

Die Konstruktion von Maschinen und Fahrzeugen, die auf unebenen Fahrbahnen fahren

Von D. Spangenberg, Braunschweig-Völkenrode

Die Forderungen, die an eine vollkommene Maschine gestellt werden, sind sehr zahlreich. Im Vordergrund steht die Erfüllung der Funktionen; dann aber die Festigkeit und Haltbarkeit, und zwar bei kleinstem Aufwand an Gewicht und Kosten; später kommen bequeme Bedienung, Formschönheit und manches mehr. Hier sollen die Fragen der Festigkeit behandelt werden. Es ist die Kunst des Konstrukteurs, den Werkstoff nach Art und Menge so auszuwählen und anzuordnen, daß er gleichmäßig und gut ausgenutzt wird. Die Unsicherheit und teilweise auch die Umständlichkeit der Berechnungsmethoden zwingen ihn aber zu einem Mehraufwand an Material, der gekennzeichnet ist durch den sogenannten Sicherheitsfaktor.

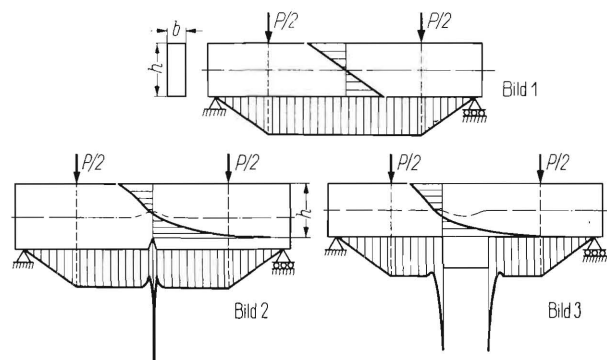
Die Größe des Sicherheitsfaktors wurde früher durch Erfahrungswerte auf Grund von Brüchen und Schäden an Maschinen festgelegt, wobei die eigentlichen Ursachen der meist vorkommenden Dauerbrüche, nämlich die Spannungsspitzen in Kerben und Querschnittsvergrößerungen, meistens nicht berücksichtigt wurden. Wenn man von der Tatsache ausgeht, daß in den Ecken plötzlicher Querschnittsänderungen Spannungsspitzen auftreten können, die den 3- bis 4fachen Wert der nach den elementaren Formeln der Festigkeitslehre berechneten Nennspannungen haben, und die für die Haltbarkeit des Bauteils bei dynamischer Beanspruchung maßgebend sind, so ist leicht zu erklären, daß die zulässige Nennfestigkeit nur ein Bruchteil der Materialfestigkeit sein darf. Will man also die Sicherheitsfaktoren und damit den Materialaufwand klein halten, so muß man in erster Linie versuchen, Spannungsspitzen zu vermeiden. Unter diesem Gesichtspunkt soll nunmehr die Konstruktion von Maschinen und Fahrzeugen, die außerhalb ebener Fahrbahnen fahren, betrachtet werden.

Über den Zusammenhang zwischen dem Verwendungszweck eines Fahrzeuges und den sich daraus ergebenden konstruktiven Folgerungen wurde früher [1] bereits ausführlich berichtet. Es wurde gezeigt, daß bei reinen Straßenfahrzeugen, also bei schnellen Fahrten auf ebener Fahrbahn in erster Linie die Biegebeanspruchungen, bei langsamen Fahrten im Gelände oder auf schlechter Straße dagegen außer den Biegebeanspruchungen zusätzlich noch große Verdrehbeanspruchungen auftreten. Es wurde ferner auf die daraus sich ergebende Konstruktionsart eines Fahrzeuges hingewiesen. Für sämtliche geländegängigen Fahrzeuge sollen möglichst Konstruktionen aus verdrehweichen, offenen Profilen verwendet werden. Obwohl zahlreiche Forschungsergebnisse über die zweckmäßige Gestaltung von Fahrzeugrahmen vorliegen [2 bis 10], bestehen erfahrungsgemäß für den Konstrukteur die Hauptschwierigkeiten darin, alle Knotenpunkte und Eckverbindungen so auszubilden, daß sie neben der notwendigen Biegefestigkeit auch genügend verdrehweich sind und obendrein keine extremen Spannungsspitzen aufweisen.

Diese Spannungsspitzen sind bei geschweißten Konstruktionen besonders gefährlich, da einmal durch die Schweißung Materialversprödungen und zusätzlich Eigenspannungen auftreten, zum anderen aber durch die Einbrandkerben weitere meist mehrachsige Spannungserhöhungen überlagert werden können. Bei Dauerbeanspruchung beginnt an diesen Stellen der erste Anriß, der häufig sehr schnell weiterläuft und zum Bruch führen kann. Vielfach werden heute wieder genietete Konstruktionen bevorzugt, wobei allerdings übersehen wird, daß die geschweißte Konstruktion bei spannungsgerechter Ausbildung der Knotenpunkte mindestens gleiche Haltbarkeit bei bedeutend geringerem Arbeitsaufwand aufweist. Diese spannungsgerechte Ausbildung von geschweißten Knotenpunkten soll unter besonderer Berücksichtigung der Verwindungsbeanspruchung eingehend behandelt werden.

1. Vermeidung von Spannungsspitzen an Biegeträgern

Bekanntlich verlaufen die Spannungen über dem Querschnitt eines ungestörten zur Biegeachse symmetrischen Biegeträgers linear und sind an der Druck- und Zugseite gleich groß, wie in **Bild 1** dargestellt ist. Bringt man in dem Träger eine Kerbe an, so ergeben sich im Kerbgrund Spannungsspitzen, die je nach der Schärfe der Kerbe ein Vielfaches der Nennspannungen betragen können, **Bild 2**. Diese Tatsache ist dem Konstrukteur unter dem Begriff der Kerbwirkung bekannt, und er wird rein gefühlsmäßig sofort eine geringere zulässige Belastung ansetzen. Er wird dagegen für ein Profil, das durch eine aufgeschweißte Lasche verstärkt ist, gefühlsmäßig zunächst die volle Nennlast zulassen, da ja das Profil noch „verstärkt“ wurde. Hierbei wird meistens



Bilder 1 bis 3. Schematische Darstellung des Formeinflusses bei Biegeträgern. Nicht nur Kerben, sondern auch Vorsprünge haben Spannungsspitzen zur Folge.

nicht berücksichtigt, daß eine plötzliche Querschnittsvergrößerung in der Ecke des Vorsprunges ebenfalls hohe Spannungsspitzen zur Folge hat, die um so größer sind, je schärfer der Querschnittsübergang ist, **Bild 3**. Die Gefährlichkeit von sprungartigen Querschnittserweiterungen liegt also in erster Linie darin, daß die durch sie entstehenden Spannungsspitzen vom Konstrukteur nicht erkannt und berücksichtigt werden.

Dr.-Ing. Dietrich Spangenberg VDI war wissenschaftlicher Mitarbeiter der „Forschungsgruppe Kloth“ im Institut für landtechnische Grundlagenforschung (Direktor: Prof. Dr.-Ing. W. Batel) der Forschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode.

Befindet sich z. B. in der hochbeanspruchten Faser eines Biegeträgers eine Schweißraupe, so kann dieser geringe Vorsprung in Verbindung mit der seitlichen Einbrandkerbe zu hohen Spannungsspitzen und damit zum Bruch bei Dauerbeanspruchung führen. Wilder [11] hat nachgewiesen, daß ein Bruch fast immer in der Ecke der Schweißnaht beginnt, **Bild 4**. Er stellt daher die Forderung, Schweißnähte stets abzuschleifen. Dies läßt sich aber aus rein wirtschaftlichen Gründen nur in den wenigsten Fällen verwirklichen. Meistens genügt es aber, wenn nur die Übergänge der Vorsprünge etwas nachgearbeitet werden, da die Spannungsspitzen in erster Linie vom Übergangsradius abhängen.

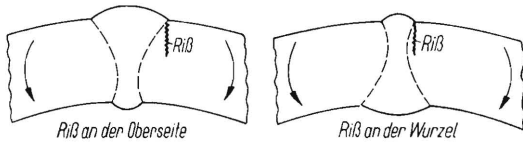


Bild 4. Typische Brüche an Schweißnähten bei Biegung eines stumpfgeschweißten Stabes [11]. Der Bruch beginnt im Übergang zur Schweißnaht. Wenn möglich, sollten die Raupen abgeschliffen werden.

Die Abhängigkeit der Spannungserhöhung von der Größe des Ausrundungsradius ist in **Bild 5** dargestellt. Es wurden für einen T-Knoten die Spannungsverteilungen längs der Unterkante und damit die Formzahlen bei verschiedenen Ausrundungsradien bestimmt. Die Untersuchungen wurden an einem spannungsoptischen Modell durchgeführt, wobei mit Hilfe der spannungsoptischen Konstanten S die Ordnungszahlen der Isochromaten

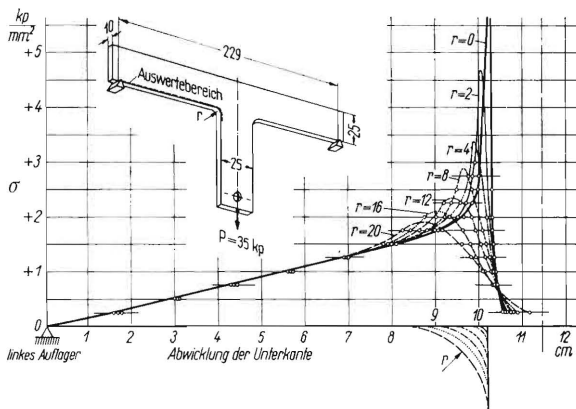


Bild 5. Einfluß des Ausrundungsradius auf die Spannungsspitze bei biegebeanspruchten T-Knoten. Je kleiner der Radius, um so größer ist die Spannungsspitze.

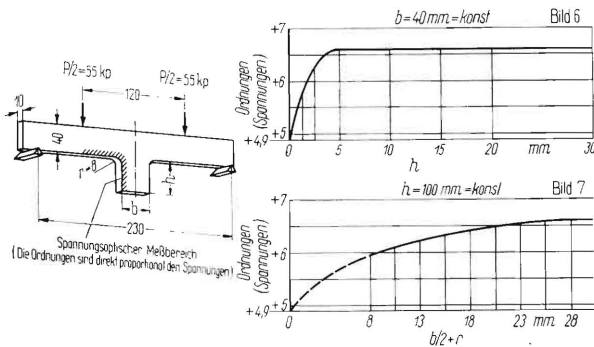


Bild 6 und 7. Einfluß der Vorsprunghöhe und Vorsprungbreite auf die Spannungsspitze. Die Formzahl α_K steigt mit der Höhe des Vorsprunges sehr schnell und erreicht nach wenigen Millimetern bereits ihren Höchstwert (**Bild 6**). Sie steigt dagegen mit zunehmender Breite langsam an (**Bild 7**).

(Farbgleiche = Linien gleicher Hauptspannungsdifferenz) in Spannungswerte umgerechnet wurden. Die Auswertung erfolgte nach der Beziehung

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{S}{d} \cdot z.$$

Hierbei ist am unteren freien Rande $\sigma_2 = 0$, Modelldicke $d = 10$ mm, $z =$ Isochromatenordnung, $S =$ spannungsoptische Konstante in $\frac{\text{kp/cm}^2}{\text{Ordnung}} \cdot \text{cm}$, die in einem Eichversuch bestimmt

wird. Aus den Spannungsverteilungskurven kann man für jeden Ausrundungsradius die Formzahl entnehmen, indem man die Spannungsspitze und die aus der geradlinigen Spannungsverteilung sich ergebende Nennspannung unterhalb der Spannungsspitze abgreift. Es ist dann die Formzahl

$$\alpha_K = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{Nenn}}}.$$

Man sieht aus **Bild 5**, daß die Formzahl mit abnehmendem Radius sehr stark zunimmt und bei rechtwinkligem Übergang mindestens den 3fachen Wert der Nennspannung erreicht, wobei noch zu berücksichtigen ist, daß bei scharfwinkligen Übergängen die Isochromaten so dicht liegen, daß sie verschwimmen und nicht mehr einwandfrei zu zählen sind. Es ist daher leicht möglich, daß die tatsächliche Maximalspannung für einen rechtwinkligen Übergang noch höher liegt [12].

Bei der Belastung eines T-Knotens mit einem gleichförmigen Biegemoment wird der Vorsprung nur in unmittelbarer Nähe des Biegeträgers beansprucht. Es wurde daher für einen T-Knoten mit konstantem Ausrundungsradius die Maximalspannung in Abhängigkeit von der Höhe h des Vorsprunges bestimmt und in **Bild 6** aufgetragen. Als Bezugsgröße wurde die konstante Nennspannung (4,9 Ordnungen) gewählt. Aus der Kurve kann man entnehmen, daß die Formzahl α_K mit zunehmender Höhe des Vorsprunges sehr schnell ansteigt, aber bereits nach wenigen mm Vorsprunghöhe einen konstanten Wert erreicht. Eine weitere Vergrößerung der Vorsprunghöhe bleibt also ohne Einfluß auf die Formzahl [13].

Ebenfalls in **Bild 7** wurde der Einfluß der Vorsprungbreite bei konstanter Vorsprunghöhe h dargestellt. Die Abmessungen des Biegeträgers und der Ausrundungsradius bleiben konstant. Auch hier wurde als Bezugsgröße die konstante Nennspannung (4,9 Ordnungen) gewählt. Es wurde die Maximalspannung über der Breite $\frac{b}{2} + r$ aufgetragen. Ist $\frac{b}{2} + r = 0$, so liegt ein glatter Biegestab vor. Beim Wert $\frac{b}{2} + r = 8$ befinden sich am Biegestab lediglich die beiden in einer Spitze auslaufenden Bogenstücke.

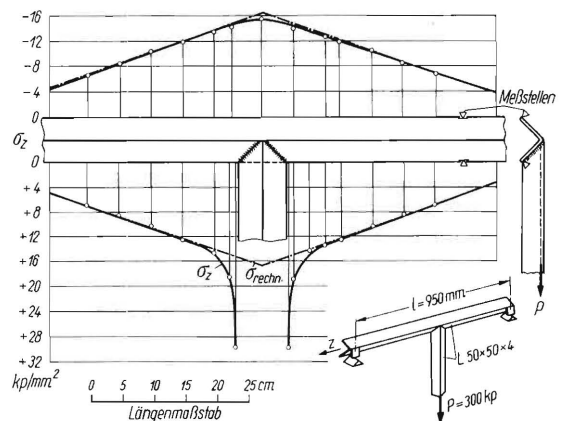


Bild 8. Spannungsverteilungen längs der Profilkanten eines geschweißten T-Knotens aus Winkelprofilen bei Biegung. Die gemessenen Spannungen an der Oberkante entsprechen den errechneten Werten. An der Unterkante wirken ausgeprägte Spannungsspitzen in den Ecken.

Aus dem Verlauf der Kurve kann man ersehen, daß mit zunehmender Breite des Vorsprungs die Formzahl langsam ansteigt, dann aber einem Grenzwert zustrebt. Man soll also einen nicht zu umgehenden Vorsprung an einem Biegeträger so schmal wie möglich machen.

Wie man aus den Bildern erkennen konnte, hängt die Formzahl, d. h. das Verhältnis der Maximalspannung zur Nennspannung, in erster Linie von dem Übergangsradius der Querschnittsänderung ab. Sie ist dagegen unabhängig von der Größe der Beanspruchung des Bauteils. Sind also die Nennspannungen hoch, so sind ebenfalls sehr hohe Spannungsspitzen zu erwarten. Da die Spannungsspitzen aber maßgebend für die Haltbarkeit des Bauteils sind, muß man entweder die Nennspannungen gering machen, indem man das Bauteil sehr stark überdimensioniert, oder aber man muß versuchen, die Anschlüsse dorthin zu legen, wo von vornherein niedrige Nennspannungen vorhanden sind. Beim Biegeträger bietet sich hierfür die neutrale Biegezone an, da hier die Spannungen etwa Null sind. Damit sind die Biegespannungsspitzen an diesen Stellen auch niedrig, obwohl die Formzahlen groß sein können. Dies wird deutlich an den in **Bild 8 und 9** gezeigten geschweißten Anschlüssen von einem Winkelprofil an einen Biegeträger aus Winkelprofil. Die Profilabmessungen und die Belastungen sind in beiden Fällen gleich,

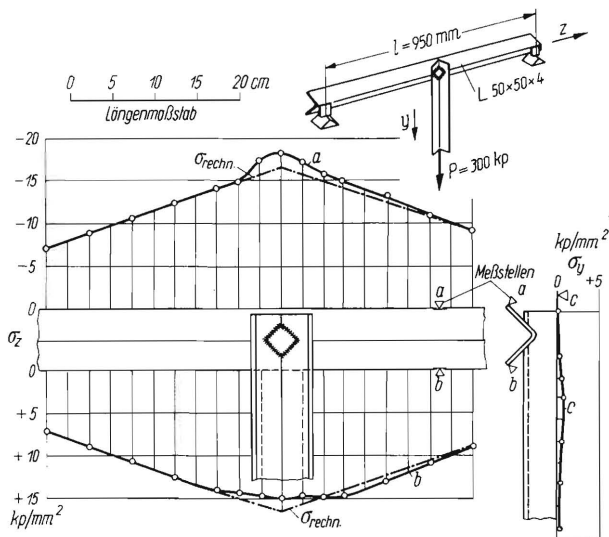


Bild 9. Spannungsverteilung längs der Profilkanten eines geschweißten T-Knotens aus Winkelprofilen bei Biegung. Schweißung in der Nähe der neutralen Zone. An Ober- und Unterkante gleichmäßiger Spannungsverlauf. Bei Verdrehbeanspruchung günstig, da kaum Verformungsbehinderung.

lediglich die Anschlußform wurde geändert. Bei dem in Bild 8 gezeigten Knotenpunkt reicht die Schweißnaht bis in die hochbeanspruchte Zone des Biegeträgers. Aus den Spannungsverteilungskurven erkennt man, daß in den ungestörten Bereichen die gemessenen Spannungen mit den rechnerischen Spannungen übereinstimmen. In den Ecken dagegen sind sehr ausgeprägte Spannungsspitzen vorhanden, die etwa das Doppelte der Nennspannungen betragen. Demgegenüber wurde bei dem Knotenpunkt in Bild 9 der geschweißte Anschluß in die Nähe der neutralen Biegezone verlegt. Man sieht, daß die ausgeprägten und gefährlichen Spannungsspitzen an den Kanten des Biegeträgers nicht mehr vorhanden sind. Tastmessungen ergaben in den Ecken der Schweißnähte zwar auch noch Spannungserhöhungen im Vergleich zu den Nennspannungen an denselben Stellen des ungestörten Biegeträgers, jedoch waren die absoluten Höchstspannungen an diesen Stellen niedriger als die maximalen Nennspannungen an der hochbeanspruchten äußeren Biegefasen.

Da die Spannungsspitzen bei dynamischer Beanspruchung maßgebend für die Haltbarkeit eines Bauteils sind, muß die Lebensdauer des in Bild 9 gezeigten Knotenpunktes größer sein als des in Bild 8 dargestellten Beispiels. Dies geht aus der Zu-

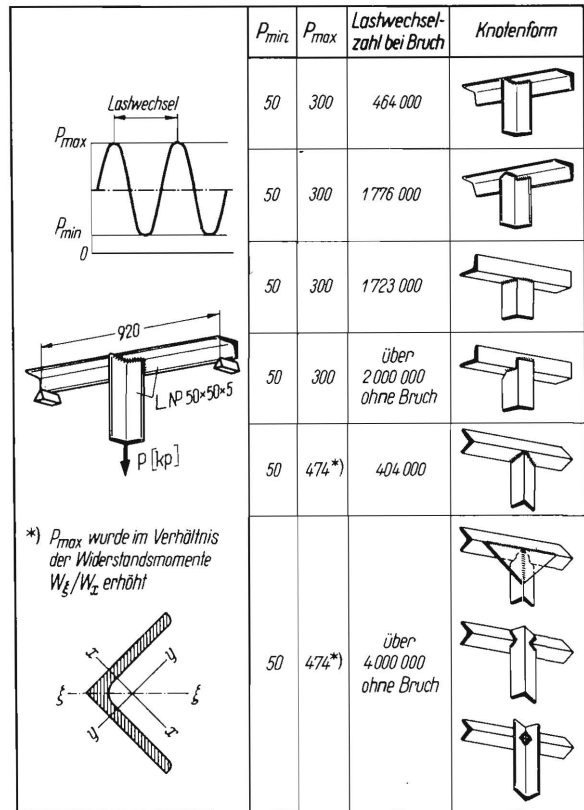


Bild 10. Lebensdauer von geschweißten T-Knoten aus Winkelprofilen bei Biege-Schwellbeanspruchung in Abhängigkeit von der Anschlußform.

sammenstellung in **Bild 10** auch eindeutig hervor. Für die verschiedenartigsten geschweißten Anschlüsse aus Winkelprofilen wurden die ertragenden Lastwechselzahlen bei schwellender Beanspruchung zusammengestellt. Vergleicht man die ersten beiden angeführten Beispiele, so erkennt man, daß der in der Nähe der neutralen Zone geschweißte Knoten 2 viermal so viel Lastwechsel ertragen hat wie der ringsum geschweißte Knoten 1. Bei den Beispielen 3 und 4 ist der Unterschied nicht so groß, obwohl auch hier der Anschluß 4 eine größere Zahl von Lastwechseln ertragen hat als der Anschluß 3. Sehr deutlich dagegen ist der Unterschied bei den beiden in Bild 8 und 9 bereits gezeigten Knoten 5 und 6. Hier war die Lebensdauer des in der Nähe der neutralen Zone geschweißten Anschlusses mindestens zehnmal größer. Der Versuch wurde für die günstigen Knoten bei 4 Millionen Lastwechseln abgebrochen, ohne daß ein Bruch aufgetreten wäre. Aus der Zusammenstellung in Bild 10 kann man ferner noch entnehmen, daß man Winkelprofile als Biegeträger möglichst um die ξ -Achse biegen sollte, da das Widerstandsmoment um die ξ -Achse gegenüber dem Widerstandsmoment um die x - oder y -Achse etwa 1,6mal so groß ist.

2. Vermeidung von Spannungsspitzen bei Biege-, Zug- und Torsionsbeanspruchung

Wie in den vorhergehenden Ausführungen dargelegt wurde, kann man bei Biegebeanspruchung die Spannungsspitzen an Querschnittsänderungen in erster Linie durch große Ausrundungsradien und sanfte Übergänge vermeiden. Außerdem besteht aber die Möglichkeit, die Anschlüsse bzw. Querschnittsvergrößerungen in die Nähe der neutralen Biegezone, d. h. in Gebiete geringer Nennspannung, zu legen, **Bild 11**. Bei reiner Zug- oder Druckbeanspruchung sind dagegen die Nennspannungen über dem ganzen Querschnitt gleich groß. Die einzige Möglichkeit, bei zug- oder druckbeanspruchten Bauteilen mit Querschnittsänderungen Spannungsspitzen zu vermeiden, besteht also darin, die Übergänge zu den verschiedenen Querschnitten möglichst sanft zu gestalten. Hierbei haben sich besonders gut hyperbolische

Ausrundungen bewährt. Auch elliptische Übergänge (Doppelkreisbogen) ergeben niedrige Spannungserhöhungen. Es muß der größte Ausrundungshalbmesser stets im Bereich der größten Nennspannung liegen.

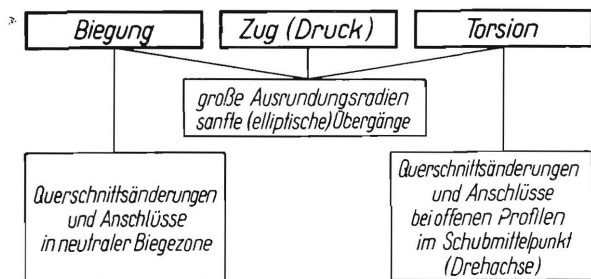
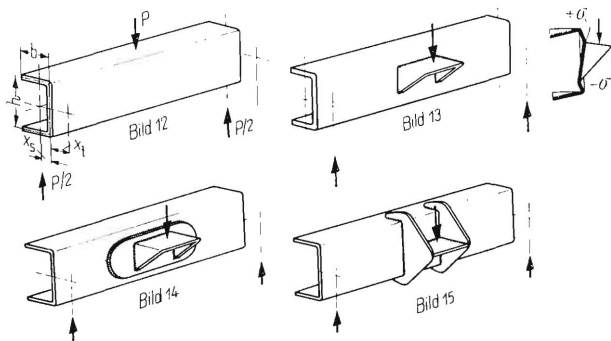
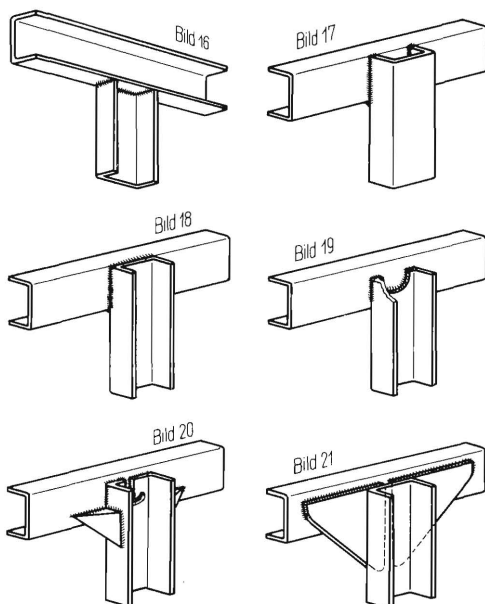


Bild 11. Übersicht über die Möglichkeiten der Vermeidung von Spannungsspitzen infolge Querschnittsänderungen bei den verschiedenen Beanspruchungsarten. In jedem Fall sind sanfte Übergänge von Vorteil. Sonst Anschlüsse in Gebiete geringer Nennspannung legen.



Bilder 12 bis 15. Kräfteinleitungen in U-Profilen müssen im Schubmittelpunkt erfolgen. Bei dünnwandigen Profilen besteht Gefahr örtlicher Beulungen, die örtliche Spannungserhöhungen zur Folge haben.

x_t Abstand des Schubmittelpunktes
 x_s Abstand des Schwerpunktes



Bilder 16 bis 21. Anschlüsse von Vertikalstreben aus U-Profilen in verwindungsweichen Fahrzeugrahmen. Es sollen nur die Stege der U-Profile verbunden werden, damit die Querschnittsverwölbung nicht behindert wird.

Ähnlich verhält es sich bei torsiionsbeanspruchten Bauteilen. Auch hier ist man in erster Linie darauf angewiesen, zur Vermeidung von Spannungsspitzen bei Querschnittsänderungen möglichst große Ausrundungen und sanfte Übergänge zu schaffen. Nur bei den verwindungsweichen offenen Profilen kann man Spannungsspitzen an Querschnittsänderungen einigermaßen dadurch vermeiden, daß man die Anschlüsse in die Nähe des Schubmittelpunktes oder der Drehachse des Profilquerschnittes anbringt. Die Querschnittsverwölbung offener Profile nimmt bei der Torsiionsbeanspruchung von dem Schubmittelpunkt aus zu den äußeren Kanten hin zu. Jede Behinderung dieser Querschnittsverwölbung ist gleichbedeutend mit örtlichen Verformungsbehinderungen und damit Spannungsspitzen. Je stärker die Verformungsbehinderung ist, um so größer sind die Steifigkeitssprünge und um so größer sind auch die maximalen Spannungen. Hierbei sind die Übergänge vom geschlossenen zum offenen Profil am gefährlichsten, da Steifigkeitssprünge an der Übergangsstelle von 1:200 oder mehr keine Seltenheit sind. Dies wird an Hand von Beispielen später sehr anschaulich gezeigt werden.

Bei den meisten im Fahrzeugbau verwendeten Profilen fällt, soweit es sich nicht um symmetrische Profile handelt, die Schubmittelpunktsachse nicht mit der Schwerlinie zusammen. Würde man die Last im Schwerpunkt eines solchen Profiles einleiten, wie es z. B. in **Bild 12** der Fall ist, so erfährt der Stab neben der Biegebeanspruchung eine zusätzliche Torsion aus dem Drehmoment $P \cdot (x_s + x_t)$. Hierdurch wird der Träger also unnötig beansprucht. Diese unnötigen Torsiionsbeanspruchungen werden vermieden, indem man die Kraft im Schubmittelpunkt — wie es in **Bild 13** gezeigt wird — einleitet [14; 15]. Der Abstand x_t des Schubmittelpunktes von der Stegmittellinie läßt sich beim U-Profil mit genügender Genauigkeit nach der Beziehung

$$x_t = \frac{b}{2 + \frac{h}{3b}}$$

bestimmen. Die Kräfteinleitung erfolgt beim U-Profil meist durch Konsolen, die am Steg angebracht sind. Mit Rücksicht auf die Biegebeanspruchung sollten die Anschlüsse möglichst nicht bis an die Flansche heranreichen. Bei dünnen Wandstärken des Längsträgers besteht dann allerdings die Gefahr, daß die Stützbleche, wie es in **Bild 13** gezeigt ist, ein örtliches Ausbeulen des Längsträgers hervorrufen. Hierdurch können örtliche Spannungsspitzen entstehen, die bei Dauerbeanspruchung zum Bruch führen. Bei dünnwandigen Profilen ist es daher zweckmäßig, den Steg des U-Profiles durch eine aufgeschweißte Platte zu verstärken, die mit Rücksicht auf die Biegebeanspruchung nicht bis an die Ober- und Unterflansche herangeführt werden darf, **Bild 14**. Eine zweite Lösungsmöglichkeit ist in **Bild 15** angegeben. Hierbei sollen die seitlichen Stützbleche eine möglichst geringe Wandstärke haben, damit die auftretenden Spannungsspitzen bei Biegebeanspruchung gering gehalten werden.

In vielen Fällen müssen die Kräfte über Vertikalstreben in einen Längsträger aus U-Profil eingeleitet werden. Hierfür sind einige Beispiele in **Bild 16 bis 21** gezeigt. Man sollte möglichst vermeiden, die Vertikalstreben am Unterflansch des Längsträgers anzuschweißen, **Bild 16**, weil dies eine örtliche Versteifung bei Biegung und eine Verhinderung der Querschnittsverwölbung bei Verdrehung bedeutet. Aber auch die Vertikalstreben selbst sollen möglichst so angeschlossen sein, daß bei Verwindungsbeanspruchung die Flansche sich frei verschieben können. Aus diesen Gründen sind die Beispiele in **Bild 16** und **17** sehr ungünstig. Bei dem Anschluß in **Bild 16** wird einmal die Verwölbung des Längsträgers behindert, zum anderen wird die Verwölbung der Vertikalstrebe ebenfalls behindert, da das Profil stirnseitig verschweißt wurde. Hinzu kommt, daß bei Biegebeanspruchung die Verformungsbehinderung des Längsträgers durch die Vertikalstrebe sehr groß ist und daß durch diese Behinderung die Gefahr von Spannungsspitzen besteht. Der Längsträger wird außerdem zusätzlich auf Torsion beansprucht, da die Kraftwirkungslinie nicht durch den Schub-

mittelpunkt des Längsträgers geht. Im Beispiel nach Bild 17 wird zwar die Verwölbung des Längsträgers kaum behindert, jedoch entsteht im Bereich des Anschlusses aus der Vertikalstrebe örtlich ein Rohr, das bei Verdrehung eine sehr große Steifigkeit besitzt. Es sind also in den Ecken des Anschlusses sehr hohe Spannungsspitzen zu erwarten, die bei Verwindungsbeanspruchung zum Bruch der Vertikalstrebe führen werden. Der Anschluß in Bild 18 ist für Verdrehbeanspruchung bedeutend günstiger. Die Flansche beider U-Profile können sich frei verwölben und sind an keiner Stelle in ihrer Verformung behindert. Bei Biegebeanspruchung treten allerdings an der unteren Ecke des Anschlusses wieder hohe Spannungsspitzen auf, die den Längsträger gefährden können. Mit Rücksicht auf die Vermeidung dieser Spannungsspitzen bei Biegung werden die Konstruktionen nach Bild 19 bis 21 vorgeschlagen, bei denen die Schweißnähte in Gebieten geringerer Nennspannung liegen. Der Anschluß nach Bild 19 ist für die Übertragung kleinerer Kräfte gedacht. Müssen größere Beanspruchungen aufgenommen werden, so ist es zweckmäßig, wie in Bild 20 gezeigt ist, seitliche Versteifungsbleche anzubringen, um ein Abheben der Vertikalstrebe zu verhindern. Gleichzeitig wird dadurch die tragende Schweißnähtlänge wesentlich erhöht. Auch hier dürfen an keiner Stelle die Schweißnähte bis an die Flansche des Längsträgers herangeführt werden. Empfohlen wird auch die Konstruktion nach Bild 21, wobei zwei Dreiecksknotenbleche auf den Längsträger im Bereich der neutralen Biegezone aufgeschweißt werden. Auf diese Knotenbleche wird dann die Vertikalstrebe geschweißt. Die Beispiele in Bild 16, 18 und 21 sollen nun an Hand von Spannungsverteilungskurven bei Biegebeanspruchung näher erläutert werden.

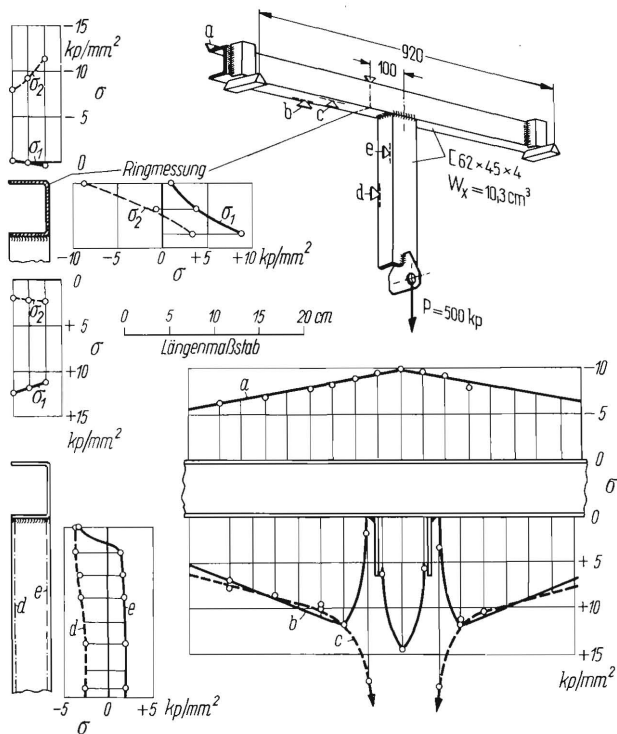


Bild 22. Spannungsverteilungen an einem T-förmigen Knoten aus U-Profilen bei Belastung im Schubmittelpunkt. Spannungsspitzen am Biegeträger. Behinderung der Querschnittsverwölbung bei Verdrehung.

Im **Bild 22** sind zunächst die Spannungsverteilungen an einem Knoten nach Bild 16 dargestellt. Hierbei wurden die Kräfte im Schubmittelpunkt eingeleitet, wie aus dem Belastungsschema im Bild zu erkennen ist. Dadurch wird im Zugstab eine Biegung überlagert (Spannungsverteilungen d und e), die vom Unterflansch des Biegeträgers aufgenommen werden muß. Die Außenkante des Unterflansches des Biegeträgers beult an den Anschlußstellen nach oben aus, wodurch Druckspannungen überla-

gert werden, die die aus der Biegung herrührenden Zugspannungen örtlich aufheben (vgl. Verteilungskurve b). Längs der Kante des Oberflansches steigen die Spannungen von den Auflagern linear zur Mitte hin an, wie es dem rechnerischen Verlauf entspricht. An der Unterkante des Biegeträgers (Spannungsverteilung c) ist der Anstieg zunächst auch linear. In unmittelbarer Nähe des Anschlusses steigen die Spannungen plötzlich stark an und haben unmittelbar in der Ecke eine ausgeprägte Spitze.

Leitet man die Kräfte nicht in den Schubmittelpunkt ein, sondern in die Stegebene des Biegeträgers, so entsteht ein Torsionsmoment von der Größe $P \cdot x_t$. Bei dem in **Bild 23** gezeigten Beispiel würde dieses Torsionsmoment etwa die Größe von 600 cm kp haben. Die aus dem Torsionsmoment herrührenden Normalspannungen sind in der Mitte des Biegeträgers am größten. Sie überlagern sich den Biegespannungen und heben

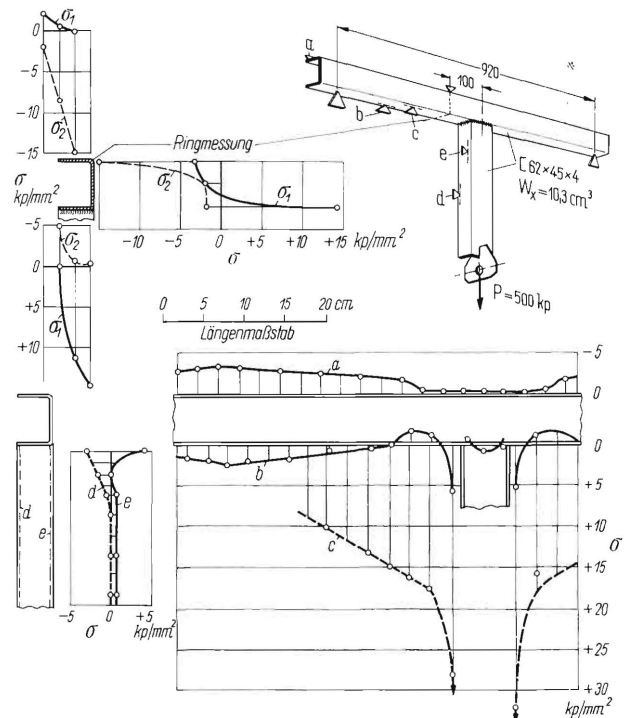


Bild 23. Spannungsverteilungen an einem T-förmigen Knoten aus U-Profilen bei Belastung in der Stegebene. Hierdurch überlagerte Torsion. Biegespannung und Torsionsspannung addieren sich und ergeben hohe Spannungsspitzen.

diese, wie aus Kurve a zu ersehen ist, sogar auf. An der unteren Kante des U-Profils haben beide Spannungen dagegen gleiche Vorzeichen (Verteilungskurve c) und ergeben damit fast doppelt so hohe Spannungswerte wie bei der entsprechenden Kurve in Bild 22. Dadurch treten in den Ecken des Anschlusses Spannungsspitzen von über 30 kp/mm² auf. Man kann aus diesem Beispiel besonders deutlich erkennen, wie wichtig es ist, die Kräfte möglichst genau im Schubmittelpunkt von offenen Profilen einzuleiten.

Bei dem in **Bild 24** gezeigten Anschluß nach Bild 18 wurden, wie aus der Belastungsskizze ersichtlich ist, die Kräfte genau im Schubmittelpunkt eingeleitet. In den ungestörten Bereichen des Biegeträgers verlaufen daher die Spannungsverteilungskurven annähernd linear und stimmen mit den rechnerisch ermittelten Werten überein. Lediglich in unmittelbarer Nähe der Schweißnaht sind an der Unterkante (Kurve c) deutliche Spannungsspitzen vorhanden. Der Zugstab wird etwa im Schwerpunkt des Profilquerschnittes belastet. Wie aus den Kurven d und e hervorgeht, herrscht daher im Zugstab ein gleichmäßiger Zugspannungszustand. Bei einer Verdrehbeanspruchung des Knotens können die Flansche sowohl des Biegeträgers als auch des Zug-

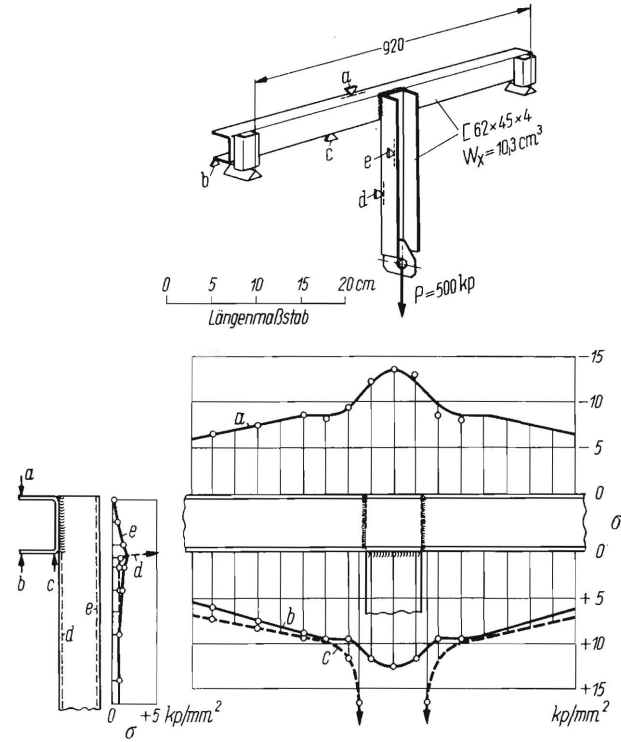


Bild 24. Spannungsverteilungen an einem T-förmigen Knoten aus U-Profilen, deren Stege ringsum verschweißt wurden. Spannungsspitzen in den unteren Ecken der Schweißnaht. Anschlußform günstig für Verdrehung, Behinderung der Querschnittsverwölbung gering.

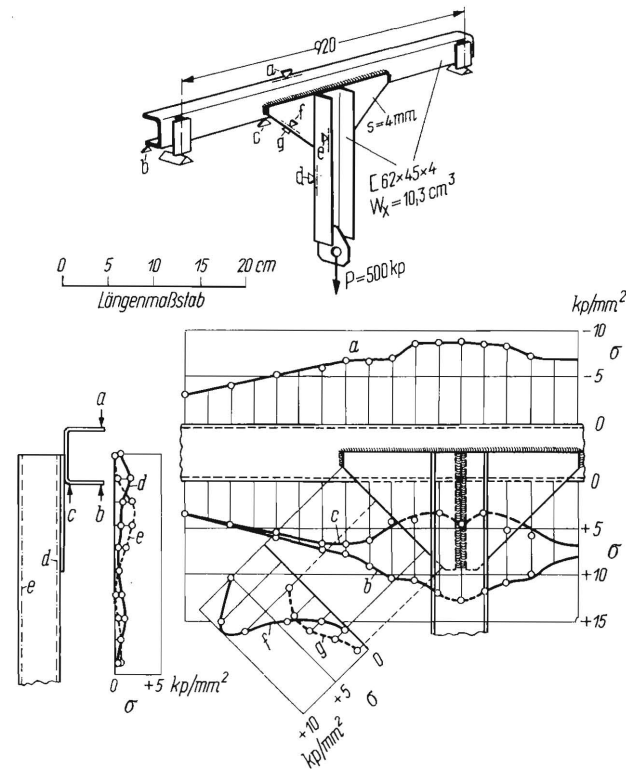


Bild 25. Spannungsverteilungen an einem T-förmigen Knoten aus U-Profil, Kraftübertragung erfolgt über zwei Dreieckbleche, die in der neutralen Biegezone verschweißt sind. Günstig bei Torsionsbeanspruchung.

stages sich frei verformen. Die Behinderung der Querschnittsverwölbung im Anschluß selbst ist daher verhältnismäßig gering.

Bei dem in **Bild 25** dargestellten Knotenpunkt wurden zunächst zwei Dreieckbleche auf den Zugstab geschweißt. Danach wurde die Oberkante der dreieckigen Abstützung etwas oberhalb der neutralen Zone des Biegeträgers angeschweißt. Die Enden der Schweißnähte wurden um die Ecken der Dreiecksbleche herumgezogen. Wie aus den Spannungsverteilungskurven a bis c zu ersehen ist, tritt an keiner Stelle der Kanten des Biegeträgers mehr eine Spannungsspitze auf. Tastmessungen an den Enden der Schweißnähte ergaben Werte, die unterhalb der maximalen Nennspannung lagen. Auch die Spannungen längs der Kanten des dreieckigen Versteifungsbleches sind geringer als die Nennspannungen im Biegeträger. Bei Verwindungsbeanspruchung können die freien Flansche beider U-Profile sich praktisch ohne Wölbbehinderung verformen. Die tragende Schweißnahtlänge ist genügend groß.

Aus diesen wenigen Beispielen ist zu erkennen, daß man Vertikalstreben in Fahrzeugrahmen so anschließen kann, daß weder bei Biegebeanspruchung noch bei Verwindungsbeanspruchung extreme Spannungsspitzen auftreten.

Wie bereits erwähnt wurde, sind Übergänge von offenen zu geschlossenen Profilquerschnitten bei Verwindungsbeanspruchung stets mit sehr großen Steifigkeitssprüngen verbunden. Dies soll an einem Beispiel näher erläutert werden. Es ist die Torsionssteifigkeit $= G \cdot I_t$ [$\text{kp} \cdot \text{cm}^2$]. Hierbei ist G der Gleitmodul in kp/cm^2 und I_t das Torsionsflächenmoment [cm^4]. Dieses Torsionsflächenmoment ist nur für den Kreisquerschnitt identisch mit dem polaren Flächenträgheitsmoment I_p . Es zeigt bei gleichem Werkstoff die Abhängigkeit der Steifigkeit vom Querschnitt eines Bauteiles an. Mit den in **Bild 26** angeschriebenen Bezeichnungen gelten für dünnwandige Profile mit konstanter Wandstärke s die Beziehungen: für offene Profile

$$I_t = \frac{1}{3} \cdot U \cdot s^3$$

und für geschlossene Hohlprofile

$$I_t = \frac{4 F^2 \cdot s}{U}$$

Hierbei bedeuten s die Wandstärke, U die Gesamtlänge der Querschnittsmittellinie und F die von der Querschnittsmittellinie eingeschlossene Fläche.

Ausgehend von einem U-Profil mit der mittleren Höhe $h = 100$ mm, der mittleren Breite $b = 50$ mm und der konstanten Wandstärke $s = 4$ mm wurden für verschiedene Querschnittsformen gleicher Höhe und gleicher Wandstärke die Torsionsflächenmomente ausgerechnet und in **Bild 26** gegenübergestellt. Geht man vom U-Profil zum geschlitzten Rechteckprofil gleicher Abmessungen über, so vergrößert sich das Torsionsflächenmoment von $0,43 \text{ cm}^4$ auf $0,64 \text{ cm}^4$ linear mit der Vergrößerung der Querschnittsmittellinie. Beim Übergang vom geschlitzten Rechteckrohr zum geschlossenen Rechteckrohr bleibt die Länge der Querschnittsmittellinie konstant. Maßgebend für die Berechnung des Torsionsflächenmomentes wird jetzt aber die von

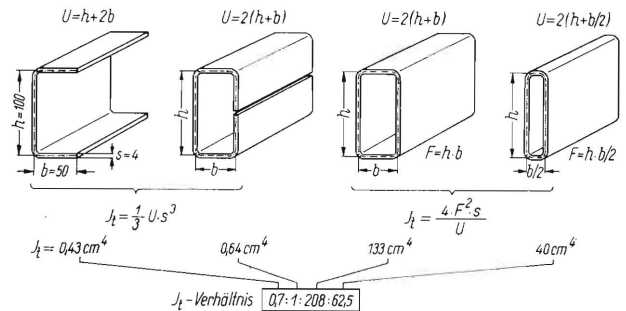


Bild 26. Torsionssteifigkeit $G \cdot I_t$ beim Übergang vom U- zum geschlossenen Hohlprofil. Steifigkeitssprung zwischen geschlitztem und geschlossenem Rohr 1:200.

der Querschnittsmittellinie eingeschlossene Fläche, die quadratisch in die Formel eingeht. Der Steifigkeitssprung bei gleichem Gleitmodul G beträgt in diesem Falle 0,64:133 oder 1:208. Würde man also bei einem torsionsbeanspruchten geschlitzten Rechteckrohr den Schlitz an einer Stelle zuschweißen, so würden hier ein Steifigkeitssprung von 1:200 und damit verbunden hohe Spannungsspitzen auftreten. Verkleinert man nun die mittlere Breite des geschlossenen Rechteckrohres um die Hälfte, so beträgt das Torsionsflächenmoment immer noch 40 cm^4 .

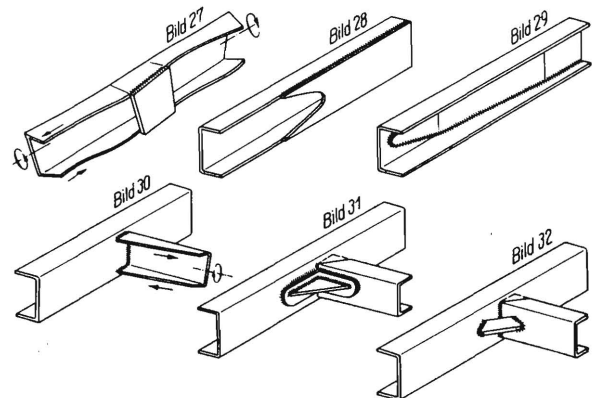
Muß in einer verwindungsbeanspruchten Konstruktion ein Übergang von einem geschlossenen Rohr zum U-Profil geschaffen werden, so muß man versuchen, den Steifigkeitssprung von etwa 1:300 möglichst langsam und gleichmäßig zu vollziehen. Ausgehend vom geschlossenen Querschnitt kann man dies nur erreichen, indem man die Breite des Rohrquerschnittes langsam abnehmen läßt. Ein Übergang vom U-Profil über das C-Profil zum geschlossenen Profil bringt keine Verbesserung. In **Bild 27** ist die Verformung eines torsionsbeanspruchten U-Profils dargestellt, das in der Mitte durch eine aufgeschweißte Platte örtlich zu einem Rechteckrohr wurde. Die Kantenverschiebung des U-Profils wird an den Übergangsstellen sehr stark behindert. Gleichzeitig wird die aufgeschweißte Platte infolge der Kantenverschiebungen in sich gedreht. Hierdurch treten zusätzlich Beulungen an den Übergangsstellen auf, deren Spannungen sich mit den Normalspannungen überlagern. Bei dynamischen Torsionsbeanspruchungen geht eine solche Konstruktion bereits nach wenigen Lastwechseln zu Bruch.

Obwohl bei dem Beispiel in **Bild 28** dem Anschein nach ein guter Übergang vom geschlossenen zum offenen Profil stattfindet, wie man ihn leider noch häufig an Fahrzeugen sieht, kann man auf Grund des im Bild 26 gezeigten Zahlenbeispiels sehr leicht erkennen, daß diese Ausrundung bei Torsionsbeanspruchung vollkommen wertlos ist. In dem gesamten Bereich vom U-Profil bis zum Scheitel der Ausrundung steigt die Verdrehsteifigkeit nur um das 1,3fache an. Unmittelbar in der Ausrundung ist dann der volle Steifigkeitssprung von etwa 1:200 vorhanden. Damit sind natürlich starke Verformungsbehinderungen und Spannungsspitzen verbunden.

Die einzig mögliche und zulässige Lösung für einen Übergang vom geschlossenen zum offenen Profil bei einer verdrehbeanspruchten Konstruktion ist im **Bild 29** dargestellt. Wie bereits im Bild 26 gezeigt wurde, ist ein allmählicher Übergang der Steifigkeit nur dadurch zu erreichen, daß man die Breite des geschlossenen Rohrquerschnittes langsam verkleinert. In dem hier gezeigten Beispiel ließ man darüber hinaus das eingeschweißte Flacheisen zur neutralen Biegezone des U-Profils hin spitz auslaufen. Außerdem ist es zweckmäßig, die freien Flansche des U-Profils im Hinblick auf die Biegebeanspruchung über den Rohrquerschnitt etwas hinausragen zu lassen.

Wie bereits bei der Besprechung der Anschlüsse von Vertikalstreben an Längsträger erwähnt wurde, wird die freie Querschnittsverwölbung eines offenen Profils auch dann behindert, wenn man es stirnseitig ringsum verschweißt. Dies gilt im gleichen Maße auch für den Anschluß der Querträger an den Längsträger eines Fahrzeuges. In **Bild 30** ist die Kantenverschiebung eines verdrehbeanspruchten Querträgers schematisch dargestellt. Der Träger wurde an seinem Ende ringsum an den Längsträger angeschweißt. Durch die Behinderung der Querschnittsverwölbung entstehen in den Ecken hohe Normalspannungsspitzen, und zwar in dem dargestellten Fall in dem Oberflansch Zugspannungen und im Unterflansch Druckspannungen. Hinsichtlich der Biegebeanspruchung des Längsträgers ist der Querträger genügend weit von den hochbeanspruchten äußeren Biegefasern des Längsträgers entfernt. Querträger in verwindungsbeanspruchten Fahrzeugen soll man daher grundsätzlich nur an den Stegen miteinander verschweißen, während die freien Flansche ausgeklinkt und nicht verschweißt werden. Um den Rahmen gegen Schubkräfte in der Rahmenebene zu versteifen, kann man im Bereich der Profilmittellinien Eckbleche einschweißen. Bei sehr dünnwandigen Profilen muß man auch hier örtliche Beulungen vermeiden, indem man die Kräfte flächenhaft einleitet,

entweder durch Unterlegen eines Bleches und damit Verstärkung des Steges oder durch räumliche Versteifungsecken, **Bild 31 und 32**.



Bilder 27 bis 32. Trägerversteifungen und Knotenpunkte in verwindungsbeanspruchten Fahrzeugrahmen. Übergang vom geschlossenen Rohr zum U-Profil nur durch langsame Verkleinerung des Rohres. Profile nur an den Stegen verschweißen, Flansche ausklinken.

Bei dem in **Bild 33** gezeigten verwindungsweichen Fahrzeugrahmen sind die Anschlüsse der Querträger am Längsträger in der vorher beschriebenen Art erfolgt. Tastmessungen in den Ecken der Versteifungsbleche ergaben keine unzulässig hohen Spannungswerte. Auch im Dauerversuch traten nach 15 000 Verwindungen von 10° keine Anrisse auf. Besonders hingewiesen sei noch auf die Anschlüsse des Drehkranzes an Quer- und Längsträger. Die Kräfte wurden in den Schubmittelpunkt der Profile eingeleitet. Um einen flächenhaften Anschluß zu erhalten, wurden die Konsolen unten mittels Schlitzschweißung befestigt. Hiermit wurde erreicht, daß man die Schweißnaht von der Unterkante des Trägers näher zu der neutralen Biegeachse hin verschob. Die Gefahr von Spannungsspitzen wurde damit wesentlich herabgesetzt.

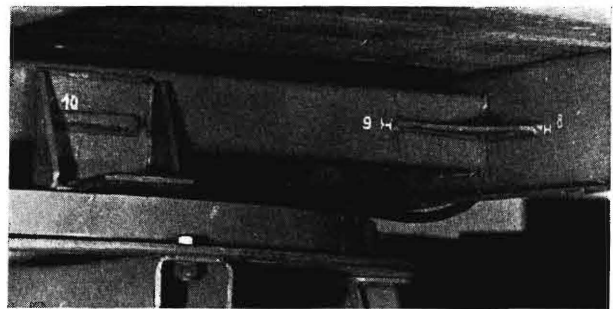


Bild 33. Beispiel für gute Knotenpunkte und Kräfteinleitungen in einem verwindungsweichen Ackerwagen.

Zusammenfassung

Alle Werkstoffteilchen einer Konstruktion sollen möglichst gleichmäßig und gleich hoch beansprucht werden. Spannungsspitzen, die durch Kerben oder sprunghafte Querschnittsvergrößerungen entstehen können, müssen daher unbedingt vermieden werden. Sie hängen in erster Linie von der Größe des Ausrundungsradius ab. Sämtliche Querschnittsübergänge sind daher so sanft wie möglich zu gestalten. Bei biegebeanspruchten Bauteilen besteht die Möglichkeit, Querschnittsänderungen in die neutrale Biegezone zu legen. Trotz hoher Formzahlen sind dann wegen der niedrigen Nennspannungen in diesem Gebiet die Maximalspannungen niedrig. Bei verwindungsbeanspruchten offenen Profilen darf die Querschnittsverwölbung nicht behindert werden. Anschlüsse sollen im Bereich der Drehachse liegen.

Hieraus ergeben sich für die Konstruktion von Maschinen und Fahrzeugen, die auf unebenen Fahrbahnen fahren, folgende allgemeine Konstruktionsrichtlinien:

1. Fahrzeuge werden in erster Linie auf Biegung berechnet. Geländegängige Fahrzeuge müssen darüber hinaus verdrehweich sein.
2. Die hochbeanspruchten Fasern eines Biegeträgers sollen möglichst nicht verletzt werden. Ist ein Anschluß an diesen Stellen konstruktiv nicht zu umgehen, so soll man ihn quer zur Trägerlängsachse legen und so schmal wie möglich machen. Im allgemeinen sollen Anschlüsse an Biegeträgern im Gebiet der neutralen Zone erfolgen.
3. Querkräfte müssen bei Biegeträgern aus offenen Profilen im Schubmittelpunkt eingeleitet werden, da sonst unnötige Torsionsbeanspruchungen entstehen.
4. Die freie Verwölbung von Profilträgern, insbesondere die Bewegungsfreiheit von U-Profilflanschen, darf nicht behindert werden. Besonders ungünstig in verdrehbeanspruchten Konstruktionen sind plötzliche Übergänge von offenen zu geschlossenen Profilen. Sprünge der Verdrehsteifigkeit von 1:200 sind an diesen Stellen keine Seltenheit. Übergänge können nur durch möglichst schlanke Verjüngungen des geschlossenen Querschnittes erfolgen.
5. Bei sehr dünnwandigen Bauteilen treten leicht örtliche Beulungen auf. Kräfte müssen dann flächenhaft und nicht punktförmig eingeleitet werden.

Jede vermiedene Spannungsspitze erhöht die Lebensdauer und Haltbarkeit der Konstruktion.

Schrifttum

- [1] *Spangenberg, D.*: Aus der Praxis des Fahrzeug-Leichtbaus. In: 16./17. Konstrukteurheft, Düsseldorf: VDI-Verlag 1959, Seite 110/15 (Grundlagen d. Landtechn. Heft 11).
- [2] *Stroppel, Th.*: Kräfte und Beanspruchungen in luftbereiften Ackerwagen. Techn. i. d. Landw. **21** (1940) S. 38/41.
- [3] *Bürger, H.*: Die Verwindungssteifigkeit von Kraftwagenrahmen. Forsch. Ing. Wes. Bd. **10** (1939) S. 170/74.
- [4] *Cleff u. Erker*: Untersuchungen über die Dauerhaltbarkeit von Fahrzeugrahmen. Dtsch. Kraftfahrzeug-Forsch. H. **35** (1939).
- [5] *Kloth, W., Th. Stroppel u. W. Bergmann*: Gesetze des Fahrens und Konstruktion für Ackerwagen. Radlasten und Wagenverwindung auf ländlicher Fahrbahn. Beanspruchungen und Gestaltung verwindungsfähiger Fahrgestelle. Z. VDI **94** (1952) S. 209/15 und S. 515/18.
- [6] *Trost, W.*: Spannungen und Werkstoffausnutzung in Fahrzeugrahmen. Z. VDI **87** (1943) S. 467/72.
- [7] *Bergmann, W.*: Spannung und Gestalt bei Knotenpunkten, insbesondere bei verwindungsfähigen Konstruktionen. In: 9. Konstrukteurheft, Düsseldorf: VDI-Verlag 1951, S. 61/67 (Grundlagen d. Landtechn. Heft 1).
- [8] *Bergmann, W.*: Neue Erkenntnisse über beanspruchungsgerechte Gestaltung, insbesondere bei Behinderung der Querschnittsverwölbung offener Profile. In: 10. Konstrukteurheft, Düsseldorf: VDI-Verlag 1952, S. 12/23 (Grundlagen d. Landtechn. Heft 3).
- [9] *Effertz, K. H.*: Berechnung und Gestalt geschweißter Trägeranschlüsse. Schweißen und Schneiden **4** (1952) S. 58 und 80/83.
- [10] *Spangenberg, D.*: Bedeutung der Verwindungsbeanspruchung bei Fahrzeugen. Wagen- und Karosseriebautechnik **12** (1959) Nr. 3 S. 3/5.
- [11] *Wilder, A. G., u. J. D. Tyson*: Metallurgical Properties of High Yield Strength Seamless Line Pipe. The Welding Journal Oktober 1947, S. 875.
- [12] *Spangenberg, D.*: Untersuchung der spannungsgerechten Gestaltung von geschweißten Stabanschlüssen an Biegeträgern. Diss. TH Braunschweig 1958.
- [13] *Spangenberg, D.*: Die Spannungen in ebenen rechtwinkligen Knotenpunkten aus Flachstäben in Abhängigkeit von der Form. Konstruktion **12** (1960) H. 7, S. 278/85.
- [14] *Treffitz, E.*: Schubmittelpunkt. Zeitschr. angew. Math. u. Mech. **15** (1935) S. 220/25.
- [15] *Bergmann, W.*: Die Bedeutung des Schubmittelpunktes bei Verwendung von Stahlleichtprofilen und die zweckmäßige Ausbildung von Knotenpunkten. Techn. Blätter Wuppermann (1957) H. 2, S. 3/19.
- [16] *Weber, C.*: Biegung, Schub und Drehung von Balken. Diss. TH Braunschweig 1922.