l = d \cdot C \cdot y \quad [\text{kg/cm}] \quad (1)$$

Hierin bedeuten:

- p die Belastung pro cm Nagellänge in kg/cm,
 σ_l die auf die Durchmesserprojektion bezogene Lochleibungsspannung in kg/cm²,
 C die Bertungsziffer des Nagelbettes in kg/cm³,
 d Nageldurchmesser.

Die Resultierende Q der lotrechten Kräfte an der Stelle x wird:

$$Q = \int_0^x p \, dx \quad \text{und die Änderung der Querkraft wird durch } p \cdot dx = dQ$$

hervorgerufen. Da $Q = \frac{dM}{dx}$, so ergibt sich

$$\frac{d^2 M}{dx^2} = p.$$

Andererseits wird der Zusammenhang zwischen der Ausbiegung y und dem Moment M durch die Differentialgleichung der elastischen Linie:

$$\frac{EJ}{dx^2} y = -M$$

gegeben. Wenn man diese Gleichung zweimal nach x differenziert, so erhält man:

$$\frac{EJ}{dx^4} y = -p.$$

Setzt man in diese Gleichung den Wert für $p = d \cdot C \cdot y$ ein, so erhält man schließlich die Differentialgleichung des Problems zu:

$$\frac{EJ}{dx^4} y + d \cdot C \cdot y = 0,$$

die man in die Form bringen kann:

$$y^{IV} + 4\alpha^4 y = 0, \quad (2)$$

wobei $\alpha^4 = \frac{Cd}{4EJ} = \frac{K}{4EJ}$ bedeutet, mit $K = Cd$.

Die allgemeine Lösung dieser Differentialgleichung lautet:

$$y = A_1 e^{\alpha x} \cos \alpha x + A_2 e^{\alpha x} \sin \alpha x + A_3 e^{-\alpha x} \cos \alpha x + A_4 e^{-\alpha x} \sin \alpha x. \quad (3)$$

Diese allgemeine Lösung mit ihren 4 willkürlichen Konstanten enthält alle *partiell* Lösungen, die durch Einführung der Grenzbedingungen für die verschiedenen Belastungs- und Lagerungsfälle gefunden werden können. Bei der Stahlblech-Holz-nagelung der vorbeschriebenen Anwendungen, bei denen die Stahlflaschen die Kraft praktisch örtlich einleiten, können wir den Verlauf der elastischen Linie des Nagels im Nagelbett mit Hilfe von je 2 Randbedingungen für die Nagelenden bzw. die Nagelmittle bestimmen. Bei der normalen Nagelverbindung ist die Kräfteinleitung unbekannt, sie ist von der Nachgiebigkeit des Nagelbettes und der Biegefestigkeit des Nagels selbst abhängig. Nimmt man aber näherungsweise an, daß in den Berührungsfugen der Hölzer Wendepunkte der Biegelinien und somit Momentennullpunkte liegen, so können die

Lösungen der Stahlblech-Holz Nagelung mit ausreichender Genauigkeit auch für die normale Nagelverbindung verwendet werden.

Für die 3 Anwendungsfälle der Stahlblech-Holz Nagelung ergeben sich folgende Bestimmungsgleichungen für die Berechnung der Durchbiegung y und damit auch der Beanspruchung im Holz (σ_1) sowie der im Nagelschaft entstehenden Biegemomente M , die aus $EJ \cdot y''$ bestimmt werden können:

Fall 1: Zweischrittige Verbindung — Laschen ansetzen (Bild 4)

Die Rand- und Übergangsbedingungen lauten:

- 1) $x = 0, \quad M = 0, \quad y''(0) = 0;$
- 2) $x = 0, \quad Q = \frac{P}{2}, \quad y''(0) = \frac{-P}{2EJ};$
- 3) $x = a, \quad Q = 0, \quad y''(a) = 0;$
- 4) $x = a, \quad \text{tg } \alpha = 0, \quad y'(a) = 0.$

Hieraus ergeben sich die 4 Konstanten A_1 bis A_4 zu:

$$A_1 = \frac{P_\alpha}{K} \cdot C_1, \quad A_2 = \frac{P_\alpha}{K} \cdot C_2, \quad A_3 = \frac{P_\alpha}{K} \cdot C_3, \quad A_4 = A_3.$$

Hierin bedeuten C_1, C_2 und C_3 Zahlenwerte, die sich aus den gegebenen Abmessungen und der Bettungsziffer berechnen lassen.

Setzt man diese Konstanten in Gl. 3 ein, so erhält man:

$$y = \frac{P_\alpha}{K} [(C_1 e^{\alpha x} + C_2 e^{-\alpha x}) \cos \alpha x + (C_3 e^{\alpha x} + C_4 e^{-\alpha x}) \sin \alpha x]. \quad (4)$$

Die *größte Durchbiegung* und damit auch die *größte Beanspruchung* im Holzbrett tritt an der Stelle $x = 0$ ein. Hierfür wird:

$$y(0) = \frac{P_\alpha}{K} (C_1 + C_2). \quad (5)$$

Die Gleichung für das Biegemoment M im Nagelschaft lautet:

$$M_\alpha = \frac{P}{2x} [(C_1 e^{\alpha x} - C_2 e^{-\alpha x}) \sin \alpha x + C_3 (e^{\alpha x} - e^{-\alpha x}) \cos \alpha x] = P \cdot \eta. \quad (6)$$

Die Stelle x , an welcher das Biegemoment seinen Maximalwert erreicht, läßt sich nicht ohne weiteres angeben. Sie könnte ermittelt werden aus der Bedingung $Q_x = 0$, d. h. $\frac{d^3 y}{dx^3} = 0$. Dieser Weg ist aber umständlicher und

zeitraubender als eine rechnerische Ermittlung der Momente für einige Punkte, aus deren Verbindungslinie rasch und für den vorliegenden Fall genau genug das Maximalmoment bestimmt werden kann. Es zeigt sich, daß etwa bis $\lambda = 10$ das Maximalmoment in der Mitte des Holzes auftritt, bei größeren Nagellängen treten zwei Maximalwerte auf, die sym-

metrisch zur Nagelmittle liegend, mit zunehmender Nagelschlantheit nach dem äußeren Rand hinwandern. Vergleicht man die Größe der bei den verschiedenen Nagelschlantheiten auftretenden Maximalwerte, so ergeben sich je nach dem Nageldurchmesser zwischen $\lambda = 8$ bis 12 die absoluten Höchstwerte, während bei größeren Schlantheiten eine Abnahme zu verzeichnen ist.

Mit den Gl. 5 und 6 können nunmehr die bei verschiedener Schlantheit für die verschiedenen Nageldurchmesser als maßgebend anzusehenden Belastungen P berechnet werden, bei welchen entweder die Pressung im Nagelbrett oder die Beanspruchung im Nagelschaft einen Grenzwert erreicht, bei dessen Überschreitung mit einer Verformungszunahme der Gesamtverbindung unter Dauerstandsbelastung zu rechnen ist. Bei der Lochleibungsbeanspruchung des Holzes kann man auf Grund bisher vorliegender Versuche etwa eine örtliche Lochleibungsspannung von 300 kg/cm² als unteren Grenzwert für normales Bauholz annehmen. Das bedeutet, daß bei dieser Lochleibungsbeanspruchung eine Einsenkung des Nagelschaftes infolge der Zusammendrückung der Holzfasern von 0,1 cm entsteht, wenn man die Bettungsziffer $C = 3000 \text{ kg/cm}^3$ zugrunde legt.

Die Größe der Belastungen P_H , bei denen am Holzrand die kritische Lochleibungsspannung von 300 kg/cm² erreicht wird, zeigt für die Durchmesser $d = 1,0$ —0,6 und 0,42 cm in Abhängigkeit von der jeweiligen Nagelschlantheit den in Bild 7 dargestellten Verlauf. Bis $\lambda = 5$ nehmen die

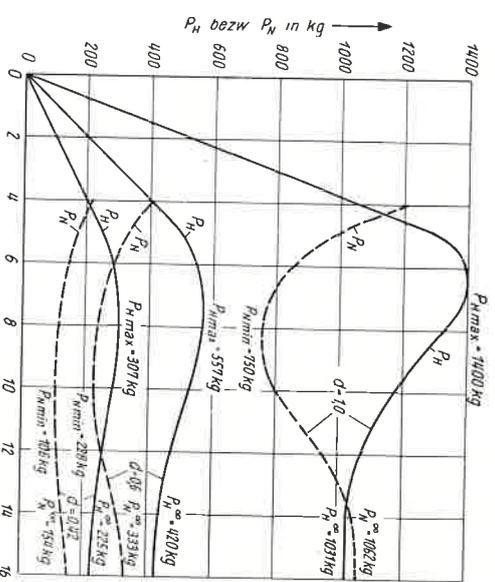


Bild 7: Nagelbelastungen der zweischrittigen Verbindung nach Bild 4 (P_H für $\sigma_1 = 300 \text{ kg/cm}^2, C = 3000 \text{ kg/cm}^3, y = 0,1 \text{ cm}, P_N$ für $\sigma_N = 6000 \text{ kg/cm}^2$) in Abhängigkeit von der Nagelschlantheit.

Belastungen linear zu, erreichen zwischen $\lambda = 6,5$ und $8,0$ ihren Höchstwert, um dann etwa bis $\lambda = 14$ auf den Grenzwert herabzusenken, der für den unendlich langen Nagel maßgebend ist. Bezüglich der Beanspruchungen im Holz wäre somit der günstigste Anwendungsbereich etwa bei Schlankheiten zwischen 5 und 10.

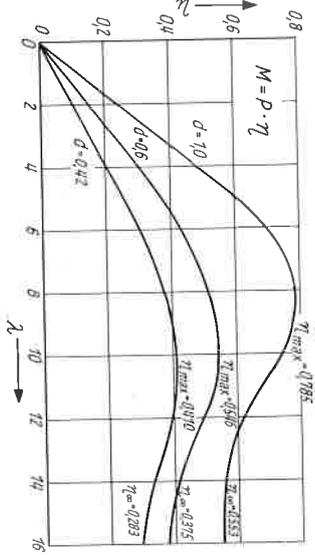


Bild 8: Größtmomente der zweischnittigen Verbindung nach Bild 4 für C = 3000 kg/cm² in Abhängigkeit von der Nagelschlankheit.

Die im Nagel auftretenden Biegemomente in Abhängigkeit von der Nagelschlankheit sind in Bild 8 aufgetragen. Die Biegemomente erreichen im Bereich zwischen $\lambda = 6$ bis 10 ihr Maximum, fallen aber bei größeren Schlankheiten wieder etwas ab. Bis $\lambda = 6$ nimmt das Biegemoment linear zu. Berechnet man aus dem jeweiligen Biegemoment M_{max} für die einzelnen Schlankheitsgrade diejenige Belastung P_N , die der Nagel bis zum Erreichen der Streckgrenze aufnehmen kann ($P_N = W_N \cdot \sigma_s : \eta$), so ergeben sich die in Bild 7 eingezeichneten Linien. Hieraus geht hervor, daß praktisch bei Schlankheiten größer als 4 die Biegebeanspruchung im Nagel und nicht die Lochleibungssteifigkeit des Holzes für das Auftreten bleibender Verformungen maßgebend ist.

Fall 2: Zweischnittige Nagelung mit zwischenliegenden Blech (Bild 5)
Auch für diesen Fall ist die partikuläre Lösung für die geltenden 4 Rand- und Übergangsbedingungen aus der allgemeinen Lösung nach Gl. 3 verhältnismäßig einfach zu bestimmen. Die 4 Konstanten ergeben sich zu:

$$A_1 = -\frac{P^\alpha}{2K} \cdot M_1, \quad A_2 = -\frac{P^\alpha}{2K} \cdot (M_1 + 1),$$

$$A_3 = -\frac{P^\alpha}{2K} \cdot (M_4 + 1), \quad A_4 = -\frac{P^\alpha}{2K} \cdot M_4.$$

Die größte Holzpressung und das größte Biegemoment im Nagel treten in der Mitte unmittelbar am Lastangriffspunkt auf. Es betragen:

$$y_0 = \frac{-P_N}{2K} (2M_1 + 1) \quad y_0: \text{größte Durchbiegung und damit größte Beanspruchung des Holzes unter dem Nagelschaft.} \quad (8)$$

$$M_0 = \frac{P}{4^\alpha} (2M_4 + 1) \quad M_0: \text{größtes Biegemoment im Nagelschaft.} \quad (9)$$

Für einen bestimmten Wert von σ_l und damit auch von y_0 im Holz und einem bestimmten Biegemoment im Nagelschaft berechnen sich aus obiger Gleichung die zugehörigen Belastungen P_H und P_N .

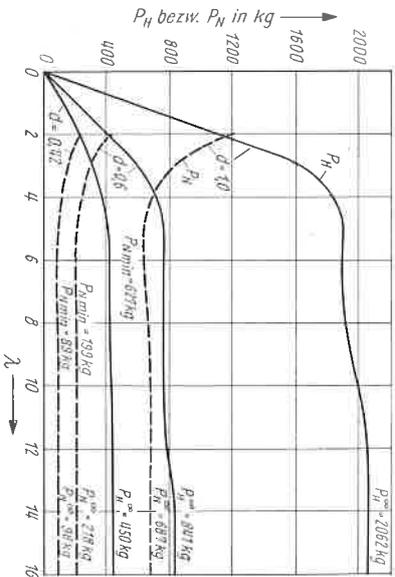


Bild 9: Nagelbelastungen der zweischnittigen Verbindung nach Bild 5.

In Bild 9 sind diese Werte für die verschiedenen Nagelschlankheiten aufgetragen. Die P_H -Linien erreichen hier etwa bei Schlankheiten über 12 ihren Höchstwert, der den Belastungswert für den unendlich langen Nagel darstellt. Aber bereits bei $\lambda = 5$ ist dieser Wert schon nahezu vorhanden, da er praktisch zwischen $\lambda = 5$ und $\lambda = 10$ sich nur wenig ändert. Einen umgekehrten Verlauf nimmt die Last P_N , die etwa bei $\lambda = 5$ ihren Kleinstwert erreicht, diesen etwa bis $\lambda = 10$ beibehält, um bei höheren Schlankheitsgraden auf den um ca. 10% höheren Endwert anzusteigen. Es ist festzustellen, daß zwar bezüglich der Holzbeanspruchungen höhere Werte als bei Fall 1, aber bezüglich der Nagelbeanspruchungen etwas geringere Werte maßgebend werden, da nach Bild 10 höhere η -Werte vorliegen als bei Fall 1.

Fall 3: Einschnittige Nagelung (Bild 6)

In diesem Falle erhält man aus den 4 Randbedingungen, von denen 3 dem Fall 1 entsprechen, ähnlich aufgebaute Konstanten A_1 bis A_4 . Sie betragen:

$$A_1 = \frac{P^\alpha}{K} \cdot C_1', \quad A_2 = \frac{P^\alpha}{K} \cdot C_2', \quad A_3 = -A_4 = \frac{P^\alpha}{K} \cdot C_3'.$$

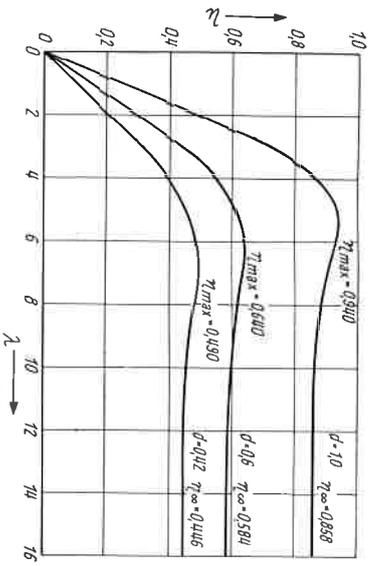


Bild 10: Größtmomente der zweischnittigen Verbindung nach Bild 5 für $C = 3000 \text{ kg/cm}^2$.

Die größte Durchbiegung und damit die größte Zusammendrückung des Holzes tritt am Rand unmittelbar neben dem Stahlblech auf und beträgt:

$$y_0 = \frac{2 P \alpha}{K} (C_1' + C_2') \quad (10)$$

Der Verlauf des Biegemomentes M_x ist bestimmt durch:

$$M_x = \frac{P}{\lambda} [(C_1' e^{\alpha x} - C_2' e^{-\alpha x}) \sin \alpha x - C_3' (e^{\alpha x} - e^{-\alpha x}) \cos \alpha x] \quad (11)$$

Die Stelle des größten Biegemomentes M_x wurde durch Aufzeichnen der Momentenlinien festgestellt. Dabei zeigte sich, daß in allen praktisch in Frage kommenden Fällen das Größtmoment etwa 1 bis 3 d vom belasteten Rand entfernt auftritt. Die Abhängigkeit des Maximalmomentes von der Nagelschlankheit geht aus Bild 11 hervor, in welcher die η_{max} -Werte aufgetragen sind ($M_{max} = P \cdot \eta_{max}$), aus denen für jede Last P das aufzutragende Moment M_{max} bestimmbar ist. Bild 12 zeigt die P_H - und P_N -Werte. In diesem Falle sind bei dicken Nägeln (über 6 mm \varnothing) in allen Schlankheitsbereichen die Holzleibungspresspannungen (also P_H) maßgebend, während bei den Nageldurchmessern 6,0 und 4,2 mm P_H nur bei Schlankheiten unter 8, darüber P_N die geringere Nagelbelastbarkeit ergibt.

4. DIE NORMALE HOLZNAGELVERBINDUNG

Die genaue rechnerische Erfassung der normalen Holznagelverbindung stößt selbst dann auf praktisch nahezu unüberwindliche Schwierigkeiten, wenn die elastischen Eigenschaften des Nagels und der Holzbohrung gegeben sind, da die Wirkungslinie der äußeren Kräfte nicht bekannt ist. Nach den einschlägigen Untersuchungen zahlreicher Forscher an Holzverbindungen und insbesondere der von Marten durchgeführten Arbeit

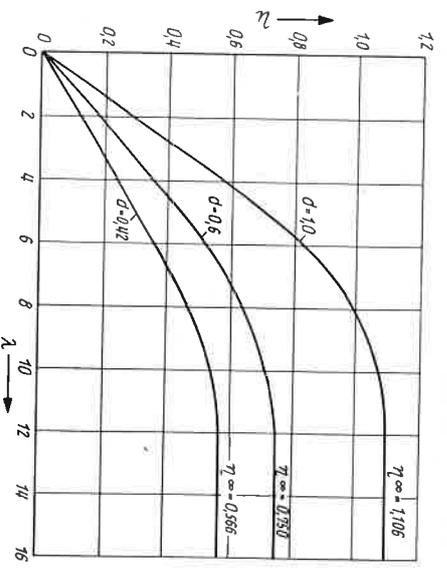


Bild 11: Größtmomente der einschnittigen Verbindung nach Bild 6 für $C = 3000 \text{ kg/cm}^2$.

über die Nagelverbindungen wird die Lage der Resultierenden als in der Fuge zwischen den einzelnen Hölzern liegend angenommen. Dieser Fall tritt aber streng genommen nur bei sehr großen Nagelschlankheiten zu, für welche die Neigung des Nagels in der Fuge für das Mittel- und Seitenholz nach Fall 1 und 3 gleich wird. Bei Holzstücken etwa unter 12 d und insbesondere bei ungleichen Dicken der Mittel- und Seitenhölzer ist die Bedingung der gleichen Neigung für die Nagelbiegeline in der Berührungsstufe nicht mehr erfüllt, wenn man nach den vorhergehenden Lastfällen rechnet. Da aber nach den Untersuchungen von Marten dieser Einfluß bei den üblichen Holzstücken, die den einzelnen Nageldurchmessern zugeordnet sind, gegenüber den natürlicherweise auftretenden Streuungen der Holzeigenschaften (Leibungsfestigkeit und Betungsverhalten, die auch durch Feuchtigkeitsschwankungen beeinflußt werden)

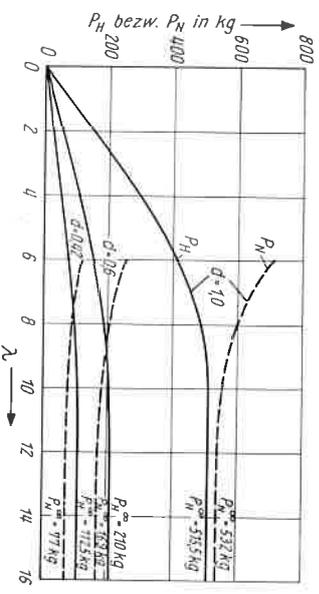


Bild 12: Nagelbelastungen der einschnittigen Verbindung nach Bild 6.

gering ist, können die Ergebnisse der Stahlblech-Holz nagelung auch für die normale Nagelung angewendet werden. Hierbei wird man bei der *zweischnittigen* Nagelung sowohl die Belastbarkeit des Mittelholzes als auch diejenige der Seitenhölzer berücksichtigen müssen, indem man sowohl Fall 1 als auch Fall 3 zur Bestimmung der P_N -Werte heranzieht. Bei *einschnittiger* Verbindung ist Fall 3 maßgebend.

Nach den heute geltenden Bestimmungen für die zulässigen Nagelbelastungen nach DIN 1052 kann der zweischrittige Nagel-Durchmesser 6,0 mm mit $N_2 = 220$ kg bei einer Holzdicke von 60 mm und der Nagel-Durchmesser 4,2 mm mit $N_2 = 125$ kg bei einer Holzdicke von 30 mm belastet werden. Für die entsprechenden Schlankheiten können die zugehörigen Nagelbelastungen aus Bild 7 mit $P_N = 228$ kg und 125 kg entnommen werden. Die Werte stimmen somit praktisch überein und es kann hieraus gefolgert werden, daß bereits bei geringfügiger Überschiebung dieser Belastungswerte mit plastischen Verformungen der Nagelverbindungen gerechnet werden muß, wie es bei Dauerstandsversuchen beobachtet worden war. Bei der *einschnittigen* Verbindung, bzw. bei den Seitenhölzern der mehrschnittigen Verbindungen, scheinen günstigere Verhältnisse vorzuliegen, da hier in der Regel erst bei Lasten über $N_2:2$ mit bleibenden Verformungen gerechnet werden muß. Hierbei ist allerdings bei den normalen Nagelschlankheiten die Lochleibungsspannung im Holz für den Grenzwert der Belastung maßgebend. Da die Nagelbelastbarkeit mit Rücksicht auf die Lochleibungsbeanspruchung unter $\lambda = 8$ geradlinig abfällt, ist es zweckmäßig, das Nagelende mindestens 8 d tief einzuschlagen, wenn der zugehörige Schnitt noch voll wirksam angenommen werden soll. Bei geringerer Einschlagtiefe wäre die Belastbarkeit linear abzumindern. Dieser Berechnungsvorschlag ist in der Schweizerischen Holzbauvorschrift SIA-Norm 164 bereits verwirklicht.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Die elastizitätstheoretischen Untersuchungen der ein- und zweischnittigen Stahlblech-Holz-Nagelverbindungen lassen die Grenzwerte der Belastungen erkennen, die entweder zu einer örtlichen plastischen Verformung des Holzes infolge des Leibungsdruckes unter dem Nagelschaft oder zu einer Plastizierung des Nagels infolge des auftretenden Biegemomentes führen. Beide Grenzwerte sind von Wichtigkeit, wenn man das Dauerstandvermögen von Holz nagelverbindungen beurteilen will. Da bei Holzverbindungen für tragende Teile nicht nur die Tragkraft und Bruch-sicherheit, sondern vor allem auch die Formbeständigkeit eine besondere Bedeutung besitzt, müssen diese Grenzwerte bei der Festlegung der zulässigen Nagelbelastungen besonders beachtet werden.

Die Schadgaskonzentration in Stollen und Tunneln

VON PROFESSOR DR.-ING., DR.-ING. E. H. FRIEDRICH RAAB

Bei Stollen im Bergbaubetrieb, bei Richtstollen zum Erschließen von Gebirgen, in Eisenbahntunneln und besonders auch in Straßentunneln, wo nicht spurgebundene Kraftfahrzeuge auf dem der Fahrtrichtung zugewiesenen Fahnbahnstreifen gelenkt werden und mit den nötigen Sicherheitsabständen voneinander fahren sollen, ist nicht nur gesunde Atemluft, sondern auch ungehinderte Sicht von Belang.

Während die Lüftung von Eisenbahntunneln mit zunehmender Elektrifizierung der Triebfahrzeuge teilweise an Interesse verliert, gewinnt sie für den Kraftfahrzeugverkehr mit wachsender Verkehrsichte stark an Bedeutung. Von der zweckentsprechenden Lösung des Lüftungsproblems ist die Sicherheit, die Leistungsfähigkeit und die Wirtschaftlichkeit des Betriebes abhängig. Die Betriebsmöglichkeit von Aurtunneln hängt um so mehr von den Lüftungseinrichtungen ab, je länger die Tunnel sind und je weniger atmosphärisch bedingt, Portalluftströme auf natürliche Weise Frischluft zuführen. Der Bau und Betrieb von sehr langen Basistunneln für Kraftwagen durch die Alpen setzt beispielsweise unabdinglich die Lösung des Lüftungsproblems voraus.

Wenn man eine ungünstige „Atmosphäre“ im Tunnel nach der schädlichen Gasmenge, d. h. nach dem unerwünschten Anteil an giftigen, lebensschädlichen oder auch nur sichtbehindernden Gasanteilen je Volumeneinheit beurteilt, kann man eine Schadgas-Konzentration c_{max} angeben, die nicht überschritten werden soll. Aufgabe der Lüftung ist es, „Frischlufte“ in solcher Menge zuzuführen oder „Schadgas“ in dem Ausmaße zu beseitigen, daß die Tunnelluft die Konzentration c_{max} , die nach verschiedenen Gesichtspunkten festsetzbar ist, nicht überschreitet. Die zulässige Konzentration kann, falls die Giftigkeit der Schadgasbeimengung ausschlaggebend ist, nach dem CO-Gehalt oder, wenn die sichtbehindernde Eigenschaft entscheidet, nach dem Rußgehalt in Volumenprozent beurteilt werden.

In den folgenden Betrachtungen wird der Konzentration c derselbe Begriffsinhalt beigelegt, der beispielsweise bei einer alkoholischen Flüssigkeit gebräuchlich ist. Unter Konzentration ist also hier der Anteil der Schadgasmenge im Gesamtvolumen „Frischlufte und Schadgas“ zu verstehen.

Die Betrachtung bezieht sich auf den stationären Endzustand in einem x Meter vom Portal entfernten Querschnitt des Tunnels, durch den sekundlich

$$Q_x = Q_0 + \alpha(x_0 + \xi) + (p - q) \cdot \xi \text{ Kubikmeter}$$

des Frischluft-Schadgas-Gemisches strömen. Mit Q_0 [m^3/s] wird die durch das Portal einströmende Frischluftmenge, mit α [$\text{m}^3/\text{m} \cdot \text{s}$] die je Sekunde