

Die Berücksichtigung der Spannungsfelder bei der Konstruktion von Schweißverbindungen

Von Dieter Radaj, Braunschweig-Völkenrode

Die Dauerfestigkeit metallischer Baukörper hängt in erster Linie von der Form und den Beanspruchungsverhältnissen ab. Eine Beurteilung der Dauerfestigkeit ist möglich, wenn man die Spannungsfelder kennt, die sich unter einer der dynamischen Belastung ähnlichen statischen Belastung ergeben. Die Dauerfestigkeit ist um so niedriger, je mehr Spannungsspitzen das Spannungsfeld aufweist, je höher diese Spitzen sind und je größer die Ausdehnung dieser Spitzen ist. Es ist notwendig, alle dauerbeanspruchten Schweißverbindungen unter dem Blickwinkel des Spannungsfeldes zu betrachten.

Spannungsfelder können im allgemeinen nicht rechnerisch ermittelt werden. Es ist nur in Sonderfällen möglich, das System partieller Differentialgleichungen hoher Ordnung, das die Ausbildung der Spannungen im Innern eines Baukörpers beschreibt, unter den allgemeinen Randbedingungen, die meist wiederum als Differential- und Integralgleichungen erscheinen, zu lösen. Die experimentelle Spannungsanalyse liefert demgegenüber schneller brauchbare Ergebnisse. Als Meßverfahren eignet sich besonders gut das Reißlackverfahren in Verbindung mit induktiven Dehnungsgebern und die polarisationsoptische Spannungsmessung.

Durch das Reißlackverfahren in Verbindung mit induktiven Dehnungsgebern werden die Spannungen auf der Bauteiloberfläche auf dem Umweg über die Dehnungen, die mit den Spannungen auf Grund des Hookeschen Gesetzes im engen Zusammenhang stehen, ermittelt. Auf der Bauteiloberfläche liegt in jedem Punkt ein zweidimensionaler Spannungs- bzw. Dehnungszustand vor, der dadurch gekennzeichnet ist, daß in zwei senkrecht zueinanderstehenden Richtungen größte und kleinste Dehnungen bzw. Spannungen auftreten. Wir bezeichnen diese Dehnungen und Spannungen als Hauptdehnungen und Hauptspannungen und die Richtungen, in denen sie auftreten, als Hauptrichtungen. Da die Größe und die Richtung der Hauptspannungen im allgemeinen von Ort zu Ort wechseln, zerfällt die Messung in zwei verfahrensmäßig getrennte Vorgänge, einmal die Ermittlung der Hauptrichtungen, zum anderen die Messung der Hauptdehnungen. Zur Bestimmung der Hauptrichtungen wird das Bauteil mit einem spröden, an der Oberfläche des Bauteiles fest haftenden Lack überzogen. Dehnt sich das Bauteil in diesem Zustand unter den aufgetragenen äußeren Lasten, dann reißt der Lack in jedem Punkt senkrecht zur größten (Zug-)Dehnung, also in einer Hauptrichtung.

Zur Messung der beiden Hauptdehnungen wird ein induktiver statischer Feindehnungsgeber verwendet. Die beiden Spitzen dieses Gebers, von denen eine fest, die andere beweglich ausgebildet ist, werden durch Federkraft in die Bauteiloberfläche gepreßt. Dehnt sich das Bauteil, dann ändert sich der Abstand der beiden Spitzen, und die Abstandsänderung wird als Induktivitätsänderung über eine Brückenschaltung als Spannungsänderung meßbar gemacht.

Bei der spannungsoptischen Meßmethode wird ein der zweidimensionalen Hauptausführung ähnliches, verkleinertes Kunststoffmodell hergestellt, das mit Kräften belastet wird, die ebenfalls unter Beachtung von Modellgesetzen verkleinert werden.

Läßt man polarisiertes Licht durch das spannungsbehaftete Modell fallen, dann beobachtet man Interferenzerscheinungen, die auf die Differenz der Hauptspannungen, also auf die Hauptschubspannung, zurückgeführt werden können.

Die Formenfülle der Schweißverbindungen kann in Grob- und Feinbau eingeteilt werden. Unter Grobbau sei Form und Anordnung der zu verbindenden Teile verstanden, unter Feinbau Form und Anordnung der Nähte. Diese Aufteilung ist auf Grund des Größenordnungsunterschiedes, auch vom Spannungsfeld her gesehen, gerechtfertigt. Die Wirkung verschiedener Schweißnahtformen und Schweißnahtanordnungen erfaßt nur Bereiche, die ebenso groß sind wie diese Schweißnähte (Prinzip von *Saint Venant*). Auch wird die Wertigkeit von Nahtformen und Nahtanordnungen unabhängig sein von der Beanspruchungshöhe des jeweiligen Feldteiles, in dem die Naht liegt.

Grobbau der Schweißverbindungen

Die Vielfalt der durch die Schweißtechnik möglichen Bauformen (Grobbau) ist gekennzeichnet durch die Möglichkeit schroffer Bauteilformänderung (gegenüber Gußkonstruktionen) verbunden mit starker Verformungsbehinderung und schroffen Steifigkeitssprüngen. Verformungsbehinderung und Steifigkeitssprünge bedeuten Spannungsspitzen, die durch konstruktive Maßnahmen vermieden werden müssen. Besonders ausgeprägte Spannungsspitzen treten bei Rahmen- und Fachwerkskonstruktionen auf, bei denen Knotenpunkte und Rahmenecken gegenüber den angeschlossenen Profilen wesentlich steifer sein können.

1. Verformungsbehinderung

1.1 Verwölbungsbehinderung bei Torsion offener Profile

Beansprucht man ein ausgesteiftes U-Profil auf Torsion, dann verformt es sich in der in **Bild 1** dargestellten Art und Weise. Der obere Flansch versucht, sich nach vorne zu bewegen, der untere nach hinten. Diese Verformung kann an den freien Enden des Profiles stattfinden, in der Mitte wird sie jedoch durch das dort gebildete Rechteckrohr behindert. Es entsteht eine Zugspannungsspitze oben vor dem Rechteckrohr und eine Druckspannungsspitze unten vor dem Rechteckrohr. Das unterschiedliche Verhalten von U-Profil und Rohrquerschnitt wird durch das Verhältnis der Torsionssteifigkeiten (1:1000) am besten gekennzeichnet. Das offene Profil verhält sich also sehr weich, das ge-

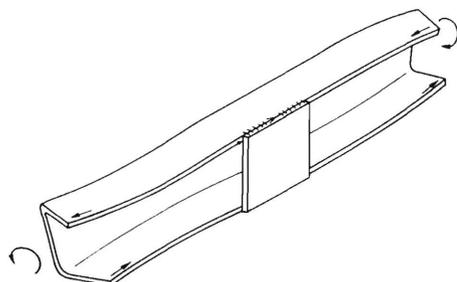
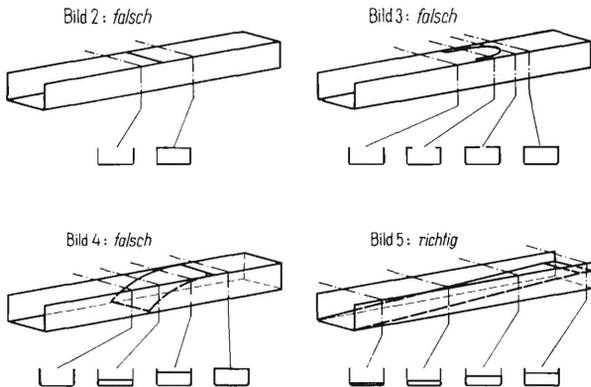


Bild 1. Verformungsmechanismus eines durch eine aufgeschweißte Platte versteiften U-Profiles bei Torsionsbeanspruchung.

geschlossene, rohrförmige Profil sehr steif. Will man die Spannungsspitzen vermeiden, dann ist es notwendig, einen stetigen Steifigkeitsübergang zu schaffen. In **Bild 5** ist dargestellt, wie dies

geschehen kann. Die Bauformen nach den **Bildern 2 bis 4** bringen keine Verbesserung, sie verlagern lediglich den Ort des Steifigkeitsüberganges.

Wird der Rohrquerschnitt durch eine Grundplatte ersetzt, dann ergeben sich die in den **Bildern 6 bis 10** dargestellten Anschlußmöglichkeiten. Sämtliche Bauformen bis auf die in **Bild 10** weisen hier hohe Spannungsspitzen auf. Die Bauform in **Bild 10** vermeidet die Spannungsspitze durch das Ausklinken der Flanschen, die sich jetzt unbehindert in Längsrichtung bewegen können.



Bilder 2 bis 5. Übergang von verdrehsteifen zu verdrehweichen Bauteilen (nach Bergmann [2]).

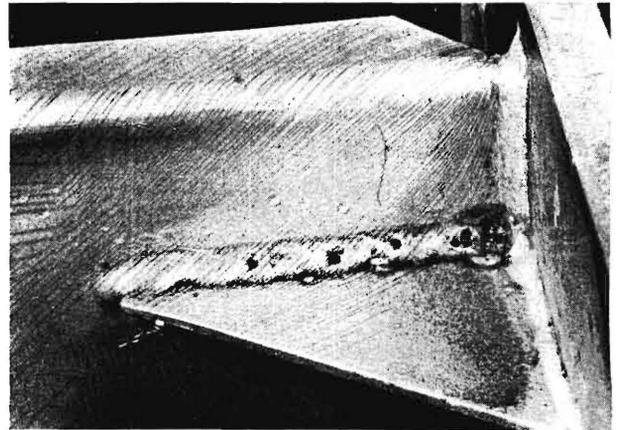
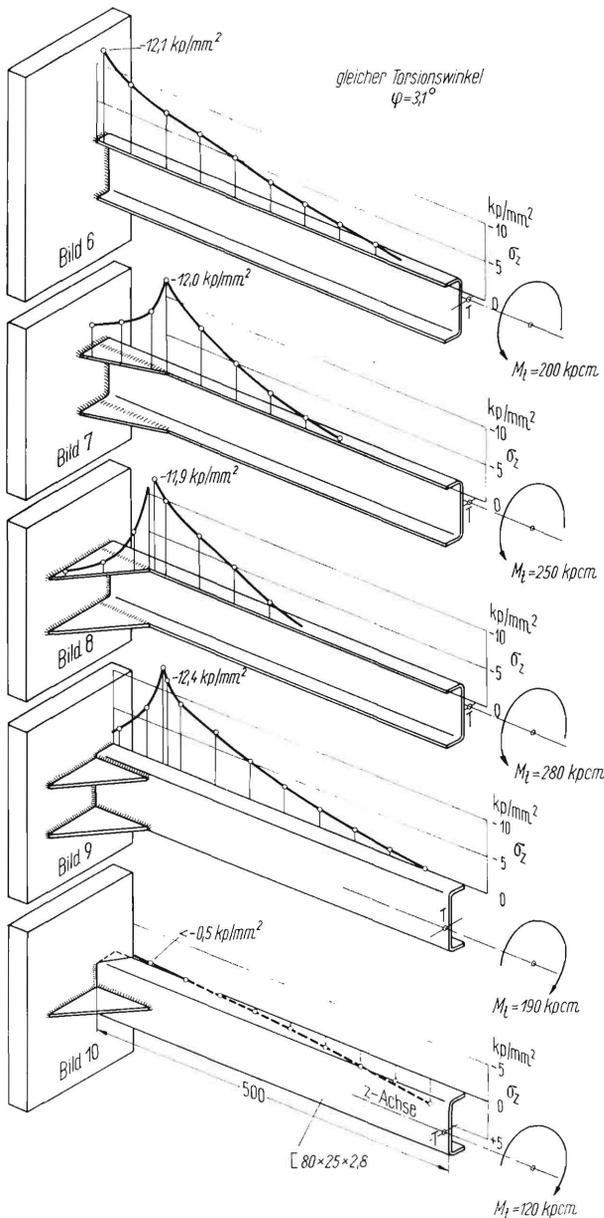


Bild 11. Gleichmäßige Dehnungslinien auf einem torsionsbeanspruchten U-Profilstab, der spannungsspitzenfrei angeschlossen wurde (nach Bergmann [5]).



Bilder 6 bis 10. Normalspannungsverteilungen auf der freien Flanschkante eines torsionsbeanspruchten U-Profilstabes bei unterschiedlicher Versteifung der Einspannstelle (nach Bergmann [5]).

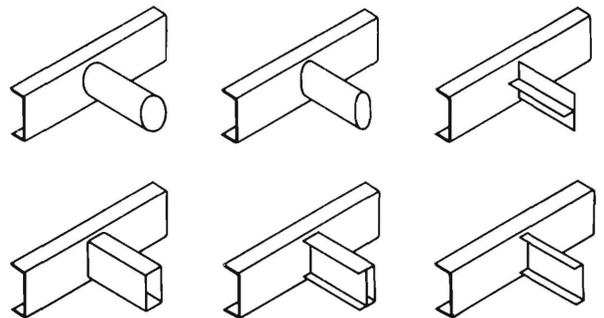


Bild 12. Konstruktiv verschiedene Rahmeneckverbindungen (nach Bergmann [3]).

In **Bild 12** sind eine Reihe von Rahmeneckverbindungen dargestellt, von denen jene als besonders ungünstig anzusehen sind, die offene und geschlossene Profile kombinieren. Am Ort des Steifigkeitsüberganges treten bevorzugt Brüche ein, **Bild 13**.

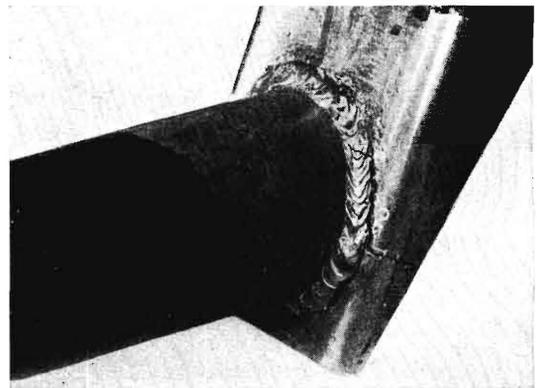


Bild 13. Rahmeneckverbindung an einem verwindungsbeanspruchten Fahrzeug. Dauerbruch in der Schweißnaht infolge der starken Verformungsbehinderung durch das Rohr (nach Spangenberg [9]).

1.2 Verformungsbehinderung bei Zug- und Biegestäben

Schneidet man einen Zug- oder Biegestab mit aufgesetzten Laschen oder Stegen in Richtung des Zuges, wie in **Bild 15** dargestellt, dann erhält man einen geschlitzten Kreuzknoten. Belastet man diesen Kreuzknoten durch ein Biegemoment oder durch eine Zugkraft, dann bilden sich am Beginn der Rundung und am Schlitzende Spannungsspitzen aus. Im spannungsoptischen Bild erscheinen an diesen Stellen Interferenzstreifen hoher Ordnung, **Bild 16**. Die Höhe der Spannungsspitzen wird gekennzeichnet durch Formzahlen, die auf die Randbiegespannung oder die mittlere Zugspannung im ungestörten Stab bezogen sind. Aus

den Diagrammen in **Bild 14** ist ersichtlich, daß die Formzahlen um so größer sind, je größer die Stabbreiten im Verhältnis zum Ausrundungsradius sind. Da dem Konstrukteur Biege- und Zugstabbreiten durch zulässige Spannungen vorgeschrieben werden, kommt es also darauf an, den Ausrundungsradius möglichst groß und die Breite des Versteifungsstabes möglichst klein zu wählen.

Diese Gesetzmäßigkeit gilt sehr allgemein. Von den in **Bild 17** und **18** dargestellten geschweißten T-Knoten ist derjenige spannungsspitzenfrei, dessen Zugstab in Richtung der Biegedehnung die geringste Ausdehnung hat, **Bild 18**. Bei dem nach **Bild 19** aus U-Profilen gebildeten T-Knoten wirkt sich das Ausschneiden des Stegbleches vorteilhaft aus.

Spannungsspitzen werden also weitgehend vermieden, wenn man Konstruktionen mit gleichmäßiger Steifigkeit bzw. mit allmählichem Steifigkeitsübergang schafft.

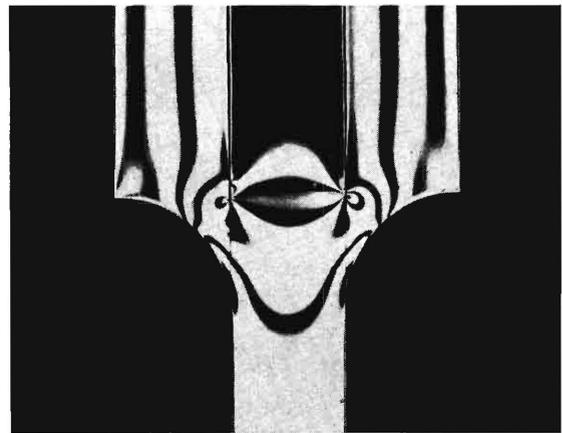
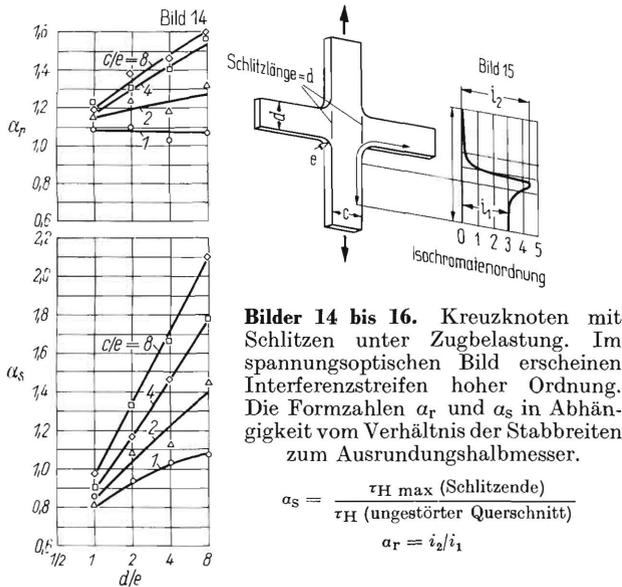
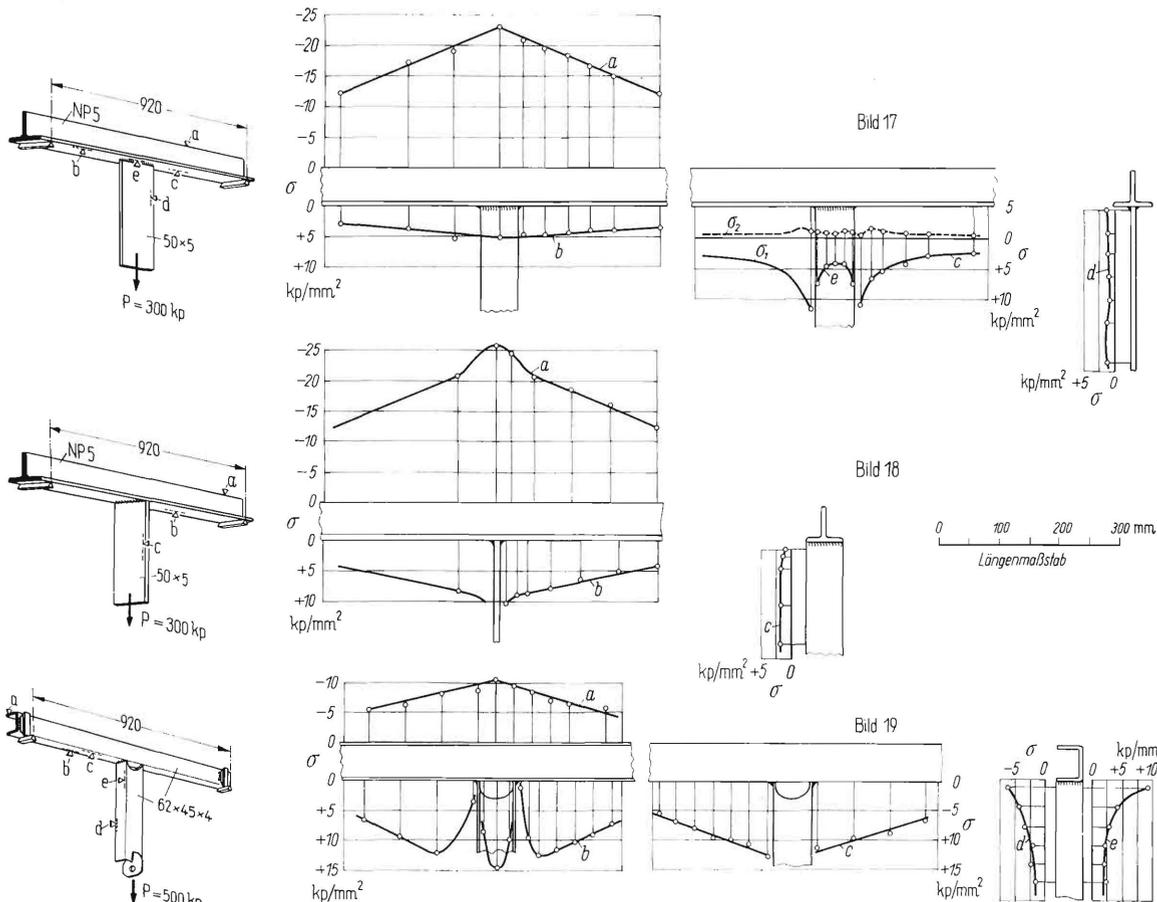


Bild 16.



Bilder 17 und 18. Spannungen in T-Knoten aus T- und Flachstahl (nach Kloth).

Bild 19. Spannungen in einem T-Knoten aus U-Profilen. Beim gezogenen U-Profil ist der Steg ausgeklinkt (nach Kloth).

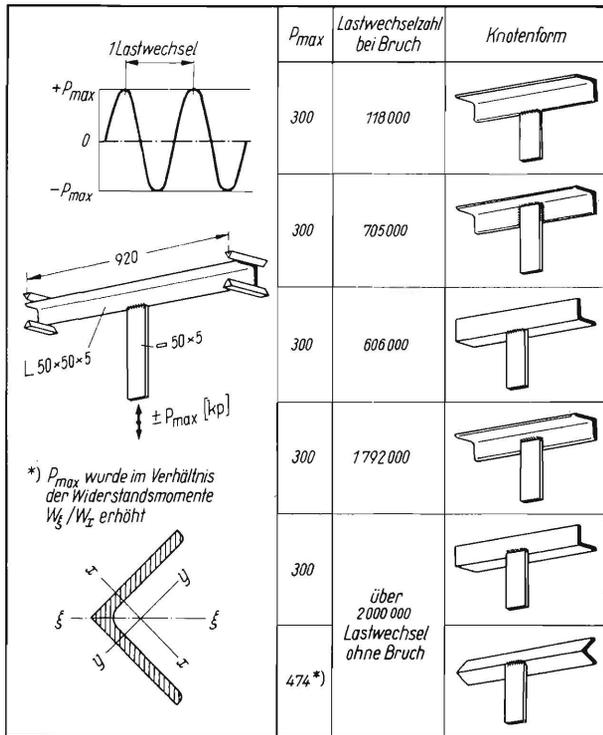


Bild 20. Lebensdauer von geschweißten T-Knoten aus Winkel- und Flachstahl bei wechselnder Beanspruchung (nach Spangenberg [8]).

2. Günstigste Nahtlage

2.1 Schweißnaht in spannungsarme Zonen legen

Die durch den Feinbau der Schweißnähte bedingten zusätzlichen Spannungserhöhungen werden sich um so stärker auswirken, je höher die Beanspruchung des Feldteiles ist, in dem die Naht liegt. Diese Gesetzmäßigkeit wird durch die in Bild 20

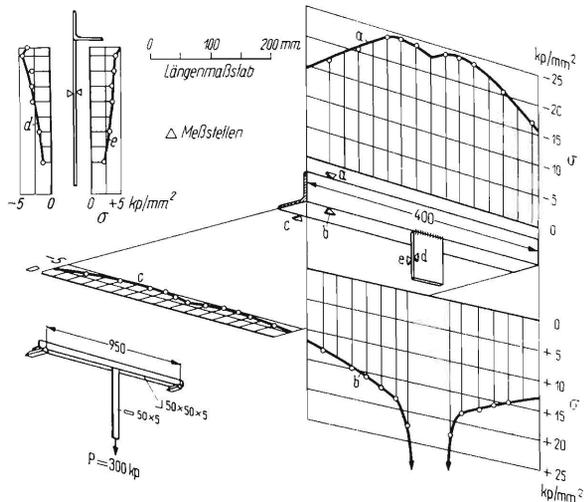


Bild 21. Spannungsspitzen in den Ecken eines T-Knotens aus Winkel- und Flachstahl (nach Kloth [10]).

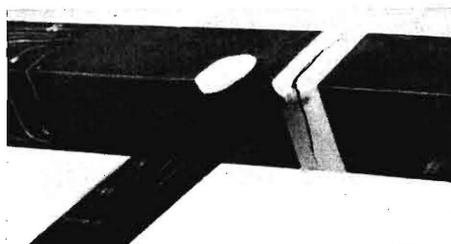
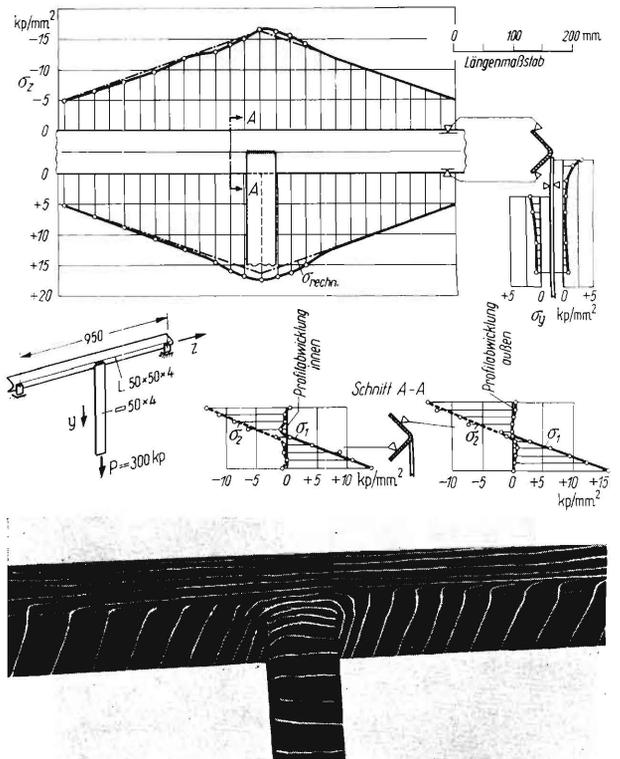


Bild 22. Bruchbild zu dem Knoten in Bild 21.



Bilder 23 und 24. Spannungen in einem T-Knoten aus Winkel- und Flachstahl bei Belastung im Schubmittelpunkt. Bild 24. Dehnungslinienbild (nach Spangenberg [8]).

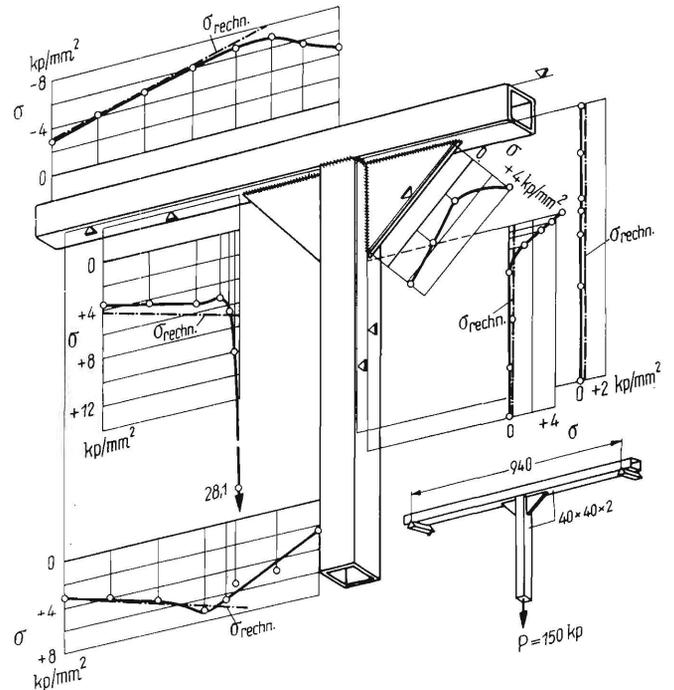


Bild 25. Spannungsverteilung an einem Rohrknoten mit hohen Spannungsspitzen am Auslauf der Versteifungsbleche (nach Kloth).

dargestellten Versuchsergebnisse bestätigt. Es ist besonders schlecht, den Zugstab in Nähe der Randbiegefaser anzuschließen, Bild 21. Knoten dieser Art brechen schon nach wenigen Lastwechseln, u. U. tritt ein Bruch am Ort der Spannungsspitze ein, Bild 22. Besonders günstig ist der in Bild 23 und 24 dargestellte Knoten. Durch das Hochkantstellen des Winkelprofils wird ein höheres Widerstandsmoment erreicht, der Biegestab ist also von vornherein wesentlich höher belastbar. Außerdem wird durch den Zugstabanschluß in der neutralen Zone die Spannungsspitze vermieden. Der Knoten ist trotz hoher Belastung dauerhaft.

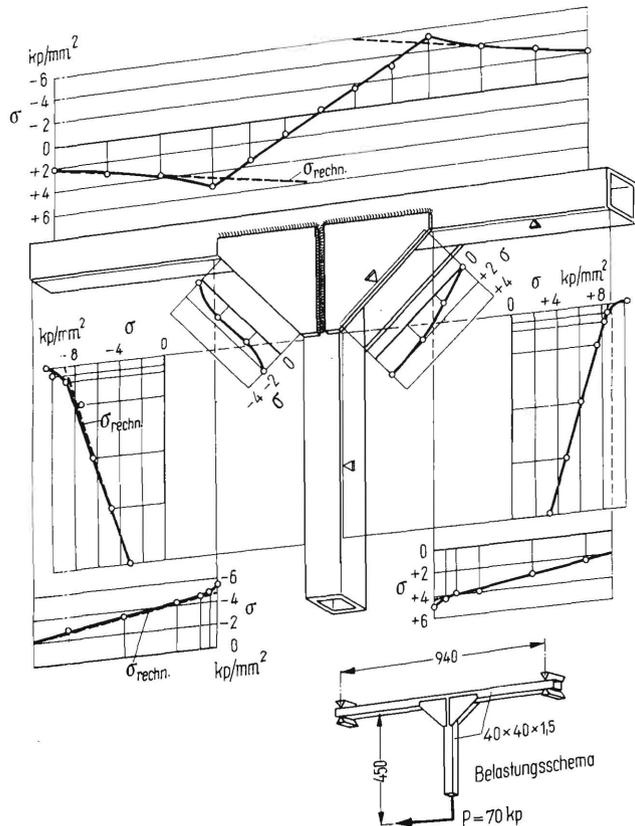


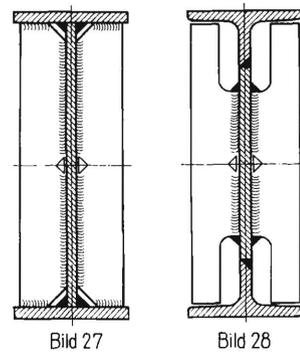
Bild 26. Spannungsverteilung an einem Rohrknoten. Schweißnähte der Versteifungsbleche in der neutralen Zone des Biegeträgers, daher spannungsspitzenfrei (nach Kloth).

Die Bevorzugung der neutralen Zone gilt auch für die Anordnung von Versteifungsblechen. Die Anordnung nach **Bild 25** weist hohe Spannungsspitzen auf, die Anordnung nach **Bild 26** ist spannungsspitzenfrei. In **Bild 27 und 28** ist die gute und die schlechte Ausführung eines ausgesteiften Biegeträgers gegenübergestellt. Bei der Ausführung in **Bild 27** sind die quer zur Zugrichtung in der Zone maximaler Biegespannung liegenden Kehlnähte besonders schädlich. Bei der Ausführung in **Bild 28** liegen alle Nähte nahe der neutralen Zone. Die Kehlnähte werden ganz vermieden.

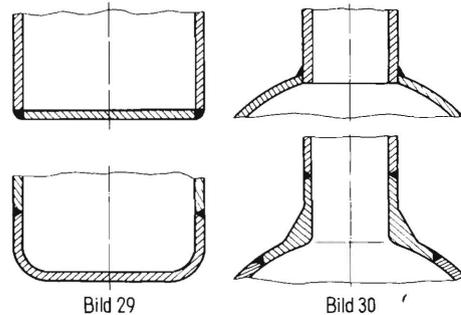
2.2 Naht heraus aus Zonen scharfer Form- und Steifigkeitsänderung legen

Zonen scharfer Steifigkeitsänderung sind immer Zonen hoher Spannung. Bei hochwertigen Konstruktionen wird die Schweißnaht aus diesen Zonen herausgelegt. In **Bild 29 und 30** sind oben ein Kesselboden und ein Rohrstützen dargestellt, die fertigungstechnisch sehr einfach, aber nicht sehr dauerhaft sind. Darunter sind entsprechende Ausführungen dargestellt, die fertigungstechnisch komplizierter, aber dafür dauerhaft sind. Der Pleuel in **Bild 31** weist Steifigkeitssprünge in beiden Projektionsebenen auf, der Pleuel in **Bild 32** besitzt dagegen nur noch in der einen Projektionsebene einen schwachen Steifigkeitsübergang, der jedoch nicht mehr mit der Schweißnaht zusammenfällt.

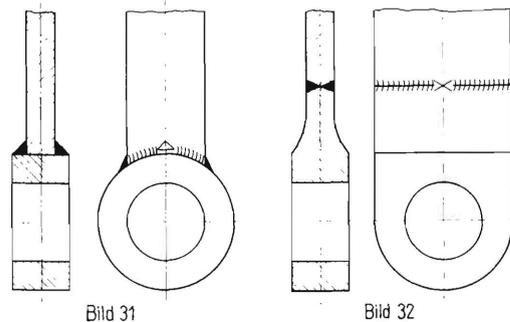
Die Ausführung der Lukenecke eines amerikanischen Liberty-Schiffes ist in **Bild 33** zu sehen. Die Blechsüsse liegen so, daß in der Ecke zwei Schweißnähte zusammenstoßen. Die im Ausschnitt dargestellte aufgeschweißte Platte war als Versteifung gedacht, erfüllte aber infolge des zusätzlichen Steifigkeitssprunges nicht ihren Zweck. Eine große Zahl der bei den Liberty-Schiffen beobachteten Sprödbrüche ging von den Lukenecken aus. In den Liberty-Schiffen folgenden, verbesserten Bauserie, den Victory-Schiffen, wurde die Lukenecke wesentlich verbessert, **Bild 34**. Die Blechsüsse wurden so gelegt, daß die Lukenecke frei von den Schweißnähten war, die Ecke selbst wurde außerdem ausgerundet, eine weitere Verbesserung erzielte man dadurch, daß für die Lukenecke ein Blech größerer Dicke gewählt wurde.



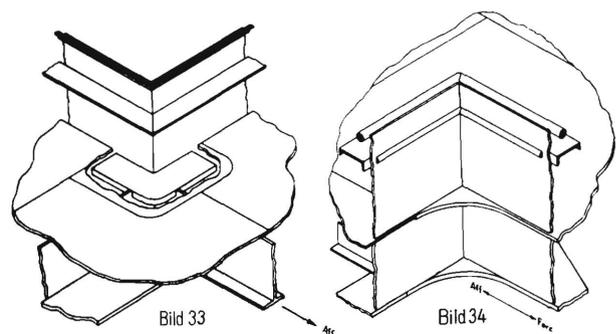
Bilder 27 und 28. Geschweißte I-Träger mit Aussteifung. (Bild 28 spannungsgerechte Ausführung).



Bilder 29 und 30. Geschweißte Kesselböden und Rohrstützen.



Bilder 31 und 32. Geschweißte Pleuelköpfe.



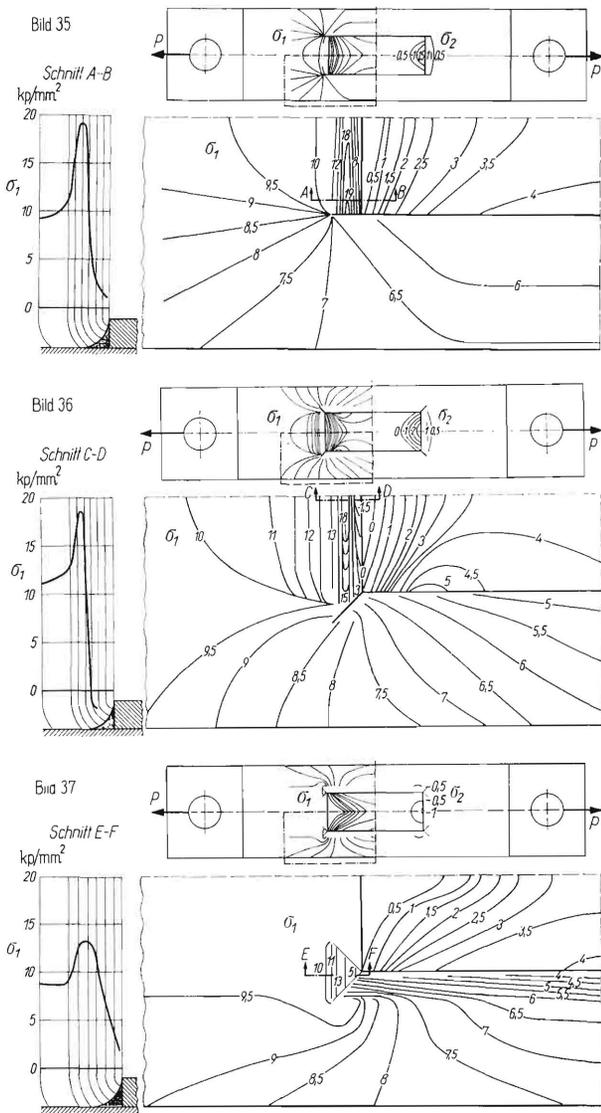
Bilder 33 und 34. Lukenecken von geschweißten amerikanischen Schiffen [13].

Bild 33. Liberty-Serie.

Bild 34. Victory-Serie.

2.3 Kehlnähte bei gleicher Verformungsbehinderung in Richtung der Hauptbeanspruchung legen

Eine Kehlnaht, die quer zur Hauptbeanspruchungsrichtung liegt, ist nie sehr dauerhaft. Eine Kehlnaht kann aber sehr dauerhaft sein, wenn sie in Richtung der Hauptbeanspruchung liegt. Eine Spannungsmessung an Zugstäben mit beidseitig aufgeschweißten Laschen unterstreicht diese Aussage. **Bild 35** zeigt einen Zugstab mit durch Hohlwähte nur querseitig angeschweißten Laschen, **Bild 36** zeigt denselben Zugstab mit allseitig angeschweißten Laschen und **Bild 37** Laschen mit nur längsseitiger



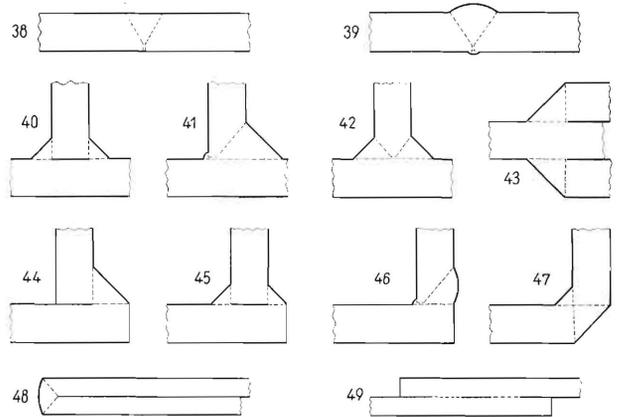
Bilder 35 bis 37. Spannungsfelder und Querschnitt mit größter Spannungsspitze bei Zugstäben mit beiderseits aufgeschweißten Laschen.

- Bild 35. Zugstab mit quer aufgeschweißten Laschen.
- Bild 36. Zugstab mit quer und längs aufgeschweißten Laschen.
- Bild 37. Zugstab mit längs aufgeschweißten Laschen.

Schweißnaht. Auf den Bildern sind die Höhenlinien des Spannungsgebirges auf Zugstab, Lasche und Schweißnaht dargestellt. Außerdem ist der Querschnitt mit der jeweils entscheidenden Spannungsspitze herausgegriffen. Aus den Bildern ist ersichtlich, daß die quer zur Zugrichtung liegende Naht eine sehr hohe Spitze hervorruft, Bild 35. Die Verlängerung der Quernaht zur Ringnaht ergibt keine wesentliche Verbesserung, Bild 36. Läßt man die Quernaht weg und schweißt die Lasche nur längsseitig an, dann treten Spannungsspitzen nur noch vor den Längsnahtenden auf. Sie sind nicht mehr so hoch wie bei der Quernaht und sind vor allem in ihrer Ausdehnung beschränkt, Bild 37. Die Längsnaht ist also als dauerfester als die Quernaht anzusehen, sofern man den Nahtansatz ausrundet.

Feinbau der Schweißverbindungen

Die Formenfülle des Feinbaus der Schweißverbindungen kann auf die in den **Bildern 38 bis 49** dargestellten Grundformen zurückgeführt werden. Es kann zwischen Stumpfnähten, Kehlnähten, Stirnnähten und Punktnähten unterschieden werden. Die Kehlnähte gliedern sich wiederum in T-Stöße, Kreuzstöße, Laschenstöße und Eckstöße. Die Kehlnaht kann als Hohlkehlnaht, Flachkehlnaht oder Wölbkehlnaht ausgeführt werden. Sämtliche Nähte können durchgehend oder abgesetzt geschweißt werden. Auch der Feinbau unterliegt der Einflußnahme des



Bilder 38 bis 49. Feinbau der Schweißverbindungen.

- Bild 38. Bearbeitete Stumpfnah.
- Bild 39. V-Naht mit Wurzelnachschweißung.
- Bild 40. T-Stoß mit Doppelkehlnaht.
- Bild 41. T-Stoß mit HV-Naht mit Wurzelnachschweißung.
- Bild 42. T-Stoß mit K-Naht mit Doppelkehlnaht.
- Bild 43. Laschenstoß mit Stirnkehlnähten.
- Bild 44. Eckstoß mit Kehlnaht.
- Bild 45. Eckstoß mit Doppelkehlnaht.
- Bild 46. Eckstoß mit V-Naht mit Wurzelnachschweißung.
- Bild 47. Eckstoß mit äußerer und innerer Ecknaht.
- Bild 48. Stirnfugennaht.
- Bild 49. Punktnaht.

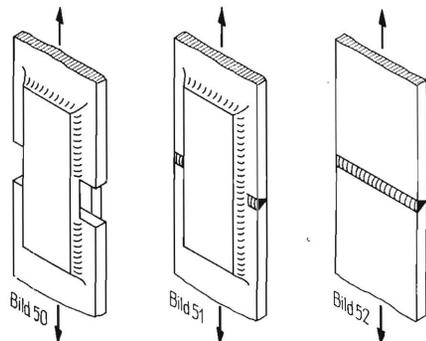
(Benennungen nach DIN 1912)

Konstrukteurs. Dabei wird vorausgesetzt, daß alle technologischen Unstimmigkeiten, also alle Schweißfehler vermieden werden können. Voraussetzung dafür ist eine gut geführte Werkstatt und eine Nachbearbeitung der Nähte an den kritischen Stellen. Die Bearbeitung der Nähte (Schleifen) wird auch von den wenigen bisher vorhandenen Vorschriften für die Konstruktion dauerbeanspruchter Teile verlangt, u. a. [14].

Schweißnähte sind immer Unstetigkeitsstellen der Form. Sie sind verbunden mit Steifigkeitssprüngen und meist auch mit Kraftumleitungen. Der Konstrukteur bestimmt Nahtart, Nahtform und Nahtanordnung.

3. Günstigste Nahtart

Die Stumpfnah ist gegenüber allen anderen Nahtarten zu bevorzugen. Dies drückt sich am klarsten an der konstruktiven Entwicklung der geschweißten Flacheisenstöße aus. In der Anfangszeit der Schweißtechnik übernahm man die in der Niettechnik gebräuchlichen überlaschten Stöße, **Bild 50**. Steifigkeitssprung und Kraftumleitung an der quergeschweißten Kehlnaht verursachten überaus hohe Spannungsspitzen und eine Verbindung, die in keiner Weise dauerhaft war. Später ging man dazu über, die Flacheisen zunächst stumpft aneinander zu schweißen und dann eine Lasche zur „Verstärkung“ darüber zu schweißen, **Bild 51**. Derartige „Angstlaschen“ wirken aber bezüglich der Dauerfestigkeit nicht als Verstärkung, sie verursachen einen Steifigkeitssprung und damit die schon bei den Zugstäben mit Laschen besprochenen Spannungsspitzen. Eine Verbindung ohne Steifigkeitssprung und ohne Kraftumleitung ist der Stumpfstoß, der sich inzwischen als die beste Verbindungsform herauskristallisiert hat, **Bild 52**.



Bilder 50 bis 52. Geschweißte Flachstahlstöße.

Eine besonders ungünstige Nahtart ist die Punktnaht. Die spannungsoptische Aufnahme, **Bild 53**, zeigt überaus hohe Spannungsspitzen an den Schlitzenden. Die sehr ungleichmäßige Verteilung der Interferenzstreifen kennzeichnet die ungleichmäßige Verteilung der Spannungen auf die vorhandenen Körperelemente. Das ungünstige Verhalten dieser Verbindungs-

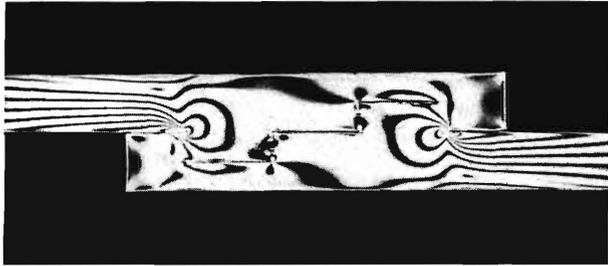


Bild 53. Spannungsoptische Aufnahme zweier Flachstäbe, die durch zwei „Schweißpunkte“ miteinander verbunden sind.

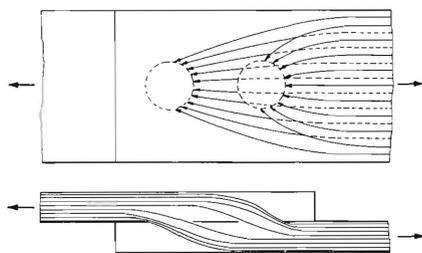


Bild 54. Kraftfluß in einer Punktschweißverbindung.

art hat seine Ursache darin, daß die angelegten äußeren Kräfte nur in sehr kleinen Bereichen („Punkten“) übertragen werden, **Bild 54**, und daß diese Kräfte durch ihren exzentrischen Angriff sehr große zusätzliche Biegungen hervorrufen. Die so entstehenden hohen Biegespannungen werden durch den Kerbeffekt des Schlitzendes noch verstärkt. Einen Eindruck von der Kompliziertheit der Spannungsfelder, die bei Punktnahtverbindungen auftreten, geben auch die **Bilder 55 und 56**. Die dort dargestellte Blechwand, die durch Z-Profile ausgesteift wurde, weist bei Querkraftbiegung Dehnungslinien auf, die die Schweißpunkte besonders hervortreten lassen. Das Spannungsfeld in **Bild 56** weist Spitzen über den Schweißpunkten auf.

4. Günstigste Nahtform

Der Einfluß der Kehlnahtform auf die Höhe der Spannungsspitze wurde an spannungsoptisch wirksamen Kunststoffmodellen ermittelt. In **Bild 57** ist das Modell eines Zugstabes mit aufgeschweißten Laschen dargestellt. Es treten Spannungsspitzen am Kehlnahtansatz und am Schlitzende auf. Die Spannungsspitzen,

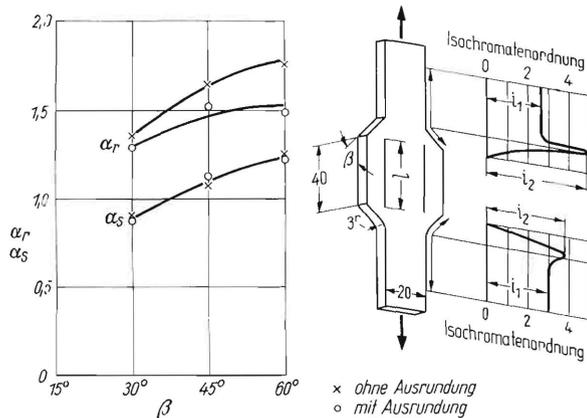


Bild 57. Formfaktoren eines geschlitzten Kreuzknotens bei verschiedener Form des Stabüberganges (Schweißnahtform).

$$\alpha_r = i_2/i_1 \quad \alpha_s = \frac{\tau_H \max(\text{Schlitzende})}{\tau_H(\text{ungestörter Zugstab})}$$



Bild 55. Dehnungslinienfeld an einem doppelten Blechboden mit eingepunkteten Z-Profilen (nach Kloth [11]).

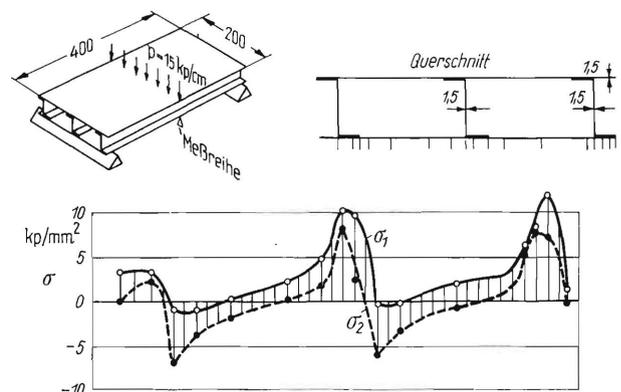


Bild 56. Spannungsverteilung auf dem doppelten Blechboden nach **Bild 55** (nach Kloth [11]).

ausgedrückt durch die Formzahlen α_r und α_s , sind abhängig von der Neigung der hier verwendeten Flachkehlnaht und davon, ob der Kehlnahtansatz ausgerundet wurde, oder ob die Flachkehle ohne Ausrundung ansteigt. Die Formzahlen sowohl des Nahtansatzes als auch des Schlitzendes sind um so niedriger, je flacher die Naht ansetzt. Dies steht im Einklang mit der Bundesbahnvorschrift für geschweißte Eisenbahnbrücken [14], die für geschweißte Gurtplattenenden einen Winkel von 25° vorschreibt. Die Formzahlen des Nahtansatzes werden durch eine Ausrundung verbessert. Die Verbesserung ist um so wirksamer, je

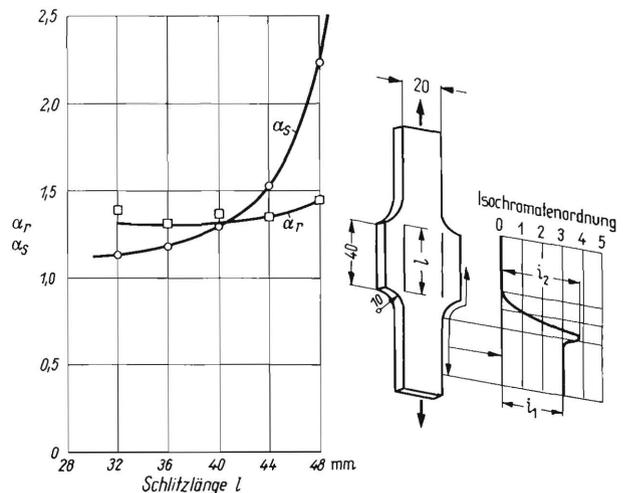
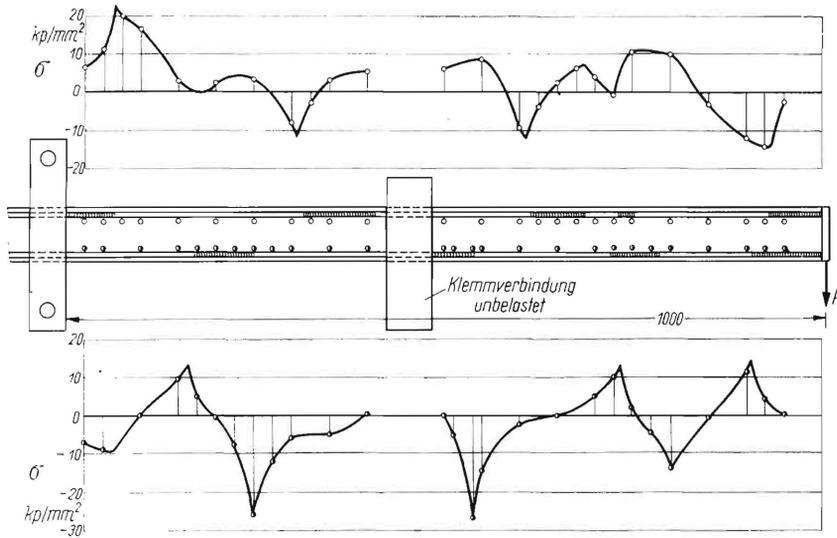
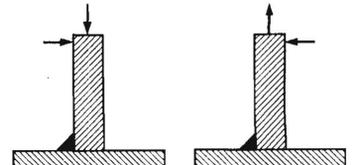
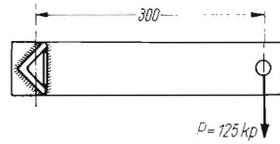


Bild 58. Formfaktoren eines geschlitzten Kreuzknotens bei verschiedener Schlitzlänge.



0 100 200 300
Längenmaßstab in mm



Bilder 59 und 60. Beanspruchungsmöglichkeiten einer Kehlnaht.

Bild 61. Spannungsverteilung auf einer torsionsbeanspruchten Werkzeugschiene (nach Bergmann [15]).

steiler der Nahtansatz ist. Die Formzahlen des Schlitzendes werden durch die gewählte Ausrundung mit kleinem Ausrundungsradius nicht beeinflusst.

Neben der sichtbaren äußeren Nahtform kann auch die unsichtbare innere Nahtform geändert werden. Das Schlitzende kann mehr oder weniger weit in die Schweißnaht hineinreichen, was mit unterschiedlich hohem Einbrand gleichbedeutend ist. In Bild 58 ist das Ergebnis einer Untersuchung dargestellt, die an einem Kunststoffmodell mit gleichbleibender Außenform aber mit wechselnder Schlitzlänge durchgeführt wurde. Die Formzahl des Schlitzendes ist in entscheidender Weise von der Schlitzlänge abhängig. Sie kann bei großer Schlitzlänge, also bei schlechtem Einbrand, wesentlich größer werden als die Formzahl des Nahtansatzes. Dauerbeanspruchte Schweißverbindungen können durch hohen Einbrand wesentlich verbessert werden.

5. Günstigste Nahtanordnung

Neben Nahtart und Nahtform ist die Nahtanordnung von entscheidender Bedeutung für die Ausbildung des Spannungsfeldes und für die Dauerhaltbarkeit des Bauteiles. Eine einseitige Kehlnaht kann sich bei der in Bild 59 dargestellten Beanspruchungsart abstützen und weist nur geringe Spannungsspitzen auf. Wird

die Richtung der Beanspruchung nach Bild 60 umgekehrt, dann erscheint eine überaus hohe Spitze am Schlitzende, die Verbindung ist nicht mehr brauchbar. Welch verheerenden Einfluß abgesetzte Schweißnähte haben können, zeigt Bild 61. Hier wurde ein Flacheisen in ein Winkelprofil eingeschweißt, welches als Werkzeugträger vor allem Torsionskräfte aufzunehmen hatte. Durch die Strichschweißung kam ein Träger zustande, der teilweise als offenes Profil, teilweise als Kasten wirkt. An den Enden der Schweißnähte treten überaus hohe Spannungsspitzen auf.

Zusammenfassung

Die konstruktiven Maßnahmen bei der Konstruktion dauerfester Schweißverbindungen zielen auf Baukörper gleicher Steifigkeit bzw. allmählichen Steifigkeitsüberganges. Baukörper stetiger Form sind zu bevorzugen. Die Schweißnaht soll in spannungsarme Zonen und in Zonen stetiger Form gelegt werden. Sie soll die Richtung der Hauptbeanspruchung haben, wenn eine bestimmte Verformungsbehinderung vorgegeben ist. Stumpfnähte sind gegenüber anderen Nahtarten zu bevorzugen. Kehlnähte sind mit flachem Nahtansatz, mit ausgerundetem Ansatz und mit hohem Einbrand auszuführen. Durchgehende und zweiseitige Nähte sind zu bevorzugen.

Schrifttum

[1] Thum, A., u. A. Erker: Gestaltfestigkeit von Schweißverbindungen. In: Heft 10 der Mitteilungen der Materialprüfungsanstalt an der TH Darmstadt. VDI-Verlag Berlin 1942.
 [2] Bergmann, W.: Steifigkeit sperriger Bauteile. In: 9. Konstrukteurheft. Düsseldorf: VDI-Verlag 1951. S. 61/67 (Grundl. d. Landtechn. Heft 1).
 [3] Bergmann, W.: Spannung und Gestalt bei Knotenpunkten, insbesondere bei verwindungsfähigen Konstruktionen. In: 9. Konstrukteurheft. Düsseldorf: VDI-Verlag 1951. S. 73/81 (Grundl. d. Landtechn. Heft 1).
 [4] Bergmann, W.: Neue Erkenntnisse über beanspruchungsgerechte Gestaltung, insbesondere bei Behinderung der Querschnittsverwölbung offener Profile. In: 10. Konstrukteurheft. Düsseldorf: VDI-Verlag 1952. S. 12/23 (Grundl. d. Landtechn. Heft 3).
 [5] Bergmann, W.: Sichtbar gemachte Spannungsfelder in Maschinenteilen. In: 11. Konstrukteurheft. Düsseldorf: VDI-Verlag 1953. S. 12/33 (Grundl. d. Landtechn. Heft 4).
 [6] Kloth, W., u. W. Bergmann: Die Bedeutung der Steifigkeit für die Tragfähigkeit geschweißter Konstruktionen. VDI-Berichte Bd. 9, 1956, S. 83/91.
 [7] Bergmann, W.: Festigkeitsprobleme für den Konstrukteur, insbesondere beim Entwurf von sperrigen Maschinenteilen. Konstruktion 9 (1957) H. 3, S. 105/18.
 [8] Spangenberg, D.: Untersuchung der spannungsgerechten Gestaltung von geschweißten Stabanschlüssen an Biegeträgern aus Flachstäben und Winkelprofilen. Diss. TH Braunschweig 1958.
 [9] Spangenberg, D.: Aus der Praxis des Fahrzeug-Leichtbaues. In: 16./17. Konstrukteurheft. Düsseldorf: VDI-Verlag 1959. S. 110/15 (Grundl. d. Landtechn. Heft 11).
 [10] Kloth, W.: Spannungs- und Verformungsfelder als Grundlage der festigkeitgerechten Gestaltung von Landmaschinen. In: 11. Konstrukteurheft. Düsseldorf: VDI-Verlag 1959. S. 105/109 (Grundl. d. Landtechn. Heft 11).
 [11] Kloth, W.: Spannungsfelder als notwendige Grundlage für eine festigkeitgerechte Gestaltung im Kranbau. Stahl und Eisen 80 (1960) H. 3, S. 159/64.
 [12] Spangenberg, D.: Die Konstruktion von Maschinen und Fahrzeugen, die auf unebenen Fahrbahnen fahren. In: 18. Konstrukteurheft. Düsseldorf: VDI-Verlag 1960. S. 5/12 (Grundl. d. Landtechn. Heft 12).
 [13] Brown, D. P.: Observations on experience with welded ships. Welding Journal Supplement 31 (1952) S. 765.
 [14] Bundesbahnvorschrift für geschweißte Eisenbahnbrücken DV 848.
 [15] Bergmann, W.: Beanspruchung und Gestaltung bei Werkzeugschienen und Klauen für Hackgeräte. In: 12. Konstrukteurheft. Düsseldorf: VDI-Verlag 1955. S. 91/105 (Grundl. d. Landtechn. Heft 6).