Spannungen in Knotenpunkten von Hohlprofilen bei statischer Belastung

Von **Walter Bergmann**

Die Praxis hat gezeigt, daß sehr hohe Spannungen und sehr ungleichmäßige Spannungsverteilungen im allgemeinen nur in den Knotenpunkten eines Baukörpers auftreten. Auf der freien Länge der Bauteile bleiben dagegen die Spannungen in zulässigen Grenzen, weil dort die Möglichkeit besteht, einigermaßen richtig zu rechnen und zu dimensionieren. Da es nach dem derzeitigen Stand der Technik

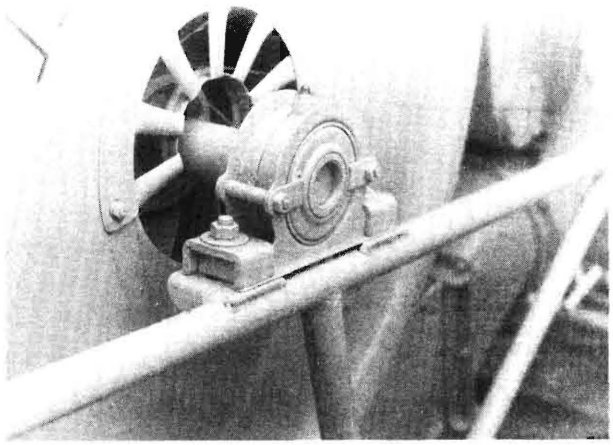


Bild 1. Unversteifter Rohrknoten am Gestell eines Fördergebläses.

keine Methoden zur sicheren Vorausberechnung der Haltbarkeit von Knotenpunkten gibt, ist es notwendig, grundlegende Erkenntnisse über die Spannungen und die Verformungen an Kraftumleitungsstellen in Form von Verformungsbildern, Spannungsfeldern und Spannungsverteilungskurven zu erarbeiten.

Im Rahmen eines umfangreichen Versuchsprogramms wurden daher zunächst statische Feindehnungsmessungen an einfachen, geschweißten Knotenpunkten aus Hohlprofilen und offenen Profilstäben [1] durchgeführt. Dynamische Versuche bei wechselnder oder schwellender Dauerbeanspruchung sind im Anschluß an die statischen Messungen vorgesehen. Bei den statischen Untersuchungen wurden nur die Beanspruchungen durch äußere Belastung berücksichtigt, nicht aber die Schweißeigenspannungen.

Ausgangspunkt für die Untersuchungen war eine Reihe von Gestaltungsbeispielen aus der Landtechnik und aus der Leichtbaufibel [2]. **Bild 1 bis 3** geben einen Einblick in die Gestaltungsprobleme bei ausgeführten Rohrkonstruktionen an Landmaschinen [3]. Aus diesen Beispielen ergaben sich Grundformen von unversteiften und versteiften Rohrverbindungen, welche in **Bild 4 bis 14** dargestellt sind. Die Art der Versteifung an den Verbindungsstellen ließ eine systematische Aufteilung nach Gestaltungsgruppen zu. Ausgehend von einem unversteiften, geschweißten Rohrknoten aus zwei T-förmig angeordneten, dünnwandigen Rohren [1], Bild 4, sollte in der ersten Gruppe der Einfluß verschiedener Versteifungen durch angeschweißte Eckbleche, Bild 5 bis 8, auf das Spannungsfeld im Knotenpunkt untersucht werden. Bei der zweiten Gruppe der T-förmigen Rohrknoten war die Frage zu beantworten, wie das Spannungsfeld durch verschiedene Arten von Kaltverformungen eines der beiden Rohre, zum Beispiel durch Falten, Aufbiegen oder Ausstülpen, beeinflußt wird (Bild 9 bis 14).

Versuchsanordnung und -durchführung

Um Störungen im Bereich der Verbindungsstelle der Rohre durch Lager-, Einspann- oder Krafteinleitungsstellen zu vermeiden, wurden die Rohrlängen möglichst groß gewählt. Das horizontale Rohr hatte eine Einspannlänge von 860 mm, das vertika-

[1]) schwarze, geschweisste und einmal kalt nachgezogene, kreisrunde Rohre 65 x 2 mm und 50 x 1,5 mm

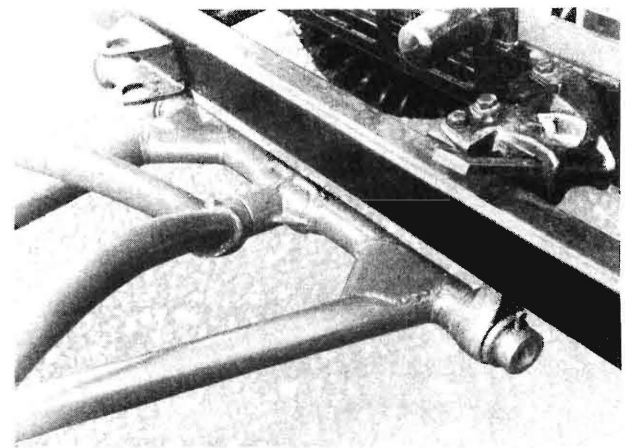


Bild 2. Durch Sattelbleche versteifte Rohrknoten an einer Landmaschine.

le Rohr war 600 mm lang. Der für diese Untersuchungen hergestellte Prüfstand ist in **Bild 15** abgebildet. Bei Zugbeanspruchung in Richtung des vertikalen Rohres war das horizontale Rohr an den Enden frei aufgelegt. Mittels einer hydraulischen Belastungsvorrichtung wurde die Last zügig bis zu einem Höchstwert von 500 kg über ein Seil und die Seilrolle f aufgebracht. Bei Biegebeanspruchung des Rohrknotens wurde das Seil über die Seilrolle g geführt. Hierzu mußte das obere Rohr gegen Verschiebung in Rohrlängsrichtung und gegen Verdrehung durch Schellen und Stifte gesichert werden. Die maximale Seitenkraft betrug 100 kg.

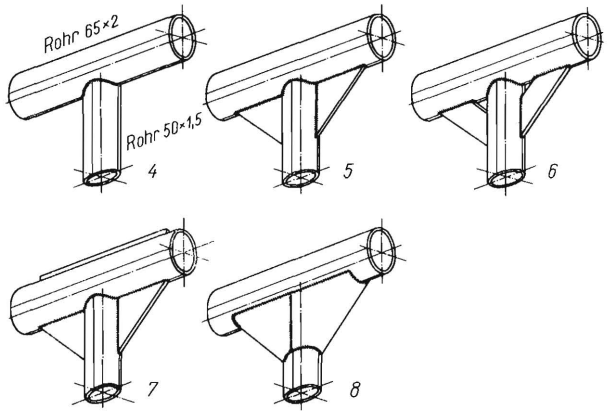


Bild 4 bis 8. Einfache, rechtwinklige Knotenpunkte mit Eckversteifungen.

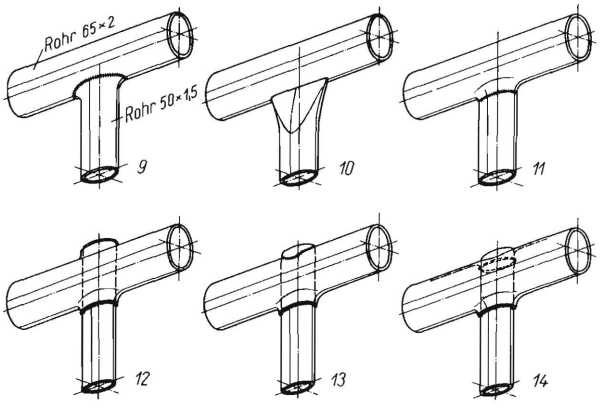


Bild 9 bis 14. Einfache, rechtwinklige Knotenpunkte, bei denen der Anschluss durch Kaltverformung eines der beiden Rohre oder durch Ineinanderstecken der Rohre hergestellt ist.

Durch Drehen des oberen Gestells auf dem kreisförmig gebogenen Führungsrohr des Prüfstandrahmens war es möglich, die Kraftrichtung für die Biegebeanspruchung im Rohrknoten beliebig zu ändern, so daß man auf diesem Prüfstand die Verformungen des Rohrknotens bei verschiedenen Beanspruchungsarten messen konnte.

Die Dehnungsmessungen wurden mit Reißlack [4, 5] und mit statischen Feindehnungsmessern von 2 mm Meßlänge durchgeführt. Die gleichzeitige Anwendung beider Meßmethoden ermöglichte die unmittelbare Erfassung der auf der Rohroberfläche bestehenden zweiachsigen Spannungszustände, indem nämlich der Reißlack die Richtung der beiden Hauptdehnungen ϵ_1 und ϵ_2 anzeigte und die Dehnungsmesser die Größe der Hauptdehnungen parallel und senkrecht zu den Lackrissen direkt lieferten.

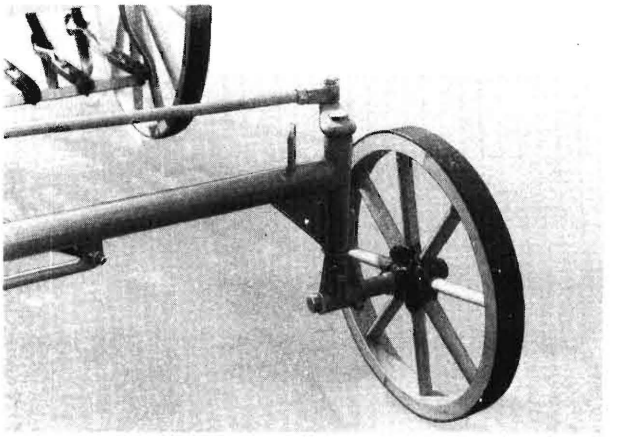


Bild 3. Rohrknoten am Vorderwagen einer Drillmaschine. Die Verbindungsstelle ist hier durch ein dreieckiges Blech versteift.

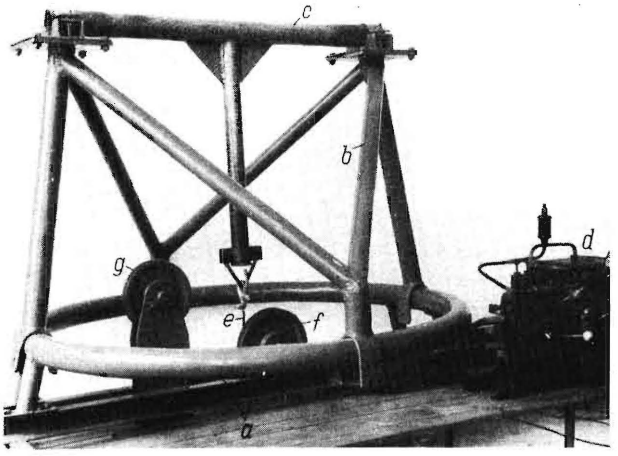


Bild 15. Belastungsvorrichtung für die Untersuchung von Knotenpunkten.

a Grundrahmen mit Seilrollen und hydraulischem Belastungszylinder,
b schwenkbares Oberteil mit Lagerungen für das horizontale Rohr des Knotenpunktes,
c Rohrknoten,
d hydraulische Belastungsvorrichtung für statische Lasten bis zu 3 t,
e Belastungsseil,
f Leitrolle für senkrechten Zug am vertikalen Rohr,
g Seilrolle für Biegebelastung des Knotenpunktes.

Theoretische Vorbetrachtungen

Die Messung der ersten und zweiten Hauptdehnung war erforderlich, erstens, weil an jedem Punkt der Verbindungsstelle ein zweiachsiger Spannungszustand herrscht, zweitens, um eine möglichst genaue Vorstellung vom Verformungsmechanismus zu bekommen, und drittens, um die Haltbarkeit einer Rohrknotenkonstruktion aus der Verformungsanalyse heraus beurteilen zu können. Bei Knotenpunkten aus offenen Profilen genügt es im allgemeinen, nur

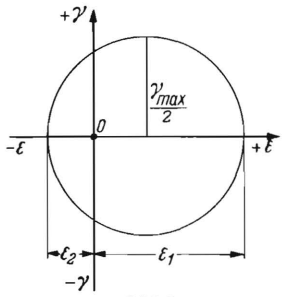


Bild 16

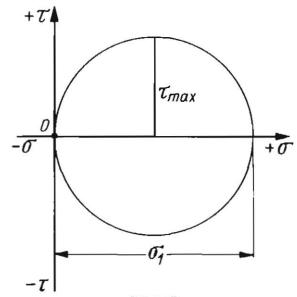


Bild 17

Bild 16. Verformungskreis für den einachsigen Spannungszustand $\epsilon_2 = -\nu\epsilon_1$.

$$\frac{\gamma_{max}}{2} = \frac{\epsilon_1 - (-\epsilon_2)}{2} = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2}$$

Bild 17. Spannungskreis für den einachsigen Zugspannungszustand σ_1; $\sigma_2 = 0$; $\sigma_3 = 0$.

$$\frac{\tau_{max}}{2} = \frac{\sigma_1}{2}$$

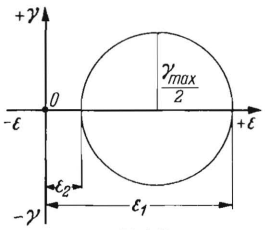


Bild 18

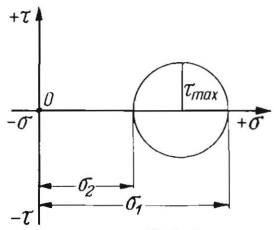


Bild 19

Bild 18. Verformungskreis bei zweiachsigem Spannungszustand.

$$\frac{\gamma_{max}}{2} = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2}$$

Bild 19. Spannungskreis des zweiachsigen Spannungszustandes σ_1; σ_2; $\sigma_3 = 0$.

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$$

in der 1,2-Ebene (Oberfläche)

in einer Richtung zu messen, da die zweite Hauptspannung am lastfreien Rande Null ist. Durch Ausrechnung der Dehnungswerte ϵ_1 und ϵ_2 aus den Meßergebnissen ist die Möglichkeit gegeben, für jede Meßstelle den Verformungskreis [6] im ϵ, γ-Diagramm zu zeichnen. Rechnet man die Dehnungswerte nach den bekannten Gleichungen für den zweiachsigen Spannungszustand um:

$$\epsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} - \nu\frac{\sigma_2}{E} \qquad \sigma_1 = \frac{E}{1-\nu^2}(\epsilon_1 + \nu\epsilon_2)$$

$$\epsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E} - \nu\frac{\sigma_1}{E} \qquad \sigma_2 = \frac{E}{1-\nu^2}(\epsilon_2 + \nu\epsilon_1)$$

so kann man auch für jede Stelle des Knotens den *Mohr*schen Spannungskreis im σ, τ-Diagramm zeichnen.

Die Kenntnis der Lage und Größe des Verformungs- oder Spannungskreises ist aus zwei Gründen von Bedeutung: Erstens kann man unmittelbar den Wert der größten Schubspannung in der Meßebene $\tau_{1,2} = (\sigma_1 - \sigma_2)/2$ ablesen, und zweitens ist man imstande, Aussagen über die Art des zu erwartenden Bruches (Trenn- oder Gleitbruch) zu machen [7 bis 9]. In **Bild 16 bis 19** sind Verformungs- und Spannungskreise für ein- und zweiachsige Spannungszustände dargestellt. Die den Beanspruchungsfall kennzeichnenden Elastizitätsgleichungen sind ebenfalls im Bild angeschrieben. Der Vorteil dieser *Mohr*schen Darstellung besteht darin, daß man sofort den Wert der größten Schiebung $\gamma_{max}/2$ bzw. den der größten Schubspannung τ_{max} für jeden Verformungs- oder Spannungszustand ablesen kann; z.B. gilt für den zweiachsigen Zugspannungszustand in der Ebene, in der die Hauptspannungen σ_1 und σ_2 wirksam sind,

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$$

und für den zweiachsigen Verformungszustand in dieser Ebene

$$\frac{\gamma_{max}}{2} = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2}$$

Grundsätzlich ist aber auch der zweiachsige Spannungszustand als ein dreiachsiger mit $\sigma_3 = 0$ aufzufassen, der definitionsgemäß einem dreiachsigen Verformungszustand mit $\epsilon_3 \neq 0$ entspricht. Aus der Darstellung in **Bild 20 und 21** geht hervor, daß bei dem aufgezeichneten zweiachsigen Zugspannungszustand die größte Schubspannung $\tau_{max} = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$ ist, welche in der Ebene 1–3 unter einem Winkel von 45° zur Hauptspannungsrichtung wirkt. Diese

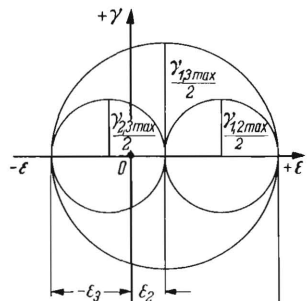


Bild 20

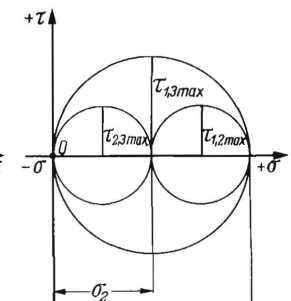


Bild 21

Bild 20. Verformungskreise eines dreiachsigen Verformungszustandes, der dem dreiachsigen Spannungszustand in Bild 21 mit $\sigma_3 = 0$ entspricht.

$$\frac{\gamma_{1,2max}}{2} = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2}$$

$$\frac{\gamma_{1,3max}}{2} = \frac{\epsilon_1 - (-\epsilon_3)}{2} = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{2}$$

Bild 21. Spannungskreise beim zweiachsigen Zugspannungszustand, der als dreiachsiger mit $\sigma_3 = 0$ aufgefasst ist.

$$\tau_{1,2max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$$

$$\tau_{1,3max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

$$\tau_{1,3max} > \tau_{1,2max}$$

$$\tau_{1,3max} = 2\tau_{1,2max}$$

wenn $\tau_{2,3max} = \tau_{1,2max}$

oder wenn $\sigma_2 = \frac{\sigma_1}{2}$ ist.

Schubspannung $\tau_{1,3}$ ist immer wesentlich größer als die in der Oberfläche (Ebene 1 – 2) wirkende Schubspannung $\tau_{1,2\,max} = (\sigma_1 - \sigma_2)/2$. Für dieses Beispiel mit den Hauptspannungen $+\sigma_1$, $+\sigma_2 = \sigma_1/2$, $\sigma_3 = 0$ ist eine Erklärung der räumlichen Lage und Richtung der Normal- und Schubspannungen in **Bild 22 bis 25** gezeigt. Ein unendlich kleines Würfelelement, das an der Oberfläche eines Rohres liegt (Bild 22 und 23), werde so beansprucht, daß ein zweiachsiger Zugspannungszustand entsteht. Infolge der Dreiachsigkeit des Verformungszustandes ($\epsilon_3 \neq 0$) sind Schiebungen γ auch in Ebenen senkrecht zur Rohroberfläche vorhanden, die Schubspannungen in der 1,3 Ebene als $\tau_{max} = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$ hervorrufen. In dem gewählten Beispiel ist $\tau_{1,3} = 2\tau_{1,2} = 2\tau_{2,3}$, d.h. die Schubspannungen in der 1,3 Ebene sind doppelt so groß wie in der Oberflächenebene und in der Querschnittsebene. Wenn, wie in diesem Beanspruchungsfall, die plastischen Formänderungen durch Gleiten entstehen, kann also Fließen oder gar Bruch in der Rohrwandung eintreten. Dies ist in besonderem Maße bei Werkstoffen mit geringem Formänderungswiderstand möglich. Sind dagegen alle drei Hauptspannungen (bzw. Hauptdehnungen) positiv und nahezu gleich groß, so kann auch ein Werkstoff mit geringem Formänderungswiderstand durch allseitige Verformungsbehinderung nicht mehr gleiten, sondern muß durch Trennung in Hauptspannungsrichtung brechen (Trennungsbruch, spröder Bruch). In der *Mohr*schen Darstellung würde sich der Spannungszustand $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ oder der Verformungszustand $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_3$ als Punkt auf der Abszisse abbilden. Das bedeutet aber, daß $\tau_{1,2} = \tau_{2,3} = \tau_{3,1} = 0$ ist. Nachdem durch Versuch die Hauptspannungen auf der Bauteiloberfläche bekannt sind, kann man in der Aussage über die Haltbarkeit der Konstruktion noch einen Schritt weiter gehen. Setzt man nämlich die Hypothese der konstanten Gestaltänderungsenergie [10] als gültig voraus – und diese Voraussetzung hat sich heute mehrfach als richtig erwiesen – , so kann man die Größe der Vergleichsspannung σ_v für den einfachen, polierten Zugstab angeben. Die Formel für die Vergleichsspannung lautet

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2}$$

Führt man hier das Anstrengungsverhältnis $a = \sigma_2/\sigma_1$ ein, so ist

$$\sigma_v = \sigma_1 \sqrt{1 - a + a^2}.$$

Die Formel gilt für alle ebenen Spannungszustände und für alle Beanspruchungsarten. Der aus σ_1 und σ_2 errechnete Wert σ_v muß z.B. bei statischer Biegebeanspruchung gleich oder kleiner sein als σ_{Sb} des Probestabes oder bei wechseldynamischer Biegebeanspruchung ohne Vorlast gleich oder kleiner als $\pm \sigma_{Wb}$ des Probestabes.

Diese allgemeinen Überlegungen über Verformungs- und Spannungszustände waren notwendig,

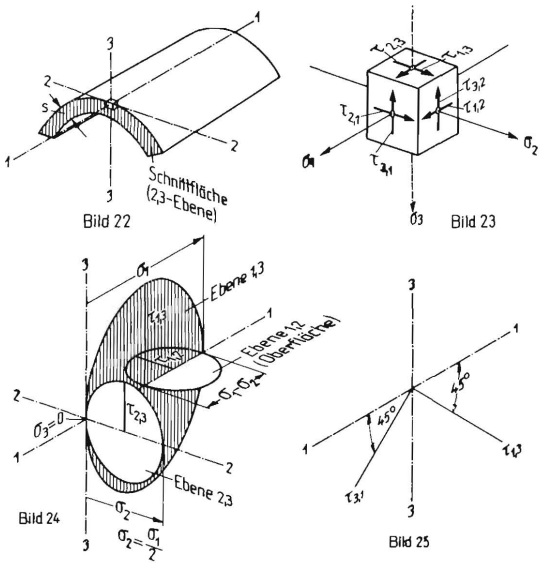


Bild 22 bis 25. Zur Erklärung der räumlichen Lage und Richtung der Normal- und Schubspannungen sowie der Spannungskreise, die in Bild 21 vereinfacht dargestellt sind.
Bild 22. Lage des Würfelelementes an der Rohroberfläche. 1 – 1 Richtung der ersten Hauptspannung.
Bild 23. Kennzeichnung der Normal- und Schubspannungen am Würfelelement in Bild 22.
Bild 24. Wirkliche räumliche Lage der Spannungskreise in den drei Hauptebenen.
Bild 25. Richtung der grössten Schubspannungen in der 1,3 – Ebene.

um die Meßergebnisse aus den Knotenpunktuntersuchungen vollständig deuten zu können. Es zeigte sich, daß Reißlackversuche zur Bestimmung der Hauptdehnungsrichtungen ebenso unumgänglich waren wie Feindehnungsmessungen senkrecht und parallel zu den Dehnungslinien.

In den folgenden Bildern sind die Meßergebnisse an den untersuchten Rohrknotenpunkten nacheinander so dargestellt, daß der Leser sowohl einen Eindruck von dem Dehnungslinienfeld als auch von der Verteilung der ersten und zweiten Hauptspannungen auf der Oberfläche erhält. Die Spannungsverteilungskurven sind so aufgezeichnet, daß für jede Stelle eines Rohrknotens der *Mohr*sche Spannungskreis abgelesen werden kann. Außerdem läßt sich auch die Größe der Schubspannungen in allen drei Ebenen sofort ablesen.

Der einfache, T-förmige Rohrknoten

Bild 26 bis 29 zeigen die Spannungsfelder auf dem Rohrknoten nach Bild 4 bei Zugbeanspruchung des vertikalen und Biegebeanspruchung des horizontalen Rohres. Die Richtung der Hauptdehnungen auf diesem Knotenpunkt ist aus den Dehnungslinienfeldern in Bild 26 bis 28 zu ersehen. Um ein möglichst vollständiges Dehnungslinienfeld zu bekommen, also auch in den druckbeanspruchten Gebieten des horizontalen Rohres, wurde der sehr spröde und rißempfindliche *Maybach*lack verwendet [4]. Hierbei zeigte es sich, daß auf einen mittigen und genau

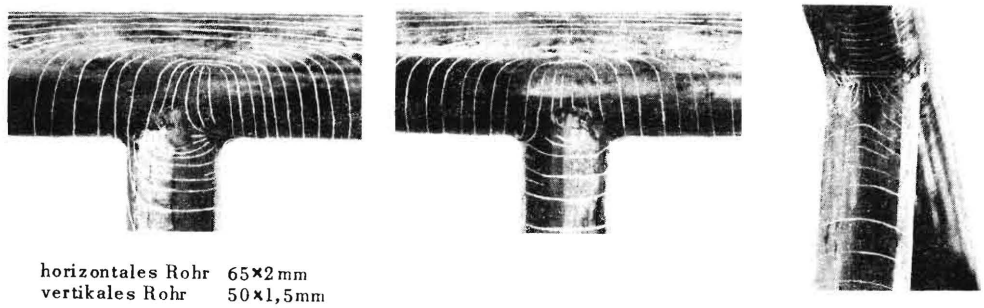


Bild 26 bis 28. Dehnungslinienfelder auf dem Rohrknoten in Bild 4 bei senkrechtem Zug im vertikalen Rohr.
In Bild 26 bei geringfügig unsymmetrischem Zug; in Bild 27 bei genau symmetrischem Zug; Bild 28: Richtung der Dehnungslinien auf der Unterseite der Anschlussstelle des Rohrknotens.

vertikalen Kraftangriff sehr sorgfältig geachtet werden mußte. Das unsymmetrische Dehnungslinienfeld in Bild 26 war dadurch entstanden, daß die Zugkraft nicht genau senkrecht gerichtet war, sondern um rund 1° von der senkrechten Zugrichtung abwich. Bild 27 zeigt das Dehnungslinienfeld bei genau vertikalem Zug. Auf der Oberseite des horizontalen Rohres laufen die Dehnungslinien parallel zur Rohrachse und zeigen Druckspannungen in Längsrichtung an. Der Verlauf der Dehnungslinien ist hier sehr gleichmäßig und wird nicht durch die Krafteinleitung, d.h. durch den Anschluß des vertikalen Rohres gestört. Auf der Unterseite des horizontalen Rohres wirken in Rohrlängsrichtung Zugspannungen, was aus dem Verlauf der Dehnungslinien in Umfangsrichtung hervorgeht. Auf dem vertikalen Rohr erscheinen entsprechend der Zugbeanspruchung vorwiegend ringförmige Lackrisse. Die bisher beschriebenen Rißbilder waren auch nach der elementaren Festigkeitslehre zu erwarten. In der unmittelbaren Umgebung der Schweißnaht aber, also dort, wo die beiden Rohre zusammenstoßen, ergeben sich Dehnungslinien, welche erheblich von der erwarteten Rißrichtung abweichen. Schaut man von der Seite auf das vertikale Rohr (Bild 28), so erkennt man, daß dicht an der Schweißnaht die Dehnungslinien parallel zur vertikalen Rohrachse verlaufen und erst etwas weiter unten in die Umfangsrichtung abbiegen. Hier müßte man zunächst annehmen, daß an diesen Stellen Druckspannungen herrschen. Wie sich aber bei Dehnungsmessungen in diesem Bereich herausstellte, herrschen hier zweiachsige Zugspannungszustände, bei welchen die zweite Hauptspannung (also die Spannungen längs einer Dehnungslinie) auch eine Zugspannung ist, jedoch nur kleiner als die erste Hauptspannung. Die erste Hauptspannung wirkt in Umfangsrichtung.

Das Ergebnis der Reißlackversuche hat einen qualitativen Überblick über die auf der Rohroberfläche herrschenden Spannungszustände und über die Richtungen der Hauptdehnungen bzw. Haupt-

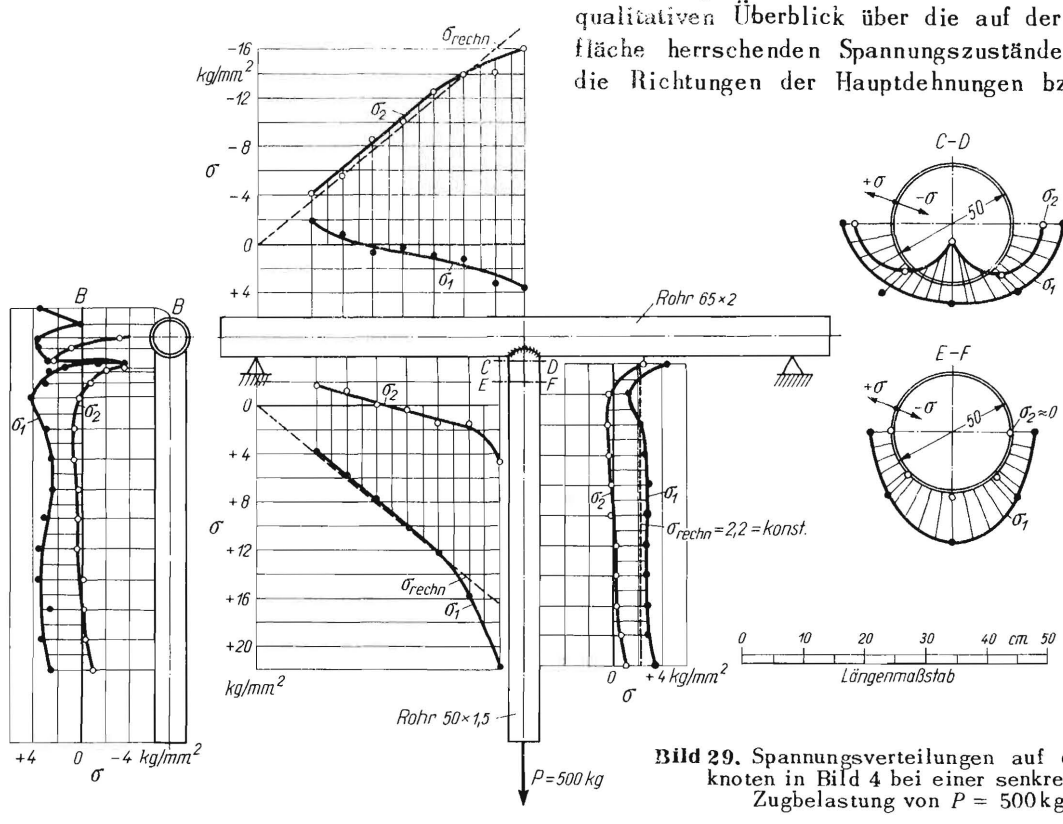


Bild 29. Spannungsverteilungen auf dem Rohrknoten in Bild 4 bei einer senkrechten Zugbelastung von $P = 500$ kg.

spannungen gegeben. Es hat aber auch gezeigt, an welchen Stellen mit besonderer Sorgfalt statische Feindehnungsmessungen durchgeführt werden müssen, um über die von der klassischen Festigkeitslehre abweichenden Spannungsverteilungen unterrichtet zu werden. Diese Stellen liegen bei diesem Knotenpunkt in unmittelbarer Umgebung der Schweißnaht und nehmen einen verhältnismäßig eng begrenzten Bereich ein. In Bild 29 sollen die Dehnungsmeßergebnisse an Hand der Dehnungs- und Spannungsverteilung erörtert werden.

Auf der Oberseite des horizontalen Rohres herrschen Druckspannungen. Wie aus der Spannungsverteilungskurve ersichtlich ist, weichen die Beträge der gemessenen Spannungen σ_2 nur wenig von den aus der bekannten Beziehung $\sigma_b = M_b/W$ errechneten ab. Allerdings ist zu dieser Spannungsverteilung zu bemerken, daß auch Spannungen σ_1 in Umfangsrichtung vorhanden sind, die anzeigen, daß auch hier zweiachsige Spannungszustände herrschen. Nur an einer Stelle, nämlich auf etwa 1/4 der Länge des horizontalen Rohres, dort, wo die σ_1-Verteilungskurve die Nullachse schneidet, herrscht ein einachsiger Spannungszustand. Die Spannungsverteilung auf der Unterseite des Rohres zeigt im ungestörten Bereich für σ_1 Zugspannungen in Rohrlängsrichtung in Übereinstimmung mit der Rechnung. Im Bereich des Knotenpunktes aber steigen die gemessenen Spannungswerte gegenüber den errechneten erheblich an. Unmittelbar am Anschluß des vertikalen Rohres herrschen zweiachsige Zugspannungszustände. Die Spannungsverteilung auf dem vertikalen Rohr entspricht im ungestörten Bereich einem nach der klassischen Festigkeitslehre zu erwartenden einachsigen Zugspannungszustand ($\sigma_2 = 0$). Jedoch in einem eng begrenzten Bereich nahe der Anschlußstelle stellen sich auch hier zweiachsige Zugspannungszustände mit einer Spannungsspitze ein. Wie die Spannungskurven σ_1 und σ_2 im Schnitt C–D zeigen, liegen diese zweiachsigen Zugspannungszustände mit sehr kleinen $\tau_{1,2}$-Werten an den Seiten. Auf der Vorderseite des vertikalen Rohres entstehen trotz des senkrechten Zuges Druckspannungen σ_2 in Richtung der Rohrachse.

Als erste grundlegende Erkenntnis kann schon nach diesen Meßergebnissen gesagt werden, daß die für die Haltbarkeit entscheidenden Beanspruchungen in einem sehr eng begrenzten Gebiet im Bereich des Knotens liegen. Hier herrschen von der klassischen Festigkeitslehre abweichende, mehrachsige Spannungszustände mit abweichenden, stets höheren Spannungswerten. Weiterhin kann man bereits aus diesem ersten Meßergebnis ersehen, daß die Werte der zweiten Hauptspannung, die hier die Spannungen in Umfangsrichtung sind – insbesondere bei solchen dünnwandigen Rohren mit großem Verformungsvermögen –, nicht unbeachtet bleiben dürfen.

Rohrknoten mit zwei Eckblechen

Im allgemeinen versucht man, die Spannungsspitzen in solchen Knotenpunkten durch Knotenbleche abzubauen, wobei man von dem Gedanken ausgeht, die Kräfte auf größeren Bereichen von dem einen in das andere Rohr überzuleiten. Eine solche Konstruktion stellt der Knotenpunkt in Bild 5 dar. Es hat sich aber durch die Meßergebnisse gezeigt, daß solche Konstruktionen, besonders mit dünnwandigen Rohren, zu keiner Verbesserung der Haltbarkeit führen. In **Bild 30** bis 38 sind die Meßergebnisse an einem mit Dreieckblechen versteiften Rohrknoten bei zwei verschiedenen Belastungsfällen dargestellt, und zwar bei senkrechtem Zug am vertikalen Rohr und bei Biegung in der Ebene des Rohrknotens.

Besonders bemerkenswert ist das Dehnungslinienfeld an der rechten und linken Seite des vertikalen Rohres unmittelbar unterhalb der angeschweißten Dreieckbleche bei senkrechtem Zug, **Bild 31**. Hier verlaufen die Dehnungslinien in einem größeren Bereich parallel zur Achse des vertikalen Rohres, also in Zugrichtung. Hieraus kann man zunächst mit Sicherheit schließen, daß die größeren Spannungen in Umfangsrichtung wirken und daß die Spannungen in Umfangsrichtung Zugspannungen sind. Dieses Ergebnis weicht ab von dem aus der klassischen Festigkeitslehre zu erwartenden, bei dem sich bei Dehnung in Längsrichtung Stauchung in Umfangsrichtung infolge der Querkontraktion einstellen müßte.

Um einen genaueren Einblick in den Verformungsmechanismus zu bekommen, wurden für diesen Knoten nach Bild 5 die senkrecht und parallel zu den Dehnungslinien gemessenen Dehnungswerte als Deh-

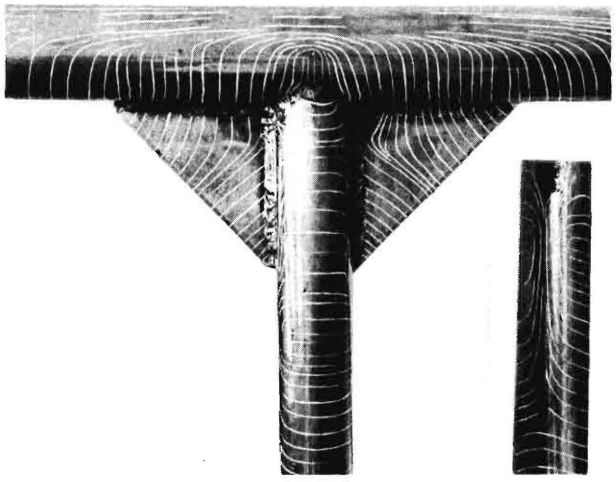


Bild 30. Dehnungslinienfeld auf dem Rohrknoten mit Eckblechen in Bild 5.
Horizontales Rohr 65×2 mm
Vertikales Rohr 50×1,5 mm
Dicke der Eckversteifungen 2 mm

Bild 31 (rechts). Richtung der Dehnungslinien auf dem vertikalen Rohr direkt unterhalb des Versteifungsbleches. (Am oberen Bildrand ist noch der Auslauf des Eckbleches zu erkennen)

nungsverteilungskurven aufgetragen (**Bild 32**). Auf der Oberseite des horizontalen Rohres verlaufen die Dehnungslinien in Rohrlängsrichtung. Die Meßwerte ϵ_2 zeigen einen linearen Verlauf der Dehnungsverteilung (Stauchung $-\epsilon_2$) ohne wesentliche Abweichung von der erwarteten Dehnungsverteilung. Die Dehnungswerte senkrecht zu den Dehnungslinien – also in Umfangsrichtung gemessen – führen zu einem unregelmäßigeren Dehnungsverlauf, insbesondere im Bereich des Knotenpunktes. Die Festigkeitslehre setzt hier eine Dehnungsverteilung der ϵ_1 - Werte so voraus, daß an jeder Stelle die Werte ϵ_1 dem Betrage nach um 0,3 kleiner sind als die ϵ_2 - Werte. Das ist hier offensichtlich nicht der Fall, sondern das Rohr verformt sich durch die am Knotenpunkt eingeleitete Kraft so in sich selbst, daß sich an keiner Stelle das Verformungsverhältnis

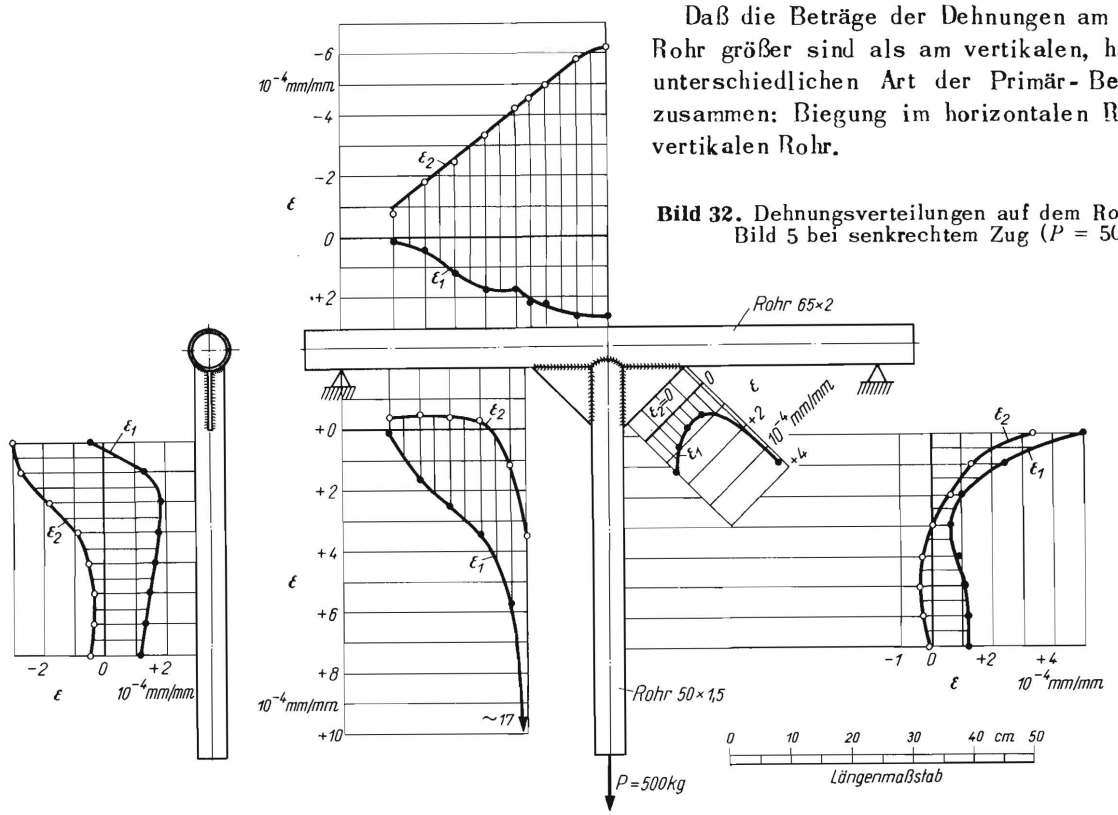


Bild 32. Dehnungsverteilungen auf dem Rohrknoten nach Bild 5 bei senkrechtem Zug (P = 500 kg).

$\epsilon_2/\epsilon_1 = -\nu$, welches den einachsigen Spannungszustand kennzeichnet, einstellt. Dies gilt auch für die anderen gemessenen Dehnungsverteilungen auf diesem Knoten außer der Dehnungsverteilung auf der Vorderseite des vertikalen Rohres. Hier ist entsprechend der reinen Zugbeanspruchung $\epsilon_2 = -\nu\,\epsilon_1$ (vergl. hierzu Bild 16 und 17). Die größten Verformungen auf der Rohroberfläche wurden unmittelbar an den Enden der Versteifungsbleche sowohl auf dem horizontalen als auch auf dem vertikalen Rohr gemessen. Es zeigte sich, wie auch schon vorher beim Knoten nach Bild 4, daß Dehnungen in b e i d e n Hauptdehnungsrichtungen mit gleichem Vorzeichen entstehen. Da am horizontalen Rohr die größere Dehnung in Rohrlängsrichtung auftritt und die zweite Hauptdehnung gegenüber der ersten verhältnismäßig klein ist (großer *Mohr*scher Verformungskreis), werden hier nur Verformungsbrüche (großes $\gamma_{max}/2$) zu erwarten sein. Anders ist es am vertikalen Rohr. Hier wirkt die erste Hauptdehnung ϵ_1 in Umfangsrichtung. Außerdem ist ϵ_2 verhältnismäßig groß gegenüber ϵ_1, oder anders ausgedrückt: $(\epsilon_1 - \epsilon_2)/2$, d.h. der Durchmesser des *Mohr*schen Verformungskreises ist sehr klein. Hier wird bei höherer Belastung des Knotenpunktes wegen geringen Verformungsvermögens ein Trennungsbruch (spröder Bruch) zu erwarten sein. Diese Gefahr wird noch dadurch vergrößert, daß man in der Schweißnaht einen zweiachsigen Zugeigenspannungszustand vermuten darf, dessen Hauptspannungsrichtung mit denen des Knotenpunktes an diesen Stellen übereinstimmen, so daß sich die Materialanstrengungen in vollem Betrage addieren.

Daß die Beträge der Dehnungen am horizontalen Rohr größer sind als am vertikalen, hängt mit der unterschiedlichen Art der Primär-Beanspruchung zusammen: Biegung im horizontalen Rohr, Zug im vertikalen Rohr.

In **Bild 33** sind die Spannungsverteilungskurven des Knotens nach Bild 5 dargestellt. Sie sind aus den Werten der Kurven in Bild 32 nach dem *Hooke*schen Gesetz für den zweiachsigen Spannungszustand umgerechnet. Man erkennt auch hier erhebliche Abweichungen von der einfachen Berechnung, besonders im engeren Bereich des Knotenpunktes. Vergleicht man diese Spannungsverteilungskurven mit denen des ersten Knotenpunktes (Bild 29), so stellt man fest, daß bei gleicher Last und gleichem Beanspruchungsfall erstens die Spannungsspitzen beim Knotenpunkt mit Eckblechen höher sind und daß zweitens der Bereich, in welchem sich die Störung durch die Verbindung der Rohre auswirkt, auch bei dem Knotenpunkt mit Eckblechen viel größer ist als bei Knoten ohne Eckbleche.

Die Größe der Hauptschubspannungen läßt sich ebenfalls aus dieser Darstellung entnehmen. Zum Beispiel ändert sich der Betrag der Schubspannungen in der Oberfläche $\tau_{1,2}$ auf dem vertikalen Rohr vom ungestörten Bereich bis zum Beginn der Knotenbleche kaum. Sie ist auch verhältnismäßig klein. Dagegen wachsen die Schubspannungen $\tau_{1,3}$, welche in einer Ebene senkrecht zur Oberfläche wirken, mit dem Anstieg der σ_1-Werte. Für den Fall eines Bruches läßt sich hier voraussagen, daß die Oberfläche wegen des geringen Verformungsvermögens infolge des zweiachsigen Zugspannungszustandes als Trennungsbruch einreißen kann und daß die Schubspannungen $\tau_{1,3}$ von innen her durch Gleitungen den von außen eingeleiteten Bruch begünstigen.

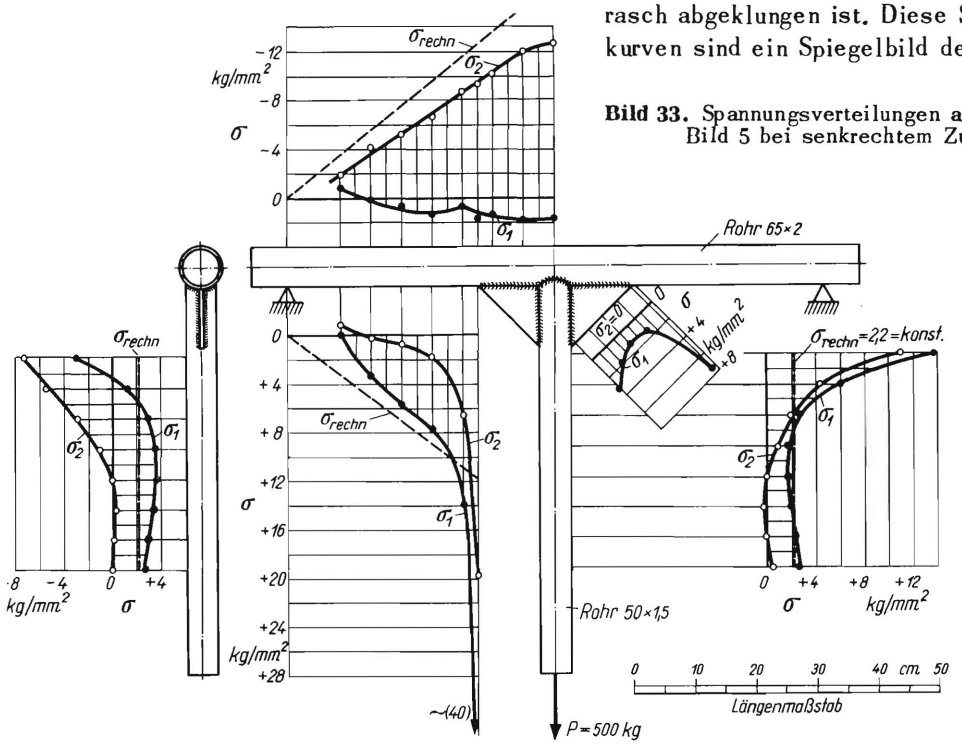


Bild 33. Spannungsverteilungen auf dem Rohrknoten nach Bild 5 bei senkrechtem Zug (P = 500 kg).

Wir stellen also zunächst fest, daß bei gleicher Last die Spannungen in dem Knotenpunkt mit Eckblechen trotz der Versteifung wesentlich größer sind als im Knotenpunkt ohne Eckbleche. Um Aussagen über den Verformungsmechanismus machen zu können, wurden Dehnungsmessungen für jeden der beiden Knoten an zwei Schnitten über den halben Umfang des vertikalen Rohres durchgeführt. Das Ergebnis dieser Messungen ist in Form von Spannungsverteilungen in **Bild 34 und 35** wiedergegeben. In den Schnitten A – B ist bei beiden Knotenpunkten die Tendenz der Spannungsverteilungskurven gleich. Die Kurven unterscheiden sich nur durch die Größe der Spannungswerte. An den Seiten herrschen zweiachsige Zugspannungszustände. Beim Knoten mit Eckblechen (Bild 34) sind die Werte der Zugspannungen besonders hoch. Diese Zugspannungen klingen bei diesem Knoten über dem Umfang des vertikalen Rohres verhältnismäßig rasch ab, so daß auf der Vorderseite zweiachsige Druckspannungszustände herrschen. Im Knotenpunkt ohne Eckbleche (Bild 35) bleibt die erste Hauptspannung über dem ganzen Umfang eine Zugspannung, und nur die zweite Hauptspannung wechselt ihre Richtung. In den Schnitten C – D, welche bei beiden Knoten 5 cm von den Schnitten A – B entfernt sind, hat sich das Bild der Spannungsverteilungen, insbesondere beim Knoten ohne Eckbleche, wesentlich geändert. Beim Knotenpunkt mit Eckblechen sind die Beträge der Spannungen kleiner geworden. An den Seiten herrschen hier aber immer noch zweiachsige Zugspannungszustände. Beim Knoten ohne Eckbleche hat sich bereits ein einachsiger Spannungszustand eingestellt und beweist, daß an diesem Knoten die Störung durch Verbindung der beiden Rohre sehr rasch abgeklungen ist. Diese Spannungsverteilungskurven sind ein Spiegelbild der Verformungen durch

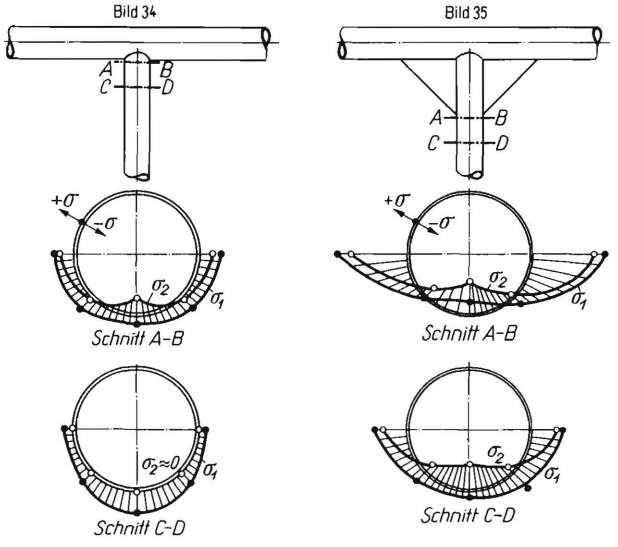


Bild 34 und 35. Gegenüberstellung der Spannungsverteilungen von Rohrknoten ohne und mit Eckblechen auf den Querschnitten A – B und C – D der vertikalen Rohre.

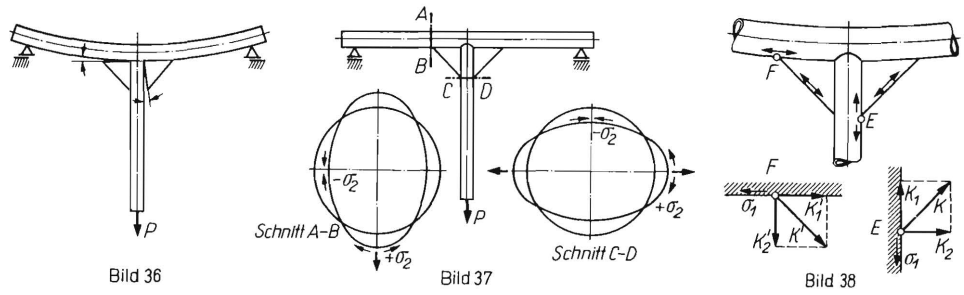


Bild 36 Bild 37 Bild 38

Bild 36 bis 38. Verformungsmechanismus beim Knotenpunkt mit Eckblechen.

Bild 36. Die nur mit je einer Kathete an die Rohre angeschweissten Dreieckbleche heben sich bei Belastung durch senkrechten Zug infolge der Durchbiegung des horizontalen Rohres von beiden Rohren ab.

Bild 37. Verformung der Rohrquerschnitte A – B und C – D durch Zugbelastung am vertikalen Rohr (schematisch). Die elliptische Verformung hat abwechselnd Zug- und Druckspannungen in Umfangsrichtung zur Folge.

Bild 38. Hauptspannungen in Rohrlängsrichtung an den Stellen E und F als Komponenten der in Richtung der freien Kanten der Dreieckbleche wirkenden Kräfte K.

die Zugbeanspruchung und lassen eine klare Verformungsanalyse an diesen Stellen zu. Da die Verformungen an dem Knotenpunkt mit Eckblechen besonders deutlich zu erkennen sind, sollen für diesen Knoten Überlegungen über den Verformungsmechanismus auf rein anschaulichem Wege vorgeführt werden:

Würde man beispielsweise eine der beiden Schweißnähte zwischen einem Eckblech und den beiden Rohren trennen, **Bild 36**, so würde man feststellen, daß bei Belastung ein keilförmiger Spalt zwischen Eckblech und Rohr infolge der Biegung des horizontalen Rohres entsteht. Im angeschweißten Zustand müssen also erhebliche innere Kräfte wirksam werden, welche die Verbindung von Rohr und Eckblech aufrecht erhalten. Da aber das dünnwandige Rohr in sich nicht steif genug ist, um solchen örtlich begrenzt angreifenden Kräften ohne starke Verformung Widerstand zu leisten, muß sich das ursprünglich kreisförmige, vertikale Rohr zu einem ovalen Rohr verformen (Schnitt C – D in **Bild 37**), wobei die größten Formveränderungen am Ende des Eckbleches auftreten. Diese Rohrverformung hat Spannungen in Umfangsrichtung zur Folge, die an den Seiten wegen der Verkleinerung des Krümmungsradius Zugspannungen $+\sigma_2$ und vorn Druckspannungen $-\sigma_2$ sind. In ähnlicher Weise wirkt sich die Verformung im horizontalen Rohr an den Stellen des Auslaufes der Eckbleche aus, jedoch mit dem Unterschied, daß hier die Kräfte nur an einer Seite des Rohres angreifen (Schnitt A – B in Bild 37).

Auch über die Spannungen in Richtung der Rohrachse, welche durch die eingeschweißten Ecken eine Erhöhung erfahren, können Aussagen allein aus der Anschauung heraus gemacht werden (**Bild 38**).

Die am vertikalen Rohr angreifende Kraft P erzeugt parallel zu den freien Rändern der dreieckigen Versteifungsbleche Zugspannungen, deren Größe durch die Spannungsverteilungskurve in Bild 33 angegeben ist. Die Spannungen kann man sich als innere Kräfte K vorstellen, welche an den Rohroberflächen dort, wo die Eckbleche auslaufen, angreifen. Zerlegt man diese Kräfte K in ihre Komponenten K_1 und K_2, so gelten K_2 bzw. K_2' als Ursache für die Rohrverformungen ϵ_2 in den Punkten E und F. K_1 bzw. K_1' sind dann diejenigen Kräfte, die die Dehnungen ϵ_1 in Längsrichtung der Rohre erzeugen und die Dehnungen infolge der Zugkraft auf dem vertikalen Rohr und infolge des Biegemomentes am horizontalen Rohr vergrößern. Wegen der größeren Verformungen durch die Biegebeanspruchung sind die durch Messung gewonnenen Spannungen σ_1 und σ_2 am horizontalen Rohr größer als am vertikalen Rohr.

Mit Hilfe dieser Erkenntnisse über den Verformungsmechanismus, zu denen man auf rein anschaulichem Wege gekommen ist, kann man Ansätze für die exakte Berechnung der Spannungen im unmittelbaren Bereich des Knotenpunktes finden. Zur Berechnung der Spannungen σ_2 in Umfangsrichtung an der Stelle E wäre die Gleichung für einen biegebeanspruchten Ring mit zwei diametral angeordneten Kräften K_2 anzusetzen. Für die Bestimmung der Spannungen σ_1 an der Stelle E sind die Spannungen infolge P und infolge K_1 zu superponieren. Ähnliche Überlegungen führen zu Ansätzen für die Berechnung der Spannungen σ_1 und σ_2 an der Stelle F.

Diese Betrachtungen über den Verformungsmechanismus galten für den Belastungsfall, bei dem eine senkrecht gerichtete Kraft P am vertikalen Rohr nach unten zog. Ähnliche Überlegungen lassen sich aber für alle anderen Belastungsfälle anstellen. In **Bild 39** ist das Dehnungslinienfeld auf dem vorherigen Knotenpunkt mit Eckblechen bei Biegung des vertikalen Rohres dargestellt. Um in derselben Größenordnung der Spannungen im Rohrknoten zu bleiben, durfte hier die am Ende des vertikalen Rohres horizontal angreifende Kraft P nur 100 kg betragen (**Bild 40**). Bei diesem Beanspruchungsfall wird das horizontale Rohr S-förmig verbogen. Im Dehnungslinienfeld ist diese Verformung an den auf der rechten und linken Hälfte des horizontalen Rohres unterschiedlichen Dehnungslinienrichtungen

zu erkennen. Bemerkenswert ist jedoch, daß die Dehnungslinien auf der Unterseite dieses Rohres im Bereich der Versteifungsbleche in eine um 90° geänderte Richtung abbiegen. Offenbar ändern die Längsspannungen auf der äußersten, unteren Faser des horizontalen Rohres am Auslauf der Versteifungsbleche sehr sprunghaft ihre Vorzeichen. Dies ist eine Folge der Eckversteifung und bedeudet, daß die S-förmige Biegung hauptsächlich über die freien Kanten der Eckbleche in das horizontale Rohr eingeleitet wird. Die Eckbleche selbst werden unterschiedlich beansprucht. So erfährt das linke Blech vorwiegend Druckspannungen, während das rechte Blech auf Zug beansprucht wird. Die höchstbeanspruchte Stelle am vertikalen Rohr ist durch die für Biegung typischen, halbkreisförmigen Dehnungslinien gekennzeichnet.

Über die Größe der Hauptspannungen gibt Bild 40 Aufschluß. Bei diesem Belastungsfall treten die größten Spannungen auf dem vertikalen Rohr unterhalb der Versteifungsbleche auf. Hier herrschen auf der rechten Seite zweiachsige Zugspannungszustände, auf der linken Seite zweiachsige Druckspannungszustände. Auf beiden Seiten sind die zweiten Hauptspannungen etwa halb so groß wie die ersten. An dieser Stelle geht die Verformung so vor sich, daß das ursprünglich kreisrunde Rohr an den Seiten flach gedrückt wird, so daß der elliptisch verformte Querschnitt sich gegenüber dem des ersten Belastungsfalles (Zug in senkrechter Richtung), um 90° gedreht, einstellt. Die in Umfangsrichtung herrschenden Druckspannungen unterhalb der Eckbleche vermindern die Zugspannungen $+\sigma_2$ auf der rechten Seite und erhöhen die Druckspannungen $-\sigma_2$ auf der linken Seite. Auf der Vorderseite des Rohres – der neutralen Biegezone – werden die σ_2 - Spannungen infolge der Verkleinerung des Krümmungsradius durch die Biegung Zugspannungen sein. Das horizontale Rohr wird nur auf der Unterseite nahe den Eckblechausläufen hoch beansprucht. Allerdings sind hier die beiden Hauptspannungen nahezu gleich groß, so daß der Spannungskreis über σ_1 und σ_2 sehr klein wird. Auf der Oberseite herrschen nur geringe Spannungen und spiegeln durch ihren Verlauf die S-förmige Biegung wider.

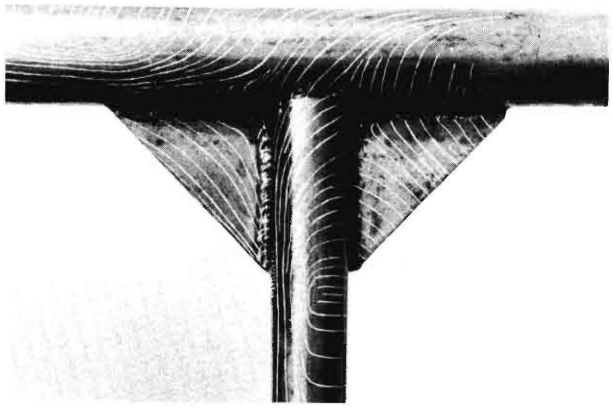


Bild 39. Dehnungslinienfeld auf dem Rohrknoten mit Eckblechen bei Biegebeanspruchung durch eine am vertikalen Rohr angreifende, horizontal gerichtete Kraft P = 100 kg.

Zusammenfassend kann man zu diesen Meßergebnissen an dem Knotenpunkt mit Eckblechen nach Bild 5 sagen, daß die ebenen Versteifungsbleche bei beiden Belastungsfällen nicht geeignet

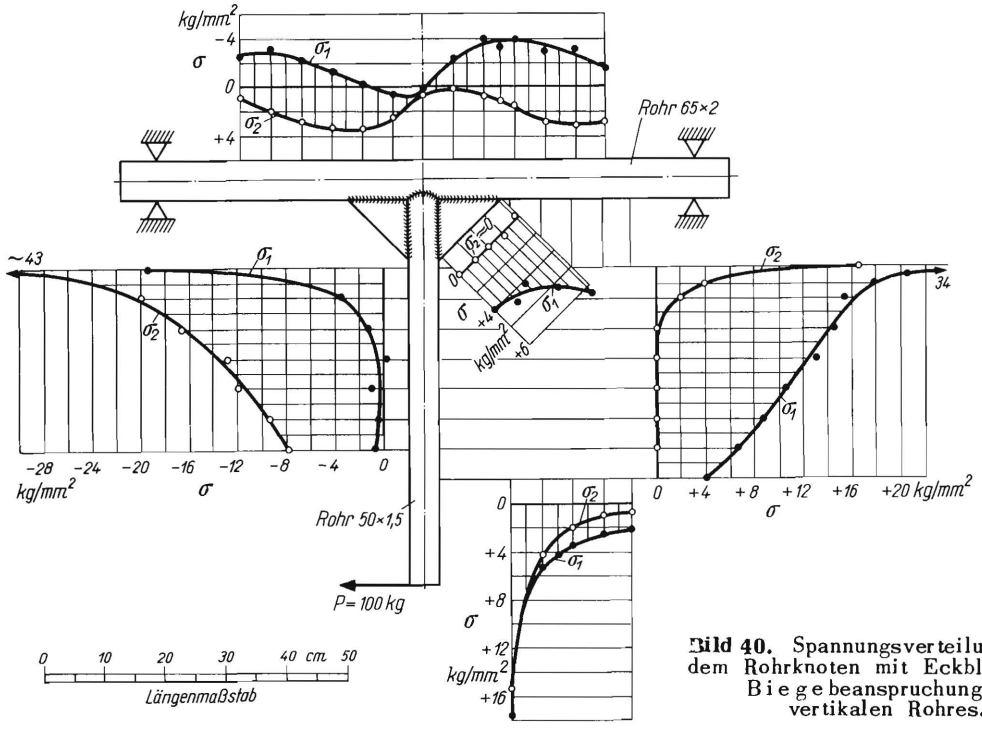


Bild 40. Spannungsverteilungen auf dem Rohrknoten mit Eckblechen bei Biegebeanspruchung des vertikalen Rohres.

sind, die Spannungserhöhungen im unmittelbaren Bereich des Knotens abzubauen. Sie verlagern vielmehr die Stellen höchster Beanspruchung an die Enden der Knotenbleche und vergrößern diese Spannungen sogar noch. Außerdem erzeugen sie den spröden Bruch fördernde, zweiachsige Zugspannungszustände.

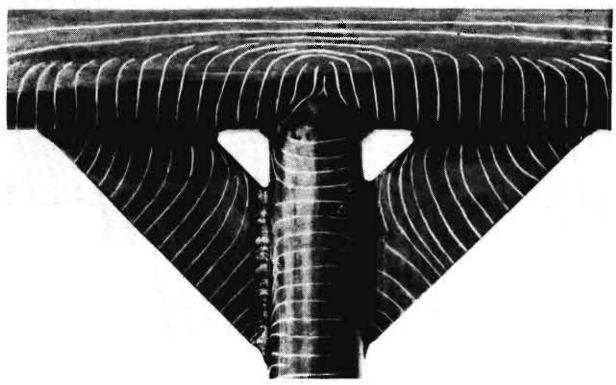


Bild 41. Dehnungslinienfeld auf dem Rohrknoten nach Bild 6. Die Versteifung der Rohrecken besteht nur aus zwei ebenen Blechstreifen von 2 mm dicke.

In der Praxis wird aus Gründen besserer Haltbarkeit vielfach empfohlen, an Stelle der dreieckigen Knotenbleche nur ebene Blechstreifen zur Versteifung von Knotenpunkten zu verwenden. Deshalb wurde eine solche Eckverbindung (Bild 6) in diese Untersuchungsreihe mit einbezogen. In **Bild 41** ist das Dehnungslinienfeld dieses Knotenpunktes bei Belastung durch senkrechten Zug am vertikalen Rohr wiedergegeben. Vergleicht man den Verlauf der Dehnungslinien auf diesem Knoten mit demjenigen in Bild 30, so findet man auf beiden Rohrknoten das gleiche Rißbild. Offenbar wird also das Spannungsfeld, im ganzen gesehen, nicht geändert, wenn die Eckversteifungen nur aus Blechstreifen bestehen. Zur Bestätigung dieser Aussage sind in **Bild 42** die Spannungsverteilungskurven aufgezeichnet. Vergleicht man sowohl den Kurvenverlauf als auch die Beträge der Spannungen mit denen des Knotenpunktes nach Bild 5 bei gleicher Belastung, so stellt man fest, daß außer auf den Blechstreifen keine nennenswerten Veränderungen zu bemerken sind. Die Spannungen sind bei gleicher äußerer Belastung bei beiden Knotenpunkten dieselben. Ein Unterschied der Haltbarkeit beider Knotenpunkte könnte bei dynamischer Belastung eintreten, wenn man berücksichtigt, daß beim Knoten nach Bild 6 die starke Anhäufung von Schweißnähten vermieden wurde.

Rohrknoten mit durchgehendem Blech

Die bisherigen Versteifungen von Rohrknoten durch ebene Bleche haben gezeigt, daß diese dünnwandigen Rohre durch die linienförmige Krafteinleitung an der Rohraußenwand sehr stark in sich verformt werden können. Bei dem Knotenpunkt nach Bild 7 sollte diese Verformungsmöglichkeit dadurch umgangen werden, daß ein großes, dreieckiges Blech (mit abgeschnittenen Ecken) als Knotenblech in der Mittelebene des Knotens eingesetzt und mit den Rohren verschweißt wurde. Hierzu mußten

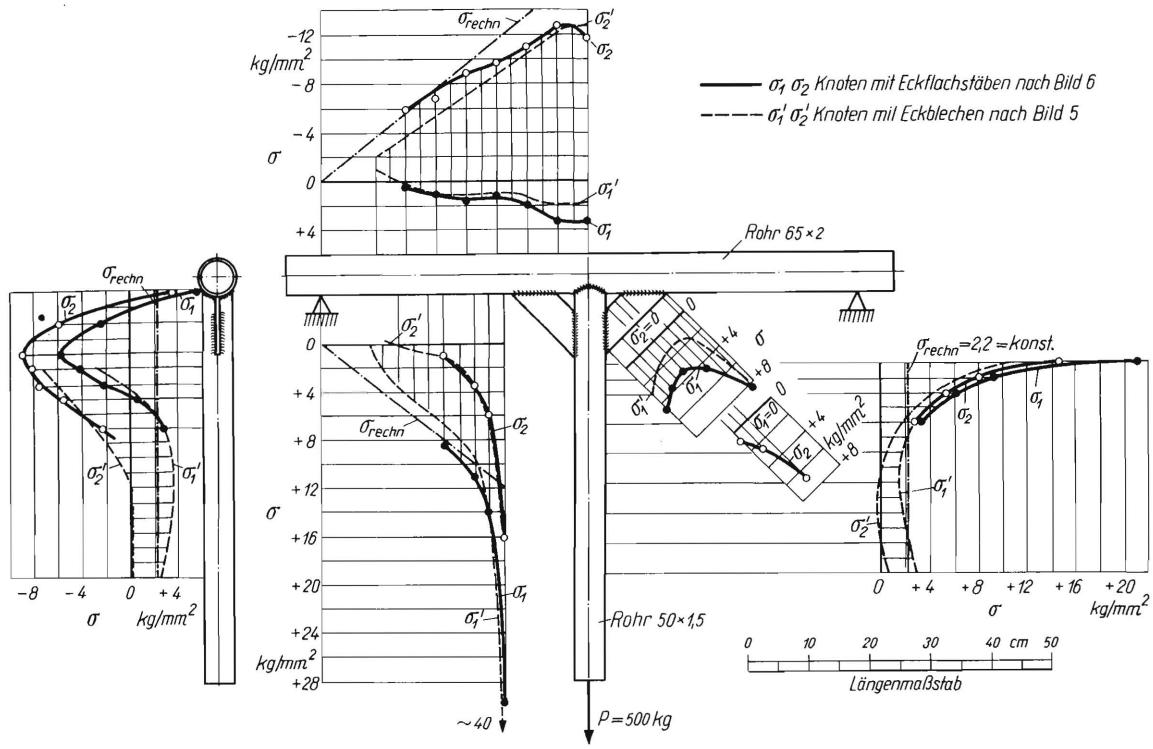


Bild 42. Spannungsverteilungen auf dem Rohrknoten nach Bild 6 bei senkrechtem Zug (P = 500 kg).

beide Rohre im Knotenbereich geschlitzt werden, was erhebliche Mehrkosten verursacht und vom Wirtschaftlichkeitsstandpunkt aus in den meisten Fällen abzulehnen ist. Sie hat aber, wie die Meßergebnisse zeigen, in der Systematik der Rohrknotenuntersuchungen ihre Bedeutung. **Bild 43** veranschaulicht das Dehnungslinienfeld auf diesem Knotenpunkt bei senkrechtem Zug. Man sieht, daß die Richtung der Dehnungslinien, insbesondere auf dem horizontalen Rohr erheblich von denen des Knotenpunktes mit den beiden seitlichen Eckblechen abweicht. Während beim Knotenpunkt mit den beiden Eckblechen die Dehnungslinien auf dem horizontalen Rohr in der neutralen Biegezone zur Knotenmitte hin abbiegen (Bild 30), bilden sich auf dem Knoten nach Bild 7 oberhalb der Knotenblechränder – auf beiden Rohrhälften symmetrisch – je eine singuläre Stelle, in welche alle Dehnungslinien einmünden (Bild 43). Auf den äußersten Biegefasern oberhalb und unterhalb dieser Stellen müssen, das lehrt die Erfahrung, die höchstbeanspruchten Stellen des Knotenpunktes liegen. Die dreieckigen Teile des ebenen Versteifungsbleches zeigen keine Änderung des Dehnungslinienfeldes gegenüber dem Knotenpunkt nach Bild 5. Da das eingeschweißte Knotenblech beide Rohre im Bereich des Knotenpunktes stützt, so daß die Rohrquerschnitte auch bei höherer Belastung kreisrund bleiben, ist mit Sicherheit anzunehmen, daß die Spannungen im Bereich des Knotenbleches niedrig sind. Die Spannungsverteilungen auf diesem Rohrknotenpunkt, die in **Bild 44** dargestellt sind, zeigen bei gleichem Beanspruchungsfall und gleicher Zugkraft P gegenüber den Knoten nach Bild 5 und 6 einen wesentlich anderen Kurvenverlauf. Hoch beansprucht werden nur die Stellen des horizontalen Rohres, an denen das Knotenblech endet. Auf der Oberseite des Rohres herrschen zweiachsige Druckspannungszustände, auf der Unterseite zweiachsige Zugspannungszustände. Da jedoch auf der Unterseite $\sigma_1 \sim 2\,\sigma_2$ ist, liegt hier keine unbedingte Sprödbruchgefahr vor, sondern auf Grund der Größe von $(\sigma_1 - \sigma_2)/2$ können Gleitungen entstehen. Wie die Spannungsverteilungskurve auf dem freien Rand des Knotenbleches zeigt, entstehen in ihm in der Nähe der Einmündung in das horizontale Rohr verhältnismäßig hohe Spannungen. Dies beweist, daß das Knotenblech bei dieser Konstruktion erhebliche Beanspruchungen aufzunehmen hat. Sehr niedrig bleiben dagegen die Spannungen im vertikalen Rohr. Der Spannungsanstieg in der Nähe der Knotenblecheinmündung ist im Vergleich zu den gleichen Stellen der Knoten mit den Eckversteifungen (Bild 33 und 42) sehr gering.

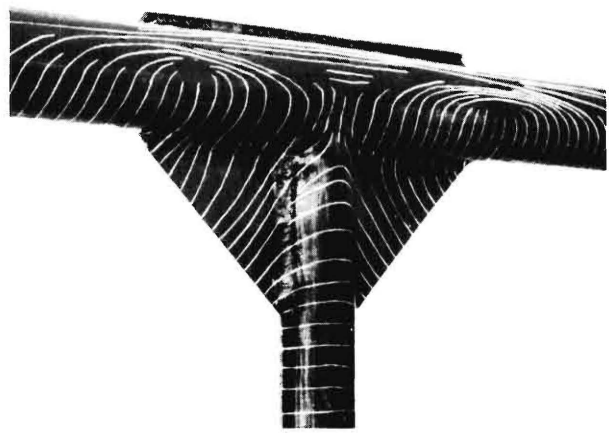


Bild 43. Dehnungslinienfeld auf dem Rohrknoten nach Bild 7 bei senkrechtem Zug. Dieser Knotenpunkt wird durch ein in der Mittelebene des Rohrknotens eingeschweisstes, dreieckiges Blech mit abgeschnittenen Ecken versteift.

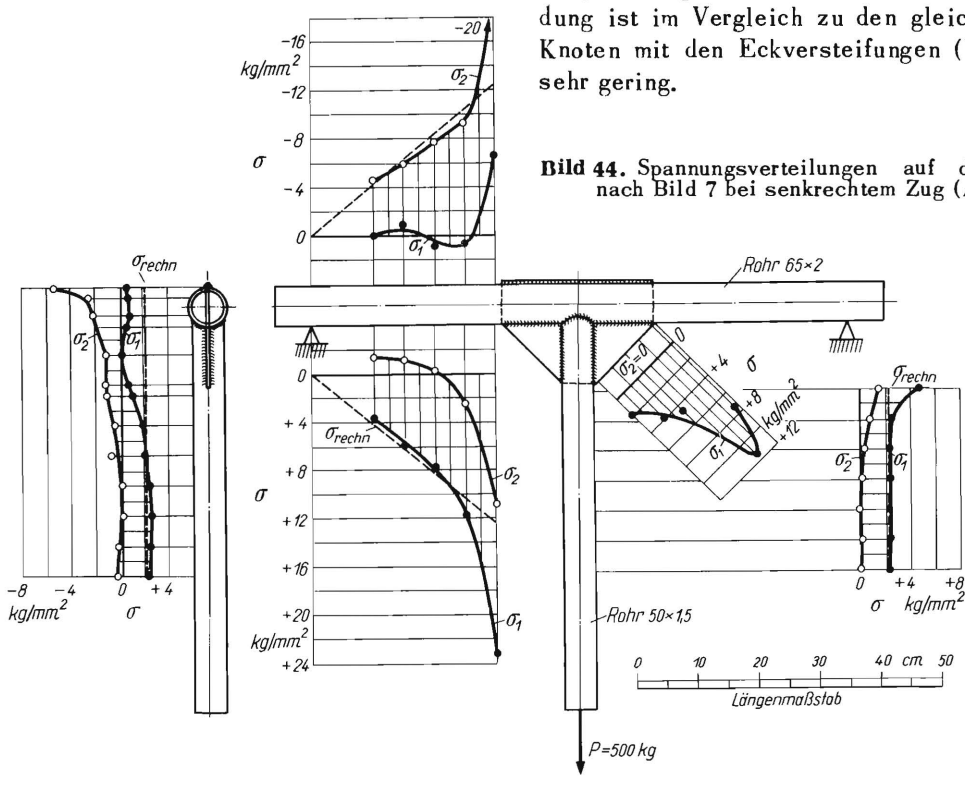


Bild 44. Spannungsverteilungen auf dem Knotenpunkt nach Bild 7 bei senkrechtem Zug (P = 500 kg).

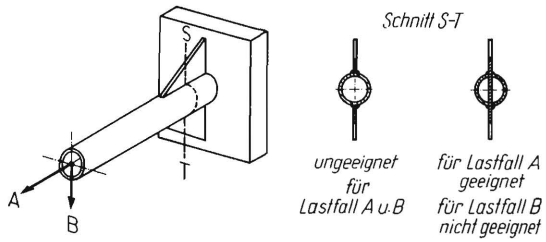


Bild 45. Beurteilung der Güte einer Rohrversteifung bei Zug- und bei Biegebeanspruchung des stirnseitig angeschweissten Rohres.
Lastfall A reine Zugbelastung durch die Kraft *A*
Lastfall B Querkraftbiegung durch die Kraft *B*

Hieraus kann der wichtige konstruktive Grundsatz abgeleitet werden, daß zugbeanspruchte Rohre, die mit einem in der Rohrmittelebene liegenden Blech an das Nachbarbauteil angeschlossen werden, spannungstechnisch günstig gestaltet sind. Bei Biegebeanspruchung jedoch ist diese Konstruktion, wie die Spannungsverteilungskurven über dem horizontalen Rohr gezeigt haben, nicht günstiger als bei nur an dem äußeren Umfang des Rohres angeschweißten Knotenblechen (**Bild 45**).

In **Bild 46** sind die Dehnungslinienfelder auf den linken Seiten der vertikalen Rohre von Knoten nach Bild 5, 6 und 7 zusammengestellt. Während die Rohre der ersten beiden Knoten durch die unterhalb des Knotenbleches senkrecht verlaufenden Dehnungslinien anzeigen, daß hier der Rohrquerschnitt stark elliptisch verformt wird und daß hohe Zugspannungen in Umfangsrichtung entstehen, zeigt das Rohr des Knotens mit dem durchgehenden Versteifungsblech an der gleichen Stelle keine Ungleichmäßigkeiten gegenüber dem Dehnungslinienfeld im ungestörten Bereich. Dies gilt ebenfalls als Beweis für die Richtigkeit des soeben niedergeschriebenen Konstruktionsgrundsatzes.

Einfluß der Wandstärke

Bei den ebenen Versteifungsblechen für Rohrknotenpunkte wäre noch die Frage zu klären, inwieweit die Wandstärke einen Einfluß auf die Verfor-

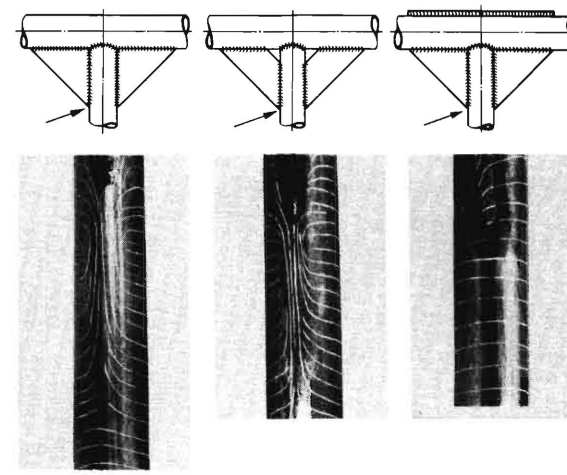


Bild 46. Einfluss der Gestalt verschiedener Eckversteifungen auf die Spannungsfelder im vertikalen Rohr dicht unter dem Auslauf der Versteifungsbleche bei senkrechtem Zug.

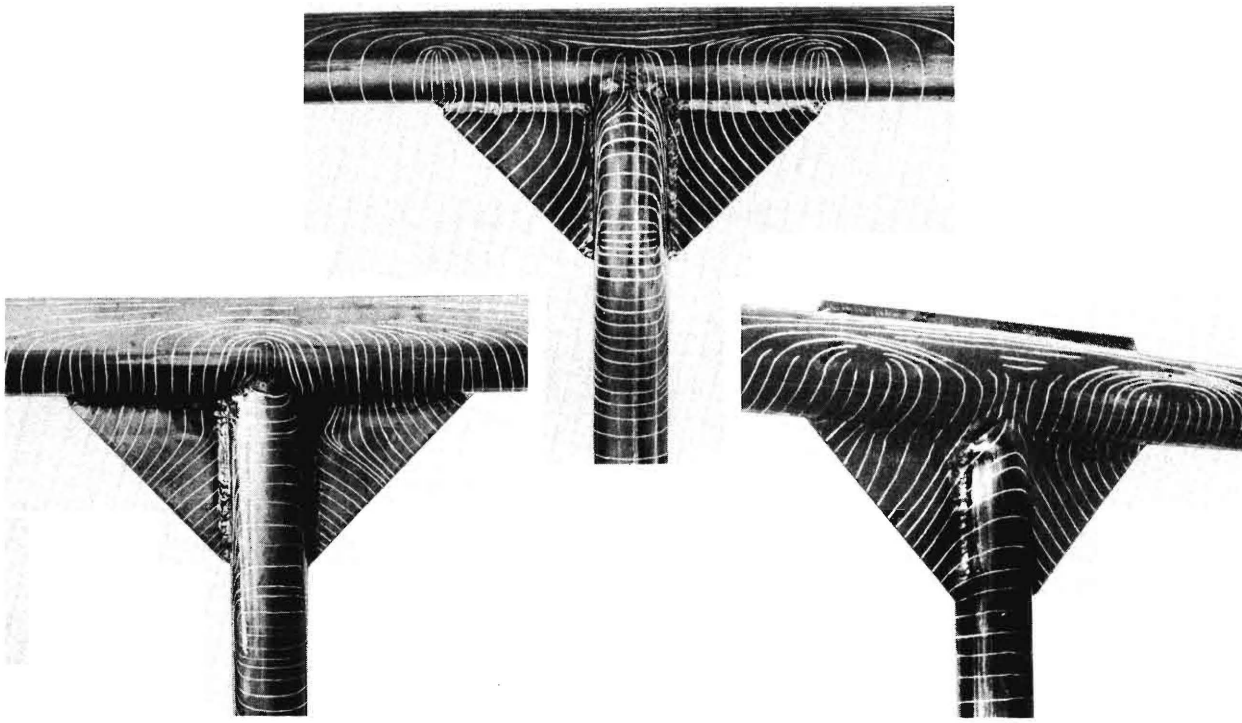


Bild 47. Dehnungslinienfeld auf einem Rohrknoten (oberes Bild) nach der Gestalt des Knotens in Bild 5 bzw. 30 (hier im Bild links unten), jedoch mit grösserer Wandstärke der Rohre, aber gleichem Durchmesser. Die Richtung der Dehnungslinien auf diesem Knoten weicht erheblich von der des Knotens mit den dünneren Rohrwänden in Bild 30 (hier im Bild links unten) ab und ist etwa der des Knotens in Bild 43 (hier im Bild rechts unten) ähnlich.

mungen in den Rohren hat. Aus diesem Grunde wurde ein Rohrknoten nach Art des Knotens in Bild 5 aus Gasrohren mit 4,5 mm Wandstärke und 2 mm dikken Versteifungsblechen hergestellt. Das Dehnungslinienfeld dieses Knotens ist für senkrechten Zug am vertikalen Rohr in **Bild 47** dargestellt. Vergleicht man die Dehnungslinien auf dem horizontalen Rohr mit denen der Knoten in Bild 30 und 43, so stellt man fest, daß die Knotenmitte dem Knotenpunkt mit den dünneren Rohrwänden in Bild 30 entspricht, daß aber diejenigen Rohrstellen, an denen die Eckbleche auslaufen, denselben Dehnungslinienverlauf zeigen wie die auf dem Knoten mit dem durchgehenden Versteifungsblech in Bild 43. Man darf aus dieser qualitativen Betrachtungsweise also folgern, daß die größere Wandstärke das gleiche Spannungsfeld verursacht wie die Versteifung durch das Mittelblech.

Man kann also sagen, daß eine Vergrößerung der Wandstärke eine erhebliche Stützung des kreisrunden Rohrquerschnittes dargestellt, und daß deshalb der Wandstärkeneinfluß bei zug- und biegebeanspruchten Rohren nicht vernachlässigt werden darf.

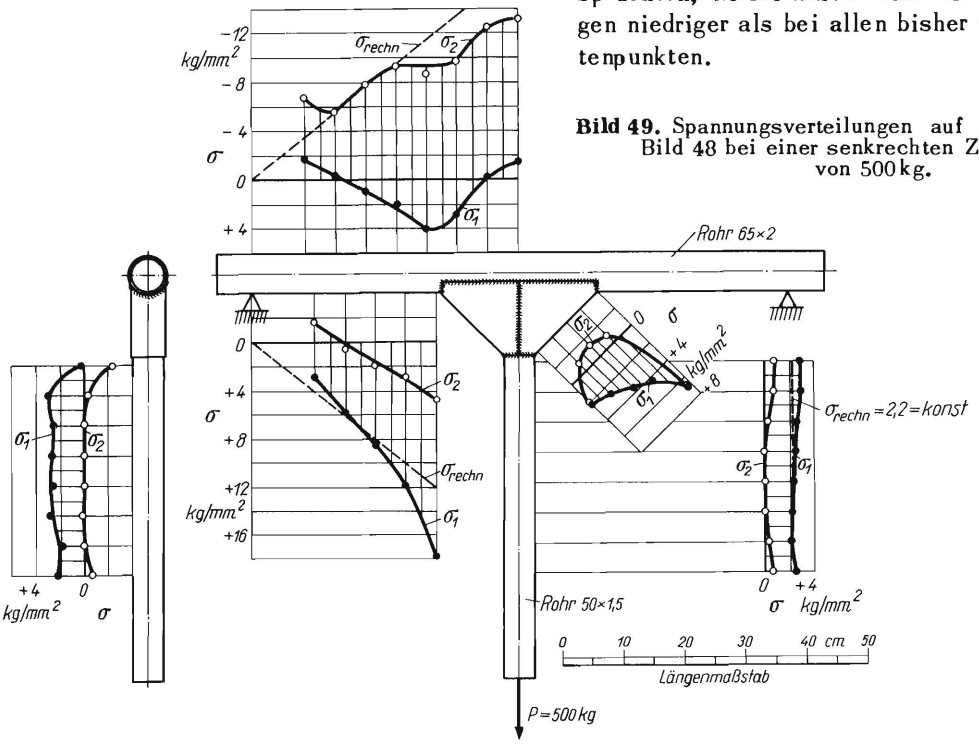
Rohrknoten mit Sattelblechversteifung

Aus der Erkenntnis heraus, daß ebene Versteifungsbleche in Rohrknoten zu Spannungserhöhungen im Bereich der Knotenblechenden führen, weil die Kraft nur auf einer Linie an der Rohrwandung angreift, wurde der sehr starre Knotenpunkt nach Bild 8 untersucht, bei welchem die Eckversteifungen als dreieckige, räumliche Sattelbleche ausgebildet sind. Das Dehnungslinienfeld dieses Knotenpunktes ist in **Bild 48** dargestellt. Der Dehnungslinienverlauf

Bild 48. Dehnungslinienfeld auf einem Rohrknoten nach Bild 8 bei senkrechtem Zug. Bei diesem Knotenpunkt wurden vorher die beiden Rohre nach Art des Knotens in Bild 4 miteinander rechtwinklig verschweisst, und erst danach wurden die Sattelbleche zur Versteifung über die Anschlussstelle geschweisst.

ist dem des Knotenpunktes mit durchgehendem Blech (Bild 43) und dem des Knotenpunktes aus dickwandigen Rohren (Bild 47) sehr ähnlich, so daß zunächst vermutet werden kann, daß die Rohrverformungen klein bleiben. Auch auf dem vertikalen Rohr sind Dehnungslinien in Form von Kreisringen wie bei dem Knotenpunkt mit durchgehendem Blech zu erkennen. Betrachtet man im Vergleich hierzu die Spannungsverteilungskurven in **Bild 49**, so findet man eine Bestätigung der soeben beschriebenen Beurteilung des Dehnungslinienfeldes. Von allen bisher untersuchten Knotenpunkten bleiben bei dieser Knotenpunktversteifung die Spannungen am niedrigsten. Die Spannungszustände sind bis herauf zum Sattelblech nahezu einachsig und zeigen reine Zugbeanspruchungen an. Auch auf dem biegebeanspruchten, horizontalen Rohr bleiben die Spannungen niedriger als bei allen bisher untersuchten Knotenpunkten.

Bild 49. Spannungsverteilungen auf dem Rohrknoten in Bild 48 bei einer senkrechten Zugbelastung von 500 kg.



Aus diesem Meßergebnis darf man folgern, daß es aus spannungstechnischen Gründen richtig ist, Rohrknoten so zu versteifen, daß die Kraftumleitung von dem einen in das andere Rohr nicht linienförmig auf einer Zylindererzeugenden, sondern auf einer möglichst großen Fläche der Rohre erfolgen soll. Die Rohre müssen von den Versteifungsblechen in Umfangsrichtung weit umschlungen werden, damit die Rohre bei Belastung des Knotens ihre kreisrunde Form behalten.

Knoten mit ausgestülptem Rohrende

Da im allgemeinen jede Blechversteifung und jede damit verbundene Vergrößerung der Schweißarbeit zusätzliche Kosten verursachen, wurde versucht, die Anschlußfläche des vertikalen Rohres durch Verformung seines oberen Endes zu vergrößern. **Bild 50** zeigt einen solchen Knotenpunkt, bei dem das obere Ende des vertikalen Rohres durch Ausstülpen so aufgeweitet wurde, daß es sich gut an das horizontale Rohr anschmiegt. Zunächst bietet diese Maßnahme die Gewähr dafür, daß die Schweißnaht nicht an der Stelle der höchsten Beanspruchung liegt. Außerdem wird durch die Rundung im Bereich der Stülpung erreicht, daß der Übergang vom horizontalen zum vertikalen Rohr weicher ist und der Knotenpunkt infolgedessen, besonders bei Biegung im vertikalen Rohr, an dieser Stelle den aufgezwungenen Verformungen besser nachgeben kann.

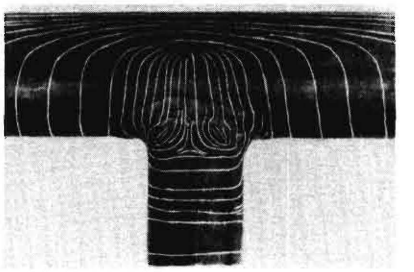


Bild 50. Dehnungslinienfeld auf dem Rohrknoten nach Bild 9 bei senkrechtem Zug. Das vertikale Rohr ist aufgestülpt und stirnseitig mit dem horizontalen Rohr verschweisst.

Das Dehnungslinienfeld in Bild 50 zeigt, abweichend von dem des Knotenpunktes mit nicht ausgestülptem Rohrende (Bild 27), jedoch bei gleicher Belastung, daß der Bereich der zur Mitte des horizontalen Rohres zusammenlaufenden Dehnungslinien wegen der größeren Anschlußfläche breiter ist und daß die Dehnungslinien auf der Vorderseite des vertikalen Rohres nach oben in die senkrechte Richtung abbiegen. Dies bedeutet, daß der Stülpungsbereich in die Zugzone des biegebeanspruchten Horizontalrohres einbezogen ist. Dadurch wird eine Verminderung der Biegespannung im Anschlußgebiet des horizontalen Rohres eintreten (Vergrößerung des Biegewiderstandes) und die Spannungskonzentrationen, die bei den anderen Knotenpunkten genau an den Übergangsstellen von Rohr zu Rohr oder von Versteifungsblech zu Rohr beobachtet wurden, sind hier nicht vorhanden, sondern verteilen sich auf die ganze Stülpungszone.

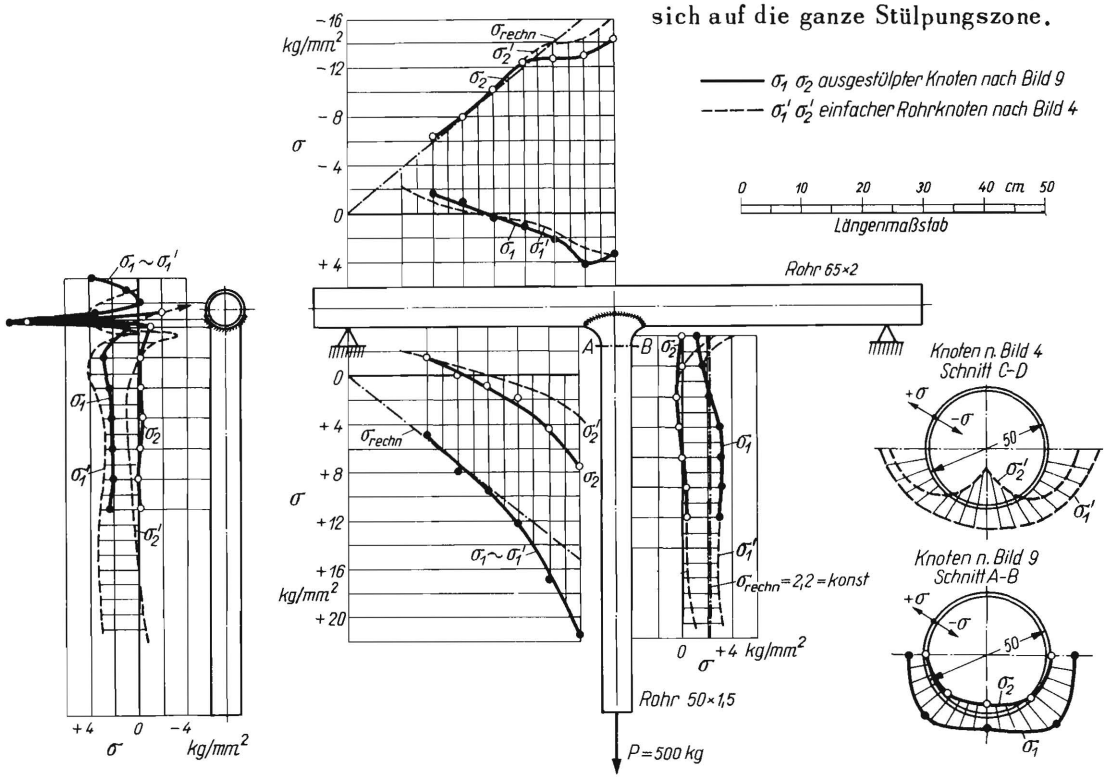


Bild 51. Spannungsverteilungen auf dem Rohrknoten in Bild 50 bei senkrechter Zugbelastung von 500 kg. Zum Vergleich sind die Spannungsverteilungskurven des Knotens mit nicht ausgestülptem, vertikalem Rohr (Bild 29) bei gleicher Belastung eingezeichnet.

In **Bild 51** sind die Spannungsverteilungskurven auf den Knotenpunkten mit ausgestülptem und nicht ausgestülptem Rohrende einander gegenübergestellt. Wie man sieht, sind die Spannungen auf dem horizontalen Rohr des Knotens mit dem ausgestülpten Rohrende fast genau so groß wie die auf dem anderen Knotenpunkt. Ausgenommen ist allerdings der Betrag der zweiten Hauptspannung auf der Unterseite des horizontalen Rohres dicht an der Schweißnaht. An dieser Stelle sind die Zugspannungen σ_2 in Umfangsrichtung doppelt so groß wie an der gleichen Stelle des Rohrknotens mit dem nicht ausgestülpten Rohrende. Auf dem vertikalen Rohr dagegen sinken die Spannungen σ_1, welche im ungestörten Bereich den rechnerischen Werten gleich sind, nahezu auf Null ab. Ein Vergleich der Spannungsverteilungen auf den vertikalen Rohren der beiden Knoten nahe der Schweißverbindung lassen erkennen, daß beim Knoten mit ausgestülptem Rohrende ein nahezu einachsiger Spannungszustand mit niedrigen Spannungen σ_1 herrscht, während auf dem anderen Knoten an den Seiten zweiachsige Zugspannungszustände und auf der Vorderseite zweiachsige Spannungszustände mit $+\sigma_1$- und $-\sigma_2$-Spannungen herrschen.

Wir stellen also fest, daß das Ausstülpen erstens wegen der Vergrößerung der Anschlußfläche und zweitens wegen des weicheren Überganges von dem vertikalen in das horizontale Rohr bei dieser Beanspruchungsart eine Verminderung der Spannungen im vertikalen Rohr mit sich gebracht hat. Das vertikale Rohr erhält bis hinauf zur Ausstülpung nur einachsige Zugspannungen.

Knoten mit flachgedrücktem Rohrende

Auf Grund dieses Meßergebnisses beim Knoten mit ausgestülptem Rohrende lag die Frage nahe, ob das Ausstülpen durch einfaches Flachdrücken des Rohres dasselbe für die Haltbarkeit des Knotens günstige Spannungsfeld ergibt. Deshalb wurde der Knotenpunkt (Bild 10) so hergestellt, daß das obere Ende des vertikalen Rohres auf eine lichte Weite von 10 mm kalt zusammen gedrückt wurde. In **Bild 52 und 53** sind die Dehnungslinienfelder der Knotenpunkte mit dem zusammengedrückten bzw. ausgestülpten Rohrende bei Biegebeanspruchung des vertikalen Rohres dargestellt. Ein Vergleich der Dehnungslinienfelder beider Knotenpunkte läßt erkennen, daß die Spannungszustände außerordentlich verschieden sind. Während beim Knoten mit dem ausgestülpten Rohrende (Bild 53) die höchsten Spannungen am vertikalen Rohr unmittelbar unterhalb der Schweißnaht auftreten, liegen die Spannungsspitzen beim Knoten mit dem zusammengedrückten Rohrende (Bild 52) auf der unteren, äußeren Faser des S-förmig verbogenen, horizontalen Rohres. Das Flachdrücken bewirkt zwar eine Vergrößerung des Biegewiderstandes im vertikalen Rohr, so daß dort

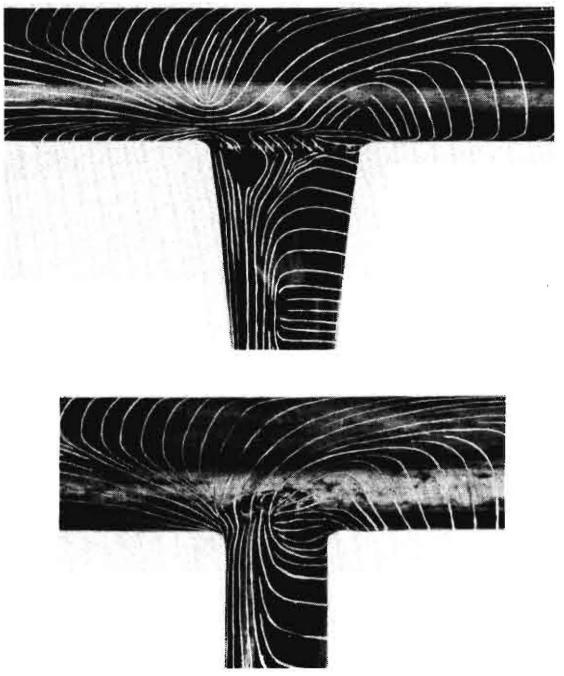


Bild 52 und 53. Dehnungslinienfelder auf zwei Knotenpunkten bei Biegebeanspruchung des vertikalen Rohres.
Bild 52. Bei diesem Knoten wurde das vertikale Rohr am oberen Ende auf eine lichte Weite von 10 mm flachgedrückt.
Bild 53. Bie diesem Knoten wurde das vertikale Rohr am oberen Ende ausgestülpt.

keine wesentlich höheren Spannungen als die durch die Berechnung nach der klassischen Festigkeitslehre zu erwartenden sind, hat aber auf der Unterseite des horizontalen Rohres wegen des schmalen Anschlusses hohe Spannungen zur Folge, weil die Enden des vertikalen Rohres die kreisrunde Gestalt des horizontalen Rohres stark verändern. Besonders interessant erscheinen in diesem Zusammenhang die Dehnungslinienfelder auf der Unterseite des horizontalen Rohres dieses Knotenpunktes in **Bild 55 und 56**. Die Lage der Dehnungslinienfelder ist in **Bild 54** zu erkennen.

Auf dem vertikalen Rohr entsprechen die Richtungen der Dehnungslinien den Vorstellungen über biegebeanspruchte Träger. In der Zugzone laufen die Lackrisse senkrecht zur Längsachse des gebogenen Vertikalrohres (Bild 56), in der Druckzone parallel zur Rohrlängsachse (Bild 55). Beim horizontalen Rohr jedoch überraschen zunächst die Richtungen der Dehnungslinien. In der Druckzone (Bild 55) reißen die Dehnungslinien senkrecht zur Rohrrichtung auf. Da hier durch die Biegeverformung und die örtliche Rohreindrückung zweiachsige Druckspannungszustände herrschen, reißt der Lack senkrecht zur kleinsten Druckspannung auf. Dies bedeutet aber, daß an diesen Stellen die Spannungen in Umfangsrichtung dem Betrag nach größer sind als die Spannungen in Rohrlängsrichtung. Umgekehrt ist es auf der Zugseite des horizontalen Rohres. Hier herrschen zweiachsige Zugspannungszustände (Bild 56). Im engeren Bereich der äußer-

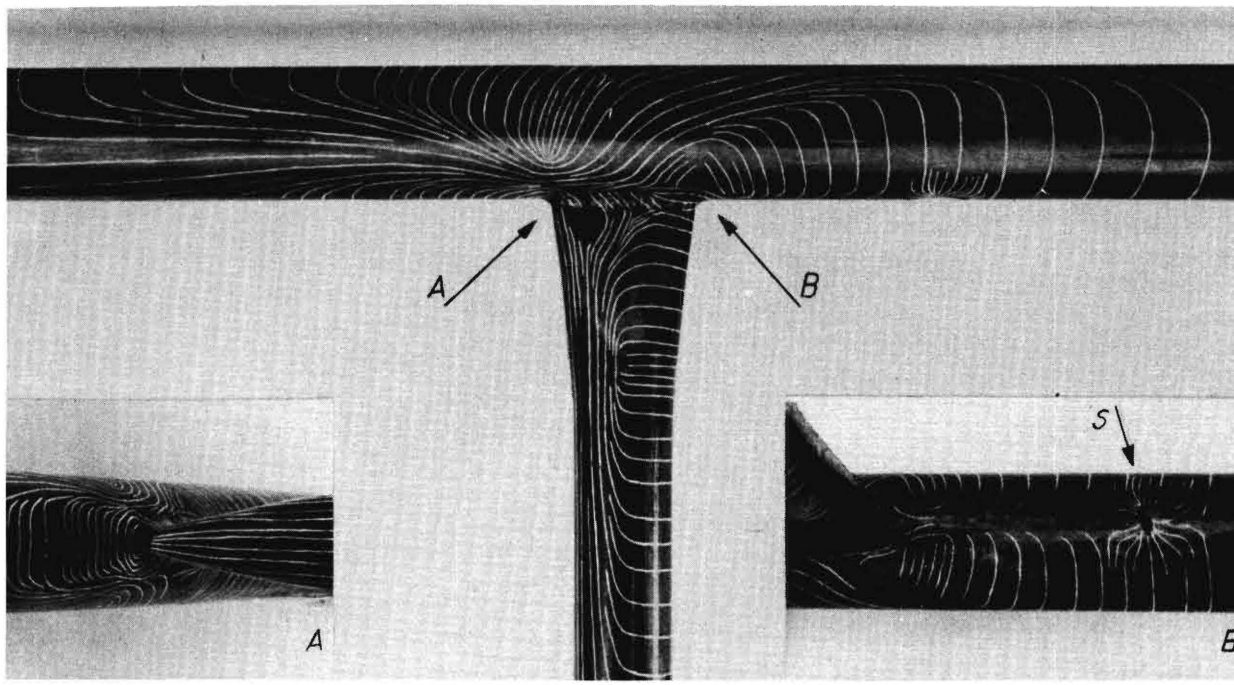


Bild 54 bis 56. Dehnungslinienfelder des biegebeanspruchten Knotens mit flachgedrücktem Rohrende.
Bild 55 (links unten). Druckbeanspruchte Unterseite des horizontalen Rohres (Ansicht in Richtung A).
Bild 56 (rechts unten). Zugbeanspruchte Unterseite des horizontalen Rohres (Ansicht in Richtung B). Die Störung s des durch die Biegebeanspruchung entstandenen Dehnungslinienfeldes wurde durch eine kleine Beule im horizontalen Rohr verursacht.

sten Biegefaser sind die größten Zugspannungen wieder in Umfangsrichtung infolge starker Verformung des Rohrquerschnittes. Da aber – über den Umfang gesehen – die Dehnungslinien sehr schnell in Umfangsrichtung abbiegen, so daß unmittelbar neben der äußersten Faser infolge der S-förmigen Verbiegung die größeren Zugspannungen wieder in Längsrichtung erscheinen, ist zu schließen, daß auf dieser Zugseite des horizontalen Rohres die Spannungen σ_1 und σ_2 fast gleich groß sind und der Spannungskreis mit dem Radius($(\sigma_1 - \sigma_2)/4$ ebenfalls sehr klein ist. Bei hohen Biegebeanspruchungen wird also auf dieser Seite (Bild 56) mit einem nahezu verformungslosen Bruch zu rechnen sein.

Wir stellen für den Rohrknoten mit zusammengedrücktem Rohrende also fest, daß er spannungsmäßig weniger günstig ist als der Knoten mit ausgestülptem Rohrende; denn durch die Querschnittsveränderung des vertikalen Rohres wird zwar eine Verlängerung der Anschlußbasis in Richtung des horizontalen Rohres erreicht, nicht aber eine größere Umschlingung.

Abschließend sei noch auf das Dehnungslinienfeld „s" in Bild 56 hingewiesen. Diese Störung des normalen Dehnungslinienverlaufes ist auf eine kleine Beule im Rohr zurückzuführen, welche beweist, wie stark die Querschnittsform eines dünnwandigen Rohres das Spannungsfeld beeinflussen kann.

Zusammenfassung

Um die Spannungen in den Knotenpunkten klein zu halten, wird in der Praxis oft versucht, die Verbindungsstellen durch Bleche zu versteifen. Die Versteifungen führen bei Zug-, Druck- und Biegebeanspruchungen und – wie früher schon festgestellt werden konnte – auch bei der Torsion offener Profilknoten nur zu einer Verlagerung der Spannungsspitzen an die Enden der Versteifungsbleche [11].

Die Versuche haben gezeigt, daß man die Spannungsfelder in solchen Knotenpunkten nur dann beherrscht, wenn man seinen Überlegungen über die richtige Gestalt des Knotenpunktes die räumliche Vorstellung von dem Verformungsmechanismus zugrundelegt.

Als Konstruktionsgrundsatz für das Verbinden dünnwandiger Rohre kann schon aus den statischen Versuchen und aus den gezeigten Meßergebnissen mitgeteilt werden, daß Kräfte in ein Rohr nur auf möglichst weiten Bereichen seines Umfanges eingeleitet werden dürfen. Punktförmige oder linienförmige Krafteinleitungen am Rohr führen infolge örtlich großer Deformationen zu hohen Spannungen und infolge mehrachsiger Zugspannungszustände unter Umständen zu spröden Brüchen.

* *
*

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: Grundlg. d. Landtechn. Heft 4. Düsseldorf 1953, S. 12/33.

[5] *Bergmann, W.:* Dehnungslinienverfahren. In: Experimentelle Spannungsanalyse. Düsseldorf 1956 (erscheint demnächst).

[6] *Rötscher, 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 Sprödbruches. 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: Grundlg. 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, (20b) Braunschweig, Bundesallee 50

Spannungen in Knotenpunkten offener Profile bei statischer Belastung

Von **Dietrich Spangenberg**

Während *Bergmann* [1] Untersuchungen an Rohrknotenpunkten 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 worden [2, 3]. Dehnungsmessungen an versteiften Knotenpunkten genieteter Fachwerkkonstruktionen 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.

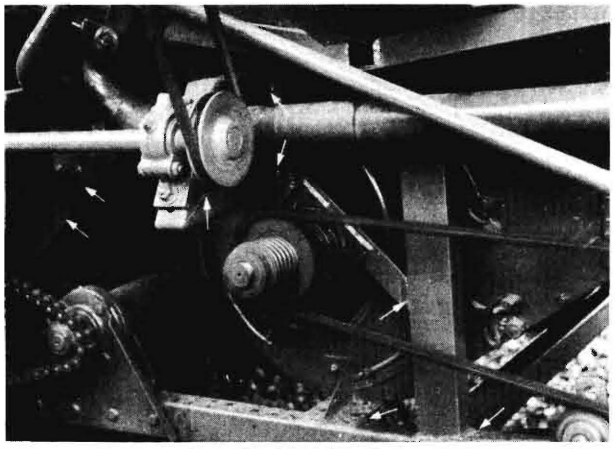


Bild 1. Knotenpunkte aus offenen Profilen am Gestell eines Mähhäckslers.

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.