

Schrifttum

- [1] Spangenberg, D.: Spannungen in Knotenpunkten offener Profile bei statischer Belastung. (In diesem Heft).
- [2] Kloth, W.: Leichtbaufibel, München-Wolfratshausen 1947.
- [3] Kloth, W.: Der Baustil der Landmaschinen. Landtechn. Forsch. 3 (1953) 72/75.
- [4] Bergmann, W.: Sichtbar gemachte Spannungsfelder in Maschinenteilen. In: Grndlgn. d. Landtechn. Heft 4. Düsseldorf 1953, S. 12/33.
- [5] Bergmann, W.: Dehnungslinienverfahren. In: Experimentelle Spannungsanalyse. Düsseldorf 1956 (erscheint demnächst).
- [6] Rötcher, F. und R. Jaschke: Dehnungsmessungen und ihre Auswertung. Berlin 1939.
- [7] Slattenschek, A.: Zähes und sprödes Verhalten metallischer Werkstoffe bei mechanischen Beanspruchungen. Schweissen und Schneiden 3 (1951), Sonderheft S. 90/100.
- [8] Slattenschek, A.: Grundsätzliches zur Theorie des Spröddruches. Radex-Rundschau (1954), Heft 4/5, S. 186/199.
- [9] Klöppel, K.: Werkstoffmechanik und Sicherheit geschweisster Stahlkonstruktionen. Schweissen und Schneiden 3 (1951), Sonderheft S. 81/89.
- [10] Rühl, K.-H.: Die Tragfähigkeit metallischer Baukörper. Berlin 1952, S. 33.
- [11] Bergmann, W.: Neue Erkenntnisse über beanspruchungsgerechte Gestaltung, insbesondere bei Behinderung der Querschnittsverwölbung offener Profile. In: Grndlgn. d. Landtechn. Heft 3. Düsseldorf 1952, S. 12/23.

Eingegangen am 16.1.1956

Institut für Landtechnische Grundlagenforschung
der Forschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode
Direktor: Prof. Dr.-Ing. W. Kloth

Anschrift des Verfassers: Dr. Ing. Walter Bergmann, (20 b) Braunschweig, Bundesallee 50

Spannungen in Knotenpunkten offener Profile bei statischer Belastung

Von Dietrich Spangenberg

Während Bergmann [1] Untersuchungen an Rohr-knotenpunkten durchgeführt hat, wird nachstehend über Untersuchungen an Knotenpunkten aus offenen Profilen berichtet. Als Belastung ist dabei nur Biegung in der Knotenebene berücksichtigt worden. Über die Beanspruchung von offenen Profilen durch Biegung und Torsion ist bereits früher berichtet

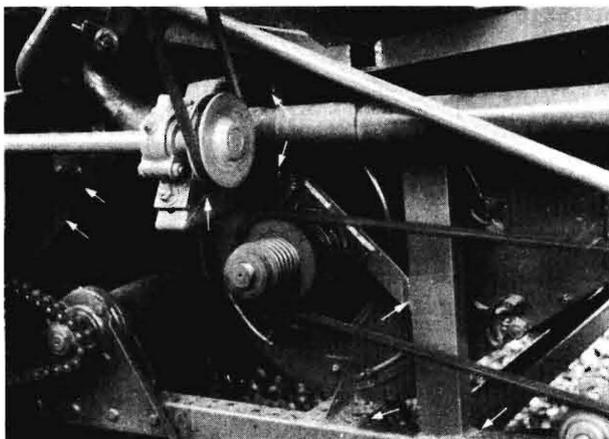


Bild 1. Knotenpunkte aus offenen Profilen am Gestell eines Mähhäckslers.

worden [2, 3]. Dehnungsmessungen an versteiften Knotenpunkten genieteteter Fachwerkstrukturen sind von Wyss [4] in großem Umfange durchgeführt und ausgewertet worden. Außerdem haben Cleff und Erker [5] die Dauerhaltbarkeit an geschweißten und genieteten Eckverbindungen ebener Fahrzeugrahmen untersucht.

Bild 1 bis 3 zeigen geschweißte Knotenpunkte aus offenen Profilen an Landmaschinen. Bild 1 ist ein Ausschnitt aus dem Gestell eines Mähhäckslers mit mehreren, verschiedenartigen Knotenpunkten (2 U-Profile, U-Profil mit Winkelprofil, U-Profil mit Flacheisen usw.). Aus der Vielfalt der möglichen Profilverbindungen wurden zunächst hauptsächlich Knotenpunkte aus Winkelprofilen mit angeschweißtem Flacheisen untersucht; hierfür zeigen Bild 2 und 3 Anwendungsbeispiele.

Die Belastung erfolgte in dem Prüfstand nach Bild 4 in gleicher Weise wie bei den von Bergmann untersuchten Rohrknoten [1], und zwar ausschließlich mit senkrechtem Zug nach unten, da eine Biegebeanspruchung des Flacheisens bei dessen geringem Widerstandsmoment praktisch wertlos ist.

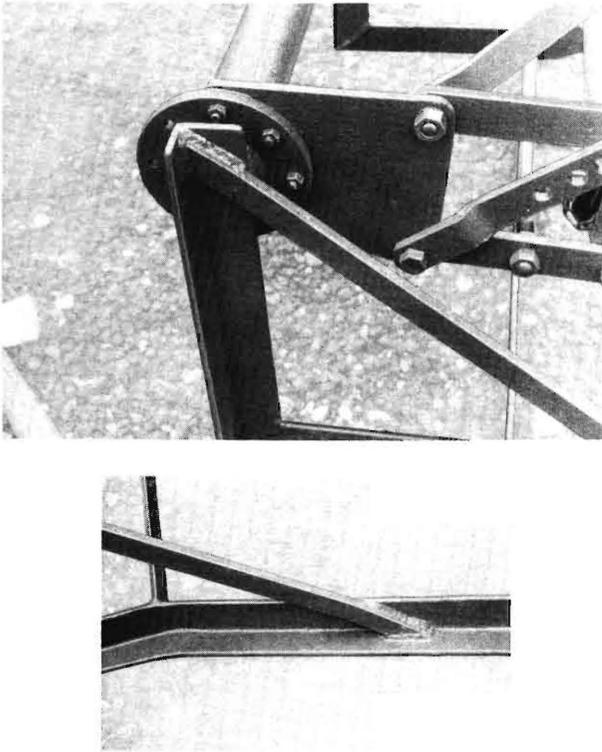


Bild 2 und 3. Anwendungsbeispiele für Knoten aus offenen Profilen.

Die Einspannung des waagerechten Profilstabes erfolgte durch Kegelstifte und Klemmschraube, **Bild 5**. Vollständig starre Einspannung wurde allerdings nicht erreicht. Auf den Einspannungsgrad wird später noch näher eingegangen. Besonderer Wert mußte auf die Art der Kräfteinleitung gelegt werden. Die Befestigung des Zugseiles mittels einer einfachen Lasche erwies sich als unzureichend, da sich die Seildrilling auf das sehr verdrehweiche Flacheisen übertrug und bewirkte, daß die Dehnungslinien auf demselben fast unter 45° verliefen. Durch den Einbau eines Kugellagers (**Bild 6**) wurde diese Seildrilling, die bei 500kg Belastung und 50cm Seillänge etwa 1,5 Umdrehungen betrug, ausgeschaltet.

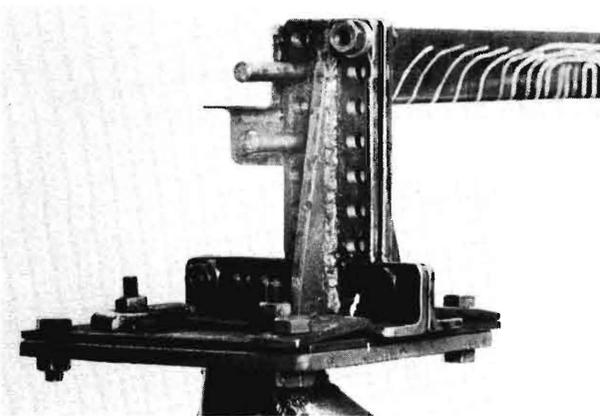


Bild 5. Aufhängung des Winkelprofils durch Kegelstifte und Klemmschraube.

Eine Übersicht über die untersuchten Knotenpunkte I bis VII gibt **Bild 7**. Im folgenden wird auf die laufende Nummer der Knoten in diesem Bild Bezug genommen.

Für die Dehnungsmessungen wurden sowohl *Huggenberger*-Tensometer mit 10mm Meßlänge als auch induktive *Askania*-Feindehnungsmesser mit 2mm Meßlänge benutzt. Messungen längs einer freien Kante wurden nur in einer Richtung, und zwar parallel zu dieser Kante, durchgeführt, da an den freien Kanten die zweite Hauptspannung gegen Null geht, was später an Hand von Spannungsverteilungskurven deutlich zu erkennen ist. Die Umrechnung der Dehnungen in Spannungen erfolgte nach dem *Hookeschen* Gesetz $\sigma = \epsilon E$. Messungen auf den Flächen wurden dagegen in Richtung beider Hauptspannungen (senkrecht und parallel zu den Reißlackdehnungslinien) gemessen und ausgewertet nach den Formeln für den zweiachsigen Spannungszustand:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1 - \nu^2} (\epsilon_1 + \nu \epsilon_2)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1 - \nu^2} (\epsilon_2 + \nu \epsilon_1)$$

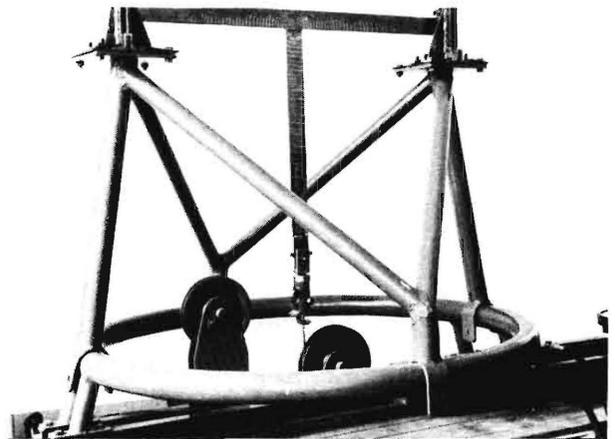


Bild 4. Belastungsvorrichtung für Knotenpunkte. Hydraulische Kraftverzeugung. Umlenkung über Rolle mittels Drahtseil.



Bild 6. Wirkung der Seildrilling auf die Beanspruchung des Knotens durch Zwischenschaltung eines Kugellagers ausgeschaltet.

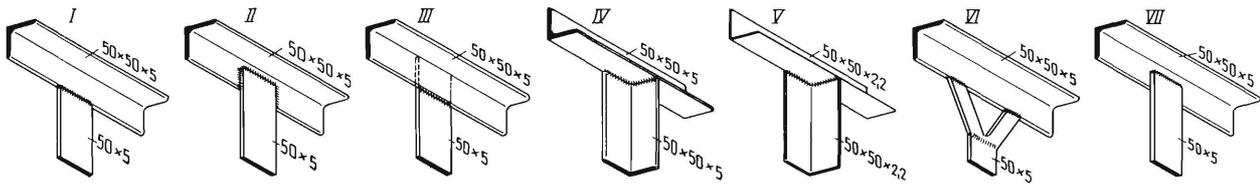


Bild 7. Übersicht über die untersuchten Knotenpunkte.

Bergmann [1] ist darauf näher eingegangen. Um die Dehnungen sichtbar zu machen, wurde *Maybach-Reißlack* verwendet. Die Rißbildung in dem Lack erfolgt stets durch Trennungsbruch, d.h. der Lack reißt immer senkrecht zur positiven Dehnung. Bei einachsigen Zugspannungszustand reißt der Lack also senkrecht zur Hauptspannungsrichtung; bei einachsigen Druckspannungszustand senkrecht zur positiven Querdehnung, also parallel zur Hauptspannungsrichtung. Es muß darauf hingewiesen werden, daß die Dichte oder Häufigkeit der mit weißer Farbe nachgezeichneten Dehnungsrisse in den späteren Bildern keinerlei Rückschlüsse auf die Größe der Spannungen gestattet. Der Abstand der wirklichen Dehnungslinien ist sehr klein und etwa gleich groß. Der Abstand der nachgezeichneten Linien liegt im Belieben des Nachzeichnenden [6, 7]. Im folgenden werden nun die Dehnungslinienbilder und Spannungsverteilungskurven der einzelnen Knotenpunkte erläutert und miteinander verglichen.

Knoten aus Winkel- und Flacheisen

Die Knotenpunkte I, II und III bestehen aus einem Winkelprofil 50×50×5 mm als Biegeträger und einem senkrecht angeschweißten Flacheisen 50×5 mm als Zugstab. Sie unterscheiden sich lediglich in der Art des Anschlusses des Flacheisens, und zwar ist das Flacheisen bei Knoten I stumpf, bei Knoten II innen und bei Knoten III außen an den Flansch des Winkeleisens angeschweißt. Bekanntlich gibt es für unsymmetrische, offene Profile nur einen Punkt, den sogenannten Schubmittelpunkt (auch Querkraftpunkt genannt), durch den die Kraft gehen muß, wenn keine zusätzliche Verdrehung des Winkelprofils auftreten soll [8 bis 10]. Dieser Schubmittelpunkt liegt bei Winkelprofilen im Schnittpunkt der Flanschmittellinien. Knoten I ist also im Schubmittelpunkt belastet, während bei Knoten II und III ein außermittiger Kraftangriff vorliegt, der eine zusätzliche Verdrehung des Winkelprofils zur Folge hat. Diese Verdrehung ist an den Kurven der Spannungsverteilung längs der Flacheisenkanten zu erkennen (Bild 8 bis 10). Beim Knoten II in Bild 10 greift die Kraft rechts vom Schubmittelpunkt an und erzeugt damit ein rechtsdrehendes Moment im Winkelprofil. Das Flacheisen macht die Verdrehung an der Einspannung mit, wird aber durch die Kraft P wieder zurückgezogen und erfährt damit eine Biegebeanspruchung. Die Biegespannungen überlagern sich den aus dem senkrechten Zug herführenden Normalspannungen. Da beim Knoten III

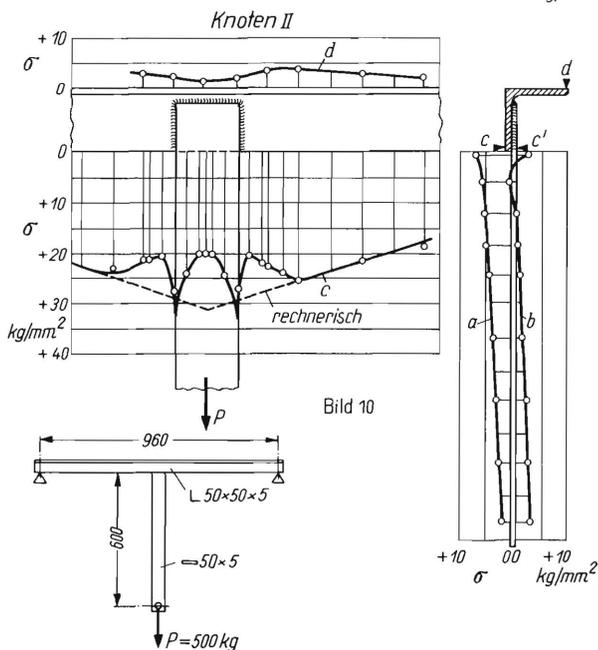
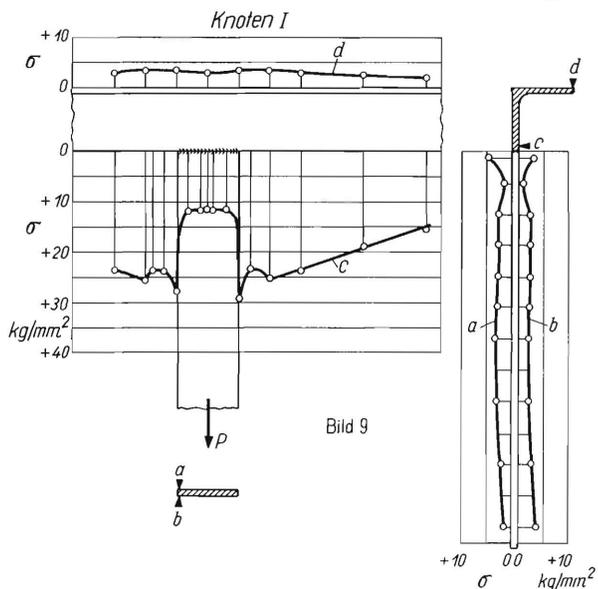
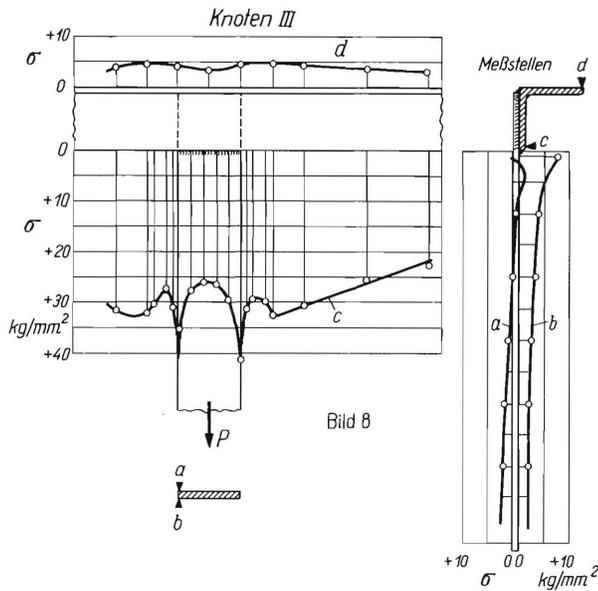
die Kraft P links vom Schubmittelpunkt angreift (Bild 8), so ist auch die Verdrehung des Winkelprofils und die Biegung des Flacheisens entgegengesetzt wie beim Knoten II. Die Einschnürung der Spannungskurven am Flacheisen des Knotens I (Bild 9, Meßstellen a und b) läßt sich damit erklären, daß der obere Teil des Flacheisens zu einem Teil des Biegeträgers wird und demnach eine Querdehnung erfährt, was sich in dem Verlauf der Dehnungslinien in Bild 18 und 19 deutlich widerspiegelt.

Am Biegeträger müßte sich nach der Rechnung bei freier Auflage eine Spannung

$$\sigma = \frac{M_b}{W_b} = \frac{Pl}{4W_b}$$

d.h. eine geradlinige Spannungsverteilung ergeben. Dies ist auch an den ungestörten Enden des Trägers der Fall. Am Knoten selbst macht sich aber der Einfluß der Versteifung und Materialverdickung bemerkbar. Zunächst werden die Spannungen geringer, steigen dann im Bereich der Schweißnaht stark an, um nach der Mitte zu wieder abzufallen. Hierbei muß hervorgehoben werden, daß die Messungen nicht auf der Kante, sondern seitlich längs der Kante durchgeführt wurden (siehe die durch schwarze Dreiecke markierten Meßstellen). Spannungsmessungen auf der Kante, zumal in der Ecke, ergaben Höchstwerte der Dehnungen, die bei Umrechnung nach dem *Hookeschen* Gesetz Spannungsspitzen von etwa 70 kg/mm² ergeben würden.

Beim Vergleich der Kurven längs der Unterkante des Trägers (Meßstellen c) in Bild 8 bis 10 erscheint es zunächst verwunderlich, daß das Spannungsgefälle beim Knoten I größer ist als bei den Knoten II und III. In Bild 11 ist nun für Knoten II die Spannungsverteilung c' für die andere Seite des Knotens dargestellt. Bei der Kurve c' für die Gegenseite erkennt man nun ein weit größeres Spannungsgefälle als bei der Kurve c in Bild 10. Mittelt man beide Kurven, so erhält man etwa die Verteilung beim Knoten I (Bild 9, Kurve c). Der Grund für diese Differenz liegt wieder in dem außermittigen Kraftangriff, wodurch auf der einen Seite zusätzliche Druckspannungen, auf der anderen Seite zusätzliche Zugspannungen überlagert werden. In Bild 11 ist ferner die rechnerische Spannungsverteilung unter Berücksichtigung des vorliegenden Einspanngrades des Winkelprofils eingezeichnet. Der Einspanngrad wurde aus den Messungen ermit-



telt. Bei starrer Einspannung würde die Gleichung für die Spannungsverteilung lauten

$$\sigma = \frac{P}{2W_b} \left(x - \frac{l}{4} \right),$$

wobei $0 < x < l/2$ ist. Die Nullstelle würde in diesem Fall bei $l/4$ liegen. Setzt man die Nullstelle der Meßkurve ins Verhältnis zu $l/4$, so erhält man ein Verhältnis von $1/3$, womit der Einspanngrad bestimmt ist. Die Formel lautet dann

$$\sigma = \frac{P}{2W_b} \left(x - \frac{l}{12} \right).$$

Der Vergleich zeigt, daß die errechneten Werte (siehe gestrichelte Kurve in Bild 10 und 11) mit den gemessenen am freien, ungestörten Träger nahezu übereinstimmen.

Betrachtet man in Bild 8 bis 10 die Spannungsverteilungen d am Oberflansch, so erkennt man bei allen drei Knoten zunächst eine Delle als Einfluß der Materialversteifung. Darüber hinaus erkennt man auch hier wieder einen für Knoten II und III unterschiedlichen Einfluß der Verdrehung durch den außermittigen Kraftangriff. Besonders hervorzuheben ist aber die Tatsache, daß bei allen drei Knotenpunkten an der Außenkante des Oberflansches Zugspannungen auftreten.

In Bild 12 ist nun die Verformung des Profiles dargestellt, wie sie am Winkelleisenprofil wie auch am Papiermodell beobachtet wurde. Man erkennt, daß neben der vertikalen Durchbiegung zusätzlich eine Durchbiegung des Profils in horizontaler Richtung stattfindet. Diese horizontale Durchbiegung

Bild 8 bis 10. Spannungsverteilung längs der Kanten der Profilstäbe bei verschiedener Knotengestalt. Einfluss der Materialversteifung. Spannungsspitzen in den Ecken. Zusätzliche Biegung im Flacheisen bei II und III durch aussermittigen Kraftangriff.

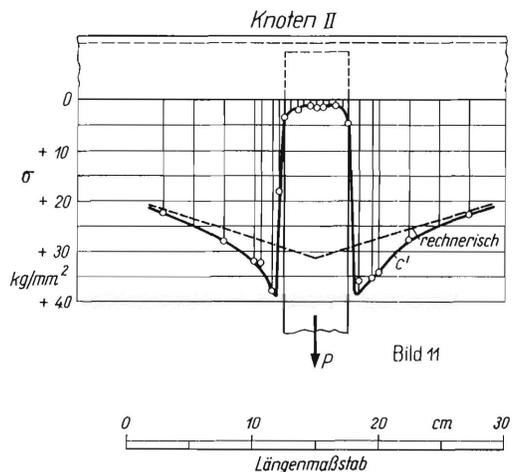


Bild 11. Spannungsverteilung auf der Gegenseite des Knotens II (s. a. Bild 10). Unterschiedliches Spannungsgefälle dadurch, dass die Kraft nicht im Schubmittelpunkt angreift. Zum Vergleich errechnete Spannungsverteilung unter Berücksichtigung des Einspanngrades.

findet auch dann statt, wenn die Kraft durch den Schubmittelpunkt geht. Sie ist lediglich abhängig von dem Winkel α der Kraftrichtung zur Richtung einer der beiden Hauptträgheitsachsen des Winkelprofils [11]. Zerlegt man das Moment der schiefen Belastung M senkrecht zu den Hauptachsen η und ξ in die Seitenmomente

$$M_1 = M \sin \alpha$$

$$M_2 = M \cos \alpha,$$

so kann man mit den zugehörigen Widerstandsmomenten W_1 und W_2 die zu jedem Seitenmoment gehörigen Randspannungen $\sigma_1 = M_1/W_1$ und $\sigma_2 = M_2/W_2$ ausrechnen. Die algebraische Summe der Einzelspannungen ergibt dann die jeweilige, resultierende Spannung. Da im vorliegenden Belastungsfall $\alpha = 45^\circ$ ist, so ist $M_1 = M_2$; aber $W_2 (= W_\xi)$ ist mehr als doppelt so groß wie $W_1 (= W_\eta)$. An der Außenkante des Oberflansches ergibt M_2 also Druckspannungen, M_1 aber an derselben Stelle Zugspannungen, die mehr als doppelt so groß sind. Die algebraische Summe ergibt also Zugspannungen für die Außenkante des Oberflansches.

Eine Vertiefung und Bestätigung der bisher geschilderten Ergebnisse kann man aus der Betrachtung von **Bild 13 bis 15** erhalten. Es handelt sich hier um eine Ringmessung über dem Umfang des Profils, etwa 15 mm vom Knoten entfernt; gemessen wurde senkrecht und parallel zu den Dehnungslinien, also in Richtung der beiden Hauptspannungen σ_1 und σ_2 mit einem Feindehnungsmesser von 2 mm Meßlänge. Die oberen Kurven stellen die Spannungsverteilungen über der Außenseite, die unteren über

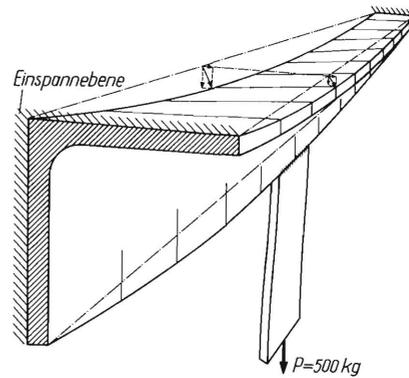


Bild 12. Verformung des Profilknotens I bei senkrechtem Zug. Hauptdurchbiegung in vertikaler Richtung, zusätzliche Durchbiegung in horizontaler Richtung. Aufweitung des Winkelprofils.

der Innenseite des Winkelprofils dar. Die horizontale Biegung des Oberflansches ist deutlich zu erkennen (Abschnitt B-C und E-D der Kurven), ebenso die Aufweitung des Profils durch unterschiedliche σ -Werte an Ober- und Unterseite.

Weiter läßt sich hier deutlich zeigen, daß an den Kanten die zweite Hauptspannung $\sigma_2 = 0$ ist, womit bewiesen ist, daß es zulässig war, längs der freien Kanten nur in einer Richtung zu messen. Auch die Verdrehung durch außermittigen Kraftangriff erkennt man daran, daß bei den Knoten II und III an der Profilecke beide Hauptspannungen auftreten, während bei Knoten I eine Hauptspannung jeweils Null ist. Vergleicht man schließlich noch die Spannungsnullstellen mit den nachfolgenden Dehnungslinienbildern in **Bild 16 bis 21**, so erkennt man sie dort am

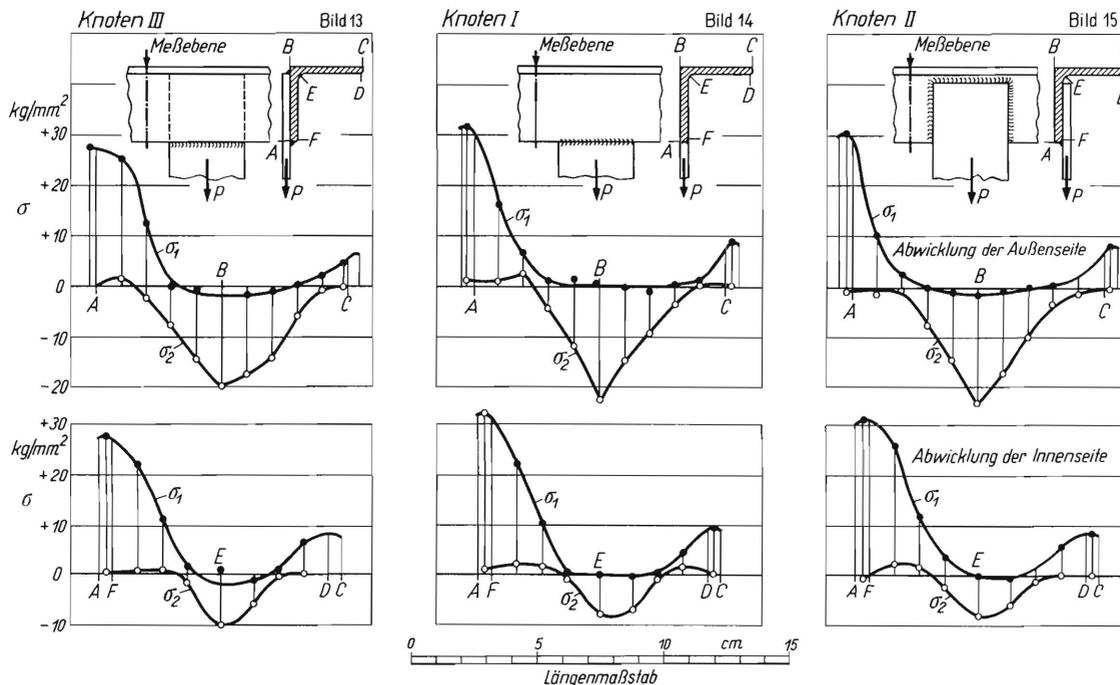


Bild 13 bis 15. Spannungsverteilung über dem Umfang des Winkelprofils bei verschiedener Knotengestalt. Messung jeweils in den beiden Hauptspannungsrichtungen. An den Kanten ist $\sigma_2 = 0$. Nullstellen lassen sich auch in den Dehnungslinienbildern erkennen (vergl. Bild 16 bis 21). Eine zusätzliche Verdrehung bei Knoten II und III ist daran erkennbar, dass im Profilscheitel sowohl σ_1 als auch σ_2 auftritt.

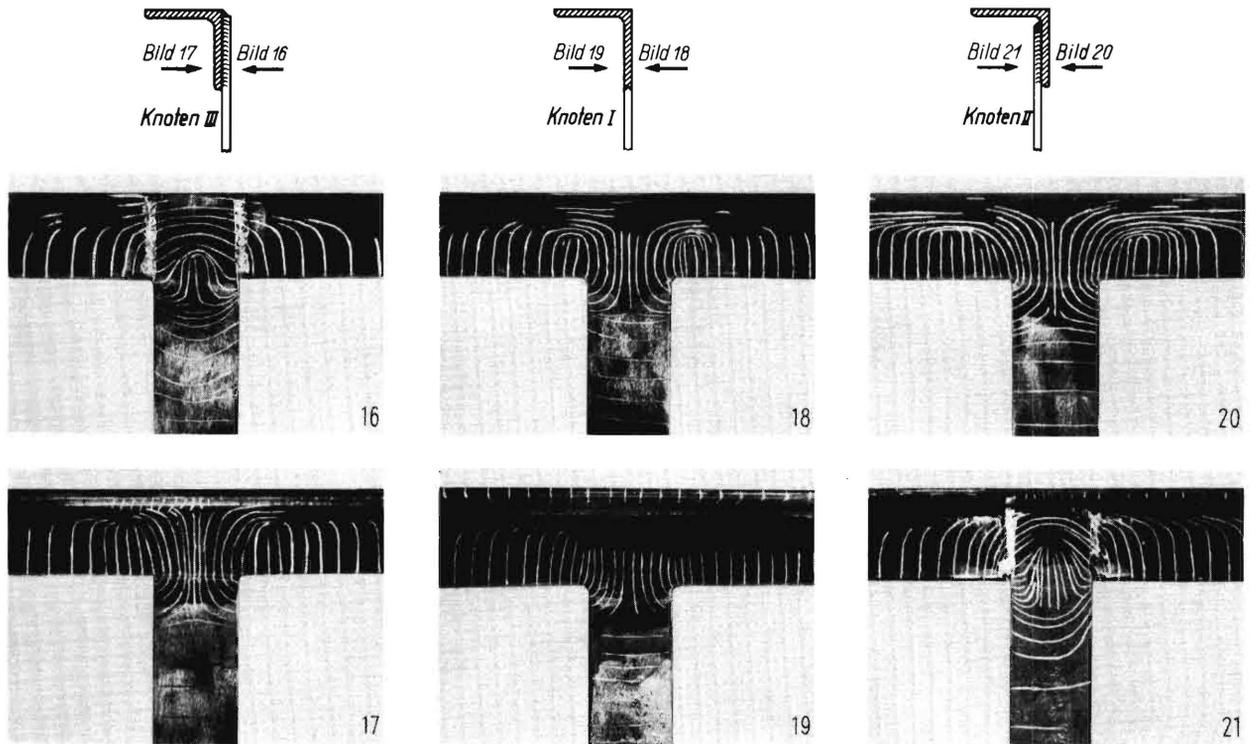


Bild 16 und 17. Spannungsfeld am Knoten III, Einfluss des aussermittigen Kraftangriffs erkennbar. Spannungsfelder auf Vorder- und Rückseite sind daher nicht mehr gleich.

Bild 18 und 19. Spannungsfeld am Knoten I. Die Biegung des Winkelprofils hat Querdehnung des Flacheisens zur Folge, und zwar auf Vorder- und Rückseite gleichmässig. Nullstellen sind dort, wo die Dehnungslinien senkrecht zusammentreffen.

Bild 20 und 21. Spannungsfeld am Knoten II. Genau umgekehrt wie am Knoten III.

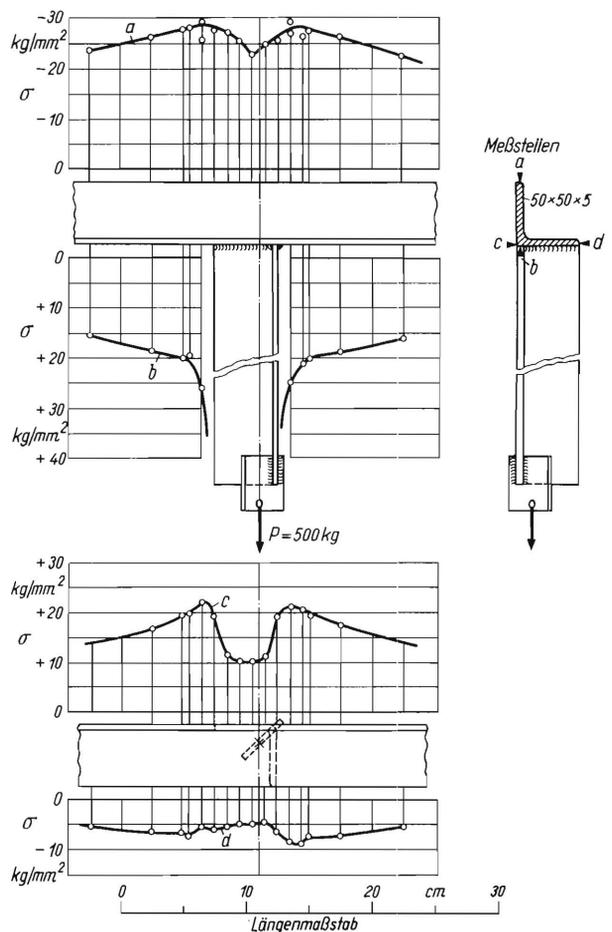
Verlauf der Dehnungslinien wieder. An Hand der Dehnungslinien sieht man auch den Einflusbereich der Biegung auf das Flacheisen, und zwar sind sie bei Knoten I auf der Vorder- und Rückseite gleich (Bild 18 und 19), bei Knoten II und III infolge der Verdrehung des Profils und Biegung des Flacheisens durch aussermittigen Kraftangriff dagegen unterschiedlich und untereinander genau umgekehrt (Bild 16/17 und 20/21).

Knoten aus zwei Winkelprofilen

In **Bild 22 und 23** sind die Spannungsverteilungskurven an Knotenpunkten aus zwei Winkelprofilen dargestellt, und zwar in Bild 22 aus dem Normalprofil 50×50×5, in Bild 23 aus dem Leichtbauprofil 50×50×2,2. Die Meßstellen sind jeweils wieder durch Meßpeile angegeben. Die Belastung erfolgte im Schwerpunkt des Zugstabprofils, d.h. für den Biegeträger ausserhalb des Schubmittelpunktes.

Auch bei diesen Knoten IV und V war wieder eine zusätzliche, horizontale Durchbiegung zu beobachten, allerdings in entgegengesetzter Richtung

Bild 22. Spannungsverteilung längs der Profilkanten des Knotens IV. Kraftangriff im Profilschwerpunkt. Seitliche Durchbiegung entgegengesetzt wie bei Knoten I bis III, dadurch Verkleinerung des Profilwinkels des horizontalen Stabes. Doppelte Versteifung durch die beiden Flansche des senkrechten Profilstabes ergibt grössere Spannungsfälle. In den Ecken des Knotens sehr hohe Spannungsspitzen.



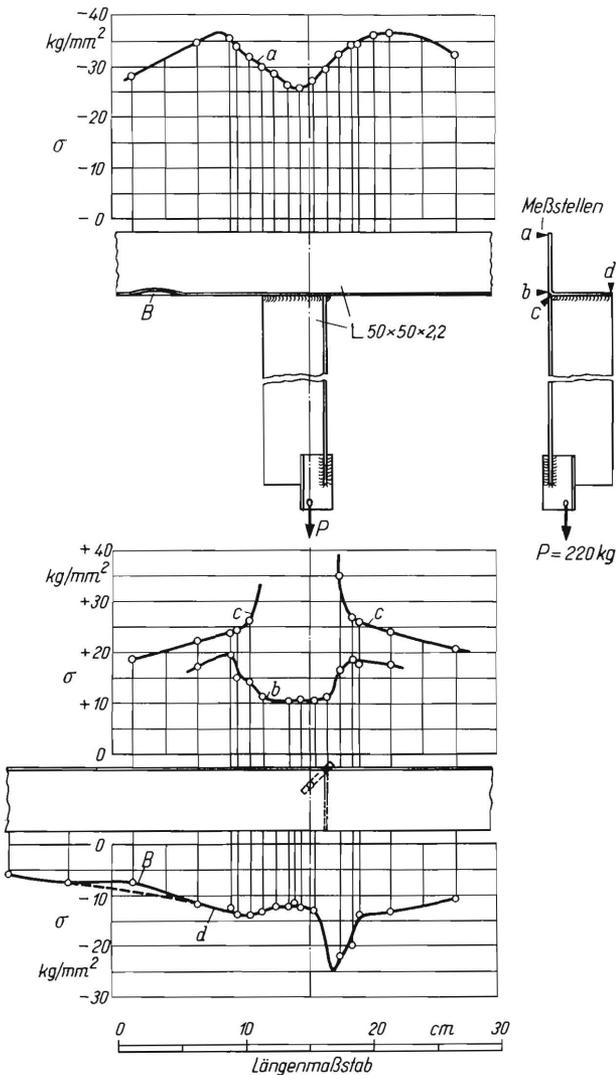


Bild 23. Spannungsverteilung längs der Profilkanten des Knotens V (Leichtbauprofil). Kurven ähnlich denen des Normalprofils in Bild 22; Spannungsspitzen sind jedoch ausgeprägter. Ausbeulempfindlich.

wie bei den Knoten I bis III, d.h. an der Außenkante des horizontalen Flansches treten anstatt Zugspannungen Druckspannungen auf. Ferner findet keine Aufweitung, sondern eine Verengung des Profils statt. Diese Erscheinung findet darin ihre Erklärung, daß bei den Knoten I bis III der Flansch, an den das Flacheisen angeschweißt ist, nach unten (in Zugrichtung) liegt, während dieser Flansch bei den Knoten IV und V nach oben gerichtet ist. Deutlich ist die doppelte Versteifung des horizontalen Flansches durch das senkrechte Winkelprofil zu erkennen. Auch hier treten in den Ecken hohe Spannungsspitzen auf.

Beim Leichtbauprofil in Bild 23 zeigt sich fast die gleiche Tendenz wie beim Normalprofil. Allerdings sind die Spannungsspitzen viel stärker ausgeprägt, was zweifellos auf die dünne Wandstärke zurückzuführen ist. Überhaupt spielt die Gefahr des Ausbeulens bei diesen dünnen Wandstärken eine große Rolle [12, 13]. So erkennt man z.B. in der

Kurve d eine Unstetigkeit, die auf eine ganz leichte Ausbeulung B des Profils zurückzuführen ist. (Diese ist an der Vorderkante links stark übertrieben eingezeichnet.)

Die Dehnungslinienbilder in Bild 24 und 26 zeigen große Ähnlichkeit mit der entsprechenden Ansicht des Knotens I (Bild 18). Lediglich die Lage der Nullstellen ist etwas unsymmetrisch infolge der zusätzlichen Versteifung durch den zweiten Flansch des senkrechten Winkelprofils. Diese doppelte Versteifung ist in Bild 25 besonders gut zu erkennen. Beim Leichtbauprofil in Bild 27 erkennt man außerdem die Empfindlichkeit gegen Verdrehung daran, daß die Dehnungslinien etwas schräg in den Rand einlaufen und nicht mehr vollständig parallel sind.

Diese Folgerungen findet man wieder bestätigt in der Ringmessung über dem Umfang, Bild 28 und 29, die auch hier, 15 mm vom Knoten entfernt, durchgeführt wurde. An der freien Kante ist $\sigma_1 = 0$, also herrscht dort einachsiger Druckspannungszustand.

Sonderausführungen von Knoten

Bei allen bisher untersuchten Knotenpunkten wurde immer eine hohe Spannungsspitze in der Ecke des Knotens festgestellt. Beim Knoten VI (Bild 30) wurde daher der Versuch gemacht, durch eine Gabelung des Flacheisens die Versteifung des Profils und die Querdehnung des Flacheisens zu mildern.

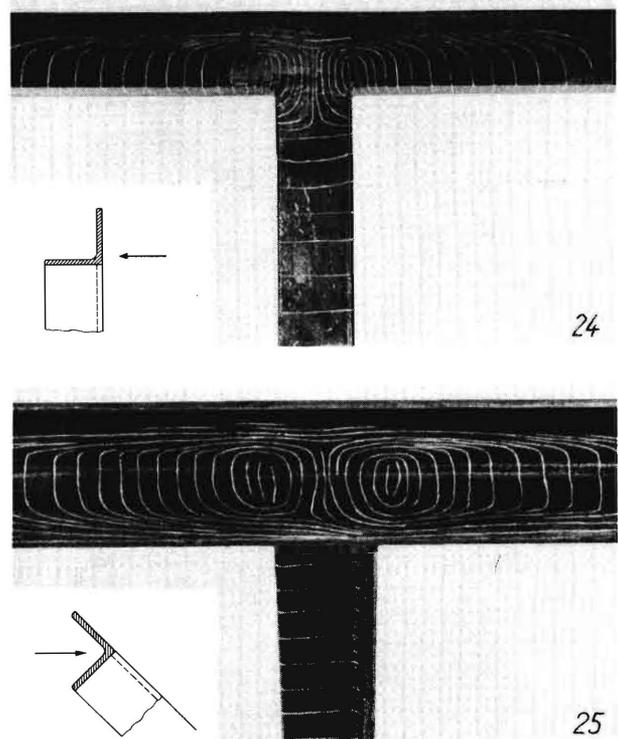
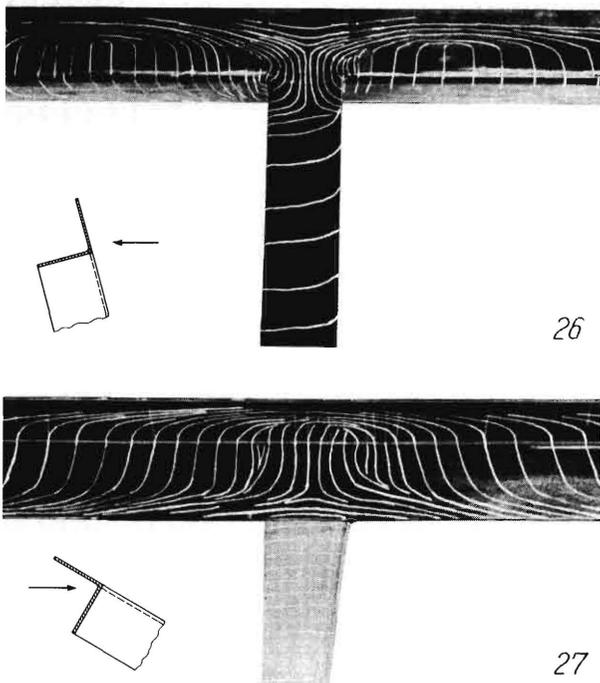


Bild 24 und 25. Spannungsfelder am Knoten IV. Doppelte Versteifung durch die beiden Flansche des senkrechten Stabes in Bild 25 zu erkennen. Bild 24 hat grosse Ähnlichkeit mit Knoten I (Bild 18).



26

27

Bild 26 und 27. Spannungsfeld am Knoten V. Ähnlich dem Normalprofil in Bild 24 und 25. Grosse Empfindlichkeit gegen Beulen und Verdrehen aus der stärkeren Neigung der Linien erkennbar.

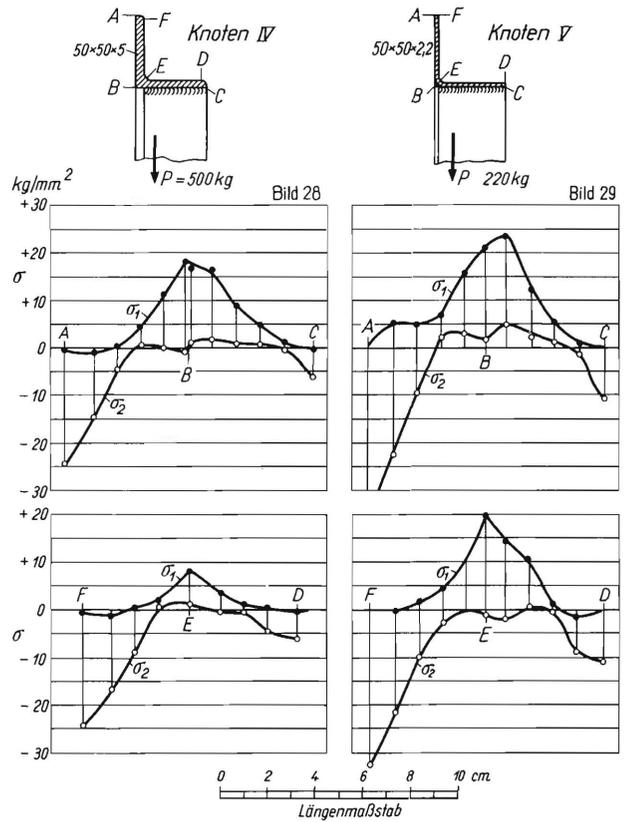


Bild 28 und 29. Spannungsverteilung über dem Umfang des Biegeträgers von Knoten IV und V. Verdrehung erkennbar. In der Mitte $\sigma_2 \neq 0$. Verschiedene Steifigkeit der beiden Knoten.

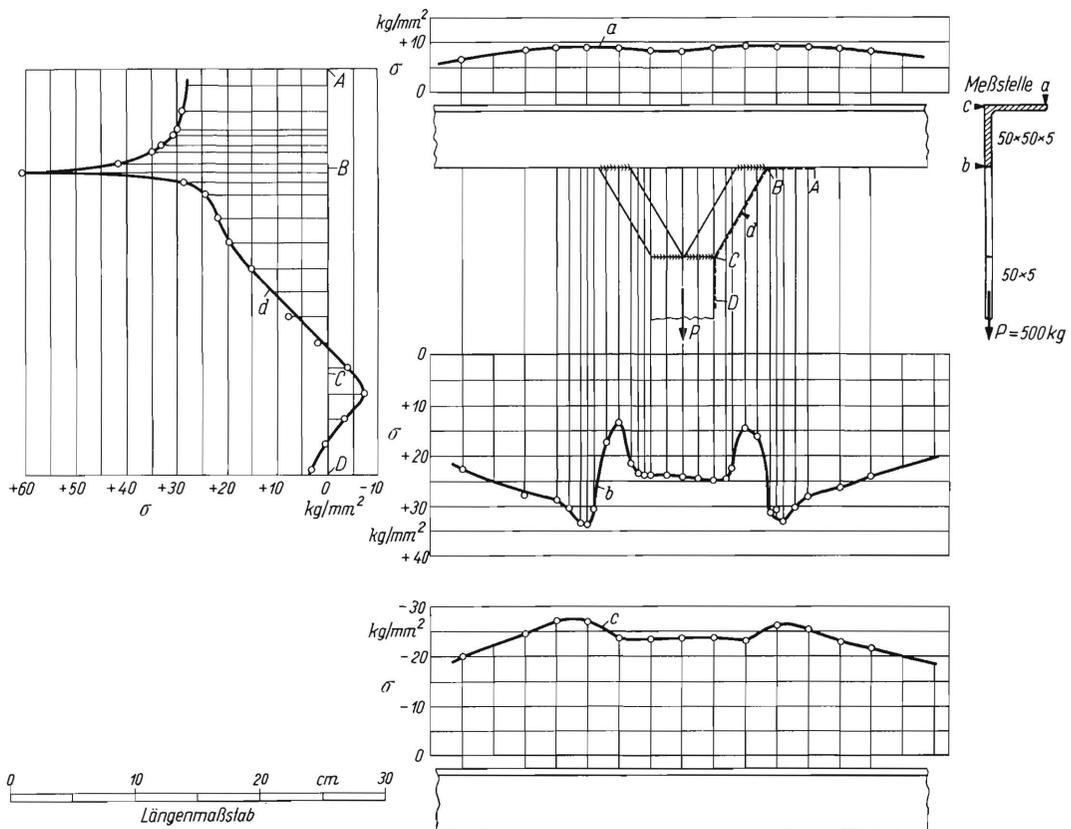
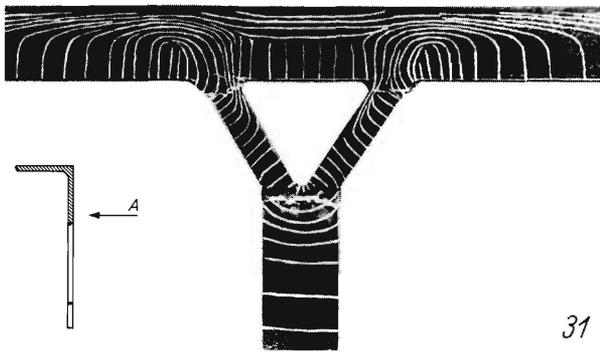
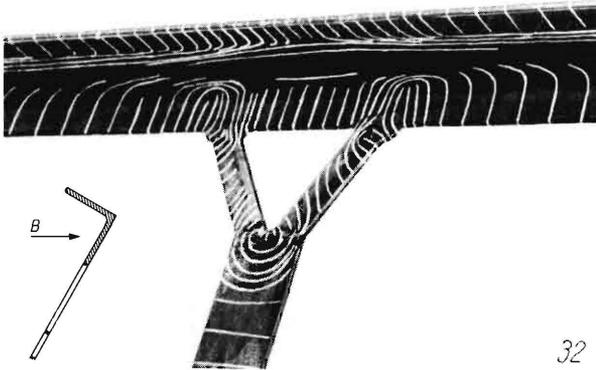


Bild 30. Spannungsverteilung längs der Profilkanten des Knotens VI. Querdehnung und Versteifung im Vergleich zu Knoten I gemildert. Örtliche Materialversteifungen durch Schweissnähte ergibt Spannungsgefälle. Spannungsverteilung in der Ecke und am Gabelstück über der Abwicklung ABCD aufgezeichnet, lässt in der Kerbe wieder sehr hohe Spannungen erkennen.



31



32

Bild 31 und 32. Spannungsfeld am Knoten VI: es ist demjenigen des Knotens I ähnlich, wenn dieser in der Mitte geteilt und nach aussen verschoben wäre.

Man kann diese Verbindung als einen Träger mit zwei Einzellasten betrachten. Zwar ist in der Mitte, wie zu erwarten, die Spannung konstant, aber niedriger als nach der Rechnung, was auf die Versteifung durch die Gabelstücke zurückzuführen ist. An den Verbindungsstellen selbst bleibt aber nach wie vor ein starkes Spannungsgefälle bestehen. Dadurch, daß der Außenwinkel zwischen dem Flansch des Winkelprofils und dem Gabelstück 120° betrug, war es meßtechnisch möglich, die Spannungsverteilung in der Ecke punktweise abzutasten. Diese Kurve ist in Bild 30 über der entsprechenden Abwicklung besonders herausgezeichnet. Man erkennt die S-förmige Biegung des Gabelstückes, erkennt aber auch besonders gut die Spannungsspitze, die genau in der Einbrandkerbe der Schweißnaht liegt und etwa 60 kg/mm^2 beträgt. Demnach ist zwar die Versteifung und Querdehnung durch diese Knotenform etwas gemildert, aber die Spannungsspitzen in den Ecken treten trotzdem auf.

Denkt man sich in **Bild 31 und 32** das Gabelstück wieder zu einem Flacheisen zusammengeschoben, so würde das Dehnungslinienbild fast genau so wie beim Knoten I (**Bild 18**) aussehen.

Die hauptsächliche Ursache für die hohen Spannungsspitzen in den Ecken war also nicht in der zusätzlichen Verdrehung durch außermittigen Kraftangriff zu suchen, sondern in der Störung der hochbeanspruchten, äußeren Biegefaser [14]. Zum Be-

weis dieser Folgerung wurde der Knoten VII hergestellt (**Bild 33**), bei dem das Flacheisen nur in der Nähe der neutralen Biegefaser angeschweißt war. Hierbei wird eine Verdrehung des horizontalen Winkelprofils durch außermittigen Kraftangriff in Kauf genommen. Die Korrosionsgefahr durch die entstandene Tasche ist vernachlässigbar klein, da der die Tasche abschließende Reißlack bei der Belastung nicht aufsprang. Es müßte also ein normaler Anstrichlack als Schutz vollauf genügen, da dieser ja

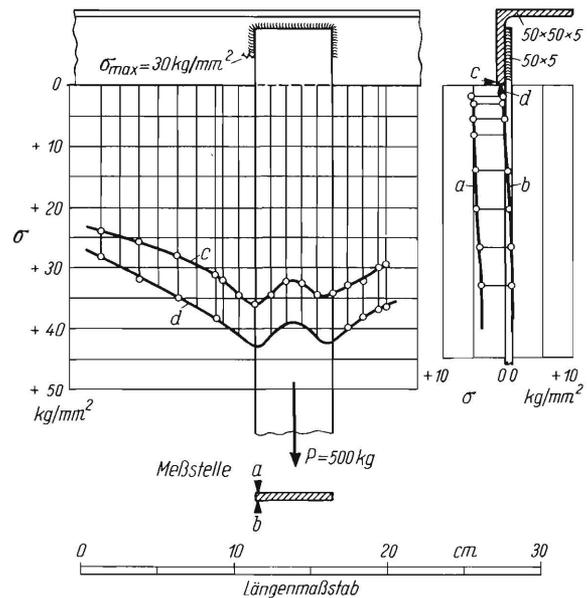


Bild 33. Spannungsverteilung längs der Profilkanten des Knotens VII, bei dem Schweißnähte nur im Bereich der neutralen Faser liegen. Spannungsspitzen werden dadurch vermieden, da hochbeanspruchte Randfasern ungestört bleiben. Verdrehung durch außermittigen Kraftangriff demgegenüber nicht bedeutend. Abbau der errechneten Spannungsspitze durch Versteifung; höchste, gemessene Dehnung in der Einbrandkerbe der Schweißnaht bleibt kleiner als rechnerische Dehnungsspitze infolge Biegung.

deutend zäher ist als der *Maybach*lack. Allerdings ist es zweckmäßig, das Flacheisen innen am Profil anzuschweißen, da dann die horizontale Durchbiegung des gesamten Profils dem Abheben des Flacheisens infolge des außermittigen Kraftangriffs entgegenwirkt. Wie die Dehnungsmessungen ergaben, ist bei dieser Knotenausbildung die Spannungsver-

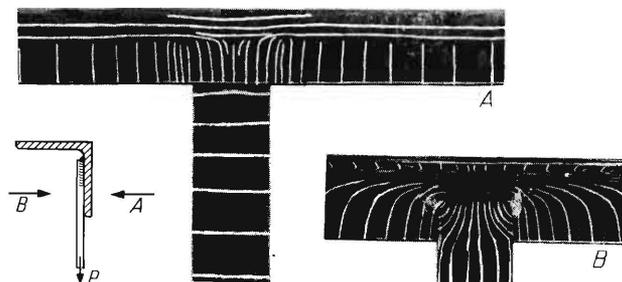


Bild 34 und 35. Spannungsfeld am Knoten VII. Ungestörte Biegung im Winkelprofil. Biegung des Flacheisens infolge außermittigen Kraftangriffs.

teilung ziemlich stetig (Bild 33). Die Versteifung durch das Flacheisen wirkt sich sogar noch günstig aus, indem sie die rechnerisch sich ergebende, in der Mitte liegende Spannungsspitze abbaut. Tastmessungen mit dem Feindehnungsmesser an den Enden der Schweißnaht ergaben als maximalen Wert 30 kg/mm^2 . Dieser Wert entspricht etwa $2/3$ der errechneten Biegespannung und ist daher ungefährlich.

Das Dehnungslinienbild in Bild 34 und 35 bestätigt diese Ergebnisse. Die Dehnungslinien laufen ungestört in die Profilkante ein. Die Störung liegt lediglich in der Nähe der neutralen Faser. Das Flacheisen wird, wie schon erwähnt, zusätzlich auf Biegung beansprucht, die aber, wie in Bild 33 zu sehen ist, nur sehr klein ist.

Zusammenfassung

Die Untersuchungen haben ergeben, daß für den freien Träger die üblichen Berechnungsformeln ausreichen. Am Knoten ergeben sich aber Spannungsspitzen, die bedeutend höher sind als die errechneten Werte. Die Ursachen hierfür können sein: einmal eine zusätzliche Verdrehung, weil die Kraft nicht im Schubmittelpunkt angreift, und eine örtliche Versteifung des Biegeträgers; zum anderen aber vor allem Schweißnähte, die in der hochbeanspruchten, äußersten Randfaser des Biegeträgers angebracht sind.

Es muß also bei solchen Knotenverbindungen stets darauf geachtet werden, daß die Randfasern des Biegeträgers möglichst ungestört bleiben. Eine

örtliche Versteifung in der Nähe der neutralen Faser kann sich dagegen sogar günstig auswirken.

Schrifttum

- [1] Bergmann, W.: Spannungen in Knotenpunkten von Hohlprofilen bei statischer Belastung. (In diesem Heft).
- [2] Trost, W.: Spannungen und Werkstoffausnutzung in Fahrzeugrahmen. Z. VDI 87 (1943) S. 467/72.
- [3] Bergmann, W.: Neue Erkenntnisse über beanspruchungsgerechte Gestaltung. Grdlg. d. Landtechn. Heft 3. Düsseldorf 1952. S. 12/23.
- [4] Wyss, Th.: Beitrag zur Spannungsuntersuchung an Knotenblechen eiserner Fachwerke. Forsch. arb. Ing. wes. Heft 226. Berlin 1923. 101 S.
- [5] Cleff, Th. und A. Erker: Untersuchungen über die Dauerhaltbarkeit von Fahrzeugrahmen. Dt. Kraftfahrtforsch. Heft 35. Berlin 1939.
- [6] Bergmann, W.: Sichtbar gemachte Spannungsfelder in Maschinenteilen. Grdlg. d. Landtechn. Heft 4. Düsseldorf 1953. S. 12/23.
- [7] Dietrich, O. und E. Lehr: Das Dehnungslinienverfahren. Z. VDI 76 (1932) S. 973.
- [8] Kloth, W. und W. Bergmann: Der Schubmittelpunkt. Landtechn. 2 (1947) Heft 23/24.
- [9] Trefftz, E.: Schubmittelpunkt. Z. angew. Math. u. Mech., 1935, S. 220 ff.
- [10] Weber, C.: Torsion und Biegung durch eine Endquerlast (Schubmittelpunkt). Z. angew. Math. u. Mech., 1924, S. 334.
- [11] —: „Hütte“, Bd. 1. Berlin 1949. S. 649 ff.
- [12] Kloth, W. und W. Bergmann: Instabilitätserscheinungen. Landtechn. 3 (1948) S. 273/76.
- [13] Reinitzhuber, F.: Beitrag zur Berechnung gedrückter, dünnwandiger Profile oberhalb der Beulgrenze. Luftfahrtforsch. 19 (1942) S. 240.
- [14] Neuber, H.: Kerbspannungslehre. Berlin 1937.

Eingegangen am 7.12.1955

Institut für Landtechnische Grundlagenforschung
der Forschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode
Direktor: Prof. Dr.-Ing. W. Kloth

Anschrift des Verfassers: Dipl.-Ing. Dietrich Spangenberg, (20b) Braunschweig, Bundesallee 50