

Der Trend zum stärkeren Schlepper läuft mit einer gewissen Gesetzmäßigkeit ab. Wie Bild 1 zeigt, läßt sich die Verteilung der Schlepperleistung im Wahrscheinlichkeitsnetz als Gerade darstellen, wenn die Achse für die Schlepperleistung logarithmisch geteilt wird. Bei der gewählten Klasseneinteilung für die Schlepperleistung ergibt sich eine besonders gute Wiedergabe der Einzelwerte durch eine Gerade für das Jahr 1955; für einige der weiteren Jahre ist die Wiedergabe weniger exakt.

Aus Bild 1 sind vor allem zwei Dinge zu entnehmen:

- Im Laufe der Jahre verschieben sich die Geraden immer weiter nach rechts. Das bedeutet: Die Schlepper werden stärker, die durchschnittliche Motorleistung – sie ist dort abzulesen, wo die Gerade die 50 %-Linie durchschneidet – steigt an, und zwar mit Werten von 1,1 bis 1,5 kW pro Jahr.
- Mit Ausnahme der Geraden für 1967 sind alle Geraden in etwa parallel. Das bedeutet: Der Mittelwert der Verteilung wandert im besagten Tempo nach rechts, die Streuung um den Mittelwert herum bleibt aber die gleiche.

Wenn wir annehmen können, daß die Entwicklung zunächst so weitergeht, ist eine Trend-Prognose relativ einfach: Auf der Basis einer Zunahme von 1,1 bis 1,5 kW pro Jahr schätzen wir die durchschnittliche Motorleistung z.B. für das Jahr 1977, ziehen die Parallele zu den bisherigen Verteilungskurven durch diesen Durchschnittswert und können dann als Schätzung jede beliebige Größenklasse ablesen und prognostizieren.

Wie jede Trend-Prognose, ob graphisch oder mit Hilfe eines Computers, basiert auch diese auf der Annahme, daß die Tendenzen und Kräfte der Vergangenheit auch in der Zukunft in etwa unverändert oder sich im gleichen Tempo ändernd auswirken werden.

#### Schrifttum

- [ 1 ] *Silvestri, R.*: Vorausschätzungen der Bestände an Ackerschleppern. Landtechnik Jg. 28 (1973) Nr. 4 S. 107/17.

## Betriebsfestigkeit abschnittsweise versteifter U-Profil-Träger bei Biege- und Verdrehbelastung

Von Gerhard Vellguth, Braunschweig\*)

Mitteilung aus dem Institut für landtechnische Grundlagenforschung der Forschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode

DK 539.431:629.11.011.3

Abschnittsweise Versteifungen werden an Kaltprofilen häufig angewendet. Sie dienen der Verstärkung an den Stellen, an denen konzentrierte Lasten auf die dünnwandigen Profile einwirken oder an denen hohe Nennbeanspruchungen vorliegen. Durch sie werden aber Steifigkeitssprünge und Verformungsbehinderungen verursacht, die zu ausgeprägten Spannungserhöhungen führen. Für Träger mit verschiedenen Versteifungsformen wurde durch dynamische Versuche die Betriebsfestigkeit bei Biege- und Verdrehbeanspruchung ermittelt.

### 1. Einleitung

Für die Rahmen von Nutzfahrzeugen (Lastwagen und Anhänger) und von fahrenden Arbeitsmaschinen (Baumaschinen und Landmaschinen) werden heute in erster Linie kaltverformte, aus Bandstahl gefertigte Leichtbauprofile verwendet. Diese sog. Kaltprofile haben den Vorteil, daß sie durch individuell gewählte Abmessungen den Belastungen des jeweiligen Fahrzeugs angepaßt werden können. Sie erreichen im Vergleich mit warmgewalzten Profilen die gleiche Tragfähigkeit bei geringerem Werkstoffaufwand oder eine höhere Tragfähigkeit bei gleichem Werkstoffaufwand.

Leider haben sie aber auch einen bedeutenden Nachteil: sie sind empfindlich gegen Vorverformungen und gegen Verformungen durch örtlich konzentrierte Lasten. Vorverformungen können auf dem Transport der Träger oder bei einer ungenauen Fertigung entstehen und sind somit bereits vor der Belastung durch die Betriebslasten vorhanden, während die Verformungen aus örtlich konzentrierten Lasten dann entstehen, wenn nicht zur Krafteinleitung in diese dünnwandigen Profile der gesamte Querschnitt herangezogen oder eine großflächige Lastverteilung vorgenommen wird. Die Folge der Verformungen können Beul- und Knickvorgänge sein, die zu einem plötzlichen Versagen der Konstruktionen auch weit unterhalb der rechnerischen Belastungsgrenze führen.

Um diesem Versagen vorzubeugen, werden häufig örtliche oder abschnittsweise Versteifungen angebracht. Außer zur Vermeidung von Verformungen werden abschnittsweise Versteifungen – insbesondere die längeren Varianten dieser Formen – auch dazu benutzt, bei ungleichförmigem Beanspruchungsverlauf z.B. des Biegemomentes die Abschnitte mit hohen Nennspannungen zu verstärken, ohne den Trägerquerschnitt auf der ganzen Länge zu vergrößern.

Die abschnittweisen Versteifungen haben aber nicht nur positive Auswirkungen. Durch die Einschweißung und den mehr oder weniger schroffen Übergang am Anfang und am Ende der Versteifung entstehen zusätzliche Spannungsspitzen, die zu einer Verminderung der Lebensdauer bei Schwingbeanspruchung führen können. Bei statisch beanspruchten Konstruktionen ist diese Gefahr nicht so groß, da solche Spannungsspitzen bei der ersten Belastung durch örtlich begrenztes Fließen abgebaut werden können. Bei Schwingbeanspruchungen, wie sie bei Fahrzeugen und fahrenden Maschinen insbesondere an den Rahmen auftreten, verursachen sie jedoch

\*) Dipl.-Ing. Gerhard Vellguth war wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für landtechnische Grundlagenforschung (Direktor: Prof. Dr.-Ing. W. Batel) der Forschungsanstalt für Landwirtschaft. Hier entstand die nachfolgende Arbeit.

Ermüdungen, die über einen Anriß oder einen ausgeprägten Bruch ein vorzeitiges Versagen der Konstruktionen zur Folge haben.

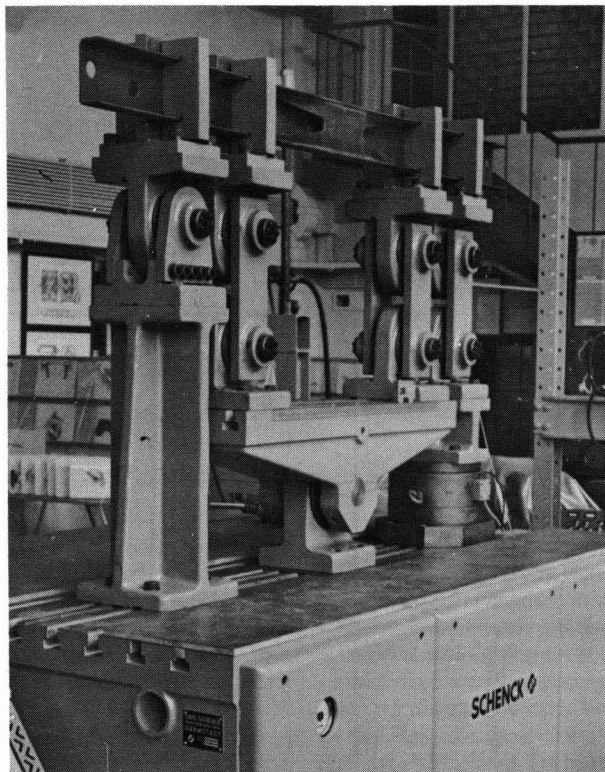
Ziel der Untersuchung war es festzustellen, wie groß dieser negative Einfluß der abschnittweisen Versteifungen bei U-Kaltprofilen unter einem wirklichkeitsnahen Betriebslastkollektiv bei Biege- und Verdrehbelastung ist.

Als Versuchsstücke wurden U-Profil-Träger aus St 37-2 mit den Abmessungen 60 x 140 x 60 x 6 mm gewählt, wie sie für landwirtschaftliche 3 t-Anhänger gebräuchlich sind.

Die Versteifungsformen wurden den in der Praxis am häufigsten angewendeten nachgebildet, wobei jedoch die Abmessungen vereinheitlicht wurden, so daß die einfachen Formen ohne Übergänge 200 mm lang sind, die Formen mit kurzen, geraden Übergängen auf 200 mm Versteifungslänge bzw. 400 mm Gesamtlänge kommen und die Formen mit langen, angebogenen Übergängen auf 200 mm Versteifungslänge bzw. 600 mm Gesamtlänge ausgedehnt sind.

## 2. Biegebelastung

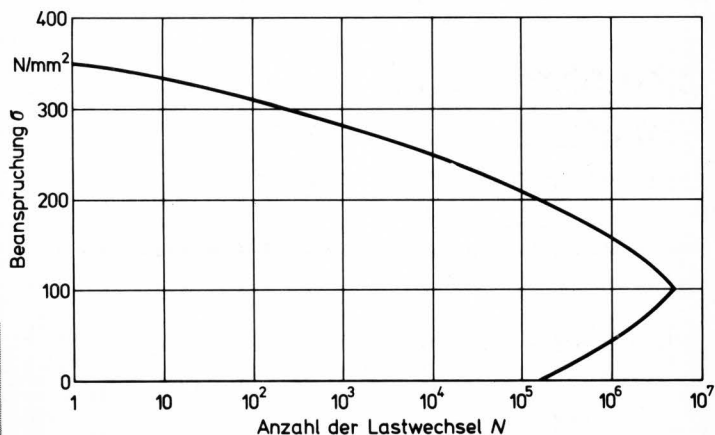
Als Belastungsvorrichtung stand ein 200 kN-Universal-Vertikal-Pulser (Schenck zur Verfügung\*). Seine Funktionsweise ist bereits beschrieben worden [1]. Die 1500 bzw. 2000 mm langen Träger mit den eingeschweißten Versteifungen von max. 600 mm Länge wurden in der in Bild 1 dargestellten serienmäßigen Biegevorrichtung belastet. Es ergibt sich eine Belastung mit konstantem Biegemoment zwischen den beiden inneren Auflagern, so daß die Nennspannungen an den Enden der Versteifungen unabhängig von deren Länge immer gleich sind. Aufgrund dieses gleichförmigen Biegemomentenverlaufes können auch Versteifungsformen unterschiedlicher Länge miteinander verglichen werden. Das zur Durchführung von Betriebsfestigkeitsversuchen notwendige Lastkollektiv wird anhand einfacher Überlegungen hergeleitet. Da es sich um



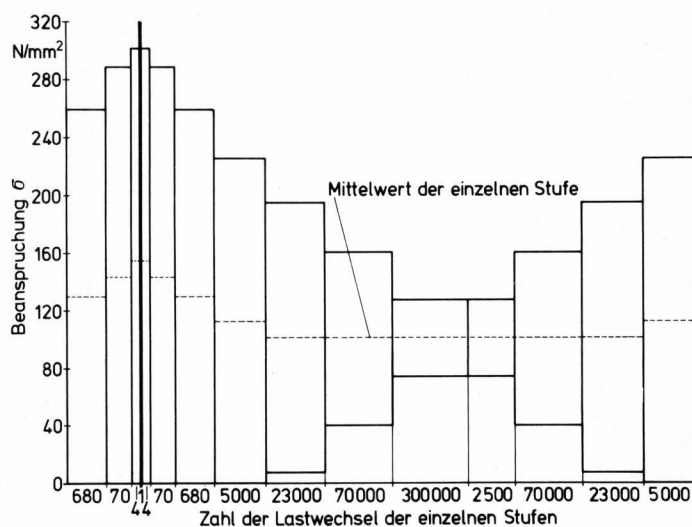
**Bild 1.** Pulsator mit Biegevorrichtung und abschnittweise versteiftem U-Träger als Prüfstück.

\*) Auch an dieser Stelle sei dem Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten gedankt für die Finanzierung der Versuchsanlage im Rahmen eines Forschungsauftrages.

den Vergleich verschiedener Versteifungen untereinander bzw. gegenüber einem unversteiften Träger handelt, ist diese Vereinfachung zulässig. Das in Bild 2 dargestellte Kollektiv ist abgeleitet aus der Erfahrung, daß bei der gleichmäßig verteilten Beladung mit der zulässigen Nutzlast Nennspannungen von 100 N/mm<sup>2</sup> auftreten dürfen und deshalb bei der Konstruktion meistens zugrundegelegt werden. Außerdem wird angenommen, daß dieser Belastungswert die größte Häufigkeit hat und daß die Fahrten mit geringerer Beladung und mit Überladung etwa gleich häufig sind. Beim Fahren treten ständig größere und kleinere Schwingungen um diesen Wert auf, so daß die Anzahl der Lastwechsel über der Dauerfestigkeitsgrenze (~ 2 Mill. bei Stahl) liegt. Die maximale Belastung, die nur einmal oder wenige Male im Laufe der gesamten Betriebszeit erreicht wird, wurde aus den in früheren Untersuchungen [2] gemessenen Beschleunigungswerten ("Stoßfaktor" bis 3,5) errechnet. Zwischen diesen Werten wird ein Verlauf entsprechend einer Normalverteilung angenommen. Für den unteren Teil des Kollektivverlaufs gilt, daß die Schwingungen des Rahmens mit der aufgelegten Ladung symmetrisch um die statische Ruhelage verlaufen. Da die Masse nicht mit dem Rahmen fest verbunden ist, tritt ab einer Beschleunigung von 1 g höchstens ein Abheben der Masse, d.h. eine Entlastung des Rahmens auf den Wert  $\sigma = 0$ , ein (Springen des Fahrzeuges).



**Bild 2.** Betriebslastkollektiv der Biegebeanspruchung für den Rahmenträger eines landwirtschaftlichen Anhängers.

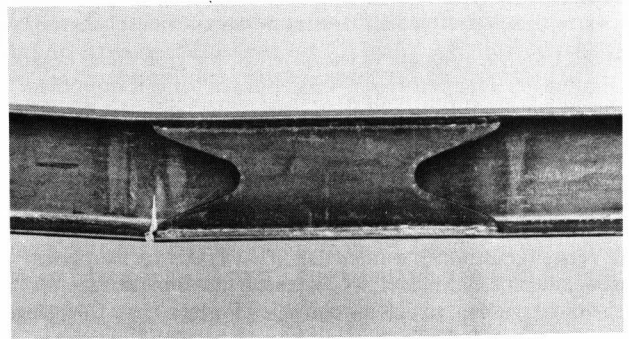


**Bild 3.** Gestuftes Teilkollektiv für die Biegebeanspruchung eines Rahmenträgers.

Die Anzahl der Lastwechsel ist auf der Abszisse in logarithmischem Maßstab abgetragen.

Um dieses Lastkollektiv in der Prüfmaschine nachfahren zu können, muß es zunächst in ein Treppenstufendiagramm (gewählt 8 Stufen) umgewandelt und dann in 8 gleiche Teilkollektive, **Bild 3**, zerlegt werden, in denen alle Lasten mit einer Lastwechselzahl vorkommen, die ihrem Anteil am Gesamtkollektiv entspricht.

Die Belastungen wurden über Lochstreifen gesteuert aufgebracht und die Zahl der Lastwechsel gezählt, bis der erste Anriß sichtbar wurde. Der Weiterriß verlief meist recht schnell und führte noch innerhalb des gleichen Teilkollektivs zum automatischen Abschalten der Prüfmaschine durch den verwendeten "Beschleunigungsbegrenzungsschalter". Den Endzustand eines solchen Versuchsträgers zeigt **Bild 4**.



**Bild 4.** U-Träger mit abschnittweiser Versteifung nach der Belastung im Biegeversuch.

**Ergebnisse**

Die **Tafel 1** gibt eine Übersicht über die bei den verschiedenen Trägern mit dem angegebenen Kollektiv bis zum Abschalten der Prüfmaschine erreichten Lastwechselzahlen. Sie lassen eine Zusammenfassung der Träger in drei Gruppen zu:

Versteifungsform	Summe der Lastwechsel bei Biegebeanspruchung	Summe der Lastwechsel bei Verdrehbeanspruchung
U-Profil 60x140x60x6 unversteift	$> 7,5 \cdot 10^6$	$> 26550$
	$1,5 \cdot 10^6$	$< 2655$ $< 2655$ $< 2655$
	$1,0 \cdot 10^6$	X
	$2 \cdot 10^6$	X
	$3 \cdot 10^6$	X
	$1,0 \cdot 10^6$	$< 2655$ $2655$
	$1,1 \cdot 10^6$	X
	$> 7,5 \cdot 10^6$	$> 26550$ $> 26550$

Versteifungsform	Summe der Lastwechsel bei Biegebeanspruchung	Summe der Lastwechsel bei Verdrehbeanspruchung
	$0,6 \cdot 10^6$ $1,0 \cdot 10^6$	5310 $< 5310$ 5310
	$5,5 \cdot 10^6$	$< 2655$ $< 2655$
	$4,5 \cdot 10^6$	X
	$1,0 \cdot 10^6$	X
	$2 \cdot 10^6$	X
	$3 \cdot 10^6$	X
	$> 7,5 \cdot 10^6$	$> 26550$ $< 13250$

X = nicht untersucht

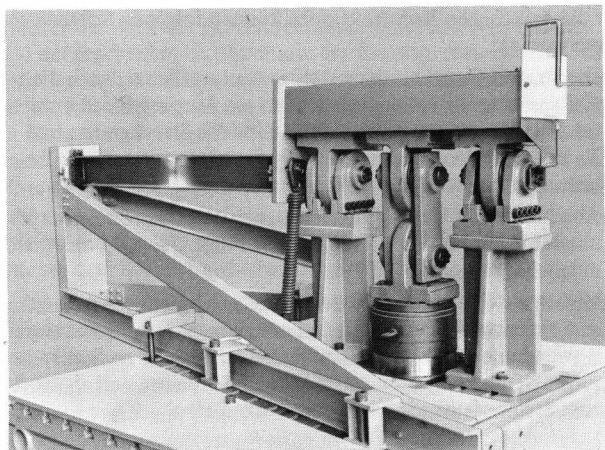
mehrere Zahlenangaben = Ergebnisse mehrerer gleicher Träger

**Tafel 1.** Untersuchte Versteifungsformen und Ergebnisse der Betriebsfestigkeitsversuche.

1. Alle einfachen Versteifungen, die plötzlich oder ohne ausreichend großen Ausrundungsradius enden, führen etwa bei 1 Mill. ( $\pm 0,5$  Mill.) Lastwechseln zum Versagen. Das bedeutet, daß die Gebrauchsdauer im Fahrzeug unter den vorgesehenen Bedingungen nur 2 Jahre betragen würde.
2. Alle Versteifungen, die besser ausgerundet sind oder durch Ausschneiden einen besseren Übergang in der Steifigkeit des Querschnittes ergeben, erreichen Lastwechselzahlen um 3 bis 4 Mill. Lastwechsel, entsprechend einer Lebensdauer von etwa 6 bis 8 Jahren.
3. Das unversteifte Profil, die Versteifung durch ein dünnwandiges Rohr mit großem Durchmesser und die kurze Versteifung mit langausgerundeten und zum Steg angebogenen Enden sind die einzigen Versuchsstücke, die im Versuch nicht angerissen sind. Die erreichten 7,5 Mill. Lastwechsel lassen erwarten, daß während der gesamten Betriebsdauer von 10 bis 15 Jahren kein Anriß eintritt.

### 3. Verdrehbelastung

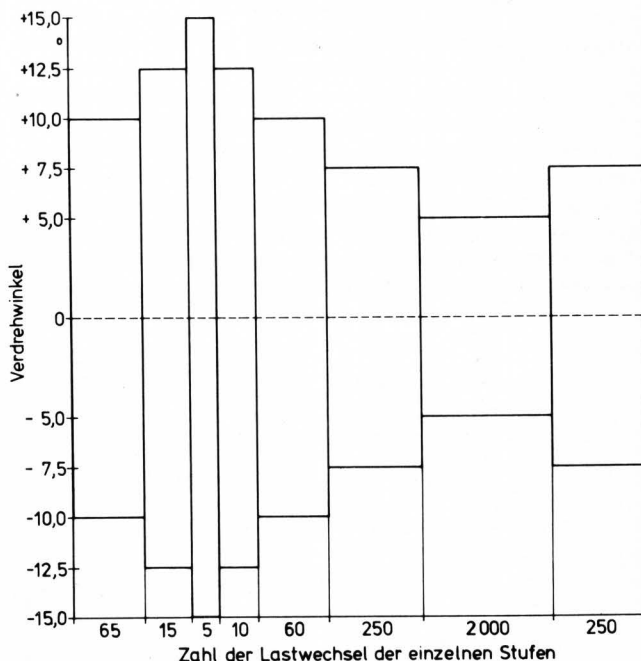
Als Belastungsvorrichtung für die Untersuchung der versteiften Träger bei Verdrehung wurde der gleiche 200 kN-Pulsator benutzt, obwohl die serienmäßige Ausstattung bzw. die lieferbaren Zusatzeinrichtungen zur Untersuchung derart großer, sperriger und verdrehweicher Bauteile nicht geeignet sind. Die hierzu selbstentwickelte und im Institut gebaute Zusatzeinrichtung wurde bereits beschrieben [1]. Bild 5 zeigt einen der Träger in dieser Vorrichtung.



**Bild 5.** Pulsator mit Verdrehvorrichtung und versteiftem U-Träger als Prüfstück.

Das Lastkollektiv für Verdrehungsuntersuchungen besteht im Normalfall aus Verdrehmomenten und den zugehörigen Lastwechselzahlen. Würde man ein solches bestimmtes und gleichbleibendes Kollektiv für die verschiedenen versteiften Träger verwenden, so würden diese aufgrund ihrer unterschiedlichen Verdrehsteifigkeiten mit verschiedenen Verdrehwinkeln beansprucht. Für Rahmenträger landwirtschaftlicher Anhänger muß jedoch davon ausgegangen werden, daß die Verdrehwinkel auch bei unterschiedlicher Versteifung der einzelnen Träger gleich sind, denn die Ursache der Verwindungen sind die Unebenheiten der Fahrbahnen. Da Federn bei diesen Fahrzeugen vielfach nicht vorhanden sind oder sehr steif ausgelegt sind, bilden die Unebenheiten der Fahrbahnen auch die Anregung der Rahmen. Als Beanspruchungskollektiv wurde deshalb die Häufigkeit der Verdrehwinkel gewählt. Die Größe und Häufigkeit von Verwindungswinkeln beim Fahren auf verschiedenen landwirtschaftlichen Fahrbahnen ist in [2] angegeben.

Wird angenommen, daß sich die Gesamtfahrtstrecke auf 6000 km gute Teerstraße, 2000 km unbefestigter Feldweg, 2000 km Acker längs zur Furche und 1000 km Acker quer zur Furche verteilt und werden die an der Achse gemessenen Verwindungswinkel auf Verdrehwinkel der Längsträger umgerechnet, so läßt sich hieraus ein "Betriebswinkelkollektiv" errechnen und dieses analog dem Verfahren bei Biegung in ein gestuftes Kollektiv und in Teilkollektive verwandeln. Zur Abkürzung der Versuchsdauer wurden darüber hinaus die Verdrehwinkel unter  $\pm 5^\circ$  fortgelassen. Da der Betrieb des Pulsers, wie in [1] beschrieben, bei derartig verdrehweichen Prüfständen nur im Langsamtrieb möglich ist, würden die kleinen Winkel mit ihrer hohen Lastwechselzahl eine sehr große Versuchszeit erfordern. Sie sind aber wegen der dabei entstehenden nur geringen Spannungen für die Ermüdung von keiner oder nur geringer Bedeutung. Das verbleibende Teilkollektiv von 2655 Lastwechseln in 5 Laststufen zeigt Bild 6. Es entspricht einer Betriebszeit von einem Jahr.



**Bild 6.** Gestuftes Teilkollektiv der Verdrehwinkel für den Rahmenträger eines landwirtschaftlichen Anhängers.

Die Anzahl der Lastwechsel ist auf der Abszisse in logarithmischem Maßstab abgetragen.

### Ergebnisse

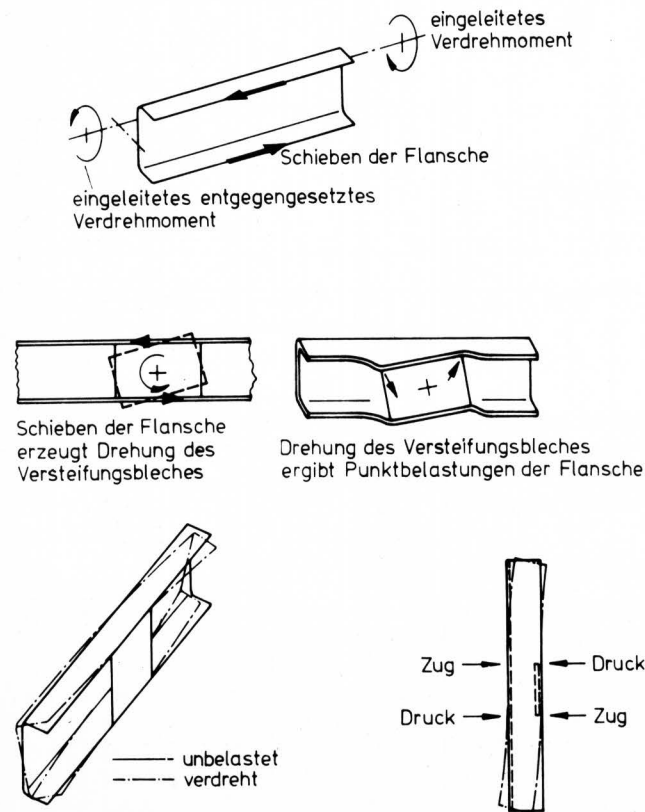
Die Ergebnisse dieser Versuche unter Verdrehbelastung zeigt Tafel 1. Die bis zum Anriß erreichten Lastwechselzahlen sind sehr viel geringer als die bei Biegung erreichten. Das liegt z.T. daran, daß — wie oben beschrieben — die Lastwechsel mit geringer Beanspruchung fortgelassen wurden, zum anderen Teil jedoch auch daran, daß der Steifigkeitssprung vom offenen U-Profil zum geschlossenen Querschnitt im versteiften Abschnitt bei Biegung nur etwa 1 : 1,2, bei Verdrehung aber etwa 1 : 500 beträgt. Deshalb sind derartige Versteifungen auch sehr viel empfindlicher gegenüber Verdrehbeanspruchungen als gegenüber Biegebeanspruchungen. Andererseits verlaufen die Anrisse bei Verdrehung nicht quer zur Trägerlängsachse, sondern in Längsrichtung der Versteifung und zwar im allgemeinen in der Schweißnaht. So wird durch den Anriß zunächst nur die wirksame Länge der Versteifung geringer, erst bei vollendetem Aufreißen der Schweißnaht würde sie schließlich vollkommen unwirksam oder sogar einfach aus dem Profil herausfallen. Da aber beide Beanspruchungsarten — Biegung und Verdrehung — miteinander überlagert bzw. abwechselnd auftreten, wird ein Anriß, der nach wenigen Lastwechseln durch Ver-

drehung begonnen wurde, durch die gleichzeitig auftretenden, häufigeren Biegelasten schnell fortgesetzt und sich auch quer zur Trägerlängsrichtung ausbreiten und schließlich zum frühzeitigen Versagen führen.

Wie bei der Biegebelastung haben auch bei der Verdrehung wieder die gleichen drei Träger — der unversteifte Träger, der rohrrversteifte Träger und der durch ein Blech mit ausgerundeten und angebogenen Enden versteifte Träger — die vorgegebene Versuchsdauer entsprechend einer Einsatzzeit von 10 Jahren ohne Anriß überstanden.

Daß die Rohrversteifung jedoch nicht problemlos ist, zeigte die Wiederholung des Verdrehversuches mit einem zweiten, gleichen Träger, der nach fünf Teilkollektiven einriß. Es liegen also doch Spannungserhöhungen vor, die zusammen mit kleinen, kaum sichtbaren Fehlern vom Einpassen oder Schweißen zum Bruch führen. Da die Rohrversteifung wegen ihrer geringen Ausdehnung zur Verriegerung von hohen Nennspannungen sowieso nicht geeignet ist, ist von ihrer Verwendung möglichst abzusehen.

Das gute Abschneiden der Versteifung mit den lang ausgerundeten und zum Steg angebogenen Enden bei der Verdrehbeanspruchung ist aus Bild 7 abzuleiten, in dem der Verformungsvorgang eines durch ein Blech ohne Übergänge versteiften U-Trägers dargestellt ist. Die günstige Wirkung der konisch auslaufenden Enden beruht demnach auf einer Verminderung der Drehung der Versteifung und einer sanft einsetzenden Dehnungsbehinderung der in ihrer Ebene und senkrecht dazu gebogenen Flansche. Bisher wurde nach theoretischer Betrachtung der verschiedenen Querschnitte davon ausgegangen, daß im Grunde der Ausrundung, d.h. am eigentlichen



**Bild 7.** Verformungsvorgänge bei der Verdrehung eines abschnittsweise versteiften U-Trägers.

Beginn der Versteifung, ein plötzlicher Übergang von einem offenen  $\square$ -Querschnitt zu einem geschlossenen  $\square$ -Querschnitt vorliegt und deshalb hier die größte Anrißgefahr besteht. Ein langsamer Übergang von einem schmalen  $\square$ -Querschnitt zu dem breiten  $\square$ -Querschnitt durch ein nur angebogenes aber nicht ausgerundetes Blech wurde empfohlen. Offensichtlich ist dieser Effekt gegenüber den dargestellten Vorgängen von untergeordneter Bedeutung. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, daß die vier Enden der Übergänge in Verbindung mit der Schweißnaht im kaltverformten Biegeradius des Kaltprofils anrißgefährdete Stellen darstellen. Gesicherte Aussagen wären erst durch Versuche mit einer größeren Zahl gleicher Träger möglich.

Da bei dem Träger ohne Versteifung derartige gefährdete Stellen nicht vorhanden sind und er wegen seiner Verdrehweichheit in der Lage ist, auch noch größere Verwindungswinkel aufzunehmen, ist er als die einzige gegen Anriß sichere Form für Verdrehbeanspruchung anzusehen.

Es ist vielleicht zu erwähnen, daß die bei Biegung und Verdrehung erreichten Lastwechselzahlen in grober Annäherung den unter statischen Lasten gemessenen Spannungen und Spannungsspitzen entsprechen. Die Unsicherheiten der Ergebnisse der dynamischen Versuche an nur wenigen Versuchsstücken und der Ermittlung der tatsächlichen Spannungsspitze bei den statischen Untersuchungen lassen jedoch keine quantitative Aussage über den an sich zu erwartenden Zusammenhang zu.

#### 4. Folgerungen für die Konstruktion

Für die praktischen Konstruktionen können folgende Schlüsse gezogen werden:

1. Die Betriebsfestigkeit unversteifter Kaltprofile ist durch die Kaltverfestigung höher als nach den am Ausgangsblech ermittelten Festigkeitswerten anzunehmen ist. Als Streckgrenze und als zulässige Höchstbeanspruchung für selten auftretende Belastungen können  $300 \div 500 \text{ N/mm}^2$  vorausgesetzt werden.
2. Abschnittsweise Versteifungen haben fast ausnahmslos eine Verminderung der Betriebsfestigkeit zur Folge. Sie sollten deshalb möglichst vermieden werden.
3. Müssen abschnittsweise Versteifungen angebracht werden, so sind sie entweder nur an Stellen mit geringer Nennspannung zu verwenden oder so lang auszuführen, daß sie erst an Stellen geringer Nennspannungen enden. Die Enden selbst sind als sanfte, zum Steg verlaufende Übergänge auszubilden.

#### Schrifttum

- [ 1 ] *Vellguth, Gerhard:* Erweiterung des Arbeitsbereiches eines Universal-Pulsers auf Torsionswechselbeanspruchungen mit Schwingwinkeln bis zu  $\pm 15^\circ$ . Grundl. Landtechnik Bd. 23 (1973) Nr. 5, S. 136/37.
- [ 2 ] *Kloth, W., Th. Stoppel u. W. Bergmann:* Gesetze des Fahrens und der Konstruktion für Ackerwagen. ZVDI Bd. 94 (1952) Nr. 8, S. 209/15.