

ders grosse Beanspruchung. Es ist also der Ausbildung gerade dieser Knotenpunkte besondere Beachtung zu schenken.

Weiterhin erwiesen sich die durch den Radkranz durchgenieteten Speichen mit z.T. noch stark hervorstehenden Nietköpfen als ungünstig. Derartige Räder gingen bei den Dauerversuchen auf dem Prüfstand an den Speichennietköpfen schon nach etwa 20 000 Nockenstössen zu Bruch, obwohl nur ein 5 mm hoher Nocken verwendet wurde. Jeder Nietkopf verursachte nämlich einen etwa gleich grossen Stoss, sodass die Anzahl der Stösse bei diesem Achtspeichenrad in Wirklichkeit rund 180 000 betrug. Es ist daher anzustreben, wie es bei den neueren Rädern auch meistens schon der Fall ist, die Nietköpfe weitgehend oder besser völlig zu versenken.

Ausserdem zeigten sich nach etwa der halben Laufzeit Lockerungen der in die Nabe eingegossenen

Speichen, wodurch die Beanspruchung der noch festen Speichen erhöht wurde und zu einer Beschleunigung eines Bruches an den Speichenenden führte.

11. Zusammenfassung

Es wurden die Spannungen in dem Radkranz und den Speichen verschiedener eiserner Räder gemessen und die Spannungsverteilung über dem Radkranz und den Speichen bei verschiedenen Betriebsbedingungen ermittelt. Durch Vergrösserung des Raddurchmessers und auch der Radkranzbreite werden die Stosskräfte verringert, was allerdings auch ein grösseres Radgewicht zur Folge hat. Es wurden ferner Betrachtungen über die Wechselwirkung zwischen Federung der Räder, den wirksamen Stosskräften und den Beanspruchungen in Speiche und Radkranz unter gewissen Voraussetzungen angestellt.

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

Anschrift des Verfassers: Dipl.-Ing. Hans Müller, (20b) Braunschweig, Forschungsanstalt für Landwirtschaft

SPANNUNG UND GESTALT BEI KNOTENPUNKTEN INSBESONDERE BEI VERWINDUNGSFÄHIGEN KONSTRUKTIONEN

Von Walter Bergmann

Mit Hilfe der klassischen Festigkeitslehre und der Mechanik ist man imstande, einfache Konstruktionselemente zu berechnen und sie so zu bemessen, dass sie mit ausreichender Sicherheit halten. Es lassen sich beispielsweise die Stabkräfte in ebenen und räumlichen Fachwerken genügend genau ermitteln. Auch ist die Erfassung von Biege- und Verdrehspannungen in einfachen Bauteilen ohne besonderen Rechenaufwand möglich. Aber in den seltensten Fällen kann man im voraus etwas über die Höhe der Beanspruchungen in Knotenpunkten aussagen. In der Mehrzahl aller Belastungsfälle sind in zusammengesetzten Konstruktionen die Knotenpunkte die Stellen höchster Beanspruchung, während über der rechnerisch einfacher zu erfassenden Länge des Bauteils keine Spannungsspitzen zu erwarten sind. Die Erfahrung lehrt, dass Brüche entweder an Krafteinleitungsstellen oder in den Knoten auftreten. Das gilt besonders auch für die sperrige Bauweise der Landmaschinen. Es ist das Ziel dieser Ausführungen, dem Konstrukteur Hinweise für die beanspruchungsgerechte Gestaltung von Knotenpunkten zu geben.

Anknüpfend an den im gleichen Heft veröffentlichten Aufsatz über die Steifigkeit sperriger Bau-

teile, sollen hier zunächst Knotenbeanspruchungen in verwundungsfähigen Bauteilen behandelt werden.

Bei reiner Verdrehbeanspruchung entstehen in einem Stab Verdrehspannungen, deren Hauptspannungsrichtung auf der Oberfläche unter 45° zur Stabachse verläuft. Solange der Querschnitt des Stabes ein Kreisring ist, bleibt diese Richtung für die gesamte Stablänge erhalten, auch wenn die Enden des Stabes stirnseitig gegen dicke Platten geschweisst sind; denn die Querschnitte eines Kreisrohres bleiben an allen Stellen eben. Bei offenen Profilstäben bleibt die Richtung der Hauptspannungen nur dann über der Trägerlänge konstant, wenn alle Querschnitte sich bei Verdrehungsbeanspruchung frei verwölben können. Wird diese freie Verwölbung z.B. durch Anschweissen der einen Stirnseite an eine starre Platte verhindert, so ändert sich in der Nähe der Schweisstelle nach und nach die Richtung der Hauptspannungen dadurch, dass zusätzliche Normalspannungen die Verdrehspannungen überlagern. Die Normalspannungen entstehen dadurch, dass ein aus Querkräften bestehendes Kräftepaar den eingespannten Torsionsstab in den Flanschen zusätzlich auf Biegung beansprucht.

Bei doppelt symmetrischen Querschnitten (z.B. Doppel-T-Profil) sind die Normalspannungen im Einspannquerschnitt in Richtung und Verteilung proportional den Verwölbungen (Bild 1 links) ¹⁾. Bei unsymmetrischen Querschnitten (z.B. U-Profil, Schlitzrohr) werden sich die Normalspannungen an

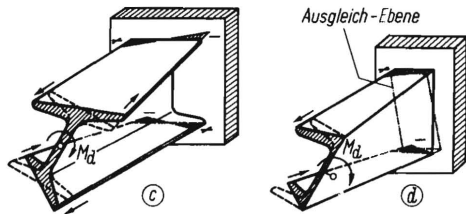


Bild 1. Verwölbung und Normalspannungsverteilung bei Doppel-T-Träger und U-Träger (beachte die Ausgleichsebene im Einspannquerschnitt des U-Trägers!). (Nach einer Vortragsreihe von C. Weber, Braunschweig im W.S. 1950/51.)

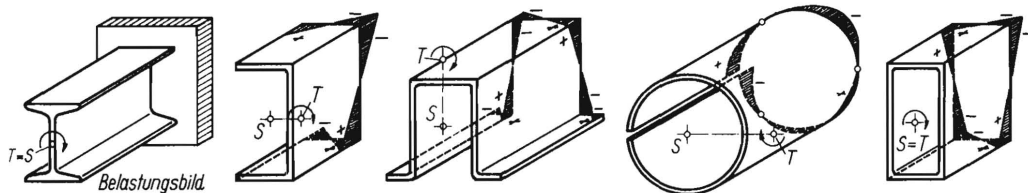


Bild 2. Normalspannungsverteilung im Einspannquerschnitt verschiedener Profilträger bei reiner Verdrehbeanspruchung.

der Einspannstelle wegen der Ebenheit der starren Platte so auszugleichen versuchen (Bild 1 rechts, beachte die Ausgleichsebene) [3], dass die Normalspannungsverteilung über den Querschnitt nicht mehr der Verwölbung proportional ist. Vielmehr stellen sich immer in Flanschnitte Normalspannungs-Nullstellen ein, während an den freien Flanschen und an den Profilecken die maximalen Normalspannungen zu erwarten sind. In Bild 2 sind die Nor-

1) Diese Querschnitte sind dadurch gekennzeichnet, dass der Schubmittelpunkt [1, 2] und Schwerpunkt sich in einem Punkt vereinigen. Bei unsymmetrischen Querschnitten liegt der Schubmittelpunkt (Querkraftmittelpunkt) meist ausserhalb der Profilumrisse.

malspannungsverteilungen über einigen Profilstäben bei Verdrehungsbeanspruchung dargestellt. Das belastende Drehmoment greift, wie aus dem Bild ersichtlich, im Schubmittelpunkt T (nicht im Schwerpunkt S) des Endquerschnitts an, um reine Verdrehung zu erhalten.

Bei den hier gezeigten einfachen Bauteilen ist es mit einem gewissen Rechenaufwand möglich, die Spannungen in jedem Querschnitt eines ein- oder beiderseitig eingespannten Profilstabes im voraus zu bestimmen. In zusammengesetzten Konstruktionen gelingt dieses leider nicht mehr. Selbst bei einfachen Knotenpunkten, wie den Eckverbindungen von verwindungsbeanspruchten Rechteckrahmen, lassen sich oft nicht einmal die Tendenzen der Spannungsverteilung erkennen, sodass man in diesen Fällen allein auf Versuchsergebnisse angewiesen ist.

Aus diesem Grunde wurden an verschiedenen Bauteilen Beanspruchungsmessungen durchgeführt. Vor Ermittlung der Grösse der Spannungen wurden die Hauptspannungsrichtungen mit Hilfe des Maybachschen Dehnungslinienverfahrens sichtbar gemacht [4]. Dieses Verfahren besteht darin, dass man das Bauteil mit einer dünnen Lackschicht überzieht und nach dem Erstarren des Lackes das Bauteil belastet. Die bei der Belastung entstehenden haardünnen Lackrisse verlaufen senkrecht zur Richtung der grössten Zugdehnung, weil der Bruch der Lackschicht immer als Trennungsbruch zustandekommt. Die Richtung der grössten Zugdehnung ist

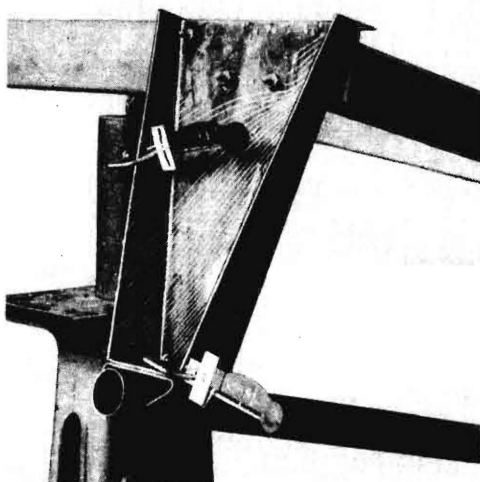


Bild 3. Durch nachgezeichnete Dehnlinien sichtbar gemachtes Spannungsfeld auf einem verwindenen Achsbock. Die Messgeräte sind Huggenberger Tensometer mit 10 und 20 mm Messlänge.

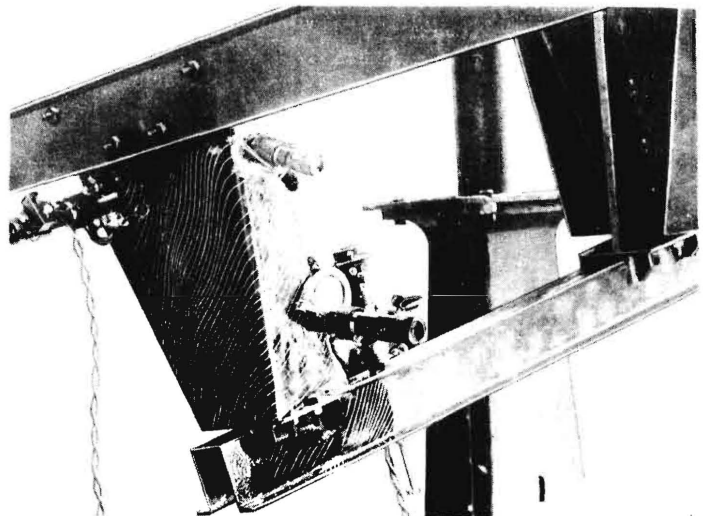


Bild 4. Spannungsfeld auf einem verwindenen Achsbock und einer Hutprofilachse (optische Dehnungsmesser mit 3 und 10 mm Messlänge vom Institut für Instrumentenkunde in Göttingen).

identisch mit der ersten Hauptspannung, während die zweite Hauptspannung tangential zur Dehnungslinie gerichtet ist. In den Bildern 3 bis 6 sind solche (nachgezeichneten) Dehnlinien auf Achsböcken von Fahrgestellen, in einer Rahmenecke und auf einer Achse zu erkennen.

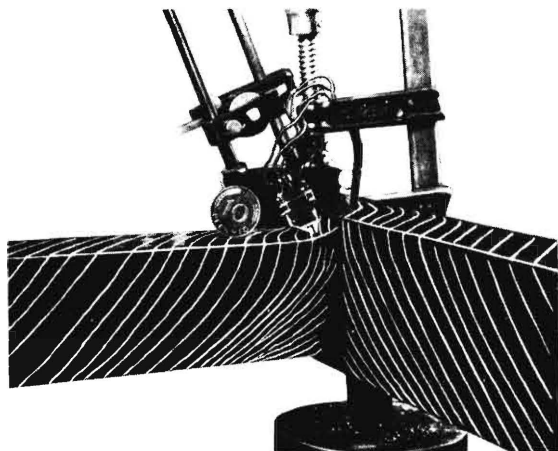


Bild 5. Nachgezeichnete Dehnlinien in einer verwundenen Rahmenecke (induktiver Dehnungsgeber mit 2 mm Messlänge von Askania).

Allein aus den Dehnlinienfeldern kann schon manches über die Art der Beanspruchung ausgesagt werden. Liegt ein einachsiger Spannungszustand (reiner Zug oder reine Biegung) vor, so reißt der Lack senkrecht zur Zugrichtung, also senkrecht zur Stablängsachse. Der Betrag der Zugdehnung ist

$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E}$$

In Richtung der Dehnungslinien ist der Betrag der Dehnung gleich der Querkontraktion

$$\epsilon_y = -\mu \cdot \epsilon_x \quad 2)$$

Bei reiner Verdrehung entstehen die Risse unter einem Winkel von 45° zur Stablängsachse. Normal und tangential zu diesen Dehnlinien liegen die Hauptdehnungen, deren Beträge im Falle dieses zweiachsigen Spannungszustandes, auf den der Schubspannungszustand zurückgeführt werden kann, gleich gross, aber entgegengesetzt gerichtet ist. Die aus der Elastizitätslehre bekannte Beziehung lautet für die Hauptdehnungen

$$\epsilon_I = -\epsilon_{II} = \frac{\gamma}{2} = \frac{\tau}{2G}, \quad 3)$$

und für die Hauptspannungen

$$\sigma_I = -\sigma_{II} = \tau.$$

Senkrecht und parallel zur Stablängsachse sind bei Belastung durch ein reines Drehmoment die Dehnungen Null.

Bei gemischter Beanspruchung aus Biegung und Verdrehung werden die Dehnlinien unter einem Winkel verlaufen, welcher der Grösse der beiden

Beanspruchungen entsprechend zwischen 0 und 45° zur Stabachse liegt. Mit Hilfe des Mohrschen Spannungskreises für den zweiachsigen Spannungszustand und der daraus verständlichen Beziehung [4] für den Dehnlinienwinkel

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{2\tau}{\sigma}$$

ist es möglich, die Anteile von Verdreh- und Biegebeanspruchung an der Gesamtbeanspruchung zu bestimmen.

Die Dehnlinien geben also im wesentlichen Aufschluss über die Richtung der Hauptspannungen. Zur Ermittlung des Spannungsbetrages wurden statische Feindehnungsmesser [5] von 2 bis 10 mm Messlänge verwendet. Die Aufspannung der Dehnungsmesser erfolgte zur Feststellung der Höhe der ersten Hauptspannung senkrecht zu den Lackrissen, zur Bestimmung des Normalspannungsbetrages in verwindungsbeanspruchten Konstruktionen in Stabrichtung.

Bild 3 und 4 zeigen die durch Dehnlinien sichtbar gemachten Spannungsfelder zweier Achsböckkonstruktionen. Die Dehnlinien auf beiden Achsböcken lassen durch ihre Neigung im wesentlichen auf Verdrehbeanspruchungen schliessen. Dem Richtungswechsel der Dehnlinien kann man aber entnehmen, dass diese Bauteile nicht nur Verdrehbeanspruchungen zu ertragen haben, sondern dass sich besonders nahe der Ecken und der freien Flanschen Zug- oder Druckspannungen bemerkbar machen, und dass die Anschlussstellen an die Nachbarbau-

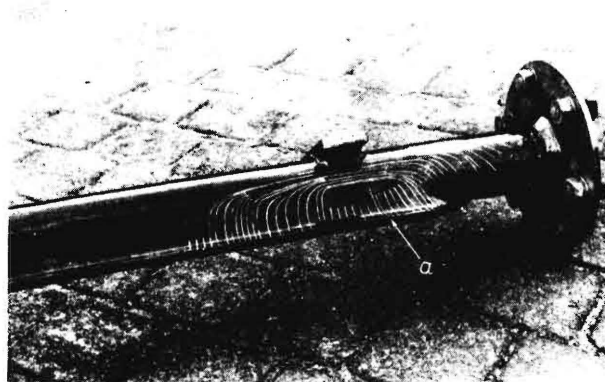


Bild 6. Dehnlinienfeld einer Hutprofilachse bei Biegebeanspruchung. a Stelle höchster Beanspruchung.

teile Unregelmässigkeiten des Dehnlinienverlaufes hervorrufen. Sehr deutlich ist die Richtungsänderung der Dehnlinien in der Rahmenecke, Bild 5, erkennbar. Hier wird durch Behinderung der Querschnittsverwölbung die Verdrehspannung durch Normalspannungen überlagert, sodass die ursprünglich etwa unter 45° verlaufenden Dehnlinien nahe der Rahmenecke fast senkrecht (Zugspannung) bzw. parallel (Druckspannung) zur Stabrichtung verlaufen. An der unteren Kante der die Ecke bildenden U-Profile werden die Verdrehspannungen durch zur Ecke hin wachsende und in Stabrichtung wirkende Druckspannungen, an der oberen Kante durch Zugspannungen überlagert.

2) Für Metalle ist die Poissonsche Konstante $\mu = \frac{3}{10}$.

3) $\gamma = \frac{\tau}{G}$ ist die „Schiebung“, d.h. Zerrung in Tangentialrichtung; im Gegensatz zu ϵ , welches die „Dehnung“, d.h. Zerrung in Normalrichtung bezeichnet.

Bild 6 zeigt das Spannungsfeld einer durch Querkraftbiegung beanspruchten Achse mit hutprofilähnlichem Querschnitt. Aus dem Verlauf der Dehnungslinien ist folgendes zu entnehmen: Links vom Achskonsol biegen die Dehnlinien aus dem senkrechten Teil nach rechts ab. Zwischen Nabenflansch und Achskonsol verlaufen die Dehnlinien mehr oder weniger geneigt. Die Stelle höchster Beanspruchung liegt dort, wo eine Dehnlinie senkrecht verläuft und beim Übergang in den gedrückten Achsbereich weder nach rechts noch nach links abbiegt; hier also unter der rechten Kante des Achskonsols (Stelle a).

Die Dehnungsmessungen zeigen eindeutig, dass die grössten Beanspruchungen immer in der Nähe der Knoten liegen. Über der Länge der Profilstäbe bleiben die Spannungen im allgemeinen niedrig. Bild 7 (links) soll die Spannungsverteilungen über der Länge des Querträgers eines Modellrahmens bei Verwindungsbeanspruchung veranschaulichen. Die Dehnungen wurden bei 13° Rahmenverwindung längs der Kanten a und b des Oberflansches gemessen, wobei die Dehnungsmesser in Stabrichtung aufgespannt waren. Es werden in diesem Falle nur die durch zusätzliche Biegung in vertikaler Richtung entstehenden Dehnungen in Stabrichtung und die durch Behinderung der Querschnittsverwölbung hervorgerufenen Dehnungen in Stabrichtung durch die Messungen erfasst, da die reine Verdrehbeanspruchung in Richtung der Stabachse keine Dehnungen hervorruft. Man erkennt, dass die gefährlichen Normalspannungen (Kurve a und b) nur in der Nähe der Verbindungsstellen mit den Längsträgern entstehen. Im mittleren Bereich des Quer-

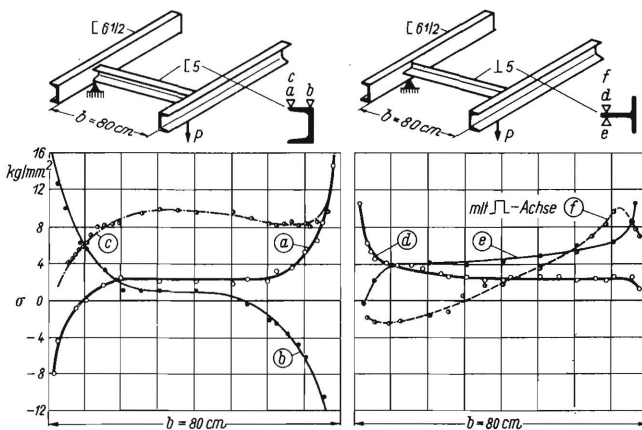
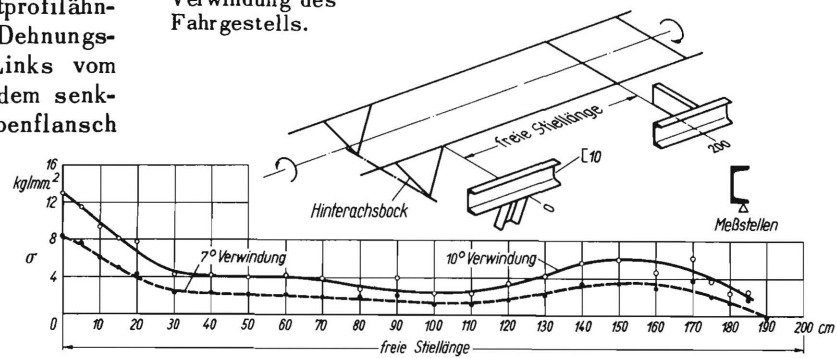


Bild 7. Spannungsverteilung über einem U- und einem T-Querträger bei Verwindung des Rahmens.

- a Normalspannungen nahe der freien Kante des Oberflansches
- b Normalspannungsverlauf in 2 mm Abstand von der oberen Stegkante
- c Verlauf der ersten Hauptspannung über der Trägerlänge nahe der freien Oberflanschkante
- d Normalspannungsverlauf auf der Oberseite des Steges nahe der freien Kante
- e Normalspannungsverlauf auf der Unterseite des Steges nahe der freien Kante
- f Normalspannungsverlauf wie bei d, nur bei Verwindung mit Achsbock und Hinterachse
- a b d e f in Stabrichtung gemessen
- c in Richtung der 1. Hauptspannung gemessen.

Bild 8. Spannungsverteilung über einem U-Längsträger bei Verwindung des Fahrgestells.



trägers bleiben die Spannungen mit etwa $+3 \text{ kg/mm}^2$ für die Messreihe a konstant. Bei reiner Verdrehung müssten die Kurven a und b zur Abzisse spiegelsymmetrisch sein und im mittleren Bereich des Querträgers sich auf der Abzisse decken. Die Spiegelungsachse ist hier um den Betrag der Spannung in der Zugfaser in $+\sigma$ -Richtung verschoben, weil der Querträger durch die gewählte Versuchsanordnung zusätzlich auf Biegung beansprucht wird. Die Kurve c in Bild 7 zeigt den Verlauf der ersten Hauptspannung über der freien Kante des oberen Querträgers und erfasst Normal- und Verdrehspannungen. Da aber die Verdrehspannungen über der Länge des Querträgers konstant sind, bringt die Kurve c im wesentlichen nur eine Verlagerung der Kurve a um den Betrag der (angenähert konstanten) Verdrehspannungen. Die entscheidenden Beanspruchungen entstehen in diesem Falle also durch die Behinderung der Querschnittsverwölbung nahe der Verbindungsstellen des Querträgers.

Dieses Messergebnis und die allgemeine Erkenntnis über die Wirkung der Verwölbungsbehinderung war Anlass zum Bau eines zweiten Modellrahmens (Bild 7 rechts), bei dem statt des U-förmigen Querträgers ein T-Träger verwendet wurde. Die Wahl dieses Querträgerprofils ist aus der Überlegung hervorgegangen, dass ein T-Träger ein U-Profil mit nach der neutralen Faser zusammengedrückten Flanschen darstellt. Vergleicht man die Spannungsverteilungen der Kurven a und d miteinander, so stellt man fest, dass der spannungserhöhende Einfluss der Verwölbungsbehinderung beim T-Profil wesentlich gemildert ist und dass in Bild 7 (rechts) nahe der Einspannstellen eine Spannungs-umkehr gegenüber der Spannungsverteilung in Bild 7 (links) zu erkennen ist. Wird dieser Rahmen mit Hinterachsbocken aus Winkelprofilen und einer daran angeschraubten Hutprofilachse versehen, so geht die Normalspannungsverteilung der Kurve d in Kurve f über. Man erkennt, dass sich bei dem Rahmen mit Hutprofilachse im Querträger ein grösseres Spannungsgefälle über die Trägerlänge einstellt.

In gleicher Weise wurden Spannungsverteilungen an den Achsbockstreben und an den Längsträgern von Ackerwagenfahrgestellen gemessen, wobei die höchsten Spannungen immer in der Nähe der Knoten und Eckverbindungen auftraten. Überhaupt zeigten

sich an Stellen, wo die Steifigkeiten der Einzelbauteile sprunghaft wechselten oder starre und weiche Bauteile aneinanderstiessen, immer hohe Spannungsspitzen. Bild 8 zeigt beispielsweise Spannungsverteilungen über dem Unterflansch des Längsträgers eines 3t-Ackerwagens bei 7° und 10° Linksverwindung während der statischen Prüfung auf dem Verwindungsprüfstand [7]. Im mittleren Bereich des Längsträgers blieben die Spannungen auch bei 10° Wagenverwindung klein. Erst etwa 40 cm vor dem Knoten A machte sich die Behinderung der Querschnittsverwölbung durch die am Längsträger – Unterflansch angeschweisste Achsbockstrebe bemerkbar. Unmittelbar im Knoten betrug die Spannung bei 10° Verwindung bereits 13 kg/mm². Es sei an dieser Stelle bemerkt, dass bei anderen Wagen an dieser Stelle auch Spannungen bis zu 25 und sogar 35 kg/mm² gemessen wurden. Die Spannungserhöhung im vorderen Bereich der Messstrecke zeigt, dass der unter den Rahmen geschraubte Drehkranz auch die Beanspruchungen in ferner liegenden Bereichen beeinflusst. Die hier entstandene Spannungserhöhung – im Höchstwert auf 6 kg/mm² – deutet darauf hin, dass an dieser Stelle bei noch grösserer Verwindung Beulungen ähnlich den in [10, Bild 3] gezeigten zu erwarten sind. Frühere Untersuchungen an Fahrzeugrahmen von Trost [6] haben ähnliche Ergebnisse über die Spannungsverteilung nahe der Rahmenecken gebracht.

Anlässlich einer Vergleichsprüfung für luftbereifte Ackerwagen wurden zahlreiche Dehnungsmessungen an Ackerwagenfahrgerstellten bei Verwindungsbeanspruchung durchgeführt [7].

Diese Untersuchungen ergaben recht eindeutige Richtlinien für die Gestaltung von Knotenpunkten in verwindungsfähigen Konstruktionen. Im folgenden soll anhand einiger Beispiele der Einfluss der Knotengestalt auf die Haltbarkeit sperriger und vorwiegend auf Verwindung beanspruchter Bauteile gezeigt werden.

In Bild 9 sind eine Reihe von Eckverbindungen verwindungsfähiger Rechteckrahmen dargestellt, wie sie etwa in den Fahrgerstellten von Ackerwagen

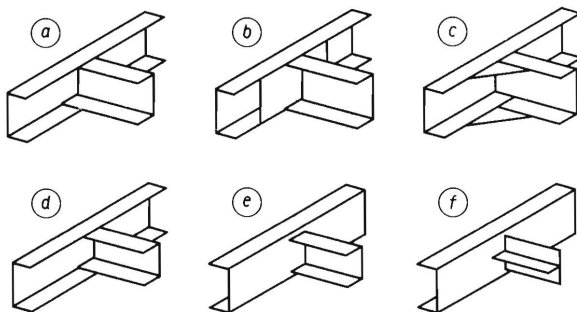


Bild 9. Eckverbindungen in zwei-stieligen Rahmen.

verwendet werden. Aus Rissbeobachtungen bei Dauerverwindungsversuchen und aus den Ergebnissen statischer Dehnungsmessungen hat sich ergeben, dass nur ein Teil dieser Knoten für verwindungsbeanspruchte Fahrgerstellte brauchbar ist. Eine Schachtelung nach Bild 9a bringt wegen Behinderung

der Querschnittsverwölbung bei Torsion zusätzliche Normalspannungen und damit Bruchgefahr. Ebenso ist die Echverbindung b falsch. Die aufgeschweisste Platte verwandelt den Längsträger an dieser Stelle in ein drehstarrs Rechteckrohr, so dass am Übergang vom U-Profil zum Rechteckrohr wegen des Steifigkeitssprunges hohe Spannungen entstehen. Rahmenecke c bringt zwar für Beanspruchungen in der Rahmenebene durch bessere Kraftumleitung Vorteile, bewirkt aber bei Verwindungsbeanspruchung eine Vergrösserung der Normalspannungen im Einspannquerschnitt des Querträgers, besonders also in der Schweissnaht zwischen Eckblech und Längsträgerflansch. Besser sind die

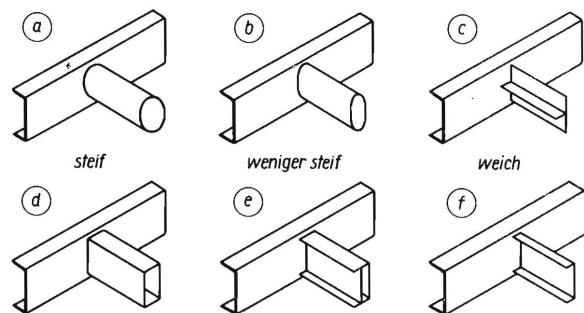


Bild 10. Möglichkeiten zur Änderung der Rahmensteifigkeit.

Eckverbindungen d und e, bei denen die Querträger nur gegen die Stege der Längsträger geschweisst sind. Allerdings sind hier, wie Bild 7 zeigte, noch Normalspannungen in den U-Flanschen der Querträger nahe der Schweissnaht wirksam. Eine gute Lösung ist in Bild 9f gezeigt, wo der Querträger ein T-Profil ist. Seine Biegesteifigkeit ist zwar geringer als die eines U-Trägers, aber bei der allgemein üblichen Ackerwagenbauweise werden nur die Längsträger durch die Nutzlast auf Biegung beansprucht. Den Querträgern fällt also lediglich die Aufgabe der Distanzhaltung zu.

Wird aus Gründen der Standsicherheit eines dreh-schemelgelenkten Ackerwagens eine bestimmte Rahmensteifigkeit gefordert [8], so kann man durch geeignete Wahl der Querträgerquerschnitte die verlangte Steifigkeit herstellen. Bild 10 zeigt die Möglichkeiten zur Erzielung jeder beliebigen Rahmensteifigkeit durch Änderung des Rahmenquerschnittes. Ein Rahmen mit Rohrquerträgern (Bild 10 a) ist wegen der Drehsteifigkeit der Rohre fast ebenso verwindungssteif wie ein Zentralrohrrahmen. Drückt man die Querträgerrohre zu ovalen Rohren zusammen (Bild 10 b), so wird der Rahmen wesentlich verwindungsweicher. Bei vollkommen gefaltetem Rohr (Bild 10 c) wäre die Weichheit eines Flach-eisens erreicht. Die im Bild dargestellte T-Profilform wäre dann so entstanden zu denken, dass man zur Erhöhung der Knicksteifigkeit an das gefaltete Rohr ein Stegblech anschweisst. In ähnlicher Weise kann man die grosse Verdrehsteifigkeit des Rechteckrohres (Bild 10 d) mildern, indem man sich den linken Steg des Rechteckrohres nach rechts bis an den rechten Steg herangerückt vorstellt. Praktisch lässt sich diese beliebig einstellbare Steifigkeit so

erzielen, dass man in ein U-Profil einen Steg in Längsrichtung einschweisst (Bild 10 e). Die grösste Weichheit wäre dann beim U-Querschnitt erreicht. Die Rahmen nach Bild 10 a und d sind aber für verwindungsfähige Fahrgestelle aus spannungstechnischen Gründen ungeeignet. Wechselverwindungsversuche an derartigen Rahmen haben ergeben, dass solche Rahmen bei normalen Verwindungsverformungen schon nach wenigen Lastwechseln in den Rohrquerträgern reissen. Die in Bild 11 gezeigte Ecke eines Rahmens wurde unter Vorverwindung von 6° etwa 60 mal mit $\pm 3^\circ$ schwingend beansprucht. Dabei platzte der vorher aufgetragene und mit Dehnlinien versehene Dehnungslack ringförmig etwa 5 cm von der Schweissnaht entfernt ab. Die Ränder dieses Ringes waren sägenförmig gezackt, was darauf zurückzuführen ist, dass in dieser Ecke besonders viele kurze Lackrisse unter 45° (Hauptspannungsrichtung bei Torsion) entstanden. Die durch den Schweissvorgang bedingte Gefügeänderung hatte an dieser Stelle die Verdreh-Schwingungsfestigkeit des Werkstoffes so weit herabgesetzt, dass hier Gefahr eines Gewaltbruches besteht [9]. Die im Bild sichtbaren Dehnlinien unter 45° zeugen von einer reinen Torsionsbeanspruchung. Ähnliche ringförmige Lack- und auch Zunderisse wurden an anderen Rechteckrahmen mit Kreisrohr- und Rechteckrohrquerträgern beobachtet. Hieraus folgt, dass Rahmenbauarten nach Bild 10 a und d für alle Konstruktionen ungeeignet sind, denen grössere Verwindungsverformungen aufgezwungen werden. Konstruktive Hinweise für die Gestaltung von Rahmen bestimmter Verwindungsteifigkeit sind in Bild 10 b und e gegeben worden. In verwindungsstarrten Rechteckrahmen wird man für Längs- und Querträger zweckmässigerweise nur Hohlprofile verwenden, damit auftretende Verwindungsbeanspruchungen von allen Rahmenträgern zu gleichen Teilen aufgenommen werden können.

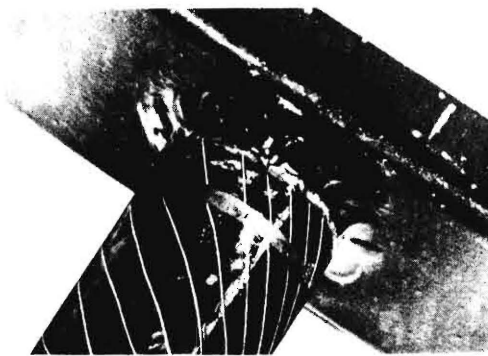


Bild 11. Ringförmiger Lackriss bei gewaltsamer Verwindung eines Rahmens mit U-Längsträgern und Rohr-Querträgern.

Auch bei der Gestaltung von Zentralträgern verwindungsfähiger Fahrgestelle sind bei Verwindungsbeanspruchung diese Gesetzmässigkeiten zu beachten (Bild 12). Die Zentralträgerbauweise ist immer nur dann günstig, wenn das Zentralrohr in der Verwindungsachse des Wagens liegt [10]. Bei Verwendung drehstarrer Rohre kann man die Bodenunebenheiten durch ein Drehgelenk im Zentralrohr aus-

gleichen. Da dieses Gelenk aber bei mangelhafter Schmierung eine Verschleissstelle ist – und es wird am Ackerwagen erfahrungsgemäss kaum geschmiert –, ist ein verdrehweicher Zentralträger in Form eines Schlitzrohres oder eines Doppel-T-Trägers vorzuziehen (Bild 12 b und k). Die Zentralträger c und d, bei denen der offene Zentralträgerquerschnitt durch unterbrochene Schweissung oder durch Aufschweissen von Blechen örtlich versteift wird, kann zwar, wie Träger d zeigt, die Biegesteifigkeit erhöhen und die Auskipppgefahr bei Biegung beseitigen, führt aber bei Verdrehbeanspruchung an den Stellen, wo der offene Träger in ein Rechteckrohr übergeht, zu erheblichen Spannungsspitzen, die mit Sicherheit Risse zur Folge haben. Zur Erhöhung der Drehsteifigkeit sei die Bauart e vorgeschlagen, bei der durch Einschweissen eines durchgehenden Blechstreifens

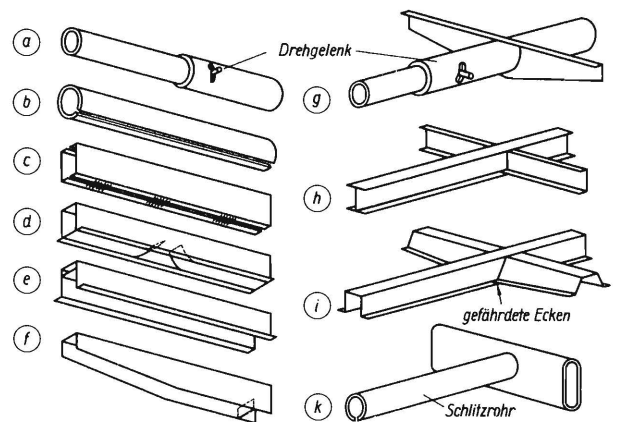


Bild 12. Zentralträgerbauweisen und Querstiellanschlüsse an Zentralträger achsschenkelgelenkter Ackerwagen.

ein schmales, aber noch verdrehfähiges Rechteckrohr im oberen Trägerteil entstanden ist. Um die Biegesteifigkeit zu erhöhen, wird man, der Bauart f entsprechend, möglichst hochflanschige Träger verwenden. Für alle verdrehweichen Zentralträger bereitet der Anschluss der Querträger erhebliche Schwierigkeiten. Im Gegensatz zum zwei-stieligen Rahmen haben hier auch die Querträger einen Teil der Nutzlast zu tragen, sodass ihr Anschluss an den Zentralträger der auftretenden Biegebeanspruchung anzupassen ist. Werden aber, wie die Rahmenknoten h und i zeigen, die Querträger mit der ganzen Stirnseite am Zentralträger angeschweisst, so besteht bei Verwindungsbeanspruchung durch Verwölbungsbehinderung besonders in den Flansch-Schweissnähten Rissgefahr. Beim Zentralträggerahmen h lässt sich diese Rissgefahr dadurch wesentlich herabmildern, dass die Querträger nur mit dem Steg des Zentralträgers verschweisst werden. Die gefährlichen Ecken des Rahmenknotens i sind nur durch Verwendung anderer Querträgerprofile, etwa durch T-Träger, zu vermeiden. Die Knotenverbindung k stellt den Anschluss eines als Langbaum verwendeten Schlitzrohres an einen drehstarrten Achsträger dar. Wird das Fahrgestell verwunden, so entsteht in den Einspannquerschnitten des Schlitzrohres eine Normalspannungsverteilung nach Bild 2, die durch Verwölbungsbehinderung hervorgerufen wird. Bei

oftmals wiederholten grösseren Verwindungen werden hier nahe der Schweissnähte Risse entstehen, die vom Schlitz ausgehen.

Wie man die Kräfte von Strebenböcken in Rahmen einleiten soll, wird an einigen Beispielen in Bild 13 gezeigt. Es ist falsch, die Kraft nur in einem Teil des Profils, etwa in den Unterflansch, einzuleiten, besonders nicht bei kleinen Wandstärken der Rahmenträger (Bild 13 a und b), da die in Strebenrichtung wirkende Kraft den Unterflansch des Rahmenträgers verbiegt und durch Einleitung der Kraft im Schwer-

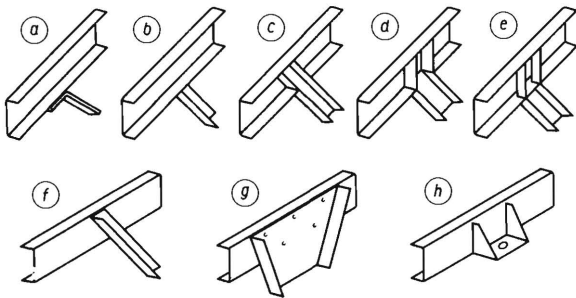


Bild 13. Krafteinleitungen in U-Träger.

punkt (nicht im Schubpunkt) des U-Trägerquerschnittes bei Biegebeanspruchung eine zusätzliche Torsion hervorruft. Ausserdem stellt der Strebenanschluss eine örtliche Versteifung des Unterflansches dar, die bei Verwindungsbeanspruchung den U-Träger an der Querschnittsverwölbung behindert. Bei den Knoten c, d und e wird die Kraft auch in den Oberflansch des Längsträgers eingeleitet. Daher ist diese Krafteinleitung für stationäre Rahmengestelle besser geeignet als die in a und b gezeigte.

Bei verwindungsbeanspruchten Fahrgestellen kommt zusätzlich eine Behinderung der Querschnittsverwölbung auch in den Oberflansch. Bei Knoten c ist diese Behinderung sehr gross, sodass die Schweissnähte bzw. die unmittelbar benachbarten Längsträgerquerschnitte hoch beansprucht werden. Durch die senkrechte Anordnung der parallelen Stützbleche in Knoten d kann sich der Oberflansch schon etwas freier verwölben. Eine weitere Verbesserung in Bezug auf Verwindungsbeanspruchung stellt der Knoten e dar, bei dem die Spannungen im Oberflansch noch dadurch abgebaut werden, dass die Stützbleche nicht mit dem Steg des Längsträgers verschweisst

sind. Eine einwandfreie Krafteinleitung zeigt der Knoten f. Hier wird die Kraft im Querkraftmittelpunkt (= Schubmittelpunkt) eingeleitet, sodass bei Biegebeanspruchung keine zusätzlichen Torsionsspannungen entstehen und sich ausserdem alle Querschnitte des Längsstieles bei Verdrehungsbeanspruchung frei verwölben können. In gleicher Weise würde man

wangenähnliche Bauteile nach Knoten g oder Konsole (Knoten h) an die Stege von U-Trägern anzubringen haben.

Eine besondere Sorgfalt erfordert die Gestaltung der verwindungsbeanspruchten Knotenverbindungen zwischen Achsen und Achsböcken von Fahrgestellen. Grosse Verdrehwinkel können von den vielfach üblichen drehstarrten Rohrachsen oder Vierkantachsen nicht aufgenommen werden. Vielmehr zwingen solche Achsen den Achsbockstreben unter Umständen so hohe zusätzliche Zug- oder Druckbeanspruchungen auf, dass Risse nach Bild 14 a, b und e entstehen. Die Schweissnähte zwischen Achse und Achsplatte liegen im spitzen Winkel und haben wenig Haltbarkeit, sodass das Bremsmoment der Achse weder vom Konsol noch vom Flacheisenachsbock aufgenommen werden kann. Im Knoten b können sich die Querschnitte der Achsbockstreben bei Verwindungsbeanspruchung nicht verwölben, sodass für die Schweissnähte an der Anschlussplatte Rissgefahr besteht. Die Schweissnähte zwischen dem U-förmigen Achskonsol und der Achse liegen quer zur Achsrichtung und schwächen den Rohrquerschnitt gerade an den Stellen höchster Beanspruchung durch Einbrandkerben. Eine aufgeschweisste Platte nach Bild 14 c bringt keinen Abbau der Spannungen, sondern verlagert nur die Rissgefahr des Knotens b an eine andere Stelle. Man kann die Bruchgefahr vermeiden, wenn man entweder ein Weichgummipolster zwischen Achsbock und Achse schaltet (Bild 14 d) oder die Achse aus einem offenen Profilträger herstellt. Auch bei wangenartigen Achsböcken (Bild 14 e) sind die nahe dem Konsol gelegenen Querschnitte wegen der starren Schweissverbindung an einer Querschnittsverwölbung behindert, sodass

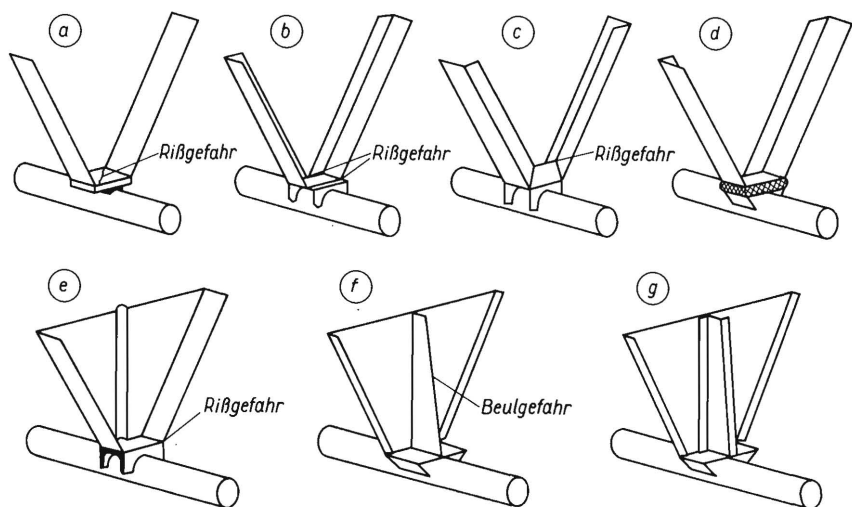


Bild 14. Verbindung zwischen Achsbock und Rohrachse an Ackerwagen

auch hier Rissgefahr besteht. Die Sicke in Wangenmitte schützt den Knoten auch nicht genügend gegen Stossbeanspruchungen quer zur Fahrtrichtung. Eine wesentlich bessere Knotenverbindung stellt Bild 14f dar. Hier können sich die Wangenflansche frei verwölben. Ausserdem wird der Knoten durch das mittlere Stegblech gegen axiale Kräfte stabilisiert. Die

an der freien Kante des Stegbleches bestehende Beulgefahr kann noch durch eine z-förmige Abkantung (Bild 14 g) beseitigt werden. Die in den Bildern 14 d, f und g gezeigten Achskonsole sind durch Längsschweißungen mit den Achsen verbunden, sodass damit auch die Achsbruchgefahr beseitigt ist, die bei der in Bild 14 b, c und e gezeigten Konsol-ausführung besteht.

Wie bereits in [10] näher beschrieben, beeinträchtigen räumliche Versteifungen die Haltbarkeit verwindungsfähiger Fahrgestelle sehr stark. Dies gilt auch für räumliche Strebenböcke zur Befestigung der Anhängerkupplung von Ackerwagen (Bild 15 a).

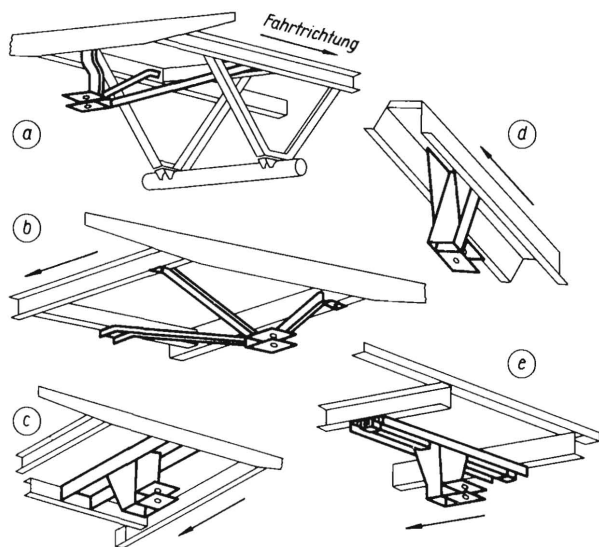


Bild 15. Befestigung der Anhängerkupplung in verwindungsbeanspruchten Ackerwagen-Fahrgestellen.

Derartige Streben reißen erfahrungsgemäss nach wenigen tausend Verwindungen nahe ihrer Anschlussstellen am Rahmen und am hinteren Stirnblech durch ständig wechselnde Zug- und Druckbeanspruchungen, ohne dass äussere Kräfte am Kupplungsmaul zusätzlich angreifen. Man kann eine Verbesserung der Haltbarkeit eines solchen Dreieckes dadurch erzielen, indem man die Streben nach der in Bild 15 b gezeigten Art anordnet, wobei die Streben mit dem Fahrgestellrahmen verschraubt werden müssen, aber jeweils nur mit einer Schraube. Ein haltbarer Kupplungsanschluss ist in Bild 15 c dargestellt. Hier wird ein torsionssteifer Kasten an den Steg eines zwischen Stirnblech und hinterem Rahmenquerträger angeordneten U-Profils angeschweisst. Kasten und U-Träger können die Kräfte am Kupplungsmaul in jeder Richtung aufnehmen und werden im übrigen durch die Wagenverwindungen nicht beansprucht. Eine ähnliche konstruktive Lösung ergibt sich für den Kupplungsanschluss bei Zentralträgerfahrgestellen (Bild 15 d). Eine recht interessante Konstruktion des Kupplungsbockes ist in Bild 15 e gezeigt⁴⁾. Der drehstarre konische Kasten ist an einem an den Rahmenlängsträgern befestigten U-Träger und einem darin eingelegten Torsionsstab angebracht. Zug- und Druckkräfte in Fahrtrichtung werden von dem

4) Anhängerkupplung des 3 t-Imbert-Ackerwagens.

sehr hochstegigen U-Profil als Biegebeanspruchung aufgenommen. Der im U-Profil eingebettete Torsionsstab nimmt die Schwenkbewegung der Kupplungsklaue als Verdrehbeanspruchung auf, sodass auch sehr harte Stösse beim Anfahren oder Auflaufen federnd in den Rahmen eingeleitet werden.

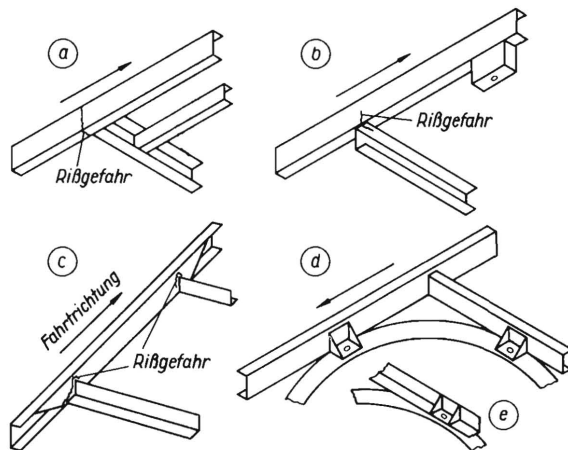


Bild 16. Anschlüsse zwischen Rahmen und Drehkranz verwindungsbeanspruchter Fahrgestelle. d und e Kräfteinleitung im Querkraftmittelpunkt.

Der Drehkranz, der zur Vermeidung von Verklebungen ein verwindungsstarrs Bauteil sein muss, versteift den vorderen Teil des Fahrgestellrahmens so sehr, dass oft schon nach einigen tausend normalen Verwindungen des Fahrgestells Risse in den Längsstielen unmittelbar hinter dem Drehkranz entstehen (Bild 16 a und b) oder die Querträger in den Knoten aus den Längsträgern herausreißen (Bild 16 c). Solche Risse sind darauf zurückzuführen, dass der Anschluss des Drehkranzes an den Rahmen zu starr ist und damit der Übergang vom steifen Rahmenvorderteil in den verwindungsweicheeren Rahmenteil zu sprunghaft ist. Die Verbindung zwischen Rahmen und Drehkranz muss zwar kraftschlüssig sein, braucht aber deshalb nicht absolut starr zu sein. Wie Bild 16 d und e zeigt, genügen 4 Schraubenverbindungen zwischen Rahmen und Drehkranz, wobei man die in den Bildern 9 e und 13 vorgeschlagenen Rahmen- und Konsolverbindungen anwenden sollte. Beim U-Profilträger wird man taschenförmige Konsole an die Stege so anschweisst, dass der Anschlussbolzen etwa im Querkraftmittelpunkt angreift (Bild 16 d). Sind die Querträger Winkelprofile, so genügt es, dreieckige Stegbleche (Bild 16 e) in den Winkel einzuschweisst, um eine haltbare Kräfteinleitungsstelle zu schaffen.

Grundsätzlich sind Schweißnähte so anzuordnen, dass sie nicht an Stellen höchster Beanspruchung liegen [11, 12]. Man wird also auch an Knotenpunkten bestrebt sein, die Schweißnähte aus den Ecken herauszuziehen. Hierfür sind von W. Kloth [11] eine Reihe von Vorschlägen gemacht worden, in denen u.a. eine Blechscheibe auf einem Rohr so aufgeschweisst ist, dass der Lochrand der Blechscheibe ausgestülpt und erst am Ende der Stulpe mit dem Rohr verschweisst ist. Derartige Ausstülpungen können die Schweißnaht erheblich entlasten.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die grössten Beanspruchungen in Knotenpunkten und in Krafterleitungsstellen auftreten. Die Voraussetzung für die Beurteilung der Haltbarkeit einer Knotenverbindung ist die Kenntnis des Verformungsmechanismus. Aus ihm kann man in vielen Fällen die richtige Gestalt der Knotenverbindung vorausbestimmen.

Schrifttum

- [1] C. Weber: Torsion und Biegung durch eine Endquerlast (Schubmittelpunkt). ZAMM (1924) S. 334, ZAMM (1926) S. 85.
- [2] E. Trefftz: Schubmittelpunkt. ZAMM (1935) S. 220.
- [3] C. Weber: Die Lehre von der Drehungssteifigkeit. Forsch. Ing. Wes. (1921) 249 und nach einer im W.S. 1950/51 an der T.H. Braunschweig gehaltenen Vortragsreihe über Querkraftmittelpunkt und Drehpunkt.
- [4] O. Dietrich und E. Lehr: Das Dehnlinienverfahren. Z. VDI 76 (1932) 973/82.

- [5] F. Röttscher und R. Jaschke: Dehnungsmessungen und ihre Auswertung. Berlin 1939.
- [6] W. Trost: Spannungen und Werkstoffausnutzung in Fahrzeugrahmen. Z. VDI 87 (1943) 467/72.
- [7] W. Kloth, Th. Stoppel und W. Bergmann: Ackerwagen, Gesetze des Fahrens und der Konstruktion. Z. VDI. 93 (1951) erscheint demnächst.
- [8] Th. Stoppel: Vergleichsprüfung luftbereifter Ackerwagen. Neue Mitt. f. d. Landw. 5 (1950) H. 24 und 43 bis 47.
- [9] A. Thum und K. Federn: Spannungszustand und Bruchausbildung. Berlin 1939. S. 46.
- [10] W. Bergmann: Steifigkeit sperriger Bauteile. Aufsatz a.a.O. dieses Heftes.
- [11] W. Kloth: Leichtbaufibel. München-Wolfratshausen, 1947.
- [12] A. Thum und A. Erker: Gestaltfestigkeit von Schweissverbindungen. Berlin 1942.

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

Anschrift des Verfassers: Dipl.-Ing. Walter Bergmann, (20b) Braunschweig, Forschungsanstalt für Landwirtschaft

MODELLE ALS HILFSMITTEL BEI DER NEUFORMUNG VON LANDMASCHINEN

Von G.W. Brenner

Modelle sind im vorliegenden Sinn masstäbliche Verkleinerungen von grossen Ausführungsformen und werden in der Technik heute vielfach verwendet.

Sehr bekannt für den Ingenieur sind die Messungen der Strömungsforschung geworden an Modellen von Flugzeugen, Schiffen und Kraftfahrzeugen, im Wind- oder Wasserkanal zum Studium der Strömungswiderstände, zur Festlegung von Flügelprofilen usw. Hier hat der Modellbau einen wesentlichen Beitrag zum Auffinden neuer Gesetze gebracht, und es sind mathematische Berechnungsverfahren entwickelt worden, um das im Modell Gefundene in die Grossausführung übertragen zu können (*Prandtl*[1]).

Auch im Brücken- und Kranbau sowie bei Wasserbauanlagen z.B. Talsperren und in der Architektur sind Modelle üblich. Hier handelt es sich allerdings meist um Anschauungsmodelle.

Aber auch verwickelte Festigkeits-Untersuchungen, besonders an Fachwerken und Schalenbaukörpern, werden heute häufig an Modellen durchgeführt. Besonders bekannt geworden sind die diesbezüglichen Arbeiten von *Kamm* [2, 3].

Den vorerwähnten Beispielen ist gemeinsam, dass man durch ein Modell die Kosten für die grosse Aus-

führung verkleinert oder ganz erspart und gewisse Messungen und Studien an der Modellausführung besser vornehmen kann als an der grossen.

Auch bei der Neuformung von Landmaschinen kann man mit gutem Nutzeffekt Modelle verwenden. Der Verfasser hat mit Modellen im Masstab 1 : 5 und 1 : 10 in den letzten Jahren bei der Durchführung verschiedener neuer Landmaschinen-Konstruktionen so gute Erfahrungen gemacht, dass es interessant sein mag, zu hören, wie die Anwendung erfolgt, worin der Wert derartiger Modelle liegt und wie vorzugehen ist.

Es wird natürlich auch im Landmaschinenbau Fragen geben, wo man mit einer Modellanfertigung wenig weiterkommt. Wenn man sich z.B. über den Schnittvorgang eines neuen Häckselmessers Gedanken macht oder die Wölbung eines Pflug-Streichbrettes in einer bestimmten Bodenart studieren will, oder wenn man einen Dreschvorgang untersucht, wird es schwer sein, durch den Bau eines Modelles die Sache besser zu durchleuchten.

Wenn aber ganz neue Bauformen geschaffen werden sollen, überhaupt bei allen Fragen der baulichen Anordnung, der Steifigkeit, der Durchbildung