

Konstruktive Gestaltung geschweißter Anschlüsse aus dünnwandigen Kastenprofilen bei Schwingbelastung

Dr.-Ing. J. Meinhardt, KDT, VEB Kombinat Fortschritt Landmaschinen, Institut für Landmaschinentechnik Leipzig

Im Landmaschinenbau wird bei der Gestaltung und Dimensionierung geschweißter Tragsysteme verstärkt der ökonomische Leichtbau dadurch realisiert, daß diese aus dünnwandigen offenen und geschlossenen Stahlleichtprofilen gefertigt werden.

Dabei sind u. a. im Gegensatz zu den dickwandigen Normprofilen bei der Krafterleitung bzw. bei der Kraftweiterleitung im Tragsystem in größerem Maß spezifische Besonderheiten zu beachten. Vielfältig werden diese bei der Gestaltung dynamisch belasteter Tragsysteme unzureichend beachtet.

Andererseits ergaben sich bei eigenen Untersuchungen [1, 2, 3] von Bauteilen aus dünn-

wandigen Kastenprofilen neue Erkenntnisse, die allgemein noch nicht bekannt sind.

Bei der Erläuterung der Varianten soll von der bisher allgemein üblichen Gegenüberstellung „gut — schlecht“ abgerückt werden. Diese Vorgehensweise belastet den Konstrukteur nur unnötig bzw. irritiert ihn, da oft für spezifische Anwendungsfälle und Belastungen Lösungen empfohlen werden, die teilweise nicht richtig sind.

Bei anderen geometrischen Abmessungen und veränderter Belastung ergeben sich zudem oft andere Gestaltungsmerkmale. Deshalb wird auf die Zusammenhänge zwischen Gestaltung und Belastungsart bei der Verallgemeinerung der Ergebnisse besonders hingewiesen.

1. Durchgeführte Untersuchungen und Ergebnisse

1.1. Auswahl geeigneter Varianten

In den vergangenen Jahren wurden auf der Grundlage von Tragwerkanalysen verschiedene Stabwerksknotengrundformen ermittelt, die in verschiedenen Gestaltungsvarianten in geschweißten Tragsystemen auftreten. Von diesen verschiedenartig belasteten Grundformen wurden bisher drei dynamisch untersucht, die im Bild 1 dargestellt sind. Dabei handelt es sich um

— Biegeträger mit Anschweißungen im querkraftfreien Bereich

Tafel 1. Schwingfestigkeitswerte für Biegeträger nach Bild 2

Var.-Nr.	Beschreibung	σ_D in N/cm^2 $N = 2,5 \cdot 10^6$; $Pü = 90\%$ $\kappa = \frac{\delta_u}{\delta_o} = 0$ $\kappa = \frac{\delta_u}{\delta_o} = -1$		Var.-Nr.	Beschreibung	σ_D in N/cm^2 $N = 2,5 \cdot 10^6$; $Pü = 90\%$ $\kappa = \frac{\delta_u}{\delta_o} = 0$ $\kappa = \frac{\delta_u}{\delta_o} = -1$	
8	Senkrechtstoß von Kastenprofilen gleicher Abmessung; Bleche ohne seitliche Anschweißungen ($s = 4$ mm)	252,1	148,1	17	Blech ($s = 8$ mm) mit Längskelnnähten ($a = 3$ mm) angeschweißt; Blechbreite kleiner als Kastenbreite	135,9	81,4
1	Senkrechtstoß von Kastenprofilen gleicher Abmessung; Fügestelle ringsherum geschweißt	156,5	94,2	3	Schrägstoß von Kastenprofilen gleicher Abmessung; Fügestelle ringsherum geschweißt	132,4	79,0
13	parallel querstehende Bleche ($s = 4$ mm) mit HV-Nähten angeschweißt	156,4	93,2	5	symmetrischer Schrägstoß von Kastenprofilen gleicher Abmessung; Fügestelle ringsherum geschweißt	120,7	72,1
2	Schrägstoß von Kastenprofilen gleicher Abmessung; Fügestelle ringsherum geschweißt	150,1	89,8	4	Schrägstoß von Kastenprofilen gleicher Abmessung; Fügestelle ringsherum geschweißt	131,9	78,5
9	wie Variante 8; zusätzliche seitliche Anschweißungen an den Knotenblechen ($s = 4$ mm)	143,2	86,3	6	Senkrechtstoß wie Variante 8; zusätzlich doppelseitig eingeschweißte Dreieckbleche ($s = 4$ mm)	123,1	73,6
11	parallel längsstehende Bleche ($s = 4$ mm) mit HV-Nähten angeschweißt	143,2	86,3	15	Blech ($s = 8$ mm) längs mit HV-Nähten ($s = 4$ mm) und quer mit Kelnähten ($a = 3$ mm) angeschweißt	121,2	72,6
14	parallel querstehende Bleche ($s = 4$ mm) mit Kelnähten ($a = 3$ mm) ringsherum angeschweißt	141,8	84,9	16	Blech ($s = 8$ mm) mit Ringkelnähten ($a = 3$ mm) angeschweißt; Blechbreite kleiner als Kastenbreite	113,3	67,9
7	Senkrechtstoß wie Variante 8; zusätzlich doppelseitig eingeschweißte ausgerundete Bleche ($s = 4$ mm)	139,8	83,4	18	Blech ($s = 8$ mm) mit Querkelnähten ($a = 3$ mm) angeschweißt; Blechbreite kleiner als Kastenbreite	103,0	61,8
12	parallel längsstehende Bleche ($s = 4$ mm) mit Kelnähten ($a = 3$ mm) ringsherum angeschweißt	133,4	79,5	10	Senkrechtstoß wie Variante 8; zusätzlich ringsherum eingeschweißte Taschen	102,5	61,3

Bauteilform	Nullstabanschluß	Knotenverbindung	Tragwerkecke (Rahmenecke)
Belastungsschema			
Biegemomentenverlauf			
Torsionsmomentenverlauf	—		
Querkraftverlauf			

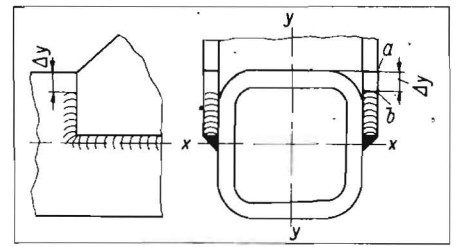


Bild 1. Zusammenstellung der schematischen Momenten- und Querkraftverläufe der untersuchten geschweißten Bauteilgrundformen

Bild 3. Detail der Variante 9 (mit Querschweißnähten an den Biegeträgerstegen); a Randfaser des Kastenträgers, b oberer Krater der Quernäht

1)
 — kombiniert biege- und torsionsbelastete Kastenträgeranschlüsse
 — kombiniert biege- und torsionsbelastete Rahmenecken.
 Die dynamischen Untersuchungen verfolgen das Ziel, die relativ günstigen Varianten bezüglich der Schwingfestigkeit herauszulösen. In diesem Zusammenhang ist darauf zu verweisen, daß die untersuchten Varianten aus einer Vielzahl geschweißter Anschlüsse ausgewählt wurden und für den Landmaschinenbau einen repräsentativen Querschnitt darstellen. Für andere im Rahmen theoretischer Untersuchungen ausgearbeitete Varianten mit verbessertem Schwingfestigkeitsverhalten steht der experimentelle Nachweis noch aus. Sie werden deshalb in die folgenden Betrachtungen nicht einbezogen. Die dynamischen Versuche wurden statistisch gesichert. Ergän-

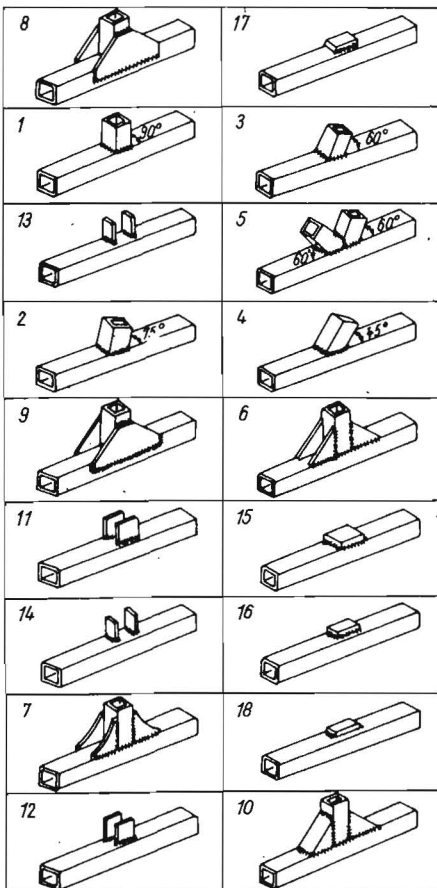
zend wurden umfangreiche statische Dehnungsmessungen in den Kerbbereichen der verschiedenen Varianten durchgeführt. Diese Ergebnisse wurden für die Praxis in einem Katalog aufbereitet [4].

1.2. Biegeträger mit Anschweißungen
 Im Bild 2 und in Tafel 1 sind 18 Varianten der biegebelasteten Kastenträger mit indirekt belasteten Anschweißungen geordnet nach der Lebensdauer zusammengestellt. Alle diese Varianten sind in den bereits vergegenständlichten Tragsystemen anzutreffen. Es handelt sich hier einmal um Stutzenanschweißungen mit und ohne zusätzliche Aussteifungen sowie um Anschweißungen von Blechen. Aus den Ergebnissen lassen sich zusammenfassend folgende Erkenntnisse ableiten:

- Die Schwingfestigkeitswerte des Grundwerkstoffs können bei guter Gestaltung zu etwa 90 bis 95% erreicht werden (Variante 8). Voraussetzung ist, daß in dem für die Haltbarkeit maßgebenden Querschnitt keine Schweißnähte in der maximal belasteten Randfaser angeordnet sind. Als Vergleich sind die Varianten 8 und 9 zu betrachten. Bei der Variante 9 werden durch zusätzliche Querschweißnähte die Schwingfestigkeitswerte verringert. Die Schwingfestigkeitswerte fallen mit der Verringerung von Δy (Bild 3).
- Schrägstoße von Kastenprofilen mit gleichen Querschnittsabmessungen bzw. gleicher Breite weisen mit zunehmender Schrägstellung der angeschweißten indirekt

- belasteten Stäbe fallende Schwingfestigkeitswerte auf (Varianten 1, 2, 3 und 5).
- Stumpfnähte sind gleichartig belasteten Kehlnahtverbindungen bei dynamischer Belastung überlegen (vgl. Varianten 13 und 14 bzw. Varianten 11 und 12).
- Quer angeschweißte stehende Bleche weisen höhere Schwingfestigkeitswerte auf als längs angeschweißte stehende Bleche. (vgl. Varianten 13 und 11 bzw. Varianten 14 und 12).
- Ursache:** Die Varianten 13 und 14 führen nur zu einem örtlich sehr eng begrenzten Steifigkeitssprung. Der Kraftfluß wird weniger nachteilig beeinflusst als bei den Varianten 11 und 12. Bei den in Belastungsrichtung stehenden Blechen wird die Biegung des Trägers stärker behindert.
- Aufschweißungen von Platten mit Querkehlnähten (Variante 18), auch in Verbindung mit Längsschweißnähten (Varianten 15 und 16), weisen niedrigere Schwingfestigkeitswerte auf als nur mit Längskehlnähten im Bereich der Biegeträgerstege aufgeschweißte Bleche (Variante 17).
- Die zusätzliche Einschweißung von Taschen ist bei Biegebelastung zu vermeiden (Variante 10). **Ursache** ist die Kerbwirkung der Querkehlnähte in Verbindung mit der Längs- und Querverformungsbehinderung des Trägers.
- Verformungssteife Teile dürfen nicht in den relativ verformungsweichen mittleren Bereichen der Gurte von Biegeträgern angeschweißt werden.

Bild 2. Varianten von Biegeträgern mit Anschweißungen im querkraftfreien Bereich für Halbzeuge aus St 38; s. Tafel 1



Tafel 2. Schwingfestigkeitswerte für kombiniert biege- und torsionsbelastete Tragwerkknoten nach Bild 4

Var.-Nr.	Beschreibung	σ_{DV} in N/cm ²	
		$\kappa = \frac{\delta_v}{\delta_o} = 0$	$\kappa = \frac{\delta_v}{\delta_o} = -1$
2	Senkrechtstoß wie Variante 1; zusätzlich eingeschweißte, mit zwei Biegekanten versehene Taschen ohne Freischnitte (s = 4 mm)	102,0	60,8
4	Senkrechtstoß wie Variante 1; zusätzlich doppelseitig eingeschweißte gleichschenklige Dreieckbleche ohne Freischnitte (s = 4 mm)	88,3	53,0
3	Senkrechtstoß wie Variante 1; zusätzlich eingeschweißte, mit einer Biegekante versehene Tasche ohne Freischnitte (s = 4 mm)	70,6	41,2
1	Senkrechtstoß von Kastenprofilen mit gleichem Profilquerschnitt; Fugestelle ringsherum geschweißt	66,7	39,2

1.3. Kombiniert biege- und torsionsbelastete Kastenträgeranschlüsse

Bisher wurden fünf Varianten dynamisch untersucht (Bild 4 und Tafel 2). Bei den Varianten 1 bis 4 traten Brüche stets im durch das Schweißen beeinflussten Grundwerkstoff des kombiniert biege- und torsionsbelasteten Trägers auf.

Bei der Gegenüberstellung der Varianten fällt auf, daß die Variante mit den zusätzlich eingeschweißten Taschen (Variante 2) die relativ günstigste aller bisher untersuchten Varianten bei dynamischer Belastung ist.

Als Begründung ist die Stützwirkung der Taschenstege anzuführen, die für einen gleichmäßigeren Kraftfluß sorgen und die Nahtkreuzungsbereiche entlasten. In diesem Zusammenhang erfolgt hier nochmals der Hinweis auf die analoge Variante der Gruppe von Biegeträgern mit indirekt belasteten Anschweißungen (Bild 2, Variante 10). Bei Biegebelastung hat sich die Variante mit zusätzlich eingeschweißten Taschen als relativ ungünstig erwiesen. Der Konstrukteur muß deshalb bei einer belastungsgerechten Gestaltung und Dimensionierung die wirkende Belastung an der Fugestelle kennen.

Die immer stärkere Orientierung auf möglichst optimale Auslastung der Grundwerkstoffreserven erfordert deshalb auch ein gewisses Umdenken bzw. eine variable Arbeitsweise der Konstrukteure.

Werden bei einer spezifischen Belastung ungünstige Gestaltungsvarianten vorgesehen, kann die geforderte Grenznutzdauer nur durch erhöhten Material- und Fertigungsaufwand erreicht werden. Dieser ist jedoch volkswirtschaftlich bei Serienfertigung der Maschinen nicht mehr vertretbar.

Die enge Zusammenarbeit zwischen Konstrukteur und Berechnungsingenieur, wie sie in einigen Betrieben bereits erfolgreich praktiziert wird, bietet deshalb die Gewähr für die Durchsetzung des Leichtbaus bei allen Erzeugnissen des Landmaschinenbaus.

Die in der Vergangenheit von vielen Konstrukteuren empfohlene Variante 3 ist zu verwerfen.

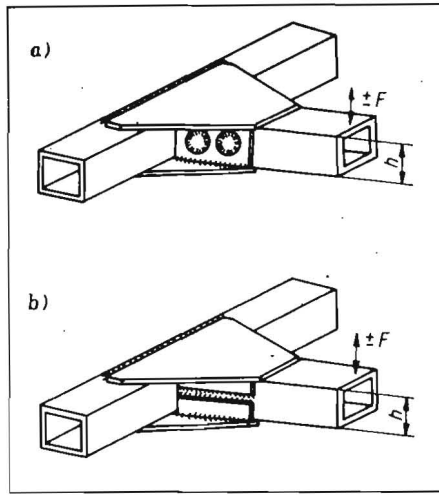


Bild 5. Tragwerkknoten ohne Querschweißnähte in der Randfaser des Biegeträgers:
a) für Profilhöhen $h > 80$ mm
b) für Profilhöhen $h \leq 80$ mm

Sie hat trotz des höheren Fertigungs- und Materialaufwands annähernd gleiche Festigkeitswerte wie die Grundvariante 1.

Die Tasche steift überwiegend die verformungsweichen Wände in den biege-neutralen Bereichen der Kastenprofile aus. Der Kraftfluß wird in den Taschen stark umgelenkt.

Werden nur Dreieckbleche eingeschweißt (Variante 4), sind zur Verbesserung des Spannungszustands sowie der Korrosionsanfälligkeit die Bleche im Nahtkreuzungsbereich der Kastenprofile freizuschneiden.

Es wurde eine Variante auf der Grundlage der Variante 8 nach Bild 2 entwickelt, die die Querschweißnaht am Biegeträger nicht aufweist (Bild 5). Die Ringschweißnaht des T-Stoßes wird so entlastet, daß für den Biegeträger die Aussagen zur Variante 8 nach Bild 2 übertragbar sind. Wie erste Untersuchungen zu dieser neuen Variante (Bild 5) zeigten, liegen die

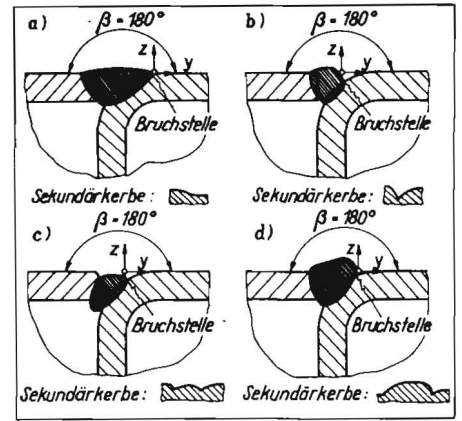


Bild 6. Einfluß der Fertigung auf die Sekundärkerbe von Schweißbauteilen;

- a) anzustrebende Schweißnahtausführung mit geringen Sekundärkerben
- b) schlechte Schweißnahtausführung; schlechter Übergang bei $y = 0$
- c) schlechte Schweißnahtausführung; fehlendes Schweißgut
- d) schlechte Schweißnahtausführung; starke Überhöhung, zu viel Schweißgut

Schwingfestigkeitswerte über denen der Variante 2 (Bild 4).

Auf das Problem des Einflusses der Schweißnahtausführung auf die Schwingfestigkeit soll im Zusammenhang mit den Tragwerkknoten hingewiesen werden. Dieser Einfluß wird von den Konstrukteuren und Technologen bisher nur unzureichend beachtet. Als Auswirkung ergibt sich oft eine unzureichende Haltbarkeit der Bauteilformen.

Aus Unkenntnis werden dann oft aufwendige Konstruktionen vorgesehen, die bei sachgemäßer Beachtung der bei Kastenprofilen auftretenden Kantenrundungen vermieden werden können.

Die im Bild 6 gezeigte unterschiedliche Form der schweißtechnologisch bedingten Sekundärkerbe führt infolge der unterschiedlichen Kraftumlenkung zu sehr verschiedenen Spannungsfeldern im Bereich der Anschweißung.

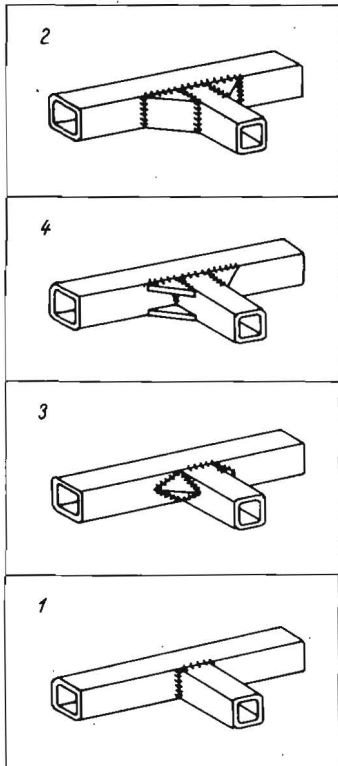


Bild 4. Varianten von kombiniert biege- und torsionsbelasteten Tragwerkknoten für Halbzeuge aus St 38; s. Tafel 2

Bild 7. Bruchlastspielzahlen und spezifische Lebensdauer für kombiniert biege- und torsionsbelastete Rahmenecken bei Schwellbelastung
 $\sigma_{\text{vow} = 0,2} = 177 \text{ N/cm}^2$ für Halbzeuge aus St 38 (Variante 6:
 $\sigma_{\text{vow} = 0,2} = 142 \text{ N/cm}^2$ an der Bruchstelle)

Var. - Nr.	Ausführung	relative Lebensdauer N bei $P_B = 50\%$	bezogene Lebensdauer
3		$13,00 \cdot 10^5$	104,0
2		$12,40 \cdot 10^5$	99,2
5		$8,70 \cdot 10^5$	69,2
6		$6,40 \cdot 10^5$	51,2
4		$0,22 \cdot 10^5$	1,76
1		$0,125 \cdot 10^5$	1,00

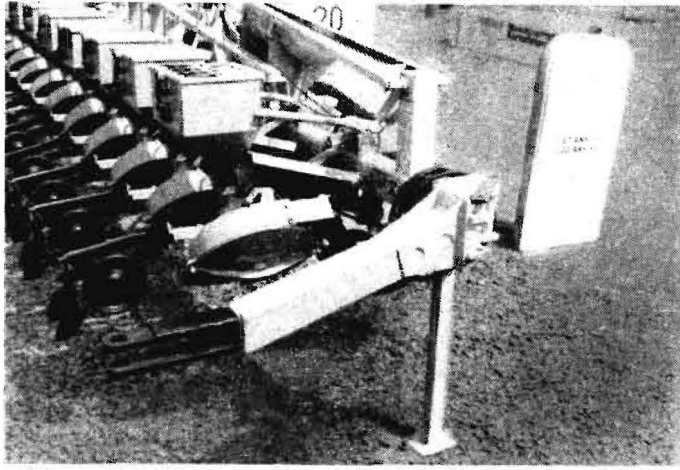


Bild 8. Konstruktion der schwenkbaren Deichsel einer Einzelkornsämaschine

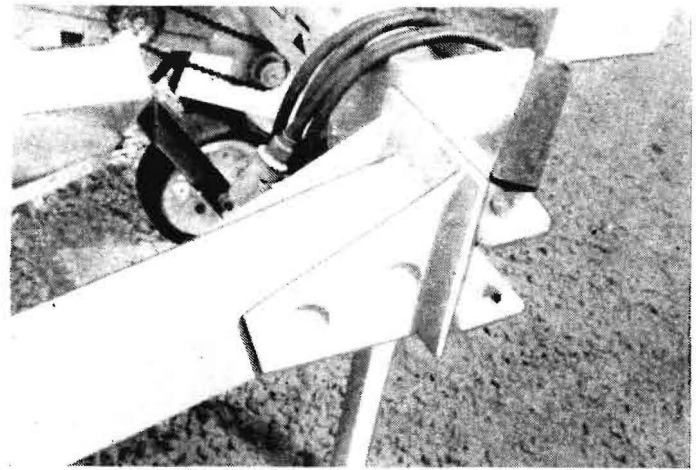


Bild 9. Detail des Deichselanschlusses

Daraus resultiert eine große Streuung der Schwingfestigkeitswerte. Bei der Festlegung der Sekundärkerbe wurde von der Definition nach Haibach [5] ausgegangen. Deshalb sollte der Konstrukteur auf solche scheinbar nebensächlichen Dinge schon beim Bau der Muster achten, um durch eventuelle Korrektur der Schweißnahtdicken bzw. standardgerechte Nahtvorbereitung Schweißnähte herstellen zu lassen, die möglichst geringe Sekundärkerben und damit höhere Schwingfestigkeitswerte aufweisen.

1.4. Kombiniert biege- und torsionsbelastete Rahmenecken

Bisher wurden sechs Varianten dynamisch untersucht und statistisch gesicherte Lebensdauerwerte ermittelt (Bild 7). Aus den dynamischen Untersuchungen ergaben sich folgende Erkenntnisse:

— Der einfache Gehrungsstoß (Variante 4) ist zu vermeiden, da im Bereich der Fügestelle an der inneren zug- und torsionsbelasteten Ecke infolge starker ungleichmäßiger Verformung der Profilquerschnitte sehr hohe Spannungsspitzen auftreten. Schon statische Modellversuche widerlegten die Annahme, daß die z. T. noch heute in der Praxis verwendeten Gehrungsstöße nach Variante 4 günstig bei kombiniert biege- und torsionsbelasteten Anschlüssen sind.

Bei Belastung sind die Verformungen visuell ohne zusätzliche Mittel zu erkennen. Die Schwingfestigkeitswerte liegen nur geringfügig über denen der Variante 1 (Geradschnittstoß ohne aufgeschweißten Deckel am Torsionsstab), die als Bezugsbasis für den Lebensdauervergleich herangezogen wurde.

— Sind Gehrungsstöße in Konstruktionen nicht zu umgehen, ist durch das Zwischenschweißen einer Platte (Variante 5) eine sprunghafte Steigerung der Schwingfestigkeit gegenüber dem einfachen Gehrungsstoß möglich.

Durch Wahl unterschiedlich dicker Bleche

lassen sich zusätzlich in gewissen Grenzen Toleranzen der Profildimensionen ausgleichen. Vorteilhaft ist auch die Möglichkeit, Profile unterschiedlicher Höhe bzw. verschiedener Schrägungswinkel zu fügen. Die Kehlnahtdicke a ist beim Zwischenschweißen einer Platte größer als $0,7 \times$ Profildicke, $a \approx (s + 1) \text{ mm}$, zu wählen. — Eingeschweißte Taschen (Variante 6) sind bei Gehrungsstößen zu vermeiden, da sie infolge starker Verformungsbehinderung des Gehrungsstoßes in Verbindung mit der Kerbwirkung der Schweißnähte zu niedrigeren Schwingfestigkeitswerten führen als bei Geradschnittstößen mit aufgeschweißtem Deckel am überstehenden Profil oder beim Geradschnittstoß mit eingeschweißter Eckmembran.

Außerdem ist der Fertigungsaufwand relativ hoch.

2. Beispiel

Die aus den dynamischen Untersuchungen abgeleiteten Erkenntnisse wurden bereits in vielen Landmaschinen vergegenständlicht. Ein Beispiel ist in den Bildern 8 und 9 dargestellt. Der überwiegend biegebelastete Träger einer Sämaschine, der funktionell bedingt durch einen horizontalen schwenkbaren Deichselanschluß unterbrochen wird, ist in Anlehnung an die Erkenntnisse der im Bild 2 dargestellten Variante 8 gestaltet. Im Bild 9 ist der Anschluß vergrößert dargestellt. Seitlich an das Kastenprofil werden mit Hilfe von Ringlochkelnähten, die nicht bis zur höchstbeanspruchten Randfaser des Biegeträgers reichen, die satt an den Biegeträgerstegen aufliegenden Bleche befestigt.

Der Durchmesser der Ausstanzungen sowie deren Abstand zueinander sind in Abhängigkeit von der Trägerhöhe h und den im Biegeträger wirkenden Spannungen festzulegen. Der Durchmesser der Ausstanzungen sollte nicht kleiner als 50 mm sein, damit die Schweißnaht standardgerecht ausgeführt werden kann. Deshalb sollte diese Variante erst bei Trägerhöhen ab etwa 100 mm zum Einsatz kommen. Die

Querkräfte werden günstig in die dünnen Stege eingeleitet, so daß keine Stabilitätsprobleme auftreten. Ist kein Ausbeulen der Stege zu erwarten, kann wie bei Profilen mit geringeren Trägerhöhen die Variante 8 nach Bild 2 realisiert werden.

Mit der im Bild 9 gezeigten Variante werden rd. 90% der Halbzeugschwingfestigkeit erreicht. Nachteilig ist die mögliche Spaltkorrosion, die jedoch durch Verschließen der Spaltöffnungen mit dauerelastischem Kitt verhindert werden kann.

3. Zusammenfassung

Die dynamischen Untersuchungen geschweißter Anschlüsse aus dünnwandigen Kastenprofilen zeigen die Abhängigkeit zwischen Gestaltung und Belastung. Darauf muß der Konstrukteur noch mehr als bisher achten, um den Forderungen nach ökonomischem Leichtbau gerecht zu werden. Die Ergebnisse der Untersuchungen vermitteln dem Konstrukteur neue Erkenntnisse, die geeignet sind, ihn bei der Realisierung des ökonomischen Leichtbaus zu unterstützen.

Literatur

- [1] Meinhardt, J.: Ermittlung der Schwingfestigkeit von Stabwerkelementen mit indirekt belasteten Anschlüssen an quadratischem dünnwandigem Rohrprofil. *Schweißtechnik* 24 (1974) H. 1, S. 30—31.
- [2] Meinhardt, J.: Schwingfestigkeitsuntersuchungen an ausgewählten geschweißten Tragwerkknoten aus quadratischem dünnwandigem Rohrprofil. *Schweißtechnik* 24 (1974) H. 3, S. 116—119.
- [3] Meinhardt, J.: Gestaltung dynamisch belasteter geschweißter Rahmenecken aus quadratischem dünnwandigem Rohrprofil. *Schweißtechnik* 24 (1974) H. 7, S. 311—314.
- [4] Meinhardt, J.: Beitrag zur Ermittlung des Zusammenhangs zwischen der Formzahl und der Schwingfestigkeit, dargestellt an Schweißbauteilen aus dünnwandigem quadratischem Rohrprofil. TH Karl-Marx-Stadt, Dissertation 1976.
- [5] Haibach, E.: Die Schwingfestigkeit von Schweißverbindungen aus der Sicht einer örtlichen Beanspruchungsmessung. TH Hannover, Dissertation 1968. A 2132

Folgende Fachzeitschriften der Elektrotechnik erscheinen im VEB Verlag Technik:
 Elektrik; der Elektro-Praktiker; Fernmeldetechnik; messen—steuern—regeln;
 Nachrichtentechnik—Elektronik; radio—fernsehen—elektronik