

Aber nicht nur bei kleineren Konstruktionsteilen hat der Kunststoff in der Landtechnik Eingang gefunden, sondern auch bei großen Formstücken, wie der Förderkanal eines englischen Feldhäckslers [6] beweist, dessen Wände aus glasfaserverstärktem Polyesterharz bestehen (Bild 16). Dieser Kunststoff ist aufgrund seiner technologischen Eigenschaften (Korrosionsunempfindlichkeit, Elastizität, einfacher Formbarkeit) für solche Zwecke ein besserer Werkstoff als das bisher verwendete Stahlblech.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß sich nicht nur im allgemeinen Maschinenbau sondern ganz besonders im Landmaschinenbau für die Kunststoffe eine Vielfalt von Anwendungsmöglichkeiten eröffnen, bei denen sie besser geeignet sind als die seither verwendeten Werkstoffe. Vorbedingung ist allerdings die klare Erkenntnis, daß die Kunststoffe in Konstruktion und Betrieb anderen Gesetzmäßigkeiten folgen als die konventionellen Werkstoffe, und daß man ihre besonderen Eigenarten bei der Formgebung, der Bearbeitung usw. beachtet.

#### Schrifttum

- [1] *Jakobi, H. R.*: Neue Erkenntnisse über Gleiteigenschaften von Polyamiden. *Kunststoffe* 47 (1957) H. 5, S. 234/39
- [2] *Mäkelt, H.*: Die Anforderungen an Gleitlager, insbesondere aus Kunststoffen. *Z. VDI* 94 (1952) Nr. 5, S. 138/145, Zahlentafel 1.

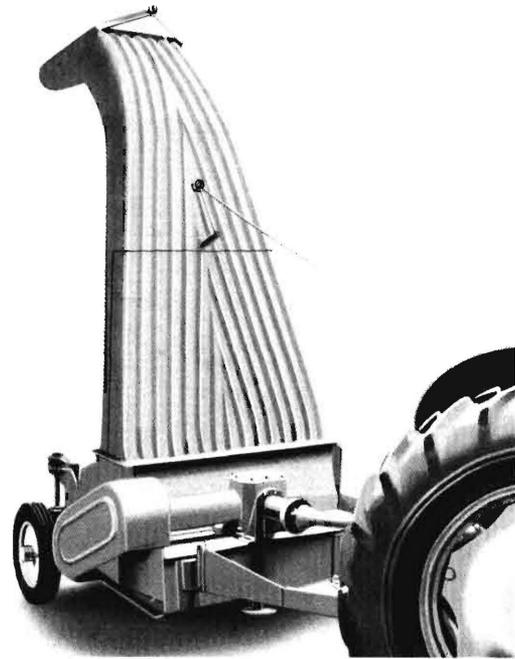


Bild 16. Förderkanal eines englischen Feldhäckslers aus glasfaserverstärktem Polyesterharz.

- [3] *Weber, W.*: Kunststoffgetränkte Gleitlagerbaustoffe. *Konstruktion* 8 (1956) H. 12, S. 507/509.
- [4] *Jakobi, H. R.*: Maschinenelemente aus thermoplastischen Kunststoffen. *VDI-Z.* 98 (1956) Nr. 12, S. 514/525.
- [5] DIN 51 211, Prüfung von Drähten, Hin- und Herbiegeversuch. 2. Ausgabe November 1934.
- [6] „Farm Implement and Machinery Review“, London Nov. 1957.

Institut für landtechnische Grundlagenforschung  
der Forschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode  
Anschrift des Verfassers: Dr.-Ing. Ruprecht Finkenzeller, Mannheim

## Spannungs- und Verformungsfelder als Grundlage der festigkeitsgerechten Gestaltung von Landmaschinen

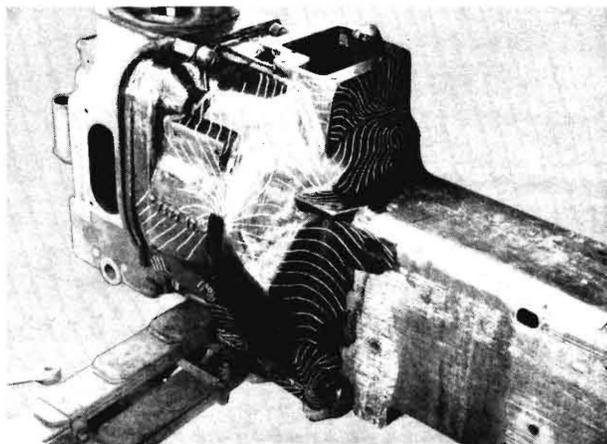
Von Willi Kloth

Wir alle haben noch auf der Schule gelernt: „man nehme die Kraft, dividiere sie durch den Querschnitt oder das Widerstandsmoment und erhält die Spannung“. Wenn sie kleiner ist als die für den benutzten Werkstoff „zulässige“ Spannung, so hält die Maschine bzw. das betreffende Maschinenteil.

Dieses Rezept war ganz brauchbar, bis durch die steigenden Drehzahlen und Beanspruchungen bereits weit unter der Streckgrenze des Werkstoffes Brüche auftraten. Sie wurden auf eine Ermüdung des Werkstoffes zurückgeführt und „Dauerbrüche“ genannt. *Professor Thum* in Darmstadt stellte fest, daß ihr Auftreten von der Gestalt des betroffenen Bauteiles abhängt und prägte den Ausdruck „Ge-

staltfestigkeit“. Er sagte, daß der Werkstoff in einer bestimmten Gestalt eine andere Festigkeit habe, als man beim Zerreißversuch mit der genormten Probe feststelle. Heute drückt man diese Erscheinung etwas anders aus, indem man sagt, daß die Spannungen, denen die Werkstoffe in der Gestalt eines Maschinenteiles ausgesetzt sind, andere sind, als die, die sich bei der einfachen Berechnung ergeben.

Damit ist zum Ausdruck gebracht, daß man die wirkliche Spannung an den einzelnen Punkten der Maschinenteile kennen muß. Leider kann man sie nicht durch so einfache Berechnungen, wie man sie früher durchführte, bestimmen. Die „Spannungs-



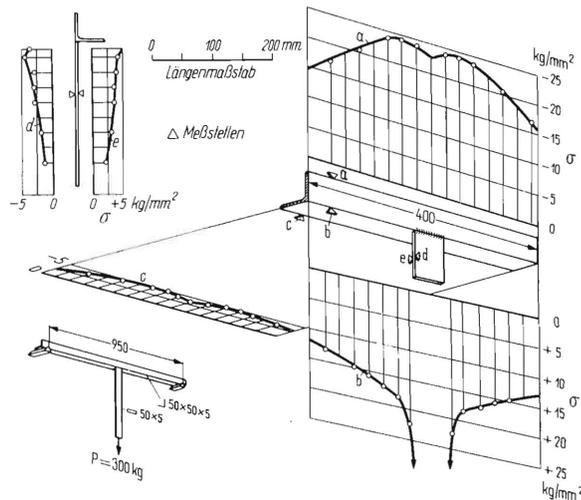
**Bild 1.** Dehnungslinienfeld auf dem Motorgehäuse eines Schleppers. Das Feld ist recht verwickelt und wird von jeder Unstetigkeit der Gestalt beeinflusst. Eine rechnerische Ermittlung der Dehnungen, und damit auch der Spannungen, ist aussichtslos.

felder", d.h. die Gesamtheit der Spannungen an einem belasteten Maschinenteil, sind recht verwickelt und stellen, wenn man sie zeichnerisch als senkrechte Vektoren über der Oberfläche des Werkstückes darstellt, ein oft wild zerklüftetes Gebirge dar. Nach dem heutigen Stand der Erkenntnisse ist es auch ziemlich hoffnungslos, sie später einmal nach allgemeingültigen Formeln berechnen zu können, da die vielartige Gestalt der praktisch vorkommenden Maschinenteile sich nicht in einfache Formeln pressen läßt. Dies geht nur bei ganz einfachen Formen, z.B. den Kerben. Man versteht darunter scharfe Rillen oder Ecken, von denen der Konstrukteur heute weiß, daß er sie vermeiden muß. Die hier auftretenden hohen Spannungen („Spannungsspitzen,“) berücksichtigt man durch „Formzahlen“, die angeben, wieviel Mal die Spannung hier größer ist als die nach den einfachen Methoden für das ungekerbte Werkstück errechnete „Nennspannung“. Die „Kerbe“ ist aber nur ein ganz spezieller Fall von den vielfältigen Einflüssen der Gestalt auf die Spannung. Man wird das sofort einsehen, wenn man sich die Maschinenteile aus Gummi vorstellt. Dann wird die Dehnung durch jede Rippe, jede Verstärkung oder Schwächung beeinflusst werden. Dehnung und Spannung sind nach dem *Hooke* schen Gesetz ja proportional, nur sind beim Stahl die Dehnungen so klein, daß man sie mit dem bloßen Auge nicht sehen kann. Aber man kann sie unschwer sichtbar machen. Wir verwenden hierzu hauptsächlich das bekannte Reißlackverfahren, das die Richtung der Dehnungen angibt (Bild 1) <sup>1)</sup>, und messen ihre Größe mit Feindehnungsmessern aus.

Es wurde vorhin der Ausdruck „Spannungsspitze“ gebraucht. Man versteht darunter eine hohe Spannung, die spitzentartig aus dem Spannungsfeld herausragt und sich oft nur über ganz kleine Bereiche

<sup>1)</sup> den meisten Bildern liegen Messungen von D. Spangenberg zu Grunde.

der Oberfläche erstreckt (Bild 2). Bei ruhiger, gleichbleibender Beanspruchung, wie sie etwa im Hochbau vorliegt, sind Spannungsspitzen nicht gefährlich, auch wenn sie über der Streckgrenze liegen. Wenn das Material an einer solchen Stelle fließt, werden die Spannungsspitzen abgebaut, weil durch das örtliche Fließen auch benachbarte Werkstoffteilchen zum Tragen herangezogen werden. Wenn dieses Bauteil aber schnellwechselnden Beanspruchungen derselben Größe und Verteilung ausgesetzt ist, so findet dieses Fließen und ein entsprechender Spannungsabbau nicht statt, sondern es entsteht an dieser Stelle ein Dauerbruch. Zunächst ist er nur klein, aber er dehnt sich durch die Kerbwirkung bald mehr und mehr aus, bis das Teil schließlich in dem verbleibenden Restquerschnitt in gewöhnlicher Weise bricht. Man erkennt solche Dauerbrüche an dem muschelförmigen, jahresringartigen Aussehen der Bruchfläche. Die Ursache von Dauerbrüchen liegt also weniger im Werkstoff begründet als in konstruktiven Mängeln, die zum Auftreten von Spannungsspitzen führen. Wie man Spannungsspitzen vermeiden kann, wird später erörtert werden.

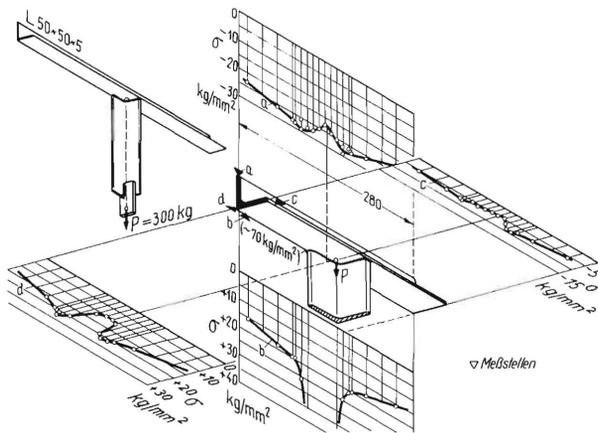


**Bild 2.** Spannungsspitzen in den Ecken eines Flacheisenanschlusses an ein biegebeanspruchtes Winkelleisen. Hier wird ein Dauerbruch ansetzen. Bei ruhiger Belastung dagegen werden die Spitzen durch ein örtliches Fließen des Materials abgebaut.

Wenn ein Ackerwagen bei strengem Frost über ein holperiges Pflaster fährt, tritt mitunter eine andere Art von Brüchen auf, die gefürchteten „Sprödbrüche“. Ohne vorhergehende Verbiegung bricht ein Achsschenkel oder ein anderes Teil plötzlich glasartig ab. Ein solcher Bruch hat verschiedene Ursachen:

1. ein alterungsempfindlicher Werkstoff, wie es z. B. gewisse Arten von Thomas-Stahl sind,
2. eine stoßartige Beanspruchung,
3. eine niedrige Temperatur und
4. ein mehrachsiger Zugspannungszustand.

Der Konstrukteur kann die Ursachen nach Punkt 2 und 3 nicht beeinflussen. Um Punkt 1 zu vermeiden,



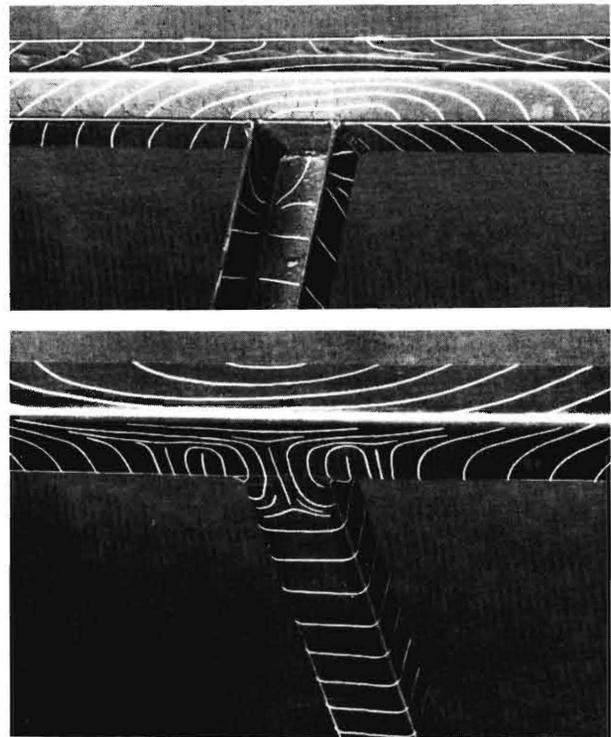
**Bild 3.** Spannungsspitzen in den Ecken einer Verbindung von Winkelisen.

kann er einen alterungs-unempfindlichen Werkstoff verwenden, wie er in DIN 17100 angegeben ist. Auch Punkt 4 kann er beeinflussen. Beim ZerreiBversuch ist die Zugspannung einachsig, da nur in einer Richtung gezogen wird. Würde man auch quer zum Zugstab ziehen, wäre sie zweiachsig. Es treten bei den verwickelten Spannungsfeldern aber auch Fälle auf, wo auch in der dritten Raumrichtung gezogen wird. Dann kann kein Fließen mehr eintreten (vor allem nicht bei Stößen und niedriger Temperatur), und das Teil bricht spröde ab. Ob ein Spannungszustand ein- oder mehrachsig ist, kann man ebenfalls aus den Spannungsfeldern ablesen, wenn gleich hier allgemeine Regeln für eine Abhilfe noch nicht so einfach anzugeben sind.

Bei einem Teil, das sich bei geringem Gewicht unter einer Belastung nur wenig elastisch verformen soll, muß man verlangen, daß alle Werkstoffteile gleichmäßig an der elastischen Verformung beteiligt sind. Das Spannungsfeld muß also möglichst gleichmäßig sein. Falls eine plastische Verformung, z.B. ein Verbiegen, vermieden werden soll, so müssen hohe Schubspannungen, vor allem Schubspannungskonzentrationen, vermieden werden. Auch hierüber gibt das Spannungsfeld Auskunft.

Die heutige Methode, nämlich die im einachsigen, statischen ZerreiBversuch ermittelten Festigkeitszahlen einer Konstruktion zugrunde zu legen, ist also recht primitiv, wenn man in einem mehrachsigen Spannungsfeld etwa die Dauerfestigkeit beurteilen will und gar noch die an der gefährdeten Stelle wirklich herrschende Spannung nicht kennt. Der Konstrukteur ist hier zurzeit noch in einer unangenehmen Lage, weil man ihm auf Grund der neuen Erkenntnisse noch kein so einfaches System für die Beurteilung der Festigkeit angeben kann, wie es nach den Angaben von Bach gelehrt wird. Man kann aber doch nach den sehr zahlreichen Messungen schon manche praktisch brauchbaren Arbeitsregeln angeben.

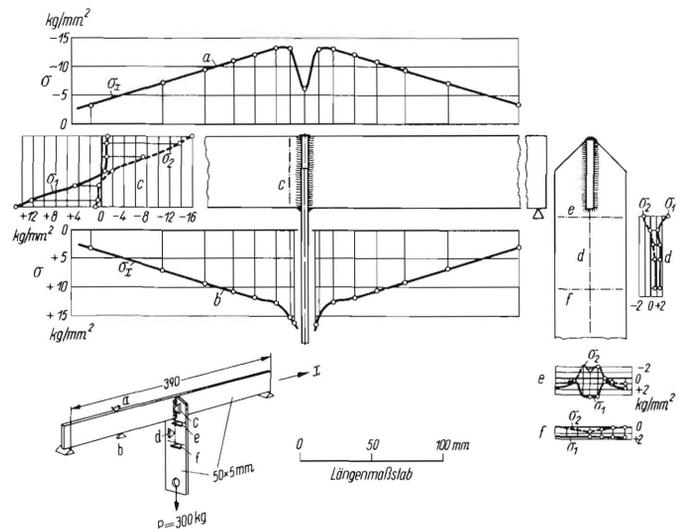
Die erwähnten Spannungsfelder bilden somit ein Kernstück der neuen Betrachtungsweise. Man



**Bild 4.** Die Verformungsbehinderung der Zugfasern des Biegestabes erkennt man schon daraus, dass die Dehnungslinien an der Unter- (Zug-)seite des Biegestabes in den oberen Teil des Zugstabes übergreifen.

kann sie zwar nicht berechnen, aber man kann sich ein Gefühl für deren Beurteilung verschaffen, wenn man zahlreiche Spannungsfelder betrachtet. Der Anfang 1960 im *Stahleisen-Verlag* in Düsseldorf erscheinende „Atlas von Spannungsfeldern in technischen Bauteilen“ wird das erleichtern; auch in früheren Heften der „Grundlagen der Landtechnik“ sind zahlreiche Spannungsfelder wiedergegeben.

Man kann sich auch durch einfache Überlegung (Gummi!) ein Bild verschaffen, wie sich ein Bauteil verformen wird und wie danach voraussichtlich

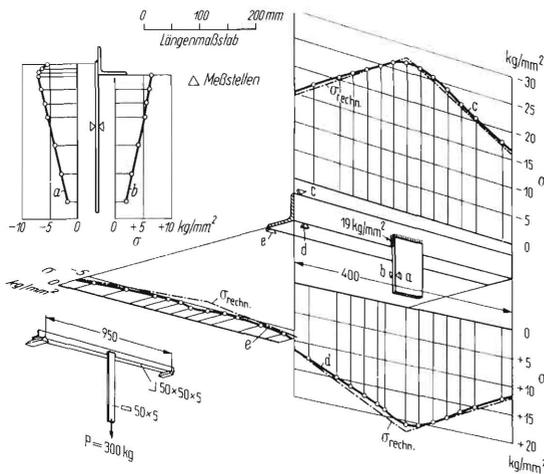


**Bild 5.** Verringerung der Spannungsspitzen dadurch, dass man den Zugstab um 90° gedreht, also die Behinderung der Zugdehnung des Biegestabes verringert hat.

das Spannungsfeld aussehen wird. Jede Unstetigkeit in der Verformung durch verschiedenartige Querschnitte, Rippen, Löcher usw. bringt eine Unstetigkeit der Spannung, meistens auch eine Span-

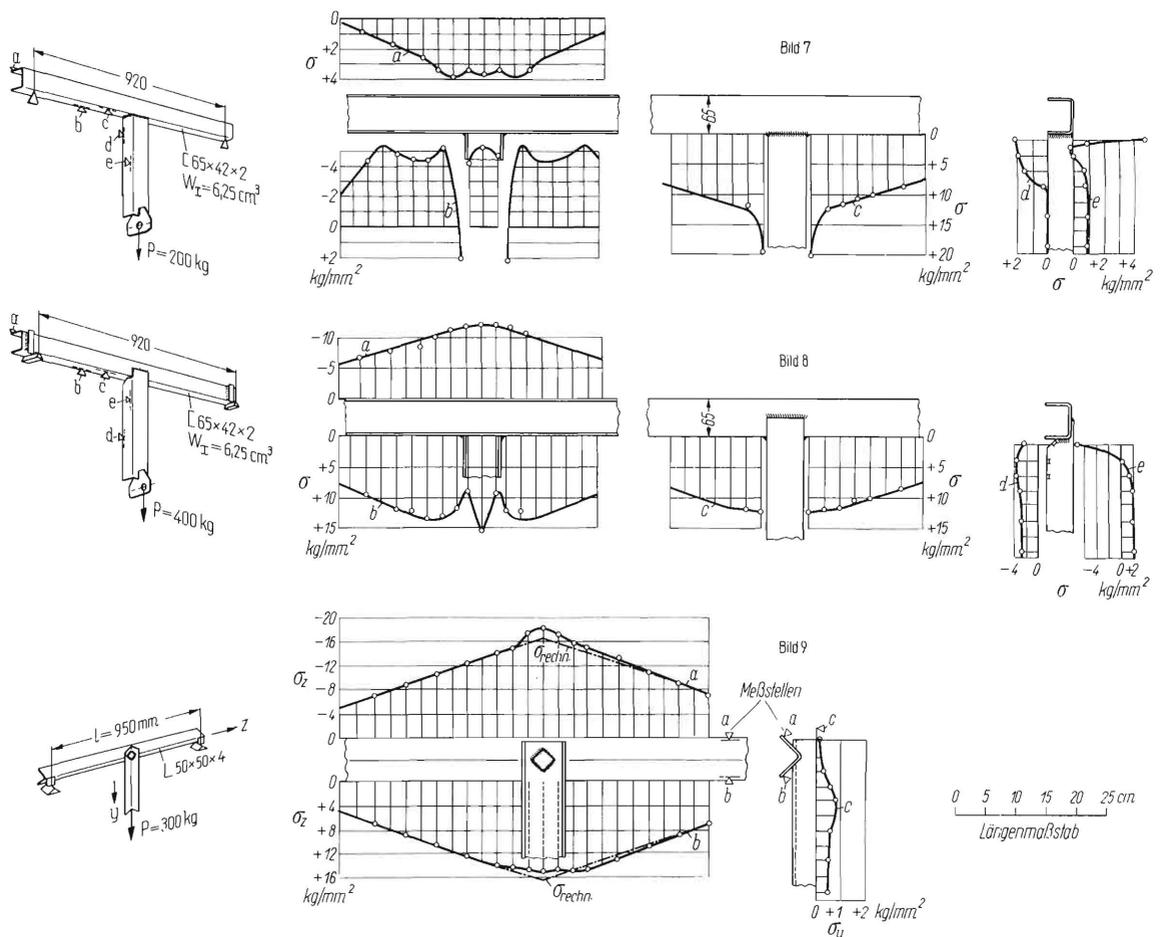
nungsspitze, mit sich. Daher lautet eine Arbeitsregel: „Körper gleicher Steifigkeit anstreben“. Vorher muß man sich darüber klar geworden sein, welche Anforderungen an das Bauteil gestellt werden<sup>2)</sup>. Daraus ergeben sich folgende Forderungen an das Spannungsfeld bzw. den Werkstoff:

1. soll das Bauteil bei statischer Belastung nicht brechen: dann keine hohen Normalspannungen, aber Werkstoff mit hoher Zugfestigkeit,
2. soll es bei wechselnder Belastung nicht brechen (Dauerbruch): keine hohen Spannungsspitzen, selbst nicht in kleinsten Bereichen (hochfeste Werkstoffe bringen keine großen Vorteile),
3. soll es nicht spröde brechen: dann Punkt 1 bis 4 (s. oben) beachten,
4. soll das Bauteil sich wenig elastisch verformen: dann gleichmäßiges Spannungsfeld anstreben. (Vom Werkstoff her kann man die elastische Verformung nicht beeinflussen, da der E-Modul für



**Bild 6.** Ein Vermeiden der Spannungsspitzen ist auch dadurch möglich, dass man den Anschluss in die neutrale Zone legt. Dort kann keine Verformungsbehinderung eintreten, da keine Zugdehnung vorhanden ist.

<sup>2)</sup> vergl. auch Kloth, Leichtbaufibel. Verlag Neureuter, Wolfartshausen.



**Bild 7.** Hohe Spannungsspitzen in den Ecken einer Verbindung aus U-Profilen. Der Anschluss ist noch besonders ungünstig, weil Kräfteinleitung und Abstützung in der Stegebene erfolgen.

**Bild 8.** Keine Spannungsspitzen, da das Stegblech des Zugstabes in der neutralen Zone des Biegestabes verschweisst ist. Ausserdem ist günstig, dass der Biegestab in der Ebene des Schubmittelpunktes abgestützt ist, so dass keine zusätzlichen Verdrehbeanspruchungen hineinkommen.

**Bild 9.** Eine überdeckgestellte Verbindung aus Winkeleisen, die recht günstig ist, da der Anschluss in der neutralen Zone erfolgt, da der Lastangriff in der Schwerachse des Zugstabes erfolgt und auf die Schubmittelpunktschwerachse des Biegestabes trifft. Ausserdem hat das L-Profil in dieser Lage ein größeres Widerstandsmoment.

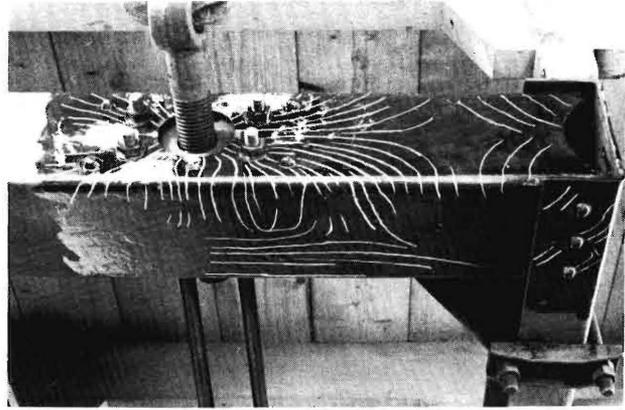
alle Stähle etwa gleich ist. Die Grenze für die bleibende Verformung (Streckgrenze) liegt jedoch bei hochfesten Werkstoffen höher.)

5. soll es sich nicht plastisch verformen: dann hohe Schubspannungen vermeiden. (Aus dem Spannungsfeld bestimmt man die Schubspannung mit dem Mohrschen Kreis, oder rechnerisch als halbe Differenz der Normalspannungen. Vom Werkstoff her wird man die Bruchdehnung beachten, die bei hochfesten Werkstoffen kleiner ist als bei solchen mit niedriger Festigkeit. Bei ersteren besteht jedoch die Gefahr, daß nach kleiner Verformung die Trennfestigkeit erreicht wird, also das Teil bricht.)

Man sieht, daß man je nach den Anforderungen ganz verschiedene Ansprüche an das Spannungsfeld und an die Eigenschaften der Werkstoffe stellen muß.

Um die heute so gefährlichen Dauerbrüche zu vermeiden, muß man die Konstruktion zunächst von Spannungsspitzen bereinigen. Wenn das geschehen ist, kann man die Spannung nach den einfachen Gesetzen der Festigkeitslehre berechnen. Zum Vermeiden von Spannungsspitzen muß man schroffe Übergänge im Querschnitt vermeiden. Schroffe Übergänge in der Steifigkeit entstehen auch, wenn man bei verdrehbeanspruchten Bauteilen, z. B. bei Fahrzeugrahmen, ein verwindungssteifes Hohlprofil (Rohr) mit einem verwindungsweichen offenen Profil (z. B. U-Profil) verbindet, oder ein (offenes) U-Profil durch ein vor die Flanschen geschweißtes Blech stellenweise in ein Rohr verwandelt. Wenn man ein U-Profil verwindet, dann wollen sich die Flansche in Achsrichtung verschieben<sup>3)</sup>. Wenn man sie daran hindert (durch gegengeschweißte Platte oder kastenförmigen steifen Knotenpunkt), treten durch die Verformungsbehinderung hohe Spannungen auf. Eine Verformungsbehinderung entsteht auch, wenn man an ein biegebeanspruchtes Profil senkrecht dazu ein anderes anschweißt (Bild 2 und 3). Die Zugfasern des Biegestabes wollen sich dehnen, werden aber durch das angeschweißte Profil daran gehindert (Bild 4 und 5). Solche Anschlüsse sollte man in der neutralen Zone verschweißen, wo keine Dehnungen auftreten (Bild 6 bis 9). Überhaupt sollte man Schweißnähte (die an sich schon eine geringere Festigkeit haben) nicht noch an eine Stelle hoher Spannung im Spannungsfeld legen.

<sup>3)</sup> durch Papiermodelle einfach zu demonstrieren.



**Bild 10.** Leichtes U-Profil als Träger einer Anhängelose. Schon aus den Dehnungslinien sieht man, dass sich das Profil nicht als ganzes verformt, also für die Belastung nicht mit dem Widerstandsmoment des Querschnittes gerechnet werden kann.

Je kleiner die Wandstärken werden (Blech!), umso sorgfältiger ist die Konstruktion durchzubilden. Kräfte sollten immer „flächenhaft“ eingeleitet werden. Auch Schweißpunkte und Niete geben u. U. gefährliche Punktlasten. Unterbrochene Schweißnähte ergeben an den Enden Spannungsspitzen, die sich noch mit den gefährlichen Einbrandkerben überlagern. Versteifungen von Blechwänden durch Sicken oder aufgeschweißte Profile bringen durch Verformungsbehinderung leicht Spannungsspitzen. Bei dünnwandigen Abkantprofilen bleibt bei der Belastung die Form des Querschnittes meist nicht erhalten, da sich die Teile des Querschnittes (z. B. die Flansche leichter U-Profile) selbständig verformen (Bild 10). Es kann also nicht mit dem vollen Widerstandsmoment gerechnet werden. Wichtig ist, daß bei solchen Profilen bei Biegebeanspruchung die Last im Schubmittelpunkt und nicht im Schwerpunkt angreift, da sonst zusätzliche Verformungen und Beanspruchungen entstehen (Bild 8).

Diese Liste der Empfehlungen ließe sich noch lange fortsetzen. Sie dürfte aber genügen, um dem Konstrukteur die grundsätzlichen Überlegungen, die ja immer wiederkehren, zu vermitteln. Der Konstrukteur sollte sich immer vor Augen halten, daß die heutige Ausnutzung der Werkstoffe noch recht gering ist, da oft nur wenige Kubikzentimeter des Werkstoffes über die Haltbarkeit entscheiden. Der Aufwand an Werkstoffen bestimmt aber bei den Landmaschinen den Anteil an den gesamten Herstellungskosten, der heute noch größer ist als der der Löhne.

Institut für landtechnische Grundlagenforschung  
der Forschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode

Anschrift des Verfassers: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Willi Kloth, (20 b) Braunschweig, Bundesallee 50