



Leseprobe

Wolfgang Bergmann

Werkstofftechnik 2

Teil 2: Anwendung

ISBN: 978-3-446-41711-3

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser.de/978-3-446-41711-3>

sowie im Buchhandel.

vorgenommen werden. Bezüglich der mit dem Wasserstrahl von ca. $\varnothing 1$ mm Durchmesser und bis zu 4 kbar Druck schneidbaren Materialien bestehen kaum Einschränkungen. Es können mit diesem ohne nennenswerte mechanische oder thermische Belastung arbeitenden Werkzeug sowohl Metalle, Glas, Keramik, Kunststoffe, Holz, Elastomere, Verbund- und Schichtwerkstoffe, Waben- und Schaumstrukturen, Papier, Textilien, Flausch- und Fasermaterial getrennt werden. Der entscheidende Vorteil des Wasserstrahlschneidens besteht in der fehlenden thermischen Beanspruchung des Werkstücks, wodurch thermisch bedingte Gefügeänderungen, Rissbildungen, Eigenspannungen und thermische Zersetzungen vermieden werden. Auch entfällt beim Trennen harter Stoffe jeglicher Werkzeugverschleiß.

Nur bei weicheren Werkstoffen wird mit reinem Wasser als Wirkmedium gearbeitet, zum Trennen der kompakten Werkstoffe Metalle, Keramik, Glas und Verbundwerkstoffe wird dem Druckwasser ein hartes, meist keramisches Schneidmittel SiO_2 , Al_2O_3 u. a. in Pulverform beigegeben. Auf diese Weise ist es möglich, auch *gehärteten Stahl* bis zu Dicken von 70 mm ohne jede Wärmeeinwirkung zu trennen.

1.8 Schweißen

Das Schweißen gehört nach DIN 8580 neben Löten und Kleben zu den stoffvereinigen Fügeverfahren.

1.8.1 Grundvorgang des Fügens

Sollen zwei Teilstücke A und B zu einem neuen Werkstück zusammengefügt werden, so kann dies nur über eine so weitgehende Annäherung ihrer Oberflächen bewerkstelligt werden, dass der Abstand r zwischen den Atomen von A und B in der Fügezone kleiner als r_m wird und sich zwischen ihnen interatomare Bindungen einstellen können (Abb. F.1-42). Das Fügen käme demnach allein durch eine gegenseitige Berührung der beiden Teilstücke zu Stande, wofür allerdings nicht nur ideal ebene, sondern auch ideal reine, d. h. bindungsaktive Oberflächen vorauszusetzen wären. Diese beiden Voraussetzungen sind unter Realbedingungen jedoch in keiner Weise erfüllt. Technische Oberflächen weisen selbst im polierten Zustand ein bestimmtes Mikroprofil auf, das nur punktuelle Berührungen zwischen zwei Oberflächen zulässt; außerdem ist jede Metalloberfläche, die der Atmosphäre ausgesetzt ist oder war, mit chemi- und physiosorbierten Schichten, zumeist oxidischen Schichten, bedeckt, die eine Bindung auch an den Berührungspunkten verhindern.

Ein technisches Fügeverfahren oder – konkreter – Schweißverfahren muss diese einer Verschweißung entgegenstehenden Hemmnisse berücksichtigen und Maßnahmen zu ihrer Beseitigung enthalten. Als erster Schritt bietet sich die Anwendung höherer Anpressdrücke auf die zu verschweißenden Flächen an. Dabei geht es aber primär nicht um eine Vergrößerung der Berührungsfläche, sondern die schweißfördernde Wirkung des Anpressdrucks besteht darin, dass an den zusammengepressten Rauigkeitsspitzen plastische Verformungen einsetzen. Hierdurch werden die dort befindlichen Oxidschichten aufgebrochen und beiseite gedrängt. Es kommen so frisch erzeugte, also oxidfreie Metallflächen in Kontakt, die miteinander verschweißen. Abgesehen von

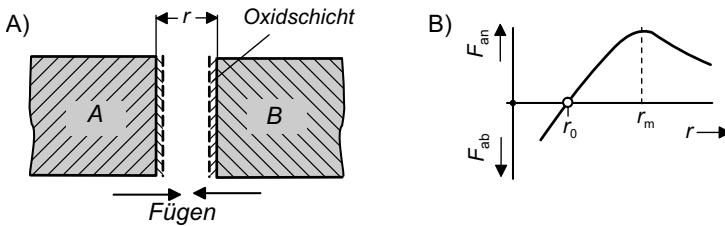


Abb. F.1-42 Grundvorgang des Fügens

A) Füügeprinzip, B) Verlauf der Bindungskraft in Abhängigkeit vom Atomabstand

den zwischen den Stoffen A und B möglichen interatomaren Bindungen hängt die Wirksamkeit einer reinen Pressschweißung entscheidend von der Plastizität der beiden Stoffe und der in der Kontaktzone erzielten plastischen Verformung ab.

Es ist leicht einzusehen, dass sich der Schweißeffekt durch Temperaturerhöhung wesentlich verstärken lässt, einerseits wegen der höheren Plastizität und andererseits wegen der größeren atomaren Mobilität, womit eine leichtere Annäherung der Atome in ihrem Bindungsbereich verknüpft ist. Folglich kann bei einem Warmpressschweißen auch mit niedrigeren Pressdrücken gearbeitet werden. Auf die Anwendung von Druck kann sogar gänzlich verzichtet werden, wenn die Temperatur in der Schweißzone bis über den Schmelzpunkt gesteigert wird. Dann genügt bereits die Schwerkraft, um durch das Zusammenfließen aufgeschmolzener A- und B-Bereiche eine ausreichende Annäherung ihrer Atome herbeizuführen.

Metallische Werkstücke können demnach miteinander verschweißt werden:

- Durch die Anwendung von Druck bzw. Verformung, also durch **Kaltpressschweißen**,
- durch die kombinierte Anwendung von Druck und Wärme, also durch **Warmpressschweißen**
- oder durch die alleinige Anwendung von Wärme, also durch **Schmelzschweißen**.

Die zahlreichen technischen Schweißverfahren werden vor allem danach unterschieden, in welcher Weise **Druck und/oder Wärme** erzeugt bzw. aufgebracht werden. Die zum Pressschweißen erforderliche Verformung kann zum Beispiel durch Explosion, Ultraschall, Schmieden, Extrudieren oder Reiben erzeugt werden, die notwendige Schweißwärme z. B. durch Widerstands-, Gasflammen-, Ofen-, Lichtbogen- oder Elektronenstrahlerwärmung. Die auf den Werkstückoberflächen auch bei guter Reinigung immer vorhandenen, den Schweißprozess störenden **Oxidschichten** können durch plastische Verformung zerstört, in einer reduzierenden Atmosphäre abgebaut, mit einem Flussmittel verschlackt (verflüssigt) oder bei Schweißverfahren mit hoher thermischer Energiedichte thermisch zersetzt werden.

Weil Schmelzschweißungen keine plastische Verformung erfordern und im allgemeinen einfach, schnell und sicher durchgeführt werden können, überwiegen sie im

Vergleich zu mechanisch unterstützten Schweißverfahren in der technischen Anwendung bei weitem. Als eine sehr effektive Wärmequelle zum Schweißen hat sich der elektrische **Lichtbogen** herausgestellt, so dass unter den Schmelzschweißverfahren den Lichtbogenverfahren die größte Bedeutung zukommt. Allerdings wird bei allen Schmelzschweißungen ein besonderer Schutz des schmelzflüssigen Schweißbades unerlässlich, da das Schmelzbad zur Reaktion mit schädlichen Bestandteilen der Luftatmosphäre (Sauerstoff, Stickstoff, Feuchtigkeit) neigt. Ein solcher Schweißnahtschutz, der bei reaktiven Metallen wie beispielsweise Titan auch auf die weitere Schweißnahtumgebung auszudehnen ist, kann mit einer Schlacke, einem Schutzgas oder in Sonderfällen auch mit Hilfe eines Vakuums realisiert werden.

Abb. F.1-43 zeigt eine typische Schmelzschweißverbindung im Querschnitt. Im Normalfall wird eine geeignet geformte Schweißfuge mit einem geschmolzenen Schweißzusatzwerkstoff gefüllt. Zur Vermeidung so genannter *Bindefehler* ist ein beträchtlicher Teil des Grundwerkstoffs ebenfalls mit aufzuschmelzen. In diesem Bereich der Schweißverbindung entwickelt sich beim Abkühlen eine für ein Erstarrungsgefüge typische Struktur.

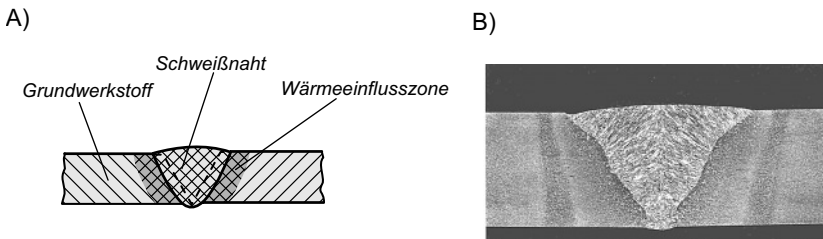


Abb. F.1-43 Schmelzschweißverbindung; A) Schematisch, B) Real, lichtmakroskopisch

Für die Qualität einer Schweißverbindung ist nicht nur die eigentliche Schweißnaht, sondern auch die neben der Schweißnaht im Grundwerkstoff befindliche so genannte **Wärmeeinflusszone (WEZ)** von entscheidender Bedeutung. In der WEZ herrschen beim Schweißen kurzzeitig Temperaturen zwischen Raum- und Schmelztemperatur, die zu dementsprechenden Gefügeänderungen führen. Häufig erfährt die WEZ nach der Schweißerwärmung eine unerwartet rasche Abkühlung. Zu hohen Abkühlgeschwindigkeiten kommt es besonders bei dicken und auch bei sehr dünnen Schweißquerschnitten. In dicken Querschnitten übt das große, nicht erwärmte Werkstückvolumen eine starke Kühlwirkung aus, während bei sehr dünnen Querschnitten (Extremfall Folie) die Schweißwärme rasch über die große Oberfläche abgeführt wird.

Die sich in der WEZ ergebenden **Gefügeänderungen** sind werkstoffspezifisch. Je nach Gefügestand des Grundwerkstoffs können sich dort bei Erwärmung Entfestigungs- und Kornvergrößerungsprozesse, Ausscheidungen und Auflösungen von Zweitphasenteilchen ereignen, bei der Abkühlung hingegen übersättigte Zustände und Eigenspannungen einstellen. Führen diese Vorgänge zu nachteiligen Eigenschaftsänderungen wie

z. B. zu unzulässigem Festigkeitsabfall oder zur Versprödung, so ist die Schweißbarkeit des Grundwerkstoffs eingeschränkt, und es müssen zu ihrer Sicherstellung zusätzliche Behandlungen vorgesehen werden. In dieser Schärfe besteht das Problem „Wärmeeinflusszone“ allerdings nur bei den Schmelzschweißverfahren. Überraschenderweise wird die Wärmeeinflusszone um so breiter und die sich in ihr vollziehenden Gefügeänderungen fallen um so gravierender aus, je niedriger die Energiedichte der zum Schweißen benutzten Wärmequellen ist. Daher liegt der entscheidende Vorteil von Schweißverfahren, die mit gebündelten Strahlen (Plasma-, Elektronen-, Laserstrahlen) arbeiten, in der hohen Energiekonzentration dieser Strahlen, die bei geeigneter Wahl der Schweißparameter eine sehr schmale Wärmeeinflusszone erzeugen und den Grundwerkstoff in thermischer Hinsicht nur relativ wenig schädigen.

Die zahlreichen Schweißverfahren werden den einführenden Betrachtungen entsprechend in **Schmelzschweiß-** und **Pressschweißverfahren** unterteilt. Zu den Schmelzschweißverfahren gehören vor allem die Lichtbogen- und Strahlenschweißverfahren, während Widerstands-, Diffusions-, Reib- und Ultraschallschweißen zu den im festen Zustand schweißenden Pressschweißverfahren zu zählen sind. Kennzeichnend für einen Pressschweißprozess ist die Mitwirkung einer Presskraft. Obwohl in der Fügezone dabei durchaus auch lokale Anschmelzungen auftreten können, liegt dort doch überwiegend eine Warmverformungsstruktur vor. Bei einem Schmelzschweißprozess hingegen ist dies eindeutig eine Erstarrungsstruktur. Die Schmelzschweißverfahren arbeiten meist mit, die Pressschweißverfahren in der Regel ohne einen Schweißzusatzwerkstoff.

1.8.2 Schmelzschweißen

1.8.2.1 Lichtbogenhandschweißen

Im Lichtbogen fließt ein elektrischer Strom zwischen einer negativen Elektrode (Kathode) und einer positiven Elektrode (Anode) über eine kurze, leitfähig gewordene Gasstrecke. Die Leitfähigkeit der Gasstrecke beruht auf der Existenz thermisch erzeugter freier Elektronen und Ionen. Ein derart ionenhaltiges Gas wird als Plasma bezeichnet. Der Ionisationsgrad eines Plasmas nimmt mit steigender Temperatur zu. Beim **Lichtbogenhandschweißen** schmilzt eine von Hand geführte **Elektrode** in dem zwischen ihr und dem Werkstück brennenden Lichtbogen ab und füllt als Schweißzusatzwerkstoff die Schweißnaht aus. Für diese Schweißmethode ist kennzeichnend, dass der abschmelzende Elektrodendraht eine **Umhüllung** trägt, die für den Schweißprozess äußerst wichtige Funktionen wahrzunehmen hat (Abb. F.1-44). Die Hauptaufgabe der Umhüllung besteht darin, die abschmelzende Elektrode, den Lichtbogen und das erstarrende Schweißbad gegenüber den schädlichen Einflüssen der Atmosphäre, die durch Sauerstoff- und Stickstoffaufnahme zu Porosität und Versprödung führen können, abzuschirmen. Diese Schutzfunktion üben Verbrennungs-, Zersetzungs- und Schmelzprodukte der Umhüllung aus, indem sie einen aus CO, CO₂ und H₂ bestehenden Schutzgasschirm und eine auf dem flüssigen Metall schwimmende **Schlacke**

bilden. Außerdem soll die Umhüllung zur Verbesserung des Lichtbogenverhaltens leicht ionisierbare und zur Erzielung guter mechanischer Eigenschaften des Schweißnahtgefüges metallurgisch aktive Substanzen enthalten.

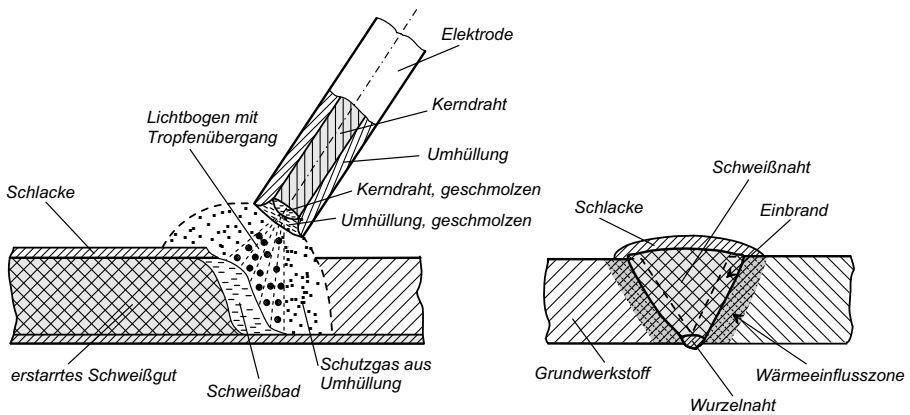


Abb. F.1-44 Lichtbogenhandschweißen

Der Metalltransport von der Elektrode in das Schmelzbad erfolgt zum größten Teil in Tropfenform, zu einem geringeren Teil auch über Verdampfung und Kondensation. Die Metalltropfen entstehen am schmelzenden Elektrodende unter der Wirkung eines magnetischen Kontraktionseffektes (so genannter Pinch-Effekt), der zu einer tropfenförmigen Abschnürung der Schmelze führt. Wenn der verbliebene Einschnürquerschnitt verdampft, wird der Tropfen in das Schweißbad geschleudert. Der Verdampfungsdruck ermöglicht sogar einen Werkstoffübergang gegen die Schwerkraft, wie dies beim Überkopfschweißen erforderlich ist. Die übergehenden Metalltropfen lösen sich dabei aus einer flüssigen Schlackenhaut und werden von einem dünnen, schützenden Schlackenfilm eingehüllt. Um ihre vielfältigen Aufgaben erfüllen zu können, besitzen die Elektrodenumhüllungen eine komplexe Zusammensetzung, deren Hauptbestandteile

- *schlackenbildende* saure oder basische Oxide (SiO_2 , TiO_2 , FeO , MnO_2 , Al_2O_3 , MgO , CaO),
- *schutzgasbildende* organische oder anorganische Verbindungen (Dextrin, Zellulose, Karbonate) sowie je nach Bedarf
- *lichtbogenstabilisierende* Alkali- und Erdalkaliverbindungen (K-, Na-, Ca-Verbindungen) und
- *metallurgisch wirksame* Zusätze (Desoxidations-, Entschwefelungs-, Legierungsmittel)

sind. Da die Bestandteile der Umhüllung einen maßgebenden Einfluss sowohl auf das Schweißverhalten als auch auf die Schweißnahteigenschaften ausüben, werden die verschiedenen Schweißdrahtelektroden in erster Linie nach ihrem Umhüllungstyp eingeteilt. Abgesehen vom Basizitätsgrad der von der Umhüllung gelieferten Schlacke

spielt auch die oxidierende oder reduzierende Wirkung der Umhüllungsbestandteile eine wichtige Rolle. Bereits geringe Sauerstoffgehalte senken die Oberflächenspannung flüssigen Eisens beträchtlich, so dass sich unter oxidierenden Bedingungen eine dünnflüssige, die Schweißfuge leicht und schnell füllende Schmelze ergibt. Im Wesentlichen gelangen drei verschiedene Elektrodentypen zur Anwendung, nämlich ein Typ mit saurer (A, Bezeichnung siehe DIN EN 499), ein Typ mit Rutil- (R) und ein Typ mit basischer (B) Umhüllung.

Saure Umhüllungen (A) enthalten vor allem Si-, Fe- und Mn-Oxid als oxidierende Bestandteile und Ferromangan zur Desoxidation. Während ihres Übergangs nehmen die Schmelztropfen aus der Schlacke Sauerstoff auf. Für A-Elektroden ist daher ein schneller, feintropfiger Werkstoffübergang mit einer dünnflüssigen Schmelze charakteristisch. Somit lassen sich hohe Abschmelzleistungen erreichen, allerdings bei eingeschränkter Spaltüberbrückbarkeit und Zwangslagenschweißbarkeit (Senkrecht-, Überkopfnähte). Im Schweißbad kommt es zu einer Desoxidation durch Mangan, das als MnO_2 in die saure Schlacke geht. Die Schweißnähte haben eine glatte bis feinschuppige Oberfläche, von der sich die über einen größeren Temperaturbereich amorph erstarrende Schlacke leicht entfernen lässt. A-Elektroden eignen sich daher vor allem für hohe Schweißgeschwindigkeiten und Abschmelzleistungen. Wegen ihres oxidierenden und sauren Charakters muss bei erhöhten Schwefelgehalten mit Warmrissempfindlichkeit und bei erhöhten Phosphorgehalten mit Versprödungen des Schweißbades gerechnet werden.

Eine **basische Umhüllung (B)** stellt quasi das Pendant zum sauren Typ dar. Der Anteil an oxidierenden bzw. sauren Oxiden (MnO_2 , Fe_3O_4 , Fe_2O_3 , TiO_2 , SiO_2) ist relativ niedrig, es überwiegen nichtoxidierende Ca-Verbindungen ($CaCO_3$, CaF_2) und desoxidierende Ferrolegerungen (FeSi, FeMn). Somit ergeben sich neutrale bis reduzierende Bedingungen und eine basische Schlacke. Die Vorzüge von B-Elektroden liegen vor allem im metallurgischen Bereich, sie liefern einschlussfreie und nicht durch Warmrisse und Phosphorversprödung gefährdete Schweißgutgefüge. Ein guter Schutz des Lichtbogenbereiches gegenüber der Atmosphäre sorgt für niedrige Gehalte an Wasserstoff, Sauerstoff und Stickstoff. Weiterhin gestatten B-Elektroden das Einbringen von Legierungselementen in das Schweißbad, die bei einer oxidierenden Umhüllung abbrennen (oxidieren) und in die Schlacke abwandern würden. So sind B-Elektroden wegen ihrer günstigen metallurgischen Eigenschaften beim Schweißen mechanisch hoch beanspruchter Konstruktionen zu wählen. Diesen Vorteilen stehen allerdings eine etwas erschwerte Handhabung beim Schweißen, eine schwerer entfernbare, kristallin erstarrende Schlacke und die strikte Forderung nach trockener Lagerung sowie nochmaliger Trocknung (mind. $250^\circ C$, 30 min) vor ihrer unmittelbaren Verwendung entgegen. Die Trockenprozedur ist wegen des hygroskopischen Charakters von B-Umhüllungen zur Vermeidung H-induzierter Rissbildungen erforderlich.

Elektroden mit **Rutil-Umhüllung (R)** liegen hinsichtlich Schweißverhalten und Schweißnahteigenschaften etwa zwischen denen mit saurer und denen mit basischer Umhüllung. Gegenüber der A-Type sind die stark oxidierenden Fe- und Mn-Oxide zum großen Teil durch das schwach oxidierende TiO_2 (Rutil) ersetzt. Auf Grund ihrer bei vorteilhaften Verarbeitungseigenschaften auch guten mechanischen Eigenschaften werden R-Elektroden im Stahl- und Maschinenbau am meisten angewendet.

Über ihre metallurgischen Funktionen hinaus beeinflussen die Eigenschaften der **Schlacke** den Schweißprozess in vielfältiger Weise. Ihr Erstarrungsverhalten hat Einfluss auf die Zwangslagenschweißbarkeit; rasch erstarrende kristalline Schlacken sind beispielsweise für Senkrecht- und Überkopfschweißungen von Vorteil. Von großer Bedeutung ist auch der von der Schlacke ausgeübte thermische Schutz des Schmelzbades, wodurch dessen Erstarrung verzögert und folglich die Abscheidung von Gasbläschen und Desoxidationsprodukten erleichtert wird. Weitere wichtige Eigenschaften sind die Dichte, die Viskosität, die Gasdurchlässigkeit, die elektrische