

Rudolf KOLLER

Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaues
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Deutschland

METHODISCHES KONSTRUIEREN VON LASERSCHWEIßVERBINDUNGEN; GRUNDLAGEN

Zusammenfassung. Durch Laserstrahlschweißen ergeben sich für zu verbindende Bauteile und deren Schweißverbindungen neue, vorteilhafte Gestaltungsmöglichkeiten. Bisherige Anwendungen dieses Verfahrens beschränken sich oft darauf, andere Fügeverfahren nur zu substituieren, ohne die durch das Laserschweißen gegebenen neuen Gestaltungsmöglichkeiten zu nutzen. Die folgenden Ausführungen sollen auf die vielfältigen Gestaltungsmöglichkeiten von Laserschweißverbindungen dünner Bleche hinweisen und zu deren Anwendung anregen. Darüber hinaus wird auf die Lösung des Problems der Erzeugung präziser Schweißfugen eingegangen.

1. Einleitung und Aufgabenstellung

Zum Bau technischer Systeme werden häufig Bauteile sehr komplexer Gestalt benötigt, die nicht oder nur sehr aufwendig aus einem Bauteil hergestellt werden können. Die in Bild 1 gezeigte PKW-Motorhaube sowie Karosserie-Details können hierzu als Beispiele gelten. Aus Einzelteilen gefügte Schweißbaugruppen sollen einem gewünschten einstückigen Bauteil in Aussehen und Eigenschaften möglichst nahe kommen. Hierbei erweisen sich Schweißverbindungen gegenüber Nieten, Schrauben und anderen Verbindungsarten hinsichtlich Aussehen (Design), Festigkeit und Kosten häufig als die besseren Lösungen. So wird beispielsweise das Laserstrahlschweißen an Fahrzeugkarosserien und anderen Dünnpblechkonstruktionen bereits vorteilhaft eingesetzt, weil es manche Verbindungsaufgaben besser zu lösen vermag als konventionelle Schweißverfahren.

Neben der Funktion, zwei Bauteile starr zu verbinden, haben Schweißverbindungen häufig noch weitere Bedingungen zu erfüllen; so beispielsweise "dicht zu sein", ein "gutes Aussehen" oder "Flanschflächen für weitere Anbauteile" zu besitzen, "korrosionsunempfindlich zu sein" u. a. m. Um Schweißverbindungen mit entsprechenden Eigenschaften zu entwickeln, steht dem Konstrukteur - neben der Variation von Werkstoffen - nur noch die Variation der Gestaltparameter von Schweißverbindungen als Lösungsmittel zur Verfügung. Die Gestaltparameter sind für die

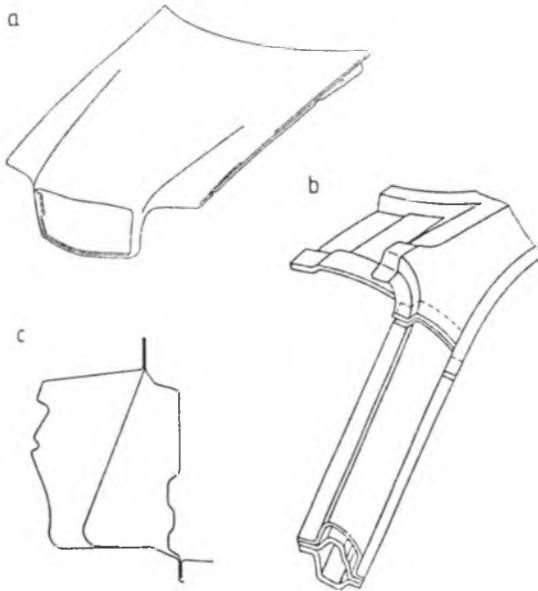


Bild 1. Komplizierte Blechbauteile, welche nicht oder nur schwer aus einem Blechteil gefertigt werden können und folglich günstiger aus mehreren Schweißbauteilen zusammengesetzt werden. Beispiele: Motorhaube (a), PKW-A-Säule und vordere Dachknoten (b), PKW-Bodenlängsträger (c)

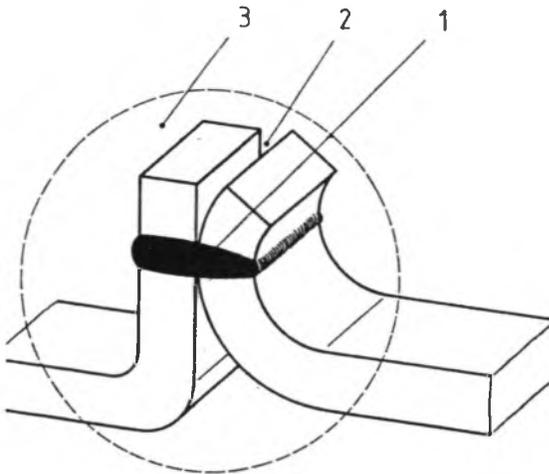


Bild 2. Gestaltungsbereiche einer Schweißverbindung: Naht (1), Fuge (2), Fugen-Nachbarbereich (3) und übriger Bauteilbereich (Fernbereich) (4)

- Naht,
- Fuge,
- Baugruppe "Naht-Fuge",
- Fugen-Nachbarbereich und
- Baugruppe "Gesamtverbindung"

zu gliedern (Bild 2).

Bei einer Verbindung zweier Schweißbauteile ist ferner zwischen der Gestalt der einzelnen, diskreten Schweißverbindungen und der Gestalt der Gesamtverbindung der betreffenden Bauteile zu unterscheiden.

Unter einer einzelnen, diskreten Schweißverbindung soll eine ununterbrochene, d. h. nur aus einem Stück Naht bestehende Schweißverbindung verstanden werden. Im Falle einer Punktschweißverbindung heißt dies: 1 Schweißpunkt = 1 Schweißverbindung. Unter dem Begriff "Gestalt einer Gesamtverbindung" soll die Gestalt der Gesamtheit aller Einzelverbindungen zweier Schweißbauteile verstanden werden. Zum besseren Verständnis des Gesagten zeigt Bild 3 eine Gestalt- und Verbindungsstruktur zweier, mittels mehrerer Schweißverbindungen gefügter Teile.

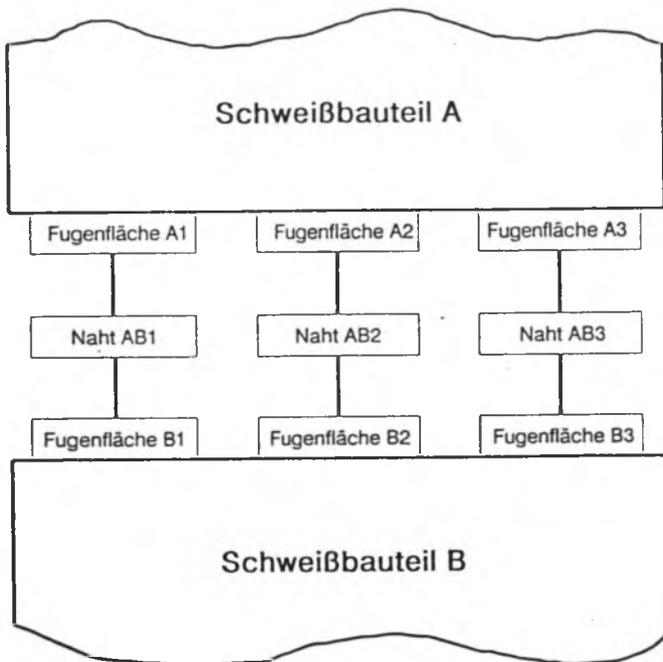


Bild 3. Verbindungs- und Gestaltstruktur einer Gesamtverbindung zweier mittels mehrerer Schweißverbindungen verbundener Bauteile

Konstruktion von Schweißverbindungen bestimmter Eigenschaften deshalb von zentraler Bedeutung. Das methodische Gestalten von Schweißverbindungen, insbesondere von Laserschweißverbindungen dünner Bleche, und die mit diesem Verfahren gegebenen neuen Gestaltungsmöglichkeiten aufzuzeigen, ist Ziel der folgenden Ausführungen.

Schließlich soll im folgenden auch auf die durch das Laserschweißen bedingte genaue Positionierung der zu verschweißenden Bauteile und die damit verbundene Toleranzproblematik bei der Konstruktion von Schweißvorrichtungen eingegangen werden.

2. Systematisches Gestalten von Dünoblech-Schweißverbindungen

Die Gestalt technischer Gebilde wird in erster Linie durch die von diesen zu erfüllenden Funktionen bestimmt. Des weiteren wird diese noch durch eine Vielzahl weiterer Bedingungen, wie beispielsweise "zuverlässig, fertigungs-, montage-, umweltgerecht" u. a. Forderungen festgelegt. Benötigt man Bauteile sehr komplexer Gestalt, welche sich nicht mehr oder nicht wirtschaftlich aus "einem Stück" herstellen lassen, so können diese beispielsweise durch Verschweißen zweier oder mehrerer einfacher Teile erzeugt werden. Entsprechend ist zwischen der Gestalt von Bauteilen und deren Schweißverbindungen zu unterscheiden.

Eine Schweißverbindung hat die "Funktion", zwei Schweißbauteile mittels Kohäsionskräften so (starr) miteinander zu verbinden, daß die auf diese Weise entstehende Schweißbaugruppe annähernd die gleichen Gestalteeigenschaften besitzt, wie ein einstückiges Bauteil ähnlicher Gestalt.

Die Aufgabenstellung bzw. Bedingungen, welche bei der Konstruktion einer Schweißverbindung berücksichtigt werden müssen, werden zum Teil durch die zu verschweißenden Teile bestimmt. Hieraus folgen beispielsweise der Werkstoff, die Blechdicke, der Winkel, unter welchem die Bleche in den Knotenbereich münden, ferner die geometrische Bedingung, ob die Bleche im Knotenbereich enden oder durch diesen hindurchlaufen.

Weitere, an Schweißverbindungen zu stellende Bedingungen können beispielsweise die Nahtlänge, der Nahtverlauf (geradlinig, kreis-förmig, spline-förmig), bestimmte Wirkflächen (zur Befestigung von Gummidichtungen oder Sichtscheiben), die Dichtheit, das Aussehen (Design), keine scharfen Kanten (Verletzungsgefahr!), die Art der Beanspruchung der Naht (Zug-, Druck-, Scherspannung) oder eine korrosionsunempfindliche Gestaltung sein.

Dem Konstrukteur steht zur Entwicklung von Schweißverbindungen bestimmter Eigenschaften neben der Blechdicke und dem Blechwerkstoff nur noch das Lösungsmittel "Variation der Gestaltparameter einer Verbindung" zur Verfügung. Blechdicke und Blechwerkstoff werden meistens durch die Funktion und sonstige, an die betreffende Schweißbaugruppe zu stellende Bedingungen festgelegt. Im folgenden sollen die Gestaltelemente und Gestaltparameter von Schweißverbindungen aufgezeigt und mittels Beispiele verdeutlicht werden. Zu diesem Zweck ist es sinnvoll, die Gesamtverbindung zweier Schweißbauteile in die Gestaltbereiche

<p>d Abmessungsparameter einer Naht: Breite b, Tiefe t, Länge l</p>	
<p>b Form von Nähten</p>	
<p>c Arten und Kombinationen von Gestaltelementen von Fugen</p>	
<p>d Form von Fugenflächen und/oder Fugenkanten</p>	
<p>e Abmessung von Fugenflächen; Länge, Breite</p>	
<p>f Abstand von Fugenflächen</p>	
<p>g Neigung von Fugenflächen</p>	
<p>h Lage der Naht bzgl. Fugenflächen</p>	
<p>i Abstand der Naht bzgl. bauteilfestem Bezugssystem</p>	
<p>k Neigung der Naht bzgl. bauteilfestem Bezugssystem</p>	
<p>l Zahl und Form der Teiloberflächen im Nahbereich der Schweißverbindung</p>	
<p>m Zahl der Schweißverbindungen einer Gesamtverbindung</p>	

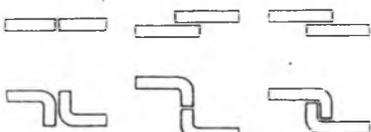
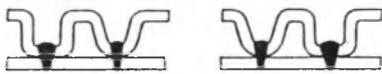
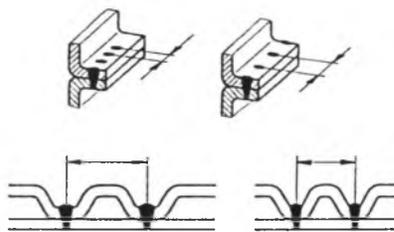
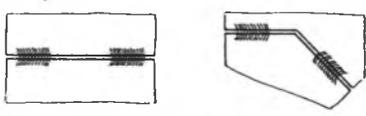
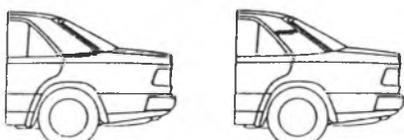
n Lage der Bauteile zueinander bzgl. Teiloberflächen	
o Reihenfolge von Schweißverbindungen unterschiedlicher Gestalt	
p Verbindungsstruktur bzgl. Teiloberflächen	
q Abstände der Schweißverbindungen relativ zueinander	
r Neigungen der Schweißverbindungen relativ zueinander	
s Längen- und Neigungsabstände bzgl. eines baugruppenfesten Koordinatensystems	

Bild 4. Gestaltelemente und Gestaltparameter von Schweiß-Gesamtverbindungen; Nahtparameter (a-b), Fugenparameter (c-g), Parameter der Baugruppe "Naht-Fuge" (h-k), Parameter der Baugruppe "Gesamtverbindung" (l-s)

2.1. Gestaltungsbereiche und Gestaltparameter

Gestaltparameter der Naht: Die Gestalt des Bauelements "Naht" wird im wesentlichen durch folgende Gestaltparameter beschrieben:

- Abmessungen der Naht, d. s. Länge, Breite und Tiefe; durch Ändern dieser Parameter können die Nahtgestalt und mithin auch die Eigenschaften (z. B. Festigkeit etc.) von Schweißverbindungen, variiert werden. Auch die Querschnittsform einer Naht kann als ein weiterer Gestaltparameter betrachtet werden (Bild 4a).

- Form (Verlauf) der Naht. Bemerkenswert ist, daß bei Laserschweißverbindungen die Nahtform unabhängig von der Fugengestalt variiert werden kann (Bild 4b).

Gestaltparameter der Fuge: Die Gestalt von Schweißungen kann durch Kombinieren und Ändern folgender Gestaltelemente und Gestaltparameter variiert werden:

- der Gestaltelementekombinationen: Kante-Kante, Kante-Fläche, Fläche-Fläche, s. Bild 4c,
- der Form der Fugenflächen: eben, zylinderförmig, spline-förmig, etc., s. Bild 4d,
- der Abmessungen, d. s. Länge und Breite der Fugenflächen, s. Bild 4e,
- des Abstandes der Fugenflächen (Spaltweite), s. Bild 4f und
- der Neigung der Fugenflächen zueinander, s. Bild 4g.

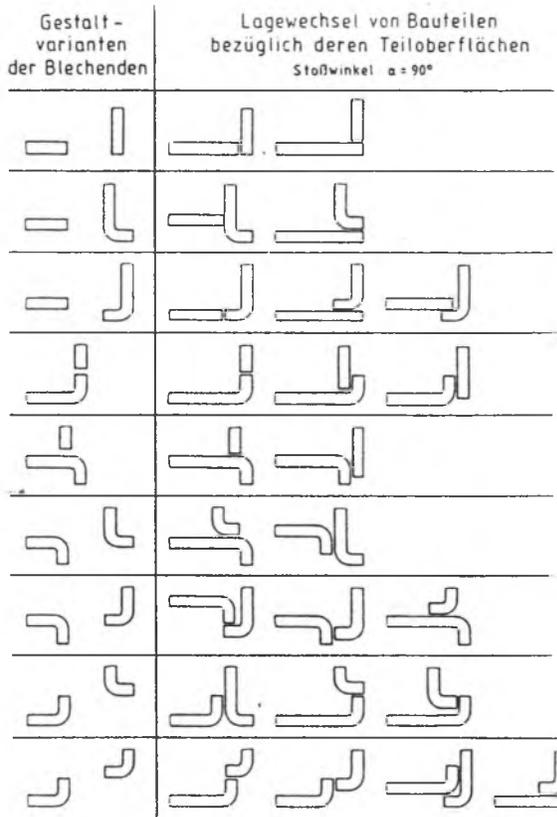


Bild 5. Varianten der Fugenlage dünner Bleche, entstanden durch Lagewechsel der Schweißbauteile bzw. Lagewechsel bezüglich Teiloberflächen der Schweißbauteile. Stoßwinkel der Bleche = 90° .

Gestaltparameter der Baugruppe "Naht-Fuge": Die Gestalt der Baugruppe "Naht-Fuge" kann durch Ändern folgender Parameter variiert werden:

- die Lage der Naht bezüglich Fuge bzw. Fugenflächen, s. Bild 4h,
- den Abstand der Naht bezüglich eines bauteilfesten Koordinatensystems, s. Bild 4i und
- die Neigung der Naht bezüglich Fugenflächen, s. Bild 4k.

Gestaltparameter der Baugruppe "Gesamtverbindung": Die Gestalt der Baugruppe "Gesamtverbindung" (Gesamtheit aller Einzelschweißverbindungen zweier Bauteile) läßt sich durch das Variieren der

- Gestalt der Fugen-Nachbarbereiche; - beispielsweise durch ein- oder mehrfaches Abkanten (Umbiegen) dünner Bleche, in die eine oder andere Richtung (Bild 4l), ändern.

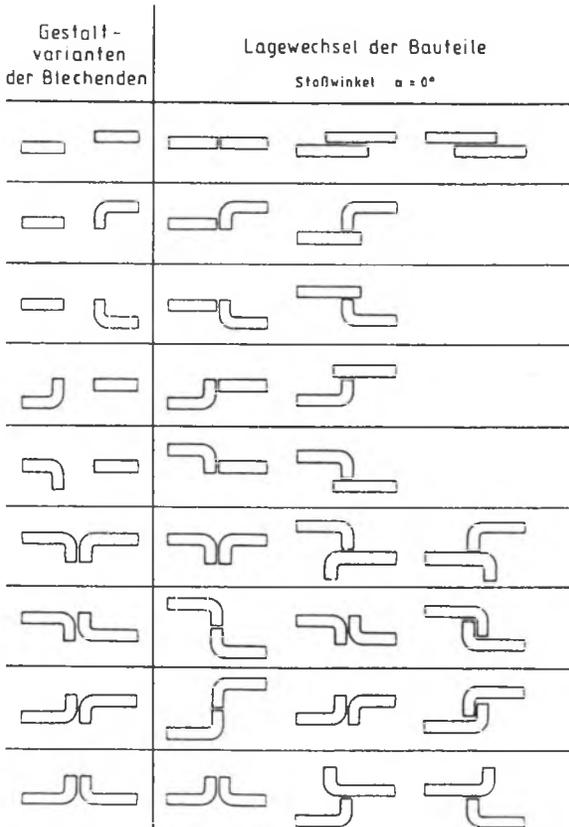


Bild 6. Varianten der Fugenlagen dünner Bleche, entstanden durch Lagewechsel der Schweißbauteile bzw. Lagewechsel bezüglich Teiloberflächen der Schweißbauteile. Stoßwinkel der Bleche $= 0^\circ$.

Üblicherweise beschränkt sich die Gestaltvariation der Fugen-Nachbarbereiche auf solche Gestaltvarianten, welche durch einfaches Umformen kostengünstig hergestellt werden können;

ferner läßt sich die Gestalt der Gesamtverbindung durch einen Wechsel der

- Zahl der eine Verbindung bildenden Schweißverbindungen, s. Bild 4m,
 - Lage der Schweißbauteile zueinander, s. Bild 4n,
 - Reihenfolge von Schweißverbindungen unterschiedlicher Gestalt, s. Bild 4o,
 - Verbindungsstruktur bezüglich Fugenflächen, s. Bild 4p,
 - Abstände (Längenabstände) der Schweißverbindungen zueinander, s. Bild 4q,
 - Neigungen (Neigungsabstände) der Schweißverbindungen zueinander, s. Bild 4r und
 - Längen- und Neigungsabstände der Schweißverbindungen bezüglich eines bauteilfesten Koordinatensystems, s. Bild 4s
- variieren.

Die Bilder 5 und 6 zeigen beispielhaft für Stoßwinkel $\alpha = 0^\circ$ und 90° , welche Gestaltvarianten von Schweißverbindungen sich durch die Variation des Gestaltparameters "Lage der Schweißbauteile zueinander", d. h. bezüglich ihrer Teiloberflächen, ergeben.

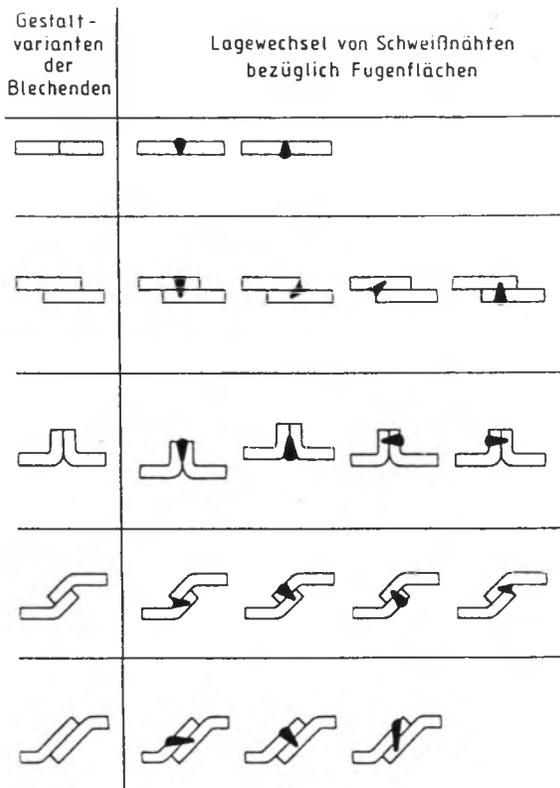


Bild 7. Gestaltvarianten einer Schweißverbindung, entstanden durch Lagewechsel der Naht bezüglich Fugenflächen

Das Laserschweißverfahren erlaubt im Gegensatz zu den meisten anderen Schweißverfahren,

- dünne Bleche stumpf aneinander stoßen zu lassen (s. Bild 4n),
- die Lage und Neigung von Nähten bezüglich Fugen unabhängig voneinander festlegen zu können (s. Bilder 4b,k und Bild 7),
- die Nachbarbereiche von Schweißverbindungen vielfältiger (mehr Gestaltungsparameter) als im Falle von Punktschweißverbindungen gestalten zu können.

Der Konstrukteur kann diese zusätzlichen Gestaltungsparameter ("Freiheiten") beispielsweise dazu nutzen, eine Schweißnaht so zu gestalten, daß diese (bei gegebener Belastungsrichtung der Bauteile) vorwiegend mit einer gewünschten Spannungsart beansprucht wird (s. Bild 8).

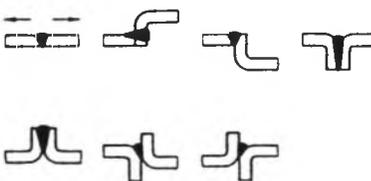
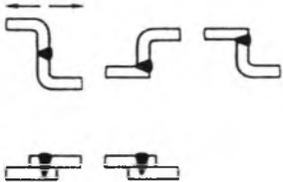
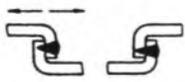
vorwiegende Beanspruchungsart	Gestalt der Blechenden
 <p>Zug</p>	
 <p>Scherung</p>	
 <p>Druck</p>	

Bild 8. Gestaltvarianten von Schweißverbindungen, geordnet nach Varianten gleicher Art von Spannungen in der Naht, bei gleicher Belastung.

Zur Fertigstellung des Profils genügen jetzt vier Schweißungen (vorher fünf); diese können als durchgehende Dichtnähte (Entfall von PVC-Abdichtungen etc.) ausgeführt werden und weisen eine dem Grundwerkstoff etwa entsprechende Festigkeit auf. Anders als beim Punktschweißen wird so die Festigkeit der Bleche voll ausgenutzt, so daß ggf. auch Blechdickenreduzierungen und folglich Gewichtsreduzierungen möglich sind. Im unteren Bereich des Längsträgers sind aus funktionalen Gründen zwei Flansche verblieben; sie werden als Aufsteckflansche benötigt, konnten aber deutlich verkürzt werden.

Die Steifigkeit des Profils steigt an, weil die Profilquerschnittsfläche (bei gleichem verfügbarem Bauraum) deutlich vergrößert werden konnte.

2.2. Gestaltungsprozeß

Der "im Kopfe des Konstrukteurs" stattfindende Gestaltungsprozeß von Schweißverbindungen läuft sehr wahrscheinlich sehr ähnlich ab, wie es das Aufzeigen der vorangegangenen Gestaltungsparameter verdeutlicht, auch wenn ihm diese im einzelnen nicht bewußt sind. Er gestaltet (synthetisiert) eine Verbindung und prüft simultan, ob diese den gestellten Bedingungen ("seinen Vorstellungen") genügt. Dabei ändert er meist mehrere Parameter gleichzeitig. Findet er eine Gestaltvariante, welche "seinen Vorstellungen einer perfekten Lösung" genügt, hört er augenblicklich auf, noch mehr Zeit aufzuwenden. Oder, er begnügt sich u. U. mit der "erstbesten Lösung" und wendet keine Zeit zur Suche weiterer Lösungen auf. Er findet bei diesem sogenannten "intuitiven Vorgehen" die gleichen Lösungen wie beim systematischen Vorgehen; nur eben nicht alle existierenden Lösungen. Obgleich er bei diesem "intuitiven Vorgehen" auch systematisch denkt, bleibt ihm so das bewußte Erleben systematischen Gestaltens verborgen, wenn ihm o. g. Gestaltungsparameter bzw. methodische Gestaltungsmöglichkeiten nicht bewußt sind. Zweck dieses einfachen Beispiels "systematisches Gestalten von Schweißverbindungen" sollte es auch sein, das Tun von Konstrukteuren bewußt zu machen detailliert zu beschreiben.

Ohne Anspruch auf Vollständigkeit, sollen bei der Gestaltung von Schweißverbindungen zu beachtende Bedingungen zusammengestellt werden. Ferner sollen in Tabelle 1 die Gestaltungsparameter bzw. Mittel zur Gestaltung von Schweißnähten mit bestimmten Eigenschaften nochmals übersichtlich aufgezeigt werden:

Schweißverbindungen

Bedingungen	Lösungsmittel/Gestaltparameter
<ul style="list-style-type: none"> ● Werkstoff ● Blechdicke ● Stoßwinkel ● Blechbreite/Nahtlänge ● Nahtverlauf ● weitere Wirk- und Funktionsflächen im Bereich der Verbindung ● Aussehen, Design ● dicht oder nicht dicht ● Spannungsart in der Naht ● Festigkeitsforderungen ● korrosionsunempfindlich ● Verletzungen vermeidend ● u. a 	<ul style="list-style-type: none"> ● Gestalt der Naht, s. Bild 4a ● Form der Naht, s. Bild 4b ● Gestaltelemente einer Fuge, s. Bild 4c ● Form der Fugenflächen, s. Bild 4d ● Abmessungen der Fugenflächen, s. Bild 4e ● Abstand der Fugenflächen, s. Bild 4f ● Neigung der Fugenflächen, s. Bild 4g ● Lage der Naht bezüglich Fugenflächen, s. Bild 4h ● Abstand der Naht bezüglich bauteilfestem Bezugssystem, s. Bild 4i ● Neigung der Naht bezüglich Fugenflächen, s. Bild 4k ● Gestalt der Blechenden, s. Bild 4l ● Zahl der Schweißverbindungen einer Gesamtverbindung, s. Bild 4m ● Länge der Schweißbauteile zueinander, s. Bild 4n ● Reihenfolge von Schweißverbindungen, s. Bild 4o ● Verbindungsstruktur bezüglich Fugenflächen, s. Bild 4p ● Abstände von Schweißverbindungen untereinander, s. Bild 4q ● Neigungen der Schweißverbindungen untereinander, s. Bild 4r ● Längenabstände der Fuge bezüglich eines bauteilfesten Bezugssystems, s. Bild 4s ● Neigungsabstände der Fuge bezüglich eines bauteilfesten Bezugssystems, s. Bild 4s

Tabelle 1. Zusammenstellung der Gestaltparameter von Schweißverbindungen und an Schweißverbindungen zu stellende Bedingungen

Bei der Gestaltung von Karosserien, Schränken, Fenstern und anderen aus Blech herstellbaren Produkten, besteht oft die Forderung, in der Nähe von Schweißnähten noch weitere Wirkflächen, wie beispielsweise Dichtflächen, Flanschflächen für Dichtleisten oder Fensterscheiben, zu schaffen. Mittels laserschweißgerechter Gestaltung lassen sich auch derartige Schweißverbindungen verwirklichen.

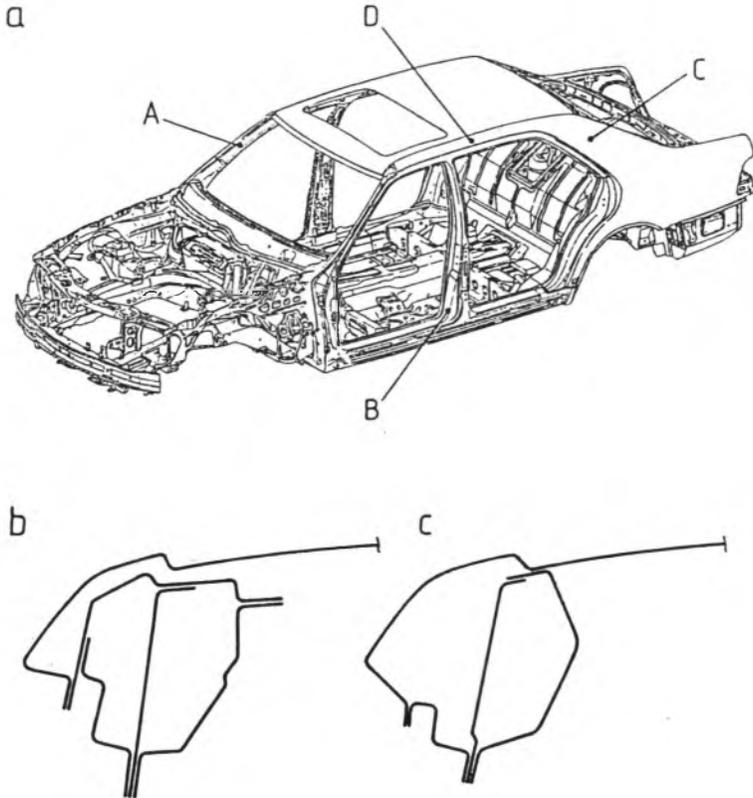


Bild 9. PKW-Dachlängsträger mit Dachblechanbindung in punktschweißgerechter (links) und laserschweißgerechter Ausführung (rechts)

Schließlich werden in Bild 9 am Beispiel des Dachlängsträgers (mit Dachblechanbindung) eines Oberklassefahrzeuges widerstandspunkt- und laserschweißgerechte Konstruktionen gegenübergestellt.

Die laserschweißgerechte Lösung (rechter Schnitt) ist leichter und steifer:

Die Gewichtsreduzierung ergibt sich daraus, daß ein Bauteil entfällt, weil das Dachblech hier auch als Teil des tragenden Dachlängsträger-Hohlprofils genutzt wird; dies ist möglich, weil Lasernähte bei nur geringer Nacharbeit in den Sichtbereich gelegt werden können.

3. Schweißvorrichtungskomponenten zur kostengünstigen Erzeugung präziser Dünnsblechfugen

Die zum Laserschweißen notwendige Herstellung sehr präziser Fugen zwischen den zu verschweißenden Bauteilen, ist ein wesentlicher Nachteil bzw. eine besondere Schwierigkeit bei der Erzeugung von Laserschweißverbindungen. Die Folge ist, eine "neue Klasse" von Schweißvorrichtungen, welche die zu verschweißenden Bauteile so genau zu positionieren und zu spannen vermögen, wie es das Verfahren erfordert:

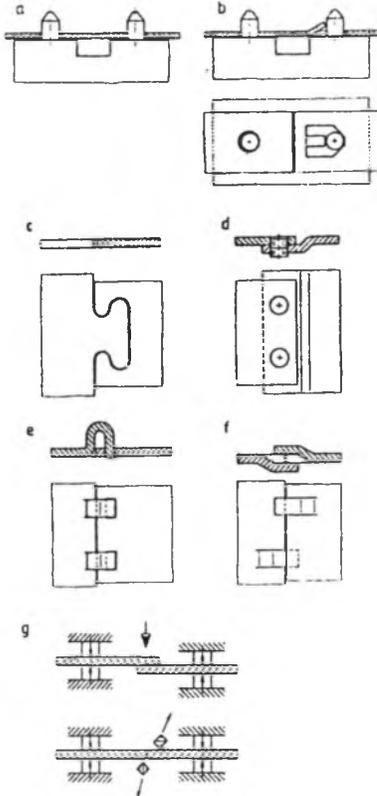


Bild 10. Gestaltvarianten von Blechenden zur kostengünstigen Erzeugung präziser Schweißfugen; Beispiele (Erläuterungen im Text)

Fugen kleiner absoluter Spaltweite und enger Spaltweitentoleranzen herzustellen, erfordert ein sehr genaues spielbehaftetes oder spielfreies Positionieren der zu verschweißenden Bauteile. Zum Laserschweißen benötigt man deshalb Vorrichtungen mit speziellen Positionier- und Spanntechniken.

Um präzise Fugen zwischen zwei zu verschweißenden Blechbauteilen kostengünstig zu erzeugen, gibt es grundsätzlich folgende Lösungswege:

- Die beiden Bleche in einer Vorrichtung genau zueinander positionieren (absolute Positionierung), wobei das Spiel zwischen Positionselementen (Stiften etc.) und Bauteilen sehr klein zu bemessen ist (Bild 10a); das zu positionierende Blech oder die Positionierelemente mit Federelementen ausstatten, um spielfreies Positionieren der Bauteile zu bewirken (Bild 10b).
- Die Enden der beiden Bleche mit geeigneten Wirkflächen versehen, welche eine genaue Positionierung beider Bleche zueinander (relative Positionierung) ermöglichen, wie es die Bilder 10c bis g exemplarisch zeigen.
- Beide Blechenden zunächst per Laser beschneiden und anschließend genau zueinander spaltfrei positionieren. Beide Blechenden sind so für eine Laserschweißprozeß vorbereitet und können in einem weiteren Prozeßschritt laserverschweißt werden (Bild 10h).

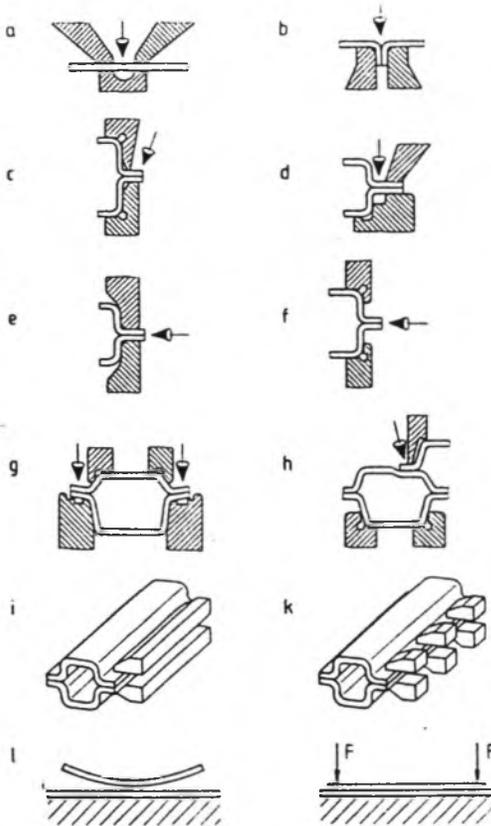


Bild 11. Vorschläge zur Spannbackengestaltung, abhängig von der Gestalt der Bauteilenden, Stoßart und Lage der Naht bezüglich Fuge (a÷h); Vermeiden von Fugenklaffen bei dünnen Blechen durch breite oder viele Spannbacken, oder geeignetes Biegen und Anpressen (i÷l)

In Bild 11 sind, abhängig von der Gestalt der Bauteilenden, der Stoßart und der Lage der Naht bezüglich der Fuge, einige Vorschläge zur Spannbackengestaltung zusammengestellt. Das Klaffen von Dünoblechfugen kann durch entsprechend breite und durch viele Backen sowie durch geeignetes Biegen und Anpressen der Schweißbauteile vermieden werden (s. Bild 11i bis 1).

Wie die vorangegangenen Ausführungen zeigen, kann man die bei Dünoblech-Schweißverbindungen durch Laserschweißen zusätzlich gegebenen Gestaltparameter und größeren Parameterbereiche (Gestaltungsmöglichkeiten) zur Schaffung von Wirkflächen im Nachbarbereich von Schweißverbindungen nutzen. Diese können dem fertigen Produkt weitere Fähigkeiten (Funktionen) verleihen. Oder man kann diese auch zur Herstellung kostengünstiger Schweißfugen nutzen.

Laserschweißen ermöglicht eine größere Gestaltungsvielfalt bei Dünoblech-Schweißverbindungen als andere Verfahren. Wie Untersuchungen an PKW-Karosserien gezeigt haben, lassen sich durch Laserschweißen noch leichtere und steifere Karosserien gestalten. Eine Vereinfachung der Gestalt von Dachlängsträgern mittels Laserschweißens zeigt Bild 9.

Gutachter: Karol Reich