

Über die Krafteinleitung bei Konstruktionen aus dünnwandigem Stahlrohr im Landmaschinenbau

Von Jens P. Friebe, Braunschweig

Wenn man die Entwicklung der Landmaschinen in den letzten Jahren verfolgt, so stellt man fest, daß immer mehr Stahlrohre, besonders dünnwandige Stahlrohre verwendet werden. Das ist bei den günstigen Eigenschaften des Kreisringquerschnittes, bei kleinem Eigengewicht große Kräfte aufnehmen und übertragen zu können, nicht überraschend. Ein neues Konstruktionselement verlangt aber auch neue Konstruktionsmethoden, die die Forschung erarbeiten muß. Der vorliegende Bericht soll dazu dienen, dem Konstrukteur ein Gefühl für die Verhaltensweise dünnwandiger Querschnitte zu vermitteln. Im folgenden sind den systematischen Untersuchungen von Krafteinleitungsstellen auch ausgeführte Konstruktionen beigegeben, an denen die Ergebnisse der Versuche zum besseren Verständnis erläutert werden. Rohrkonstruktionen im Landmaschinenbau dienen stets dazu, Kräfte und Momente, die sich aus dem Betrieb der Maschinen ergeben, aufzunehmen und weiterzuleiten. Um diese Kräfte und Momente so in den Rohrquerschnitt einzuleiten, daß Spannungsspitzen vermieden werden, deren Größe und Gefährlichkeit vom Reißbrett aus nicht übersehen werden können, selbst wenn ihre Existenz bekannt ist, müssen Konstruktionsprinzipien auf Grund systematischer Versuche entwickelt werden.

Bevor nun einzelne Beispiele von Krafteinleitungsstellen besprochen werden, soll das Ergebnis der Untersuchungen vorweggenommen werden, indem einige wichtige allgemeine Regeln für die Gestaltung von solchen Stellen aufgestellt werden. Die Beispiele werden dann daraufhin untersucht, wieweit diese Regeln befolgt wurden.

Die ersten drei Regeln ergeben sich aus den Steifigkeitseigenschaften eines dünnen Bleches. Seine Steifigkeit gegen Kräfte, die senkrecht auf seine Oberfläche wirken, ist gering; sie ist hingegen groß gegenüber einer Belastung, deren Kraftvektoren in der Mittelebene der Blechwand liegen. Entsprechend ist die Rohrwand steif gegenüber einer Belastung tangential zu ihrer Mittelebene. Es gilt also:

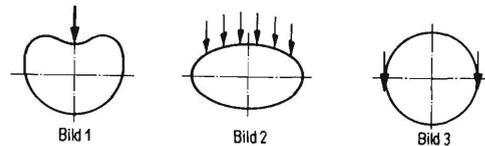
1. Einzelkräfte mit kleiner Angriffsfläche, senkrecht zur Rohrwand wirkend, sind zu vermeiden.
2. Konsole und ähnliche Elemente zur Krafteinleitung in Rohre sind so auszubilden, daß die Kräfte zwischen ihnen und der Rohrwand, also in der Anschlußfläche, tangential als Schubkräfte wirken.
3. Lassen sich Kräfte senkrecht zur Rohrwand nicht vermeiden, so sind sie über eine große Anschlußfläche in den Rohrquerschnitt einzuleiten. Unter „Anschlußfläche“ soll dabei die gedachte Schnittfläche zwischen dem ursprünglichen Rohr und dem angefügten Bauelement verstanden werden.

In den **Bildern 1 bis 3** sind diese Regeln veranschaulicht.

Ein weiterer Grund für Spannungsspitzen ist die bei bestimmten Konstruktionen auftretende Dehnungsbehinderung. Wird eine versteifende Lasche, die sich weit in Längsrichtung des Rohres erstreckt, in einer Zone hoher Biegespannungen an das Rohr geschweißt, **Bild 4**, so behindert sie die normale Biegeverformung des Rohres in zweifacher Weise. Sie behindert sowohl die Biegedehnung der Rohrfasern wie auch die Durchkrümmung des Rohres infolge der Querkraftbelastung, da sie als sehr steifes Element selber kaum an den Dehnungen teilnehmen kann. Die

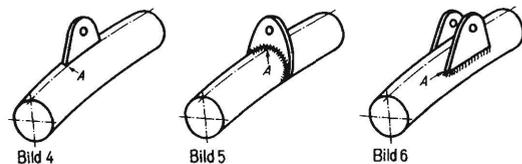
Folge sind Spannungsspitzen an den in Längsrichtung des Rohres liegenden Schweißnahtenden. Es gilt also ferner:

4. Anbringung von Bauelementen zur Krafteinleitung in Zonen hoher Längsspannungen ist zu vermeiden.
5. Ist es aus irgendwelchen Gründen nicht möglich, die Schweißnähte in die neutrale Faser zu legen, **Bild 6**, so ist bei einer Anbringung in einer Zone hoher Längsspannungen darauf zu achten, daß
 - 5.1 die Erstreckung des entsprechenden Bauelementes zur Krafteinleitung in Wirkungsrichtung der Spannungen gering ist, **Bild 5**, und
 - 5.2 das Element nicht derart versteifend ausgebildet ist, daß der Kreisquerschnitt des Rohres bei der Durchbiegung zwangsweise erhalten bleibt.



Bilder 1 bis 3. Schematische Darstellung des Einflusses der Krafteinleitungsart auf die Querschnittsverformung.

Bild 1. Einzelkraft senkrecht zur Rohroberfläche: starke Deformation, Bild 2. Stetige Last „senkrecht“ zur Rohroberfläche: geringe Deformation, Bild 3. Schubkräfte tangential zur Rohroberfläche: wenig Deformation.



Bilder 4 bis 6. Schematische Darstellung des Einflusses der Laschenform und -anordnung auf die Dehnungsbehinderung bei Biegung.

Bild 4. Dehnungsbehinderung bei A groß, Bild 5. Dehnungsbehinderung bei A gering und Bild 6. Dehnungsbehinderung bei A klein

Eine konsequente Beachtung dieser Regeln wird zu guten Konstruktionen führen. Die nun folgende Besprechung der praktischen Ausführungsbeispiele wird zeigen, inwieweit diese Regeln befolgt sind; die Meßergebnisse der systematischen Untersuchungen werden aufzeigen, welche Folgen ihre Nichtbeachtung haben kann.

Bild 7 zeigt den typischen Fall einer Querkrafteinleitung. Die Kraftkomponente in Längsrichtung des senkrechten Rohres ist in dieser Stellung des Kranauslegers in dem unteren Gelenkpunkt gering. Die Kraft wird über zwei dreieckförmige Laschen eingeleitet, die so angebracht sind, daß noch Komponenten der Kraft senkrecht auf die Rohrwand wirken und Verformungen des Rohres eintreten können. Die Spannungsspitzen infolge Dehnungsbehinderung dürften gering sein, da die senkrechte Säule einen sehr steifen Eindruck macht. Man sollte jedoch stets versuchen, die Laschen seitlich in der neutralen Zone anzubringen, wie **Bild 8 und 9** zeigen, so daß alle Querschnittsteile frei an der Biegedehnung teilnehmen können. Die Regeln 2 und 4 sind hierbei beachtet, wodurch sich eine Spannungsverteilung ergibt, die keine Störungen und Spitzen aufweist und deren Maximalwerte die rechnerisch ermittelten Werte von 12 kp/mm² nicht übersteigen. Diese Konstruktion kann daher als Vergleichsbasis für alle untersuchten Konstruktionen mit einer reinen Querkrafteinleitung dienen.

Dipl.-Ing. Jens P. Friebe war wissenschaftlicher Mitarbeiter der „Forschungsgruppe Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. W. Kloth“ im Institut für landtechnische Grundlagenforschung der Forschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode.

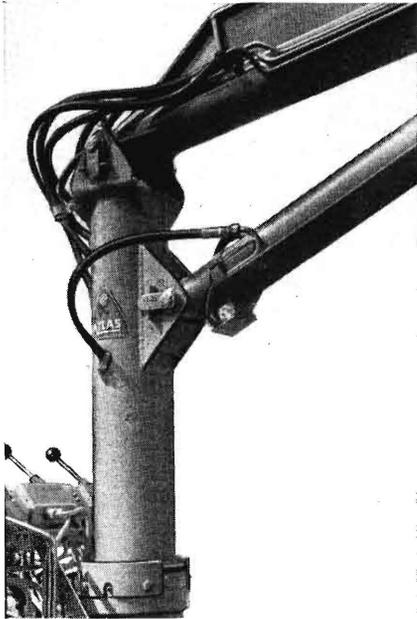


Bild 7. Einleitung einer Querkraft an einem Anbaulader.

Das aus Reißlackversuchen und Feindehnungsmessungen kombinierte Verfahren zur Ermittlung der Spannungsverteilung ist an dieser Stelle bereits mehrfach von *Kloth*, *Bergmann* und *Spangenberg* beschrieben worden, so daß sich eine neuerliche Besprechung erübrigt. Die Dehnungslinienfelder werden, um die Übersichtlichkeit der Ausführungen zu erhalten, nur dort angeprochen, wo bereits deren Verlauf auf hohe Spannungen hindeutet. In die Rohre wurden mittels der verschiedenen Bauelemente eine Kraft $P = 500$ kp als Längs- oder Querkraft eingeleitet und mittels Feindehnungsmesser die Spannungsverteilung in der Rohroberfläche ermittelt. Da bei einigen Konstruktionen die Höchstwerte der auftretenden Spannungen die Fließgrenze des Werkstoffes bei weitem übersteigen würden, wurden die Spannungsverläufe bei $P = 100$ kp gemessen und dann linear auf den vollen Wert von $P = 500$ kp extrapoliert, um zwischen den einzelnen Konstruktionen übersichtliche Vergleichsmöglichkeiten zu bekommen. Die nach diesem Verfahren erhaltenen Maximalwerte der Spannungen sind in den Diagrammen mit einem Sternchen versehen.

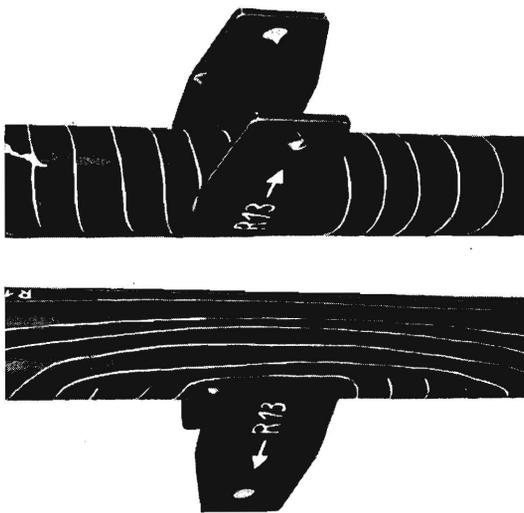


Bild 8 und 9. Querkrafteinleitung in der neutralen Biegefaser eines Rohres.

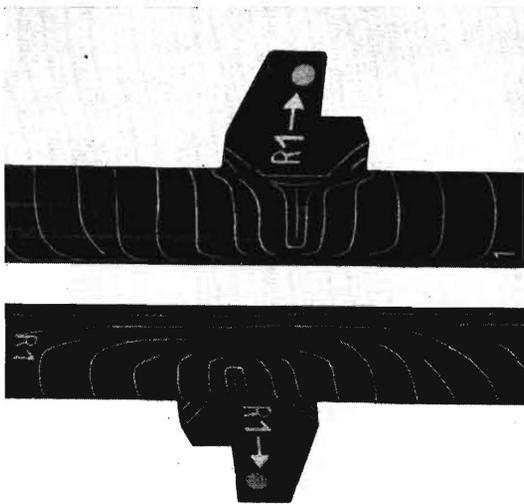
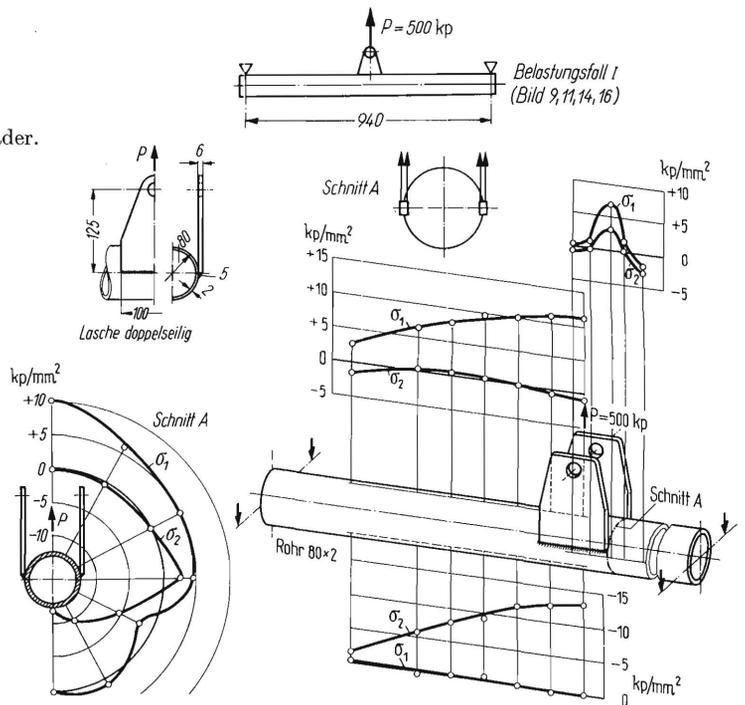
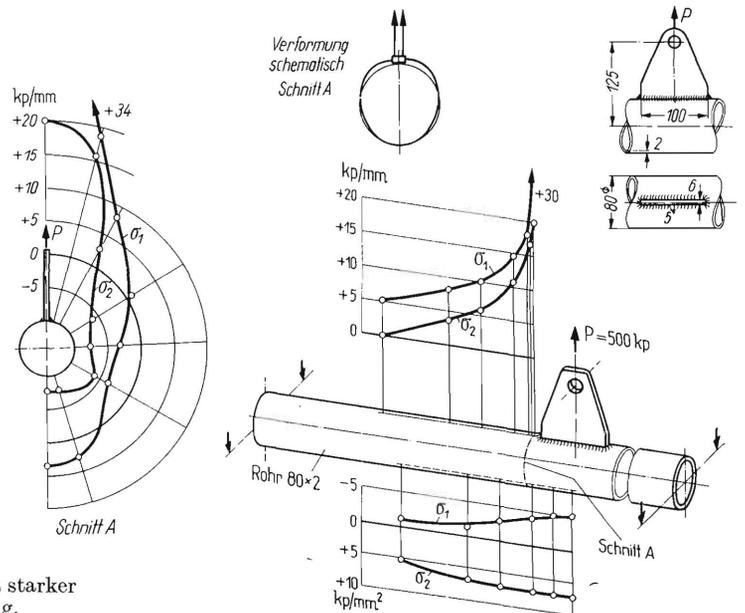


Bild 10 und 11. Beispiel für eine Querkrafteinleitung mit starker Dehnungsbehinderung und Querschnittsverformung.



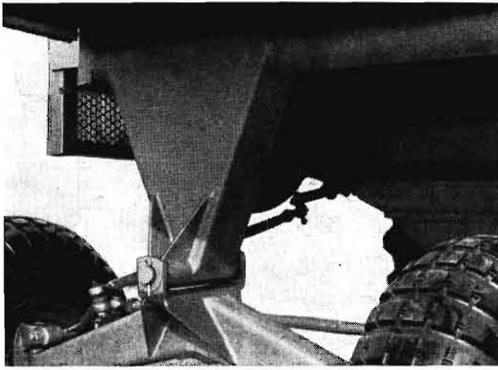


Bild 12. Querkrafteinleitung mit geringer Verformung des Rohrquerschnittes und geringer Dehnungsbehinderung, da die in Fahrzeuglängsrichtung liegenden Nähte dünnwandig sind.

Eine Querkraft wird häufig, wie in **Bild 10 und 11** gezeigt, über eine einfache Lasche eingeleitet, die mit einer Längsnaht am Rohr befestigt ist. Die Anordnung stellt also einen Verstoß gegen die Regeln 1, 2 und 4 dar. Die Folgen sind Deformationen der Rohrwand und Dehnungsbehinderungen, die sich teilweise gegenseitig bedingen. Die dabei auftretenden Spannungsspitzen an den in Längsrichtung des Rohres liegenden Enden der Anschlußfläche sind bereits dreimal so hoch wie im zuvor besprochenen Fall. Ein interessantes Phänomen ist hier, daß in der der Lasche gegenüberliegenden Druckfaser des Rohres die Spannungen unter den

rechnerischen Werten bleiben. Das liegt daran, daß der Rohrquerschnitt sich unter dem Einfluß des Kraftangriffes zu einem Oval verformt, wodurch der Rohrquerschnitt im belasteten Zustand ein höheres Widerstandsmoment als im unbelasteten Zustand ein höheres Widerstandsmoment als im unbelasteten Zustand aufweist. Wir sehen hier erstmalig, daß die leichte Verformbarkeit eines dünnwandigen Querschnittes auch einmal vor höheren Spannungsspitzen, die bei einem steiferen Gebilde auftreten können, schützt. Das gleiche gilt auch für die Spannungsspitzen an den Enden der Anschlußfläche. Hindert man das Rohr daran, sich zu einem Oval zu verformen, etwa dadurch, daß die Lasche mittels Schlitz quer durch das Rohr gesteckt und sowohl auf der Druck- wie auf der Zugseite des Rohres verschweißt wird, so beobachtet man höhere Spannungsspitzen als in dem vorliegenden Fall. Der Grund ist, daß das Rohr nunmehr daran gehindert wird, durch eine Querschnittsverformung die Spitzen der Spannungsverteilung abzubauen. (Eine solche Anordnung ist in **Bild 36**, jedoch für einen anderen Lastfall, dargestellt.) Wir erkennen jetzt auch die Berechtigung für die Regel 5.2. Gegen sie wird in der Praxis in gutem Glauben häufig verstoßen. Nach dieser Regel müssen auch Laschen beurteilt werden, die mit Ringnähten angeschlossen werden, die das Rohr zwingen, seinen

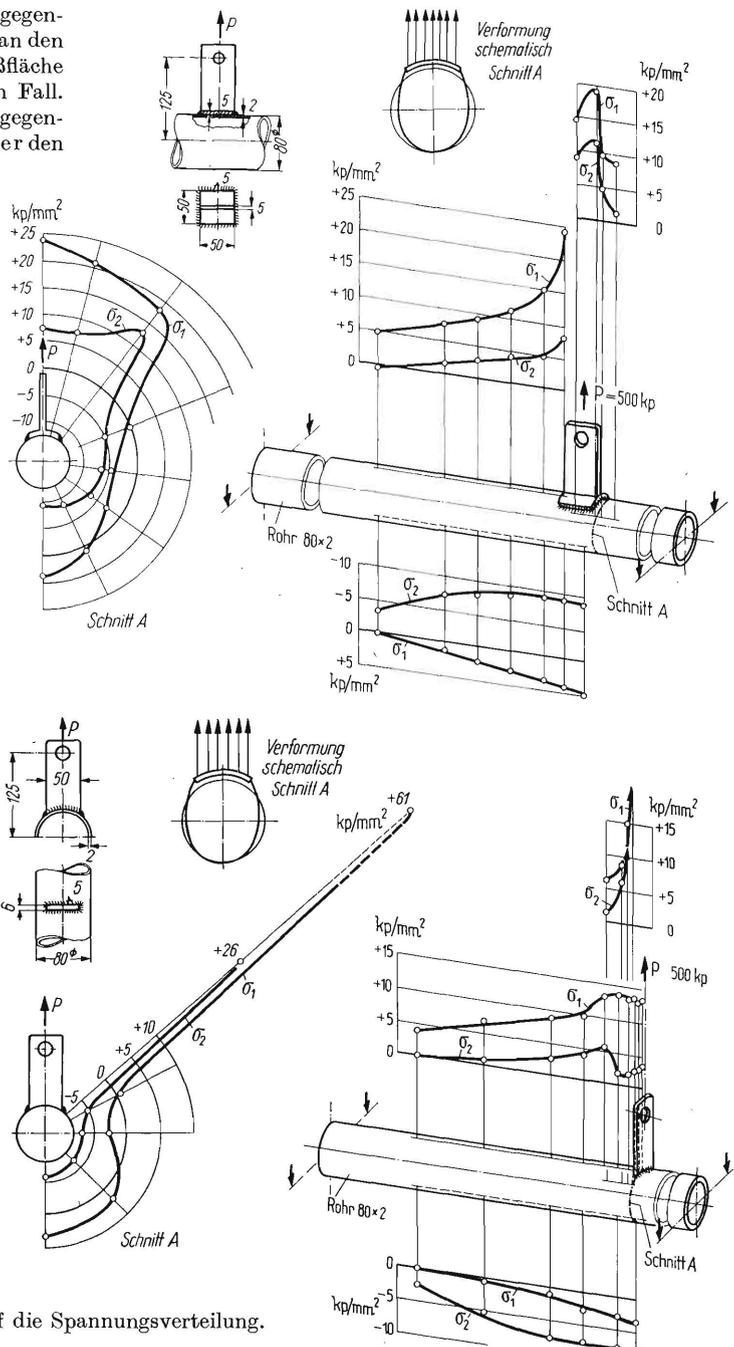
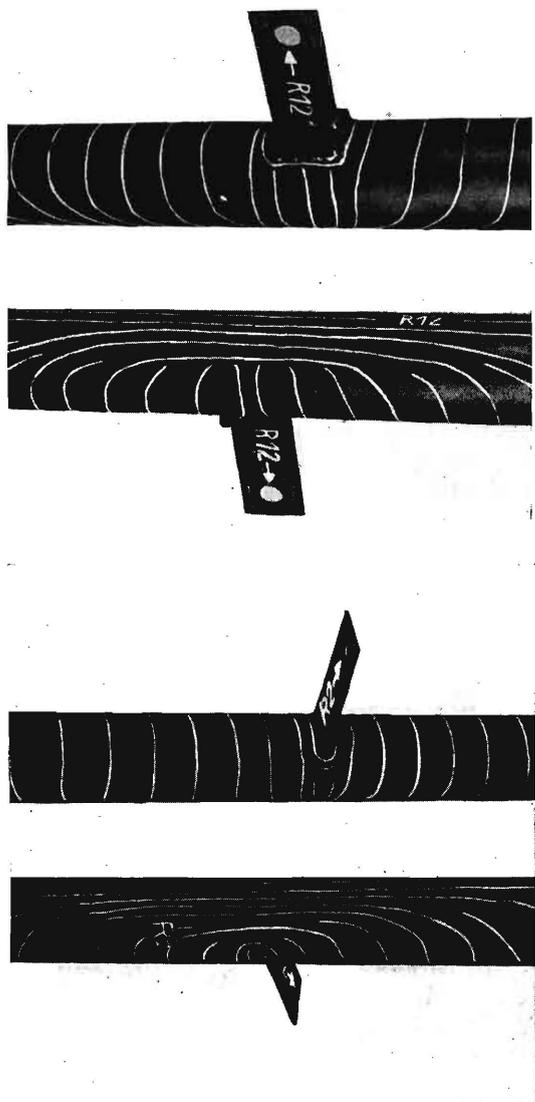


Bild 13 bis 16. Einfluß der Größe der Anschlußfläche auf die Spannungsverteilung.

Kreisquerschnitt zu erhalten, so daß ihm die Möglichkeit genommen ist, Spannungsspitzen abzubauen. Hinzu kommt eine Gefährdung durch Eigenspannungen.

In **Bild 12** sehen wir eine recht gute Lösung für die Querkrafteinleitung. Ein aus Blech gefertigter Kasten ist so mit dem Rohr verbunden, daß die Hauptnähte in der neutralen Zone liegen, während mit den quer zur Rohrachse liegenden Nähten nicht gegen Regel 5 verstoßen wird. Die obere Hälfte des Rohrquerschnittes wird nicht angetastet und kann sich daher frei verformen. Die quer zur Rohrachse liegenden Ebenen des Kastens sind nachgiebig, so daß für die Beurteilung der Dehnungsbehinderung allein die Kehlnaht, nicht aber das ganze Konsolmaßgebend ist. Dennoch wäre zu erwägen, ob nicht noch besser auf diese Nähte verzichtet werden sollte. Dadurch würden die Herstellungskosten und die Festigkeit verbessert.

Aus den **Bildern 13 bis 16** erkennt man die Bedeutung der Regeln 1 und 2. In beiden Fällen ist die Anschlußfläche ein Rechteck mit abgerundeten Ecken. Dieses Rechteck hat jedoch in **Bild 14** einen viermal so großen Flächeninhalt wie bei dem in **Bild 16** dargestellten Fall. Die Maximalwerte der Spannungsspitzen verhalten sich wie 1:2,7, wobei der Wert 1 der großen Anschlußfläche zuzuordnen ist. Dabei darf nicht übersehen werden, daß die Spannungsspitzen auch bei der größeren Anschlußfläche noch doppelt so hoch wie bei der Konstruktion in **Bild 9** sind. Noch bessere Ergebnisse sind bei einer stärkeren Abrundung der Ecken der Anschlußfläche zu erwarten, die im Fall nach **Bild 13** und **14** nur soweit gegeben ist, wie sie sich durch das Herumziehen der Schweißnaht um die an sich scharfe Ecke zwangsläufig ergibt. Weitere Verbesserungen können durch eine weitere Vergrößerung der Anschlußfläche erreicht werden, wobei aber in zunehmendem Maße die versteifende Wirkung der Lasche mit Behinderung der Werkstoffdehnung und der Querschnittsverformung ungünstige Einflüsse haben wird.

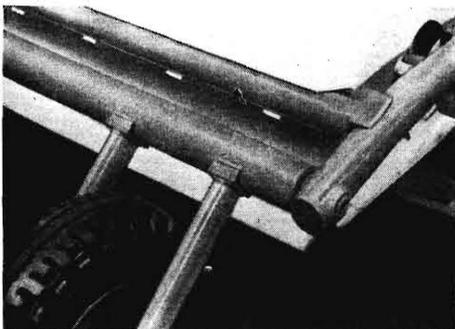


Bild 17. Einleitung einer Querkraft und eines Drehmomentes in ein Rohr. Eine verbesserungsfähige Konstruktion.

Wir sehen in **Bild 16** den errechneten Maximalwert der Spannungen mit 61 kg/mm^2 eingetragen, der an sich bereits über der Fließgrenze des verwendeten Werkstoffes liegt, selbst wenn diese Grenze wie im vorliegenden Falle durch einen versprödhenden Spannungszustand erhöht ist. Die durch Extrapolation der Querkraft auf 500 kp entstandenen Zahlenwerte in den Diagrammen dienen, wie bereits erwähnt, dazu, verschiedene Konstruktionen auch dann vergleichen zu können, wenn die höchsten Spannungen über der Fließgrenze liegen würden. In diesem Zusammenhang ist noch eine interessante Erscheinung zu erwähnen. Bei Versuchen konnte festgestellt werden, daß die Dehnungen bei örtlich begrenzten Spannungsspitzen bei den dünnwandigen Rohren und sicher auch bei anderen dünnwandigen Querschnitten bei Entlastung auch dann noch nahezu auf Null zurückgehen, wenn ihre Maximalwerte weit über der Fließgrenze lagen. Man darf daraus schließen, daß die elastischen Kräfte in der Umgebung der örtlich eng begrenzten Zone plastischer Verformungen bei Entlastung ein Zurückfließen des Werkstoffes erzwingen. Eine dauernde Wiederholung dieses Vorganges im Sinne einer Schwingungsbeanspruchung würde zu einem Dauerbrauch führen, ein gelegentliches, örtliches und geringes Überschreiten der Fließgrenze stellt jedoch keine Gefahr für die Konstruktion dar. Die Spannungsspitzen sind in nahezu allen Fällen an der Oberfläche

zweiachsig. Die versprödhende Wirkung solcher Spannungszustände ist bekannt und muß von Fall zu Fall beachtet werden.

Bild 17 stellt eine gemischte Krafteinleitungsstelle dar. Es wird eine Querkraft und ein Drehmoment eingeleitet, wobei das Moment überwiegt. Die Wirkung ist etwa die gleiche wie in **Bild 7**. Es soll jedoch an diesem Beispiel gezeigt werden, daß man nicht nur an das Rohr denken darf, sondern daß auch das Bauelement zur Krafteinleitung die nötige Eignung haben muß. Hier wurden die Kräfte aus der aus stabilem Ovalrohr hergestellten Radgabel über eine aus Flacheisen gebogene labile Krafteinleitungsstruktur geleitet, die nicht recht in das übrige Bild paßt. Ein Grund für diese Konstruktion mag der Wunsch gewesen sein, teure Rohrverschneidungen zu vermeiden; doch ist sie vom Gesichtspunkt der Festigkeit unorganisch.

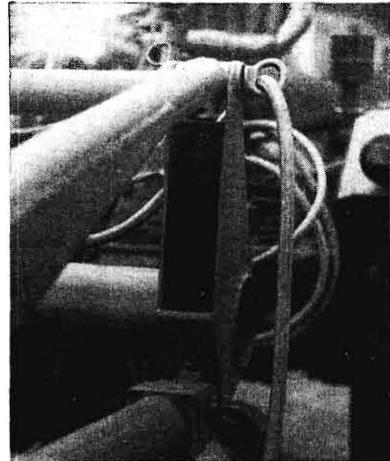


Bild 18. Eine typische Drehmomenteneinleitung.

Besonders bevorzugt wird Stahlrohr dort, wo es auf die Aufnahme und Weiterleitung von Drehmomenten ankommt. Der Grund ist in der großen Verdrehsteifigkeit zu suchen, die mit der vierten Potenz des Durchmessers, aber nur linear mit der Wandstärke wächst und daher eine besonders leichte Konstruktion ermöglicht. Ähnliches gilt für die Widerstandsmomente gegen Verdrehung.

Ein typisches Beispiel für diesen Anwendungsbereich zeigt **Bild 18**. Es handelt sich um einen Frontlader, bei dem das gesamte Moment der Schaufel samt Inhalt über den senkrecht stehenden Hebel als Drehmoment an dem dünnwandigen horizontal liegenden Rohr wirkt. Zusätzlich zu dem Drehmoment wird eine Querkraft eingeleitet, was übrigens in der überwiegenden Mehrzahl solcher Krafteinleitungen der Fall ist und die konstruktive Lösung des Problems zusätzlich erschwert. Eine Konstruktion kann durchaus geeignet sein, ein Drehmoment über einen Hebel in ein Rohr einzuleiten, aber sie kann ungeeignet sein, die zugleich auftretende Querkraft aufzunehmen. Nach **Bild 18** wird das Drehmoment gut eingeleitet. Es wird unmittelbar an der Krafteinleitungsstelle ein völlig gleichmäßiger Schubfluß im Rohr erzeugt. Das Biegemoment infolge der Querkraft ist in diesem Fall an der Krafteinleitungsstelle gleich Null. Das braucht bei ähnlichen Konstruktionen nicht immer so zu sein, und man wird dann nach Wegen suchen müssen, um der Regel 5.2 gerecht zu werden. Unabhängig davon muß das Problem der Eigenspannungen bei Ringnähten beachtet werden. Man wird ihnen am besten durch Spannungsfreiglühen begegnen.

In **Bild 19** und **20** ist das Ergebnis für eine Konstruktion dargestellt, gegen die man auf Grund des bisher Gesagten berechnete Einwände hinsichtlich der Einleitung der zugleich mit dem Drehmoment auftretenden Querkraft haben müßte. Die späteren Beispiele werden jedoch zeigen, daß es nur wenig gute Konstruktionen zur Drehmomenteneinleitung gibt, und daß man bei einer zusätzlichen Querkrafteinleitung oft zu Kompromissen gezwungen ist. So wurde durch Vergleichsuntersuchungen die Konstruktion nach **Bild 20** aus einer umfangreichen Versuchsreihe als die weitaus beste ermittelt. Es handelt sich um einen mit dem Rohr vollständig verschweißten Kasten, dessen rohrparallele

Flächen tangential in die Rohrwand einlaufen und die Drehkraft entsprechend der Regel 2 als Schubkräfte in den Rohrquerschnitt einleiten. Nachteilig ist, daß diese Nähte in der Faser maximaler Biegespannung zu liegen kommen. Die Spannungsverteilung weist jedoch recht günstige Werte auf, so daß daraus geschlossen werden kann, daß die Dehnungsbehinderungen gering sind. Das wird um so mehr der Fall sein, je kleiner die Wandstärken des

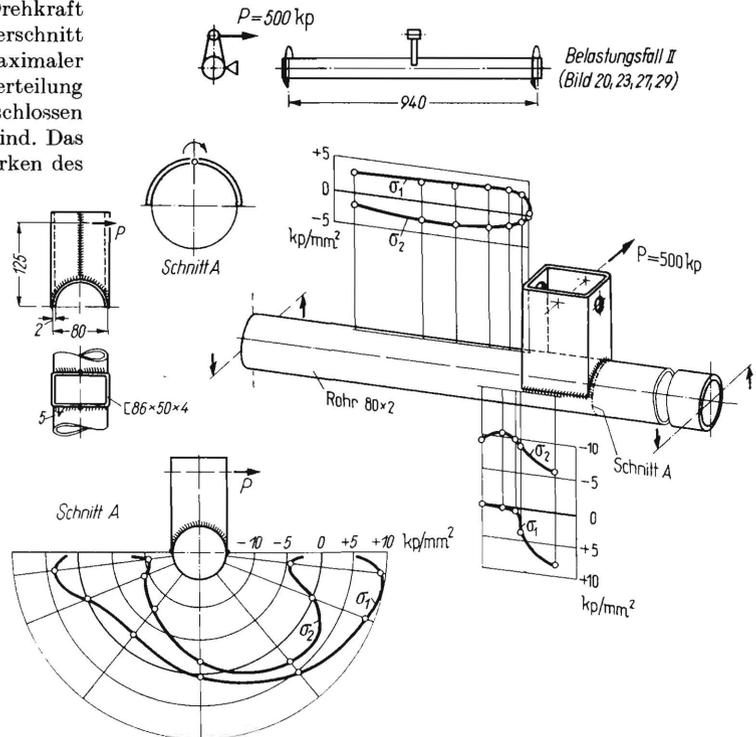
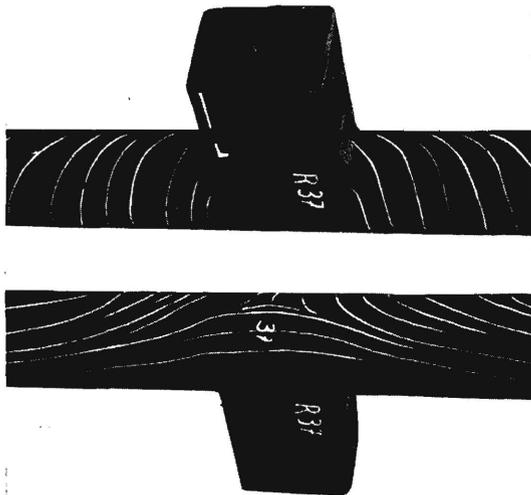


Bild 19 und 20. Eine Drehmomenteneinleitung in ein Rohr ohne Verformung des Rohrquerschnittes. Bei größeren Querkraften ist auf Dehnungsbehinderung des Rohres zu achten.

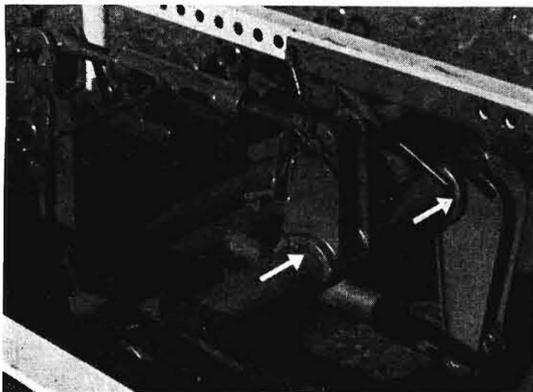


Bild 21. Ein Anwendungsbeispiel des in Bild 19 dargestellten Falles.

Kastens sind. Bezüglich der Quernähte gilt das zu Bild 12 Gesagte, wobei in diesem Falle weniger auf diese Schweißnähte verzichtet werden kann. Läßt man diese Nähte weg, so führt das zu einer Konstruktion, wie sie in **Bild 21** zu sehen ist. Der angeschweißte Hebelarm ist nur mit in Längsrichtung des Rohres liegenden Nähten angeschweißt, während auf Quernähte verzichtet wurde.

Rückt man alle Nähte der ringsherum verschweißten Form nach Bild 12 näher zusammen, so entsteht eine Konstruktion nach Regel 3 mit Krafteinleitung über Normalkräfte zwischen Hebel und Rohroberfläche, aber mit vergrößerter Anschlußfläche, **Bild 22 und 23**. Die Höhen der Spannungen werden eine Funktion der Größe der Anschlußfläche sein, sie betragen im vor-

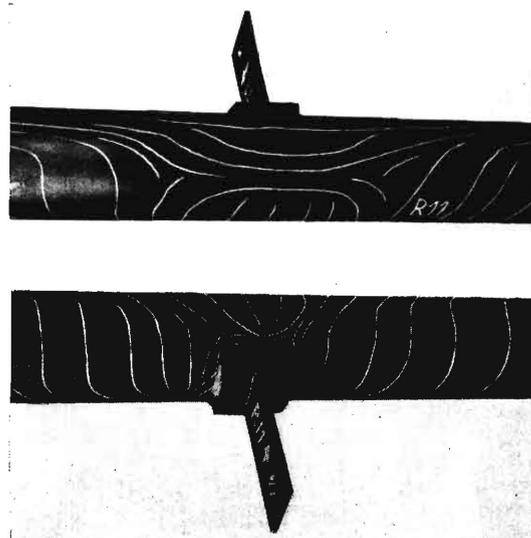
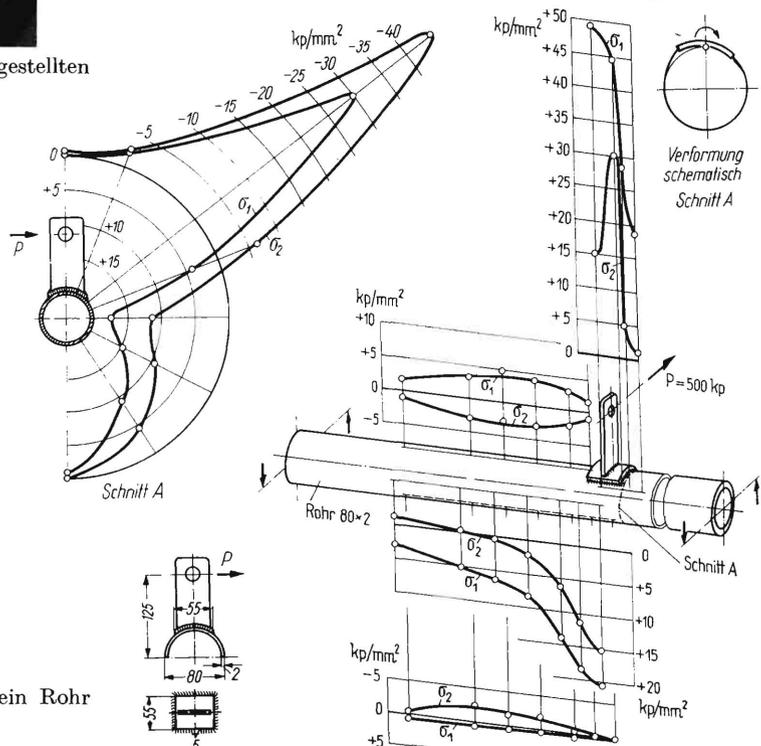


Bild 22 und 23. Einleitung eines Drehmomentes in ein Rohr über eine quadratische Anschlußfläche.



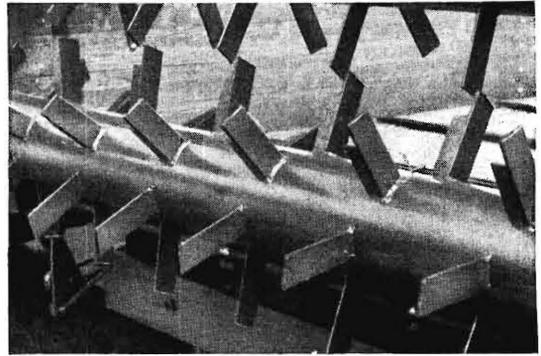
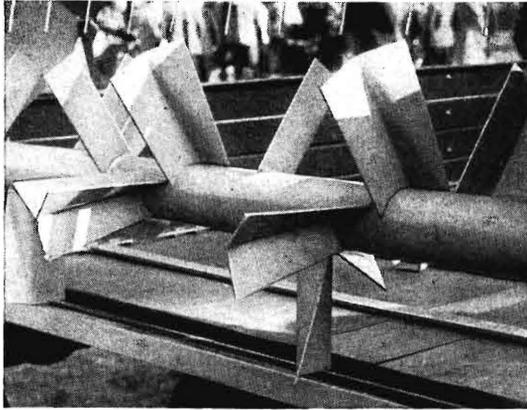
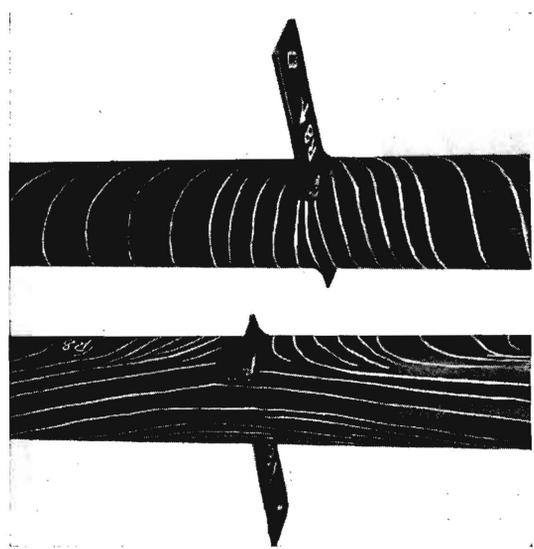
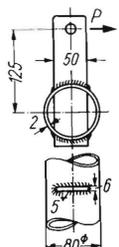
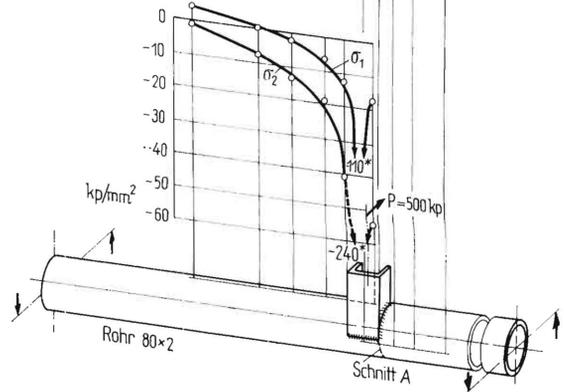
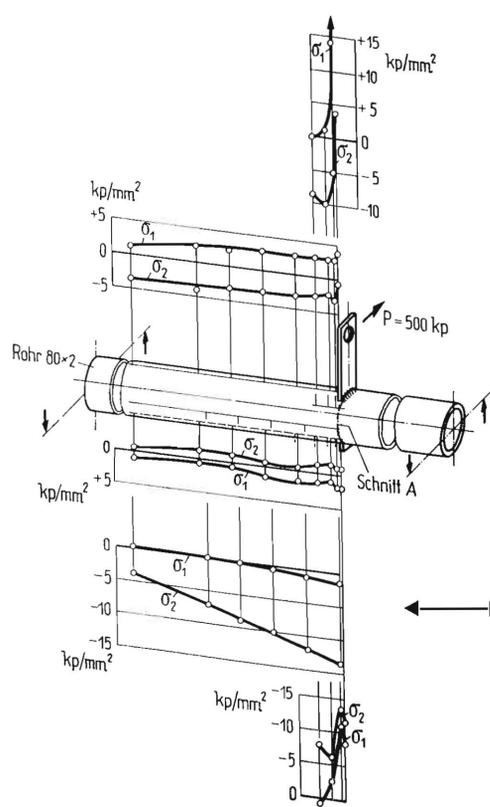
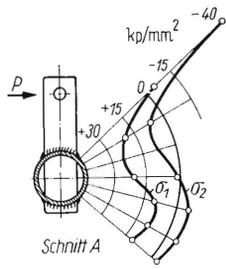
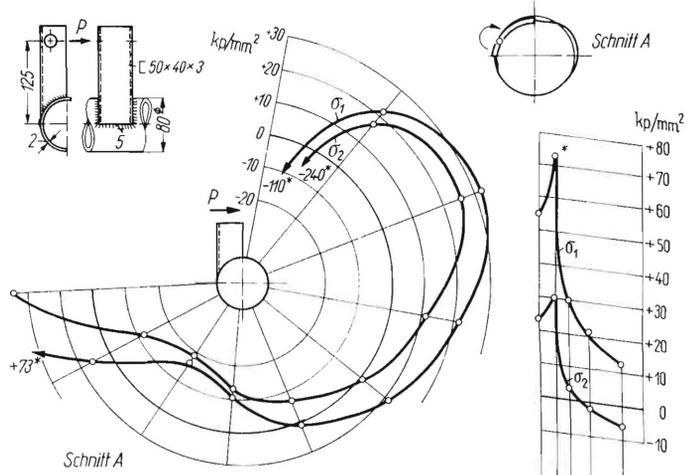
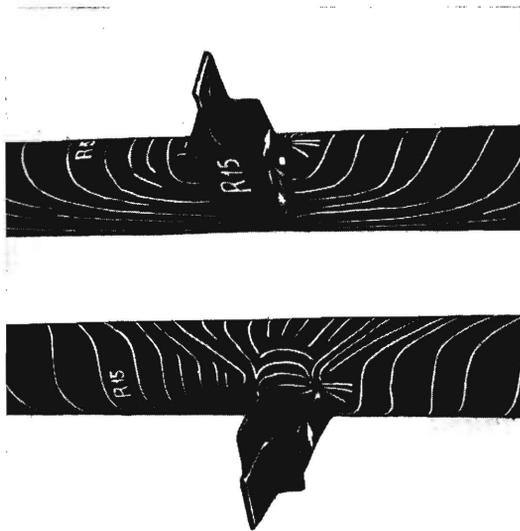


Bild 24 und 25. Anschlüsse von Zinken auf Miststreuerwalzen.



Bilder 26 bis 29. Drehmomenteneinleitungen mit hohen Spannungsspitzen im Rohr.

liegenden Falle bereits das 4,5fache der Spannungen in Bild 20. Der erwünschte Torsionsschubfluß kann sich im Rohr erst einstellen, wenn in einiger Entfernung von der Krafteinleitungsstelle die Verformung der Rohrwand abgeklungen ist. Das Ziel solcher Krafteinleitungen ist aber, gleichmäßig verteilte Torsionsschubspannungen in einem Rohr zu erzeugen, und zwar unmittelbar an der Krafteinleitungsstelle. Es ist also im Grunde widersinnig, die Krafteinleitungsstellen so zu bauen, daß in der Anschlußfläche Normalkräfte statt der eigentlich gewünschten Schubkräfte entstehen, ganz abgesehen von den Gründen, die zu der Regel 1 geführt haben. In der in Bild 23 gezeichneten Form handelt es sich noch um eine verhältnismäßig gute Konstruktion.

Diese warnenden Hinweise gelten in starkem Maße für Konstruktionen, wie sie in **Bild 24 und 25** gezeigt werden. Erschwerend kommt hinzu, daß die Anschlußflächen der Zinken aus Winkel-eisen nicht geschlossen sind, sondern die Schenkel der Winkel-profile freie Enden haben, die sich bei Belastung der Zinken in erhöhtem Maße in die Rohrwand eindrücken. Dabei treten sicher Spannungsspitzen auf, die, wie **Bild 26 und 27** zeigen, weit über die rechnerische Spannung von 12 kp/mm^2 für eine reine Querkraft ansteigen. Auch das sternförmige Zusammenlaufen der Dehnungslinien deutet auf die hohen Spannungen an den Schweiß-nahtenden hin. Es soll nicht bezweifelt werden, daß die abgebildeten praktischen Beispiele haltbare und dauerhafte Konstruktionen darstellen; das wird schließlich durch die große Verbreitung solcher Maschinen in der Landwirtschaft bewiesen. Wenn es jedoch gelingt, spannungsgerechte Konstruktionen zu entwickeln, die das gleiche leisten und sich zu einem marktgerechten Preis fertigen lassen, so wird das Gewicht der neuen Konstruktion, besonders im Hinblick auf die hohen Spannungswerte in Bild 27, nur noch ein Bruchteil des Gewichtes der jetzigen Konstruktion betragen. Es muß dem Konstrukteur vorbehalten bleiben, von Fall zu Fall zu entscheiden, ob es vorteilhafter ist, sich der im Maschinenbau, besonders im Fahrzeugbau ganz allgemein zu beobachtenden Tendenz zum Leichtbau bei spannungsgerechter Konstruktion anzuschließen oder nicht. Im Einzelfall, besonders bei kleinen Stückzahlen, können Kostengründe dagegen sprechen.

Eine Konstruktion, die verhältnismäßig geringe Spannungen ergibt, wird in **Bild 28 und 29** aufgezeigt. Das Rohr wurde geschlitzt und ein Flacheisen mit seiner Mittelebene quer zur Rohr-achse hindurchgesteckt. Das Flacheisen wurde sodann an beiden herausstehenden Enden verschweißt. Macht man das Flacheisen breiter, so ergibt sich im Grenzfall wieder die Konstruktion mit der Ringnaht, wie sie bereits besprochen wurde. Dadurch, daß die Lasche an der dem Kraftangriffspunkt gegenüberliegenden Seite der Rohrwand eine Abstützung erhält, wird die Anschlußfläche nahezu normalspannungsfrei, und die Verformungen der Rohrwand werden auf ein Mindestmaß reduziert. Damit verringern sich die Spannungsspitzen erheblich. Das wird bei einer Verringerung der Laschenbreite noch mehr der Fall sein, solange nur die Lasche selber in der Lage ist, die Kräfte zu übertragen, und die doppelte Abstützung erhalten bleibt. Bei diesem Beispiel sind die maximalen Spannungen 4mal so hoch wie bei der günstigsten Konstruktion.

Bild 30 zeigt nochmals die Einleitung einer Drehkraft. Die Güte der Konstruktion ist nach der Regel 2 zu beurteilen. Aus Versuchen geht einwandfrei hervor, daß über solche Laschen keine größeren Kräfte eingeleitet werden können, sofern man nicht zu

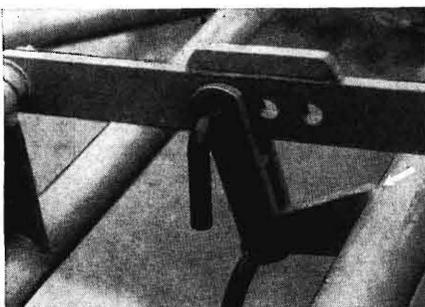


Bild 30. Drehmomenteneinleitung an einem Pflug.

einer Form entsprechend Bild 29 übergeht. Im vorliegenden Fall ist jedoch zu bedenken, daß die Größe der wirksamen Kräfte nach dem Bild nicht beurteilt werden kann.

Ordnet man, wie in **Bild 31 und 32**, mehrere Pflugkörper hintereinander an einem Rohrträger an, so muß dieser neben Kraftkomponenten, die verdrehend am Rohrträger wirken, auch erhebliche Längskräfte und Biegemomente aufnehmen. Der Konstrukteur des Pfluges in Bild 31 mißt den Vertikal- und Verdrehbeanspruchungen die größte Bedeutung zu. Die Befestigungsteile sind so dimensioniert und angeordnet, daß sie keine größere Längskraft in das Rohr einleiten können. Der Konstrukteur des Pfluges nach Bild 32 bevorzugt stärker die Einleitung der Längskräfte in das Rohr.

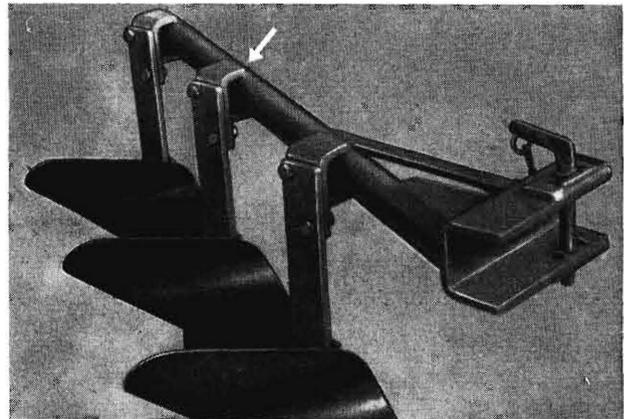
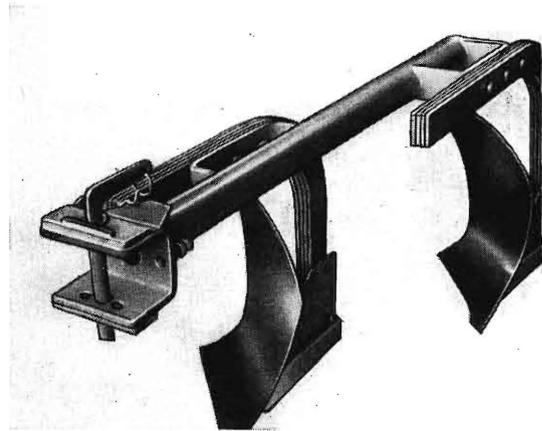


Bild 31 und 32. Verschieden angeschlossene Pflugkörper.

Wie zweckmäßigerweise solche Längskräfte in Rohre eingeleitet werden, wird an vier Beispielen gezeigt. Dabei handelt es sich um Längskräfte, die zusätzlich noch an einem Hebelarm wirken. Über die Einleitung von Kräften, deren Wirkungslinie mit der Rohrachse zusammenfallen, soll später berichtet werden. Einige dieser Konstruktionen in den **Bildern 33 bis 40** wurden bereits für andere Lastfälle besprochen. Bild 34 zeigt die günstigste Lösung; die Regel 2 ist vollständig befolgt. Die Längskraft selber sowie das zusätzliche Biegemoment werden nur über Schubkräfte, deren Wirkungsrichtung tangential in der Anschlußfläche an die Rohrwand liegt, in das Rohr eingeleitet. Die Lösung in Bild 36 greift das Prinzip der Abstützung der Lasche auf der dem Kraftangriff abgewandten Seite der Rohrwand auf. Beide Lösungen haben eine günstige Spannungsverteilung; der maximale Wert beträgt 25 kp/mm^2 im ersten und 18 kp/mm^2 im zweiten Falle. Die quadratische vergrößerte Anschlußfläche liefert für diesen Belastungsfall völlig unbefriedigende Ergebnisse. Diese Fläche versucht unter dem Einfluß der Kraft eine Schräglage einzunehmen und deformiert den Rohrquerschnitt dabei so stark, daß die Vergleichswerte der Spannungen auf $33,2 \text{ kp/mm}^2$ ansteigen, Bild 38. Das gleiche gilt sinngemäß für das angeschweißte T-Profil, Bild 40. Das ist auch an den dazugehörigen Dehnungslinien zu beobachten, die sich an den Ecken und Enden der

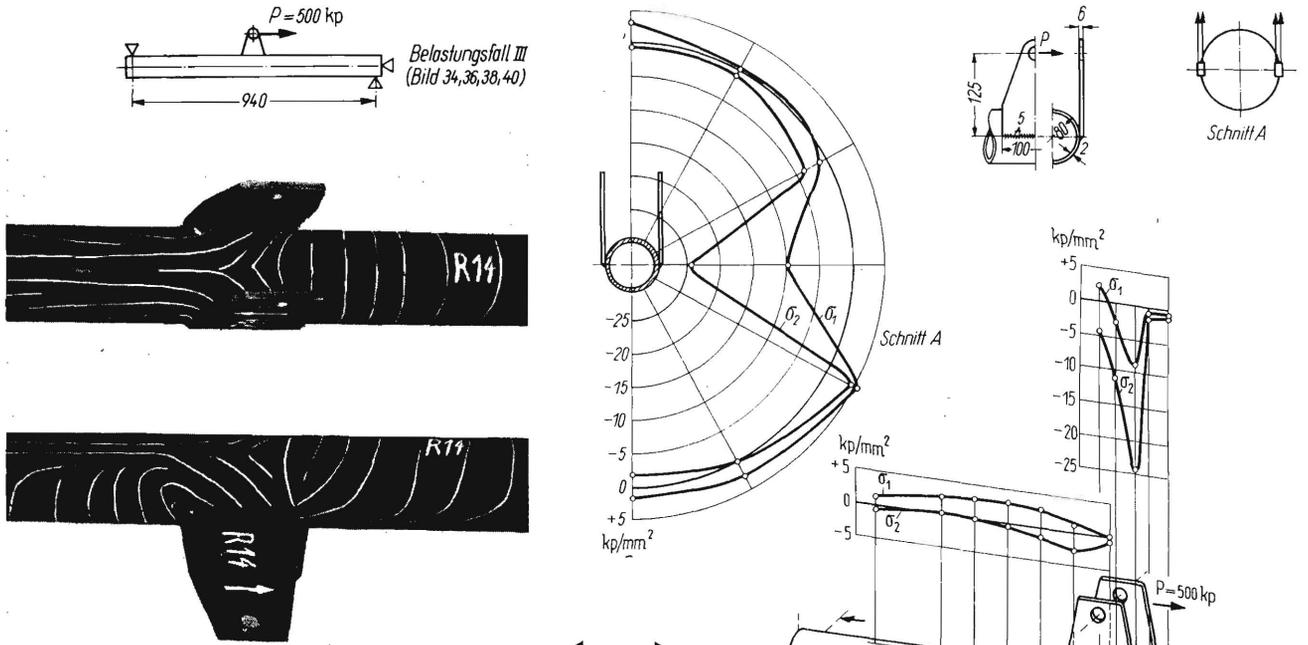


Bild 33 und 34. Eine günstige Konstruktion zur Einleitung einer Längskraft.

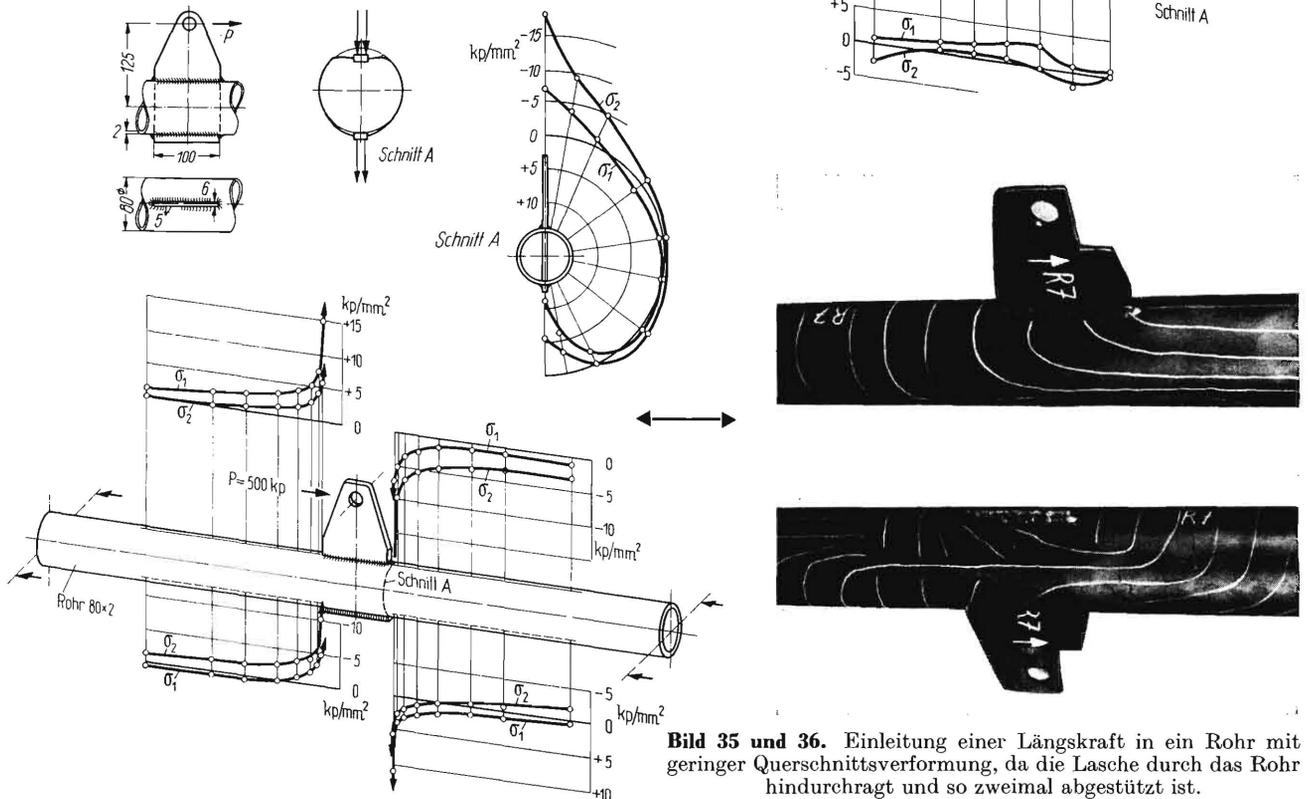


Bild 35 und 36. Einleitung einer Längskraft in ein Rohr mit geringer Querschnittsverformung, da die Lasche durch das Rohr hindurchragt und so zweimal abgestützt ist.

Schweißnähte je nach Verformungsrichtung ringförmig oder sternförmig schließen. Hier liegt eine Parallele vor zu Bild 27. Das dort Gesagte gilt sinngemäß auch für die Drehmomenteneinleitung hier. Es ist durchweg schwierig, brauchbare Krafteinleitungsstellen unter Verwendung von Normalprofilen zu entwickeln.

Bild 41 und 42 fassen die Ergebnisse einer Versuchsreihe mit einer einfachen Lasche, die in Längsrichtung des Rohres aufgeschweißt ist, für zwei Lastfälle, nämlich für eine reine Querkraft und für eine Längskraft mit zusätzlichem Biegemoment, zusammen. Die Krafteinleitungsstellen wurden mit unterschied-

licher Länge l der Anschlußfläche untersucht. Über der Länge l sind in Bild 41 die maximalen Spannungen bei reiner Querkraft, in Bild 42 bei Längskraft mit zusätzlichem Biegemoment aufgetragen. Bei der Querkraft (Bild 41) fällt auf, daß die Maximalspannungen in einem breiten Bereich nur wenig von der Länge der Anschlußfläche abhängig sind. Es bildet sich dabei ein schwach ausgeprägtes Minimum, das sich bei kleineren Wanddicken zu größeren Laschenlängen hin zu verlagern scheint (gestrichelte Linie). Die Spannungen sind nahezu proportional der Rohrwandstärke. Die entsprechenden Kurven für die Längskraft steigen zu kleineren Laschenlängen hin sehr stark an.

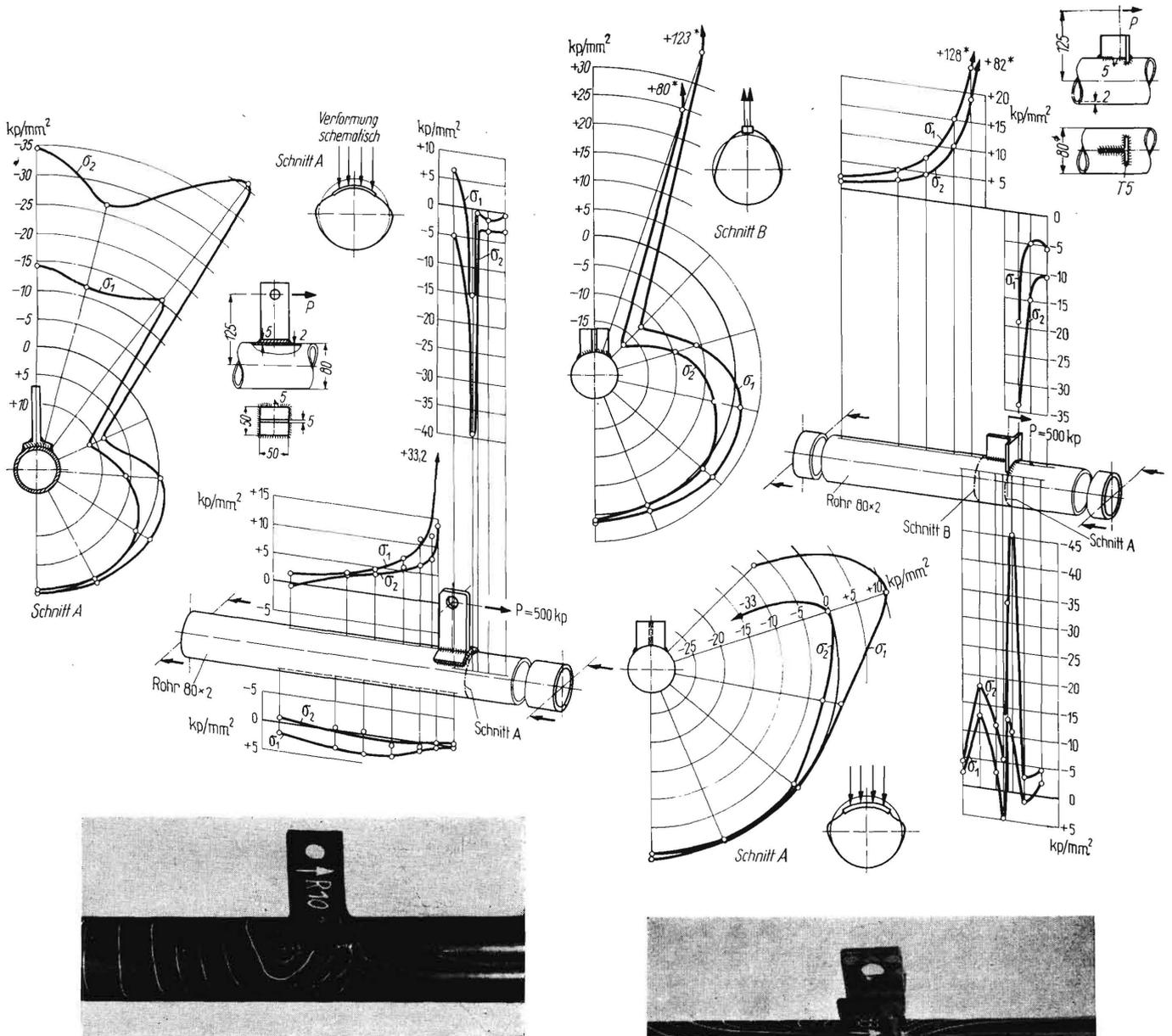


Bild 37 und 38. Einleitung einer Längskraft in ein Rohr über eine quadratische Anschlußfläche.

Bild 39 und 40. Längskrafteinleitung mit starker örtlicher Verformung der Rohrwand.

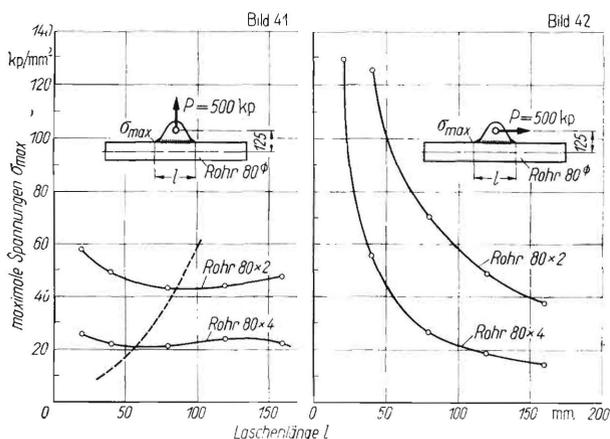


Bild 41 und 42. Quer- und Längskrafteinleitungen über eine Lasche gemäß Bild 11. Abhängigkeit der Maximalspannungen von den Abmessungen.

Zusammenfassung

Es wurden in systematischen Versuchen Konstruktionsrichtlinien für die Einleitung von Kräften in dünnwandige, kreisrunde Stahlrohre ermittelt und an Beispielen aus der Praxis des Landmaschinenbaues erörtert. Es wurde gezeigt, daß hohe Spannungen in den Anschlußstellen immer dann auftreten, wenn die einzuleitenden Kräfte punktförmig bzw. über sehr kleine Querschnitte eingeleitet werden, oder die Kräfte zwischen der Rohrwand und dem Bauelement senkrecht und nicht tangential auf die Wand bzw. in Richtung der Rohrwand wirken, oder die Biegedehnungen in der Rohrwand durch die angeschweißten Bauelemente für die Krafteinleitung behindert werden.

Auf Grund dieser Regeln läßt sich die Güte der ermittelten Bestlösungen für die Krafteinleitung erklären.