



3.3.6 Fügen von Bauteilen¹

3.3.6.1 Thermisches Fügen (Schweißen²)

Im Stahlschiffbau sind die verschiedenen Verfahren des Lichtbogenschweißens die Fügeverfahren schlechthin. Ältere Verbindungstechniken wie das Nieten sind vollständig verschwunden. Neuere wie das Laserstrahlschweißen sind im Schiffbau erst am Anfang der Entwicklung. Die besondere Bedeutung der Schweißtechnik auf Werften wird deutlich, wenn man bedenkt, dass ca. 30 - 40 % der Fertigungsstunden für den Stahlschiffkörper auf das Schweißen entfallen. Im wesentlichen werden auf den Werften heute Schutzgas- und Unterpulververfahren in unterschiedlichen Modifikationen und Kombinationen eingesetzt. Die Verfahren haben einen hohen Zuverlässigkeitsgrad erreicht. In enger Zusammenarbeit mit den Schweißzusatzherstellern wurden Werkstoff-Schweißparameter-Kombinationen entwickelt, die reproduzierbar gleichbleibend hohe Gütewerte gewährleisten.

3.3.6.1.1 Lichtbogenhandschweißen

Das Lichtbogenhandschweißen mit umhüllter Stabelektrode war im Schiffbau jahrzehntelang das am häufigsten eingesetzte Verfahren. Je nach Stahlsorte und Arbeitsbedingungen bzw. Schweißposition kann das Schweißergebnis durch geeignete Wahl der Elektrode bzw. deren Umhüllung beeinflusst werden. Dabei hat die Umhüllung folgende Aufgaben zu erfüllen:

- Stabilisierung des Lichtbogens
- Bilden einer Schutzgasatmosphäre und
- Bilden einer metallurgisch wirksamen Schlacke.
- den Abbrand von Legierungselementen auszugleichen

Die Werkstoffzufuhr erfolgt über die abschmelzende Stabelektrode. Der abgeschmolzene Zusatzwerkstoff hat hinsichtlich der Zähigkeit, Festigkeit und Dehnung meistens gleiche Eigenschaften wie der Grundwerkstoff.

Der Einsatz des Handschweißens mit Stabelektrode beginnt im Montageprozess schon bei den ersten notwendigen Heftschweißungen sowohl im Stahlschiffbau als auch im Rohrleitungsbau. In allen Ausrüstungs- und Einrichtungsbereichen ist das Verfahren anzutreffen. Sein Vorteil liegt in der hohen Flexibilität und den verfahrenstechnischen Vorzügen (leichtes Zünden und stabiler Lichtbogen) sowie der guten Ausbringung (1 - 3 kg/h bei Normalelektroden und 2 - 6 kg/h bei Hochleistungslektroden (200 - 500 A)).

Das einfache und flexible Verfahren hat in den modernen Werften an Bedeutung verloren, weil die Abschmelzleistung des Schweißzusatzwerkstoffes und damit die Arbeitsproduktivität gegenüber dem Metall-Schutzgasschweißen mit Massiv- und Fülldrahtelektroden geringer ist. Neben weiteren verfahrensbedingten Nachteilen (hoher Grad an Unordnung, je Schweißer ist ein Kabel und eine Schweißstromquelle erforderlich. Beschädigungen an Kabeln kommen häufig vor. Durch die Schlacke aus den Elektrodenumhüllungen verschmutzt der Arbeitsplatz schnell. Rauche verursachen besonders bei den cellulosebasierten Umhüllungen Probleme) **fällt ins Gewicht, dass sich der Prozess Lichtbogenhandschweißen nicht maschinell führen lässt.**

¹ Quelle: Verband für Schiffbau und Meerestechnik e. V. (Hrsg.): Schiffstechnik und Schiffbautechnologie; Hamburg: Seehafen Verlag GmbH, 1998, ISBN 3-87743-800-8, S. 101ff

² Siehe auch: <http://de.wikipedia.org/wiki/Schwei%C3%9Fen>
<http://www.isf-aachen.de/arbeitsg/forschung/libo.html>

3.3.6.1.2 Metall-Schutzgasschweißen

Die Schutzgasschweißverfahren finden sowohl bei der Handschweißung als auch bei den mechanisierten Verfahren eine immer breitere Anwendung. Sie haben eine höhere Ausbringung, liefern eine reproduzierbare Qualität und können mechanisiert und automatisiert werden. Verfahrenstypisch für das Schutzgasschweißen ist die Verhinderung des Vordringens der Umgebungsluft zum schmelzflüssigen Schweißbad durch das Schutzgas. Dieselbe Aufgabe der Abschirmung des Schweißbades übernimmt beim Autogen-Schweißen die neutrale Autogenflamme oder beim Lichtbogenhandschweißen die Gasglocke der verdampfenden Umhüllung der Stabelektrode.

Die Schutzgasschweißverfahren lassen sich wie folgt einteilen:

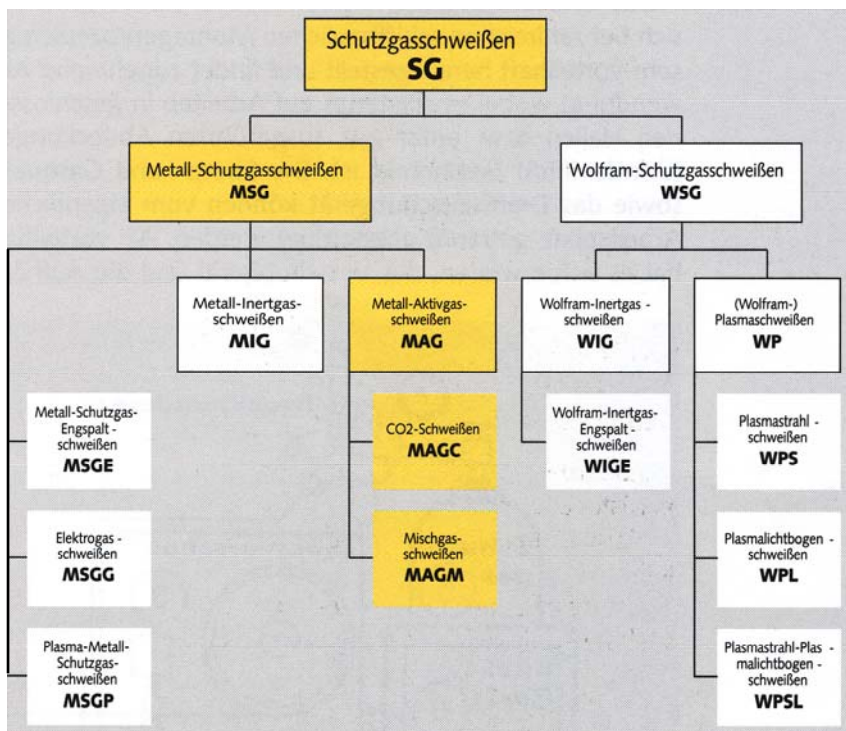


Bild:
Einteilung der Schutzgasschweißverfahren

Von den genannten Verfahren wird im Schiffbau vor allem das Metall-Aktiv-Gasschweißen (MAG) verwendet. Das MAG-Schweißen unterteilt sich dann weiter in das Metall-Aktiv-Gasschweißen mit Mischgasen (MAGM) und das Metall-Aktiv-Gasschweißen mit CO₂ (MAGC) als Schutzgas.

Anteilsmäßig liegt das MAGM-Verfahren bei etwa 80 % gegenüber 20 % beim MAGC-Verfahren.

Wegen ihres inerten³ (chemisch neutralen) Charakters werden die Edelgase Argon und Helium als Schutzgase verwendet. Diese beiden einatomigen Gase gehen keine chemischen Verbindungen mit dem zu verschweißenden Werkstoff ein. Sie schützen daher nicht nur das Schweißgut vor dem Zutritt der Luft, sondern verhindern auch unerwünschte Reaktionen mit der Elektrode und dem Schweißbad. In ihren physikalischen Eigenschaften und damit mit ihrem Einfluss

³ Als chemisch **inert** (lat. für *untätig, unbeteiligt, träge*) bezeichnet man Substanzen, die unter den jeweilig gegebenen Bedingungen mit potentiellen Reaktionspartnern (Luft, Wasser, Edukte und Produkte einer Reaktion) nicht oder nur in verschwindend geringem Maße reagieren. Chemisch inerte Substanzen können aus verschiedenen, unterschiedlichsten Chemikalienklassen kommen: chemische Elemente, chemische Verbindungen, Lösungsmittel, Gase u. v. a.

auf das Ergebnis zeigen die beiden Edelgase allerdings starke Unterschiede u.a. auf Grund der unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeit; diese ist bei Helium wesentlich höher. Für das Schweißen von Schiffbaustählen wird Helium nicht verwendet, weil es zu leicht und zu teuer ist.

Kohlendioxid CO_2 und Sauerstoff sind sogenannte Aktivgase. Aus ihnen entsteht im Lichtbogen aktiver atomarer Sauerstoff. Sie haben entscheidenden Einfluss auf den Werkstoffübergang bei der Metallschutzgasschweißung von Stahlwerkstoffen. Die Nachteile des Sauerstoffs (z.B. Oxidbildung in den flüssigen Metallschmelzen) werden kompensiert durch Desoxidationsbildner in den Schweißzusätzen. Die sich bildenden Oxide scheiden als Schlacke aus.

Durch geeignet zusammengestellte Gemische lassen sich die vorteilhaften Eigenschaften der Komponenten kombinieren. Besonders wichtig sind die Gemische bei der Metallschutzgasschweißung von Stahl. Hier muss dem Argon zur Erzeugung eines regelmäßigen Werkstoffüberganges grundsätzlich Sauerstoff oder Kohlendioxid beigemischt werden. Die dabei entstehenden Aktivgase werden nicht als Gasgemische, sondern als Mischgase bezeichnet.

Es kann auch mit 100% CO_2 geschweißt werden, dann entstehen allerdings mehr Spritzer.

Das Metallaktivgasschweißen (*MAG-Schweißen*) hat sich bei zahlreichen schiffbaulichen Montageprozessen als sehr vorteilhaft herausgestellt und findet zunehmend Anwendung, wobei es allerdings auf Arbeiten in geschlossenen Hallen bzw. unter gut ausgeführten Abdeckungen (Windeinfluss) beschränkt ist. Die Strom- und Gasquelle sowie das Drahtvorschubgerät können vom eigentlichen Arbeitsplatz getrennt angeordnet werden. Als vorteilhaft hat es sich erwiesen, das Vorschubgerät und die Aufhängung des Schlauchpaketes an Auslegern oder Portalen oberhalb des Arbeitsplatzes zu platzieren.

Der prinzipielle Aufbau einer Metall-Schutzgasschweißanlage ist im folgenden Bild dargestellt. Auf eine Wasserkühlung kann nur bei geringen Stromstärken verzichtet werden. Es wird grundsätzlich mit Gleichstrom geschweißt. Die Polung ist abhängig vom Drahttyp; bei Masivdraht ist die Elektrode positiv und das Werkstück negativ gepolt.

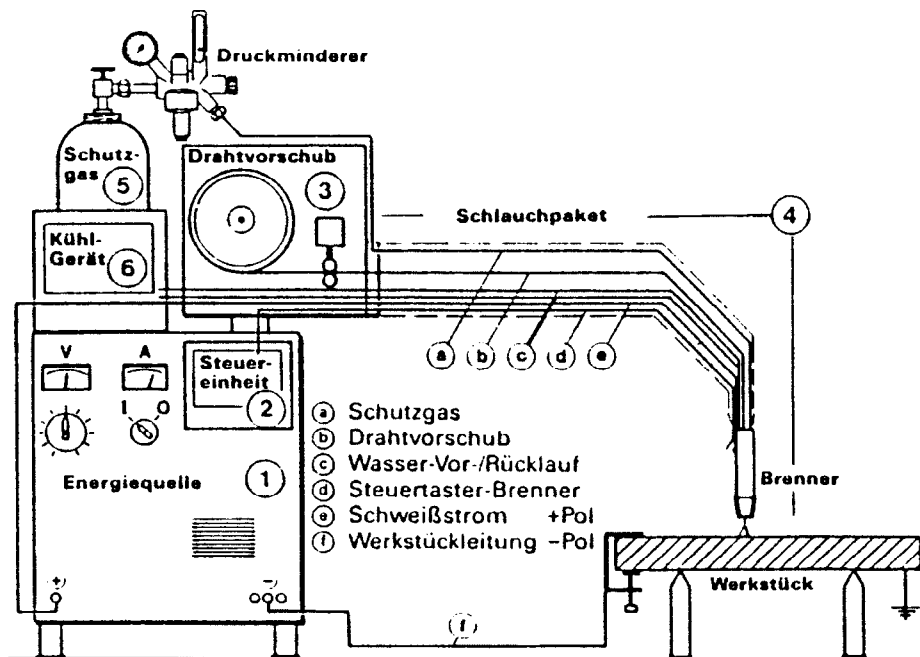


Bild: Prinzipieller Aufbau einer Schutzgas-Schweißanlage




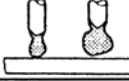



Lichtbogenart	Tropfen- größe	Ø Relation Draht/Tropfen	Werkstoff- übergang
KLB MAG M MAG C Kurzlichtbogen	fein- tropfig		im Kurzschluß
ÜBL MAG M MAG C Übergangslichtbogen	fein- bis grob-tropfig		Kurzschluß behaftet
SLB MAG M Sprühlichtbogen	feinst- tropfig		Kurzschluß frei
LLB MAG C Langlichtbogen	grob- tropfig		Kurzschluß behaftet
ILB MAG M Impulslichtbogen	fein- tropfig		Kurzschluß frei

Bild:
Lichtbogenarten beim Metallschutz-
gasschweißen

Beim MAG-Schweißen bilden sich je nach Stromstärke und verwendetem Drahtdurchmesser unterschiedliche Lichtbogenbereiche mit entsprechend unterschiedlichen Materialübergängen gemäß der Tabelle links aus.

Vor einiger Zeit sind unter dem Oberbegriff „Hochleistungsverfahren“ neue Prozesse wie TIME, Twin Arc oder Rapid Arc eingeführt worden. Die Drahtfördergeschwindigkeiten können bei einem Draht von 1,2 mm Durchmesser bis zu 50 m/min erreichen. Es entsteht ein rotierender Lichtbogen, durch den es bei geringer Einbrandtiefe zu einer breiten Nahtfüllung (großes a-Maß) kommt. Es ist also möglich, in gewissen Grenzen über die Parametereinstellung auf die Ausbildung der Schweißnaht Einfluss zu nehmen und sie damit dem Belastungsfall anzupassen.

Hinsichtlich der Auswahl der Drahtelektrode sind die folgenden grundsätzlichen Regelungen zu beachten:

- Durch artgleiche oder artähnliche Drahtelektroden sollte eine Anpassung an den Grundwerkstoff erfolgen.
- Mit zunehmender Aktivität des Schutzgases ist eine zunehmende Legierungs- bzw. Desoxydationsmittelmenge in der Drahtelektrode erforderlich.

Bei der Auswahl der Elektrode muss also das Abbrandverhalten des verwendeten Schutzgases berücksichtigt werden. Die Gütewerte des Schweißgutes werden von der Drahtelektrode und dem Schutzgas bestimmt.

Dies bedeutet, dass die MAG-Schweißungen jeweils genau nach erprobten vorgegebenen Parametern durchgeführt werden müssen, wenn das angestrebte Ergebnis erreicht werden soll. Dies ist auch Voraussetzung für eine Beherrschung der Schrumpfungsprozesse im Verlauf der Fertigung.

Neben den Massivdrähten werden zunehmend Fülldrähte eingesetzt. Sie bestehen aus einem Mantel mit eingeschlossenem Pulver zur Lichtbogenstabilisierung, zur gezielten Schlackenbildung und zur Legierungsbildung. Die Zusätze begünstigen einen ruhigen Schweißprozeß und schützen die erstarrende Naht vor Atmosphäreneinflüssen. Durch den vergleichsweise geringeren leitenden Querschnitt erhöht sich bei gleichen Parametern der Widerstand gegenüber der Massivdrahtelektrode. Damit steigt die Erwärmung zwischen dem freien Drahtende und der Kontaktdüse und damit letztlich die Abschmelzleistung. Nachteilig sind zunächst die stärkere Rauchentwicklung und die höheren Drahtkosten. Am Abbau dieser Nachteile wird seitens der Hersteller von Zusatzwerkstoffen intensiv gearbeitet.



Das außerordentlich vielseitig anwendbare Schutzgasschweißen entwickelt sich in allen stahlschiffbaulichen Bereichen zum Hauptverfahren schlechthin. Es lässt sich gleichermaßen vorteilhaft bei Montageschweißungen von Hand als auch bei vollmechanisierten und vollautomatischen Verfahren einsetzen. Über die Schutzgaszusammensetzung, die Drahtvorschubgeschwindigkeit und die Strom/Spannungskombination lassen sich für die jeweilige Schweißaufgabe geeignete Werte einstellen.

Neben den Anwendungen bei Montagevorgängen und Robotereinsätzen haben die Schutzgasverfahren ihren Platz in den mechanisierten Fertigungsstraßen (Paneellinien usw.) gefunden. Hier gibt es auch häufig Verfahrenskombinationen mit UP-Verfahren z.B. beim Einsatz als Radsicherung für nachfolgendes UP-Schweißen.

Ein weiterer typischer Anwendungsfall ist das Schweißen von Vertikalnähten. Dabei kommt der besondere Vorteil von Fülldrahtanwendungen zur Geltung. Die Produktivität von Lichtbogenhandschweißen/Metall-Schutzgasschweißen mit Massivdrahtelektrode/Metall-Schutzgasschweißen mit Fülldrahtelektrode steht dabei im Verhältnis 1 : 1,5 : 2,5.

3.3.6.1.3 Unterpulverschweißen

Als weitere Verfahrensgruppe ist das Unterpulverschweißen (UP-Schweißen) zu nennen. Hier wird eine kontinuierlich zugeführte Massiv- oder Fülldrahtdrahtelektrode unter einer Schicht körnigen Schweißpulvers abgeschmolzen. Der Lichtbogen, brennt für das Auge nicht sichtbar, zwischen der Elektrode und dem Werkstück innerhalb einer gasgefüllten Schweißkaverne (= Hohlraum).

Neben dem Eindrahtschweißen, bei dem nur ein Draht stromführend als Drahtelektrode abgeschmolzen wird, gibt es eine Reihe von Verfahrensvarianten (Einsatz mehrerer Drahtelektroden und/oder Stromquellen und Regelungen), mit denen in der Regel Leistungssteigerungen verbunden sind.

Eine UP-Schweißanlage besitzt einen Vorschubmotor, an dem die Vorschubrolle sitzt. Diese zieht die Drahtelektrode mit Hilfe der Gegendruckrolle von der Spule ab und schiebt sie in das Stromrohr, an dessen unterem Ende die Stromübertragung erfolgt. Ein Richtwerk zum geraden Austreten der Elektrode wird häufig verwendet. Das Schweißpulver befindet sich in einem Vorratsbehälter, von wo es durch einen Zuführungsschlauch zur Schweißstelle geleitet und hier ringförmig um das Stromkontaktröhre aufgeschüttet wird. Eine UP-Schweißanlage enthält ferner eine Stromquelle und eine Regeleinheit.

Abgesehen von Ausnahmen wird das UP-Schweißverfahren als vollmechanisches Verfahren eingesetzt, d.h. auch die Schweißfortschrittsbewegung erfolgt maschinell. Auf einfachste Art geschieht dies mit Hilfe eines Traktorfahrwerkes, das entweder auf ausgelegten Schienen oder auf dem Werkstück selbst läuft. Die Steuerung erfolgt durch Führungsschienen, durch Spurräder, die den Wagen in der Schweißfuge oder -kehle führen, oder auch von Hand mit Hilfe eines Lichtpunktes.

Beim Zusammenschweißen von Blechen zu größeren Plattenfeldern werden auch beim UP-Schweißen Spannvorrichtungen benutzt.

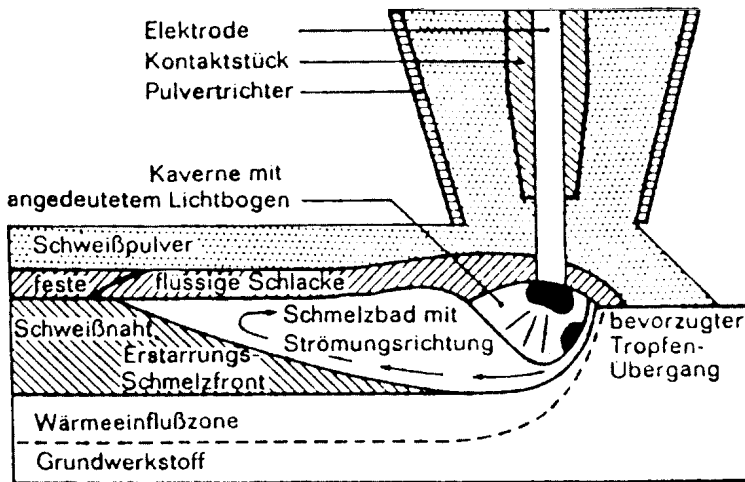


Bild: Verfahrensprinzip des Unterpulverschweißens

Das Schweißpulver setzt sich aus verschiedenen mineralischen Bestandteilen zusammen und übernimmt die gleiche Funktion wie die Elektrodenumhüllung beim Schweißen mit der Stabelektrode. Der Schutz des Schweißbades vor Atmosphäreneinflüssen ist aufgrund der bis zu 10 mm dicken Schlackenschicht sehr wirksam. Nicht angeschmolzenes Schweißpulver wird hinter der Schweißstelle abgesaugt und einer Wiederverwendung zugeführt.



Bild: UP-Traktor

Es kann mit Gleichstrom oder mit Wechselstrom geschweißt werden. Die Zündung des Lichtbogens erfolgt entweder über Kontaktzündung bei „schleichendem“ Heranfahren des Drahtes an das Werkstück oder berührungslos durch Hochspannungszündeinrichtungen.

Die verwendeten Schweißpulver sind schmelzbar und werden nach unterschiedlichen Verfahren hergestellt (*Geschmolzene Pulver, Geschäumte Pulver und agglomerierte Pulver*).

Folgende Pulvertypen werden je nach der chemischen Zusammensetzung der Hauptbestandteile unterschieden: Mangan-Silikat (MS), Kalzium-Silikat (CS), Aluminat-Rutil (AR), Aluminatbasisch (AB) und Fluoridbasisch (FB). Schweißpulver müssen trocken gelagert werden. Je nach Schweißaufgabe bzw. zu verschweißendem Werkstoff wird das am besten geeignete Pulver bzw. die beste Draht-Pulver-Kombination ausgewählt



Das Unterpulver-Schweißverfahren ist für das Schweißen langer gerader Nähte sehr vorteilhaft einsetzbar, da es relativ leicht zu mechanisieren ist, robust und stabil arbeitet und insbesondere in Verbindung mit Metallpulvern eine außerordentlich hohe Ausbringung ergibt. Nachteilig ist, dass es sich physikalisch bedingt nur für Stumpfstöße und Kehlnähte in waagerechter und horizontaler Lage sowie in Querposition eignet. Deshalb wird das Verfahren vorwiegend in Panelstraßen bzw. bei der mechanisierten Fertigung von flachen geraden Untergruppen eingesetzt.

Um ein Durchfallen des Schweißgutes zu verhindern, muss entweder ein ausreichender Steg (ausreichende Steghöhe und keine zu großen Luftspalte zwischen den Stegflächen) vorliegen oder es muss eine Badsicherung verwendet werden. Als Badsicherung kommen in Betracht:

- eine mit der Hand aufgebrachte Schweißlage,
- eine keramische Unterlage,
- ein Badsicherungsband (Aluminiumband mit Pulverkissen),
- eine - evtl. gekühlte - Kupferunterlage,
- eine Pulver-Kupfer-Unterlage oder
- eine mit Vorrichtungen festgehaltene Pulverunterlage.

Stumpfstöße zum Fügen von Einzelplatten zu Plattenplänen werden sowohl in Einseitentechnik als auch in Zweiseitentechnik mit UP-Schweißverfahren gefertigt. Dabei gibt es keine eindeutige Antwort auf die Frage nach den Vor- und Nachteilen. Die Einseitentechnik stellt höhere technologische Anforderungen. Häufig wird die Zweiseitentechnik angewandt, wenn bei Modernisierungen von Anlagen die Bauhöhen in den Hallen ein Wenden der Plattenpläne problemlos erlauben.

3.3.6.1.4 Laserschweißen⁴

Während die industrielle Anwendung von Hochleistungs-CO₂-Laserquellen für Schneid- und Fügeaufgaben z.B. im Automobilbau bereits Stand der Technik ist, steht die Einführung dieser neuen Technologie im Schiffbau mit vergleichsweise dickeren Blechen noch am Anfang. Dabei bietet das Verfahren dank des hochkonzentrierten Energieeintrages (Strahlfokussdurchmesser ca. 0,4 mm) mit vergleichsweise niedrigen Streckenenergien viele Vorteile, wie z.B. die sehr schmale Wärmeeinflusszone und den geringen thermischen Verzug nach dem Schweißen. Außerdem kann prinzipiell ohne Zusatzwerkstoff geschweißt werden. Dem stehen Probleme gegenüber wie die hohen Investitionskosten (die fortschreitende Einführung der Technologie dürfte allerdings in den nächsten Jahren zu niedrigeren Anschaffungskosten führen), die relativ große Aufhärtung der schmalen Wärmeeinflusszone, der nur durch kostenverursachende Absenkung des Kohlenstoffgehaltes und anderer Verunreinigungen wie Schwefel und Phosphor im Werkstoff oder durch Reduzierung der Schweißgeschwindigkeit begegnet werden kann. Nachteilig ist außerdem die aus dem geringen Strahldurchmesser resultierende Forderung nach Spaltfreiheit beim Fügen. Im Schiffbau ist diese Spaltfreiheit nur schwer zu erreichen. Man wird hier deshalb mit Zusatzdraht oder Hybridverfahren (Laser und MAG) arbeiten müssen.

⁴ **Laser** [*ˈleɪzə*] ist das Initialwort von *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (Lichtverstärkung durch induzierte Emission von Strahlung). Den Begriff prägte [Gordon Gould](#) 1957 in Anlehnung an den [Maser](#). Frühere Arbeiten zu Lasern bezogen sich auf *optical maser* (Optische Maser). Laser sind Strahlungsquellen ([Infrarot](#), sichtbares [Licht](#), [Ultraviolett](#), [Röntgenstrahlung](#)), deren Gemeinsamkeit im Entstehungsprozess der Strahlung liegt, nämlich in der so genannten induzierten Emission. Es gibt eine Vielzahl unterschiedlicher Typen von Lasern mit den verschiedensten Eigenschaften. Ein Laser besteht immer aus einem optisch aktiven Medium, in dem die Strahlung erzeugt wird, und meistens einem [Resonator](#), der für die Eigenschaften des Laserstrahls, wie [Parallelität](#) oder Strahlprofil, mitverantwortlich ist

Durch intensive Forschungsarbeiten sind in den vergangenen Jahren die Grundlagen für schiffbauliche Anwendungen gelegt worden. Dies bezieht sich zunächst auf konventionelle Fügegeometrien wie den I-Stoß und Kehlnähte. Der Stand der Entwicklung erlaubt die Anwendung des Verfahrens bis zu Blechdicken von ca. 10 mm mit Zusatzwerkstoff.

Hinsichtlich der Verfahrenstechnik sind noch Entwicklungsarbeiten notwendig. Laserschweißverfahren sind grundsätzlich mechanisierte Verfahren, wobei die Arbeitsplätze mit geeigneten Abschirmungen gegen reflektierte Laserstrahlen (Plexiglas) umgeben werden müssen.

Die Vorteile der Laseranwendungen können besonders durch die Entwicklung von Konstruktionen, welche die speziellen Möglichkeiten des Strahlwerkzeuges „Laser“ berücksichtigen, voll erschlossen werden. Bei der Meyer-Werft führte das zu einer neuartigen Sandwich-Deckskonstruktion⁵. Aus relativ dünnen Deckblechen wird mit dazwischenliegenden Verstärkungselementen ein Paneel erzeugt, welches die bisherige Blech-Profil-Konstruktion ablöst. Der laserspezifische Tiefschweißeffekt (stake weld) wird genutzt, um sogenannte verdeckte T-Stöße zu schweißen, durch die Deckbleche und Vertikalstege verbunden werden.

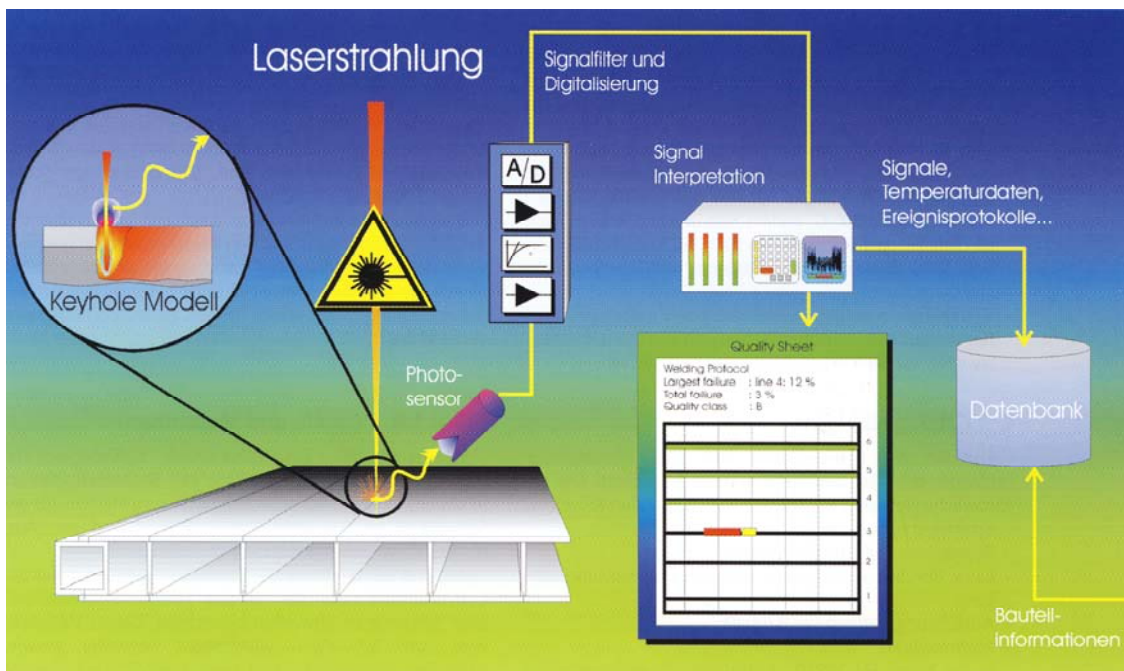


Bild: Laserschweißen von Sandwichpaneelen

Die neuen hochgenauen Sandwichpaneele vereinfachen nachfolgende Ausführungsarbeiten, ersparen das Aufbringen von Decksausgleichsmassen und sind wesentlich leichter als konventionelle Decksstrukturen aus Stahl. Auf der Werft wurde eine automatisierte Fertigungseinrichtung geschaffen, die Deckspaneele von 10 m x 3 m produziert.

⁵ Als Konstruktionsweise bezeichnet die Sandwichbauweise eine Form des Leichtbaus, bei dem die Bauteile aus kraftaufnehmenden Decklagen bestehen, die durch einen relativ weichen, meist leichten, Kernwerkstoff auf Abstand gehalten werden. Diese Teile sind bei geringem Gewicht sehr biege- und beulsteif. Ihre Berechnung wird im Bauwesen nach der linearen [Sandwichtheorie](#) vorgenommen. Im Schiffbau ist diese Bauweise bereits heute, vor allem bei Sportbooten sehr verbreitet. Im Großschiffbau verspricht die Sandwichbauweise mehr Sicherheit zu bringen, ganz besonders bei den Tankschiffen. Auch bestehende Schiffe lassen sich nachträglich ausrüsten.



3.3.6.1.5 Lichtbogenbolzenschweißen

Auf Werften wird für die Anbringung von Befestigungselementen häufig das Lichtbogenbolzenschweißen verwendet. Es können damit Gewindebolzen, Kopfbolzen oder Halter angeschweißt werden. Hierfür wird eine spezielle Schweißpistole verwendet. Mit Hilfe dieser Pistole wird der Bolzen auf die Stahlplatte gesetzt. Der Fuß des Bolzens wird von einem Keramikring umschlossen. Der Schweißprozess wird dadurch eingeleitet, dass die Pistole den Bolzen anhebt und einen Lichtbogen zwischen Bolzen und Grundwerkstoff erzeugt. Dieser schmilzt das Bolzenende und den Grundwerkstoff. Der Bolzen wird in das flüssige Schweißbad getaucht, das erstarrt und die Verbindung herstellt. Der Keramikring, der dem Schutz des Schweißbades diente, kann danach abgeschlagen werden.

3.3.6.1.6 Verarbeitungsregeln Schweißen

Der Schweißfachingenieur muss Schweißverfahren und Schweißzusatzstoffe sorgfältig auf den Grundwerkstoff abstimmen, damit eine einwandfreie Schweißung gelingt. Das von ihm ausgearbeitete Konzept muss genau befolgt werden.

Die Schweißarbeiten müssen nach den Schweißvorschriften der zuständigen Klassifikationsgesellschaft ausgeführt werden. Die für wesentliche Schweißarbeiten eingesetzten Schweißer werden von ihr darauf geprüft, ob sie die zum Einsatz kommenden Verfahren beherrschen. Damit die Verfahren sachgerecht angewendet werden, stellt jede Werft ergänzende objektbezogene und allgemein anwendbare Schweißanweisungen auf.

Im wesentlichen werden darin folgende Punkte angesprochen:

- Festlegung der Schweißzusatzwerkstoffe in Abhängigkeit von Verfahren, Stahlart, Nahtform und Schweißposition
- Auflistung der anwendbaren Schweißvorschriften (z.B. Klassifikationsgesellschaft, Fertigungsstandard des Deutschen Schiffbaus, werfteigene Vorschriften).
- Ergänzende Hinweise zur Ausführung der Arbeiten.
- Lagerung und Behandlung der Schweißzusatzwerkstoffe. Generell gilt, dass Schweißzusatzwerkstoffe trocken verarbeitet werden müssen (Feuchtigkeit im Schweißzusatz führt dazu, dass im Lichtbogen Wasserstoff entsteht und in das Schweißbad und die benachbarte Wärmeeinflusszone gelangt. Dieser Wasserstoff ist im festen Zustand von Stählen beweglich. Er kann im abgekühlten Stahl ausdiffundieren und/oder bei dieser Bewegung im Stahl das Stahlgefüge trennen.). Elektroden müssen deshalb nach der Entnahme aus der feuchtigkeitsgeschützten Packung kurzfristig verarbeitet werden. Wenn die Gefahr besteht, dass sie Feuchtigkeit aufgenommen haben können, müssen sie in Trockenschränken rückgetrocknet werden. Aus dem gleichen Grunde müssen die Schweißzonenbereiche frei von Feuchtigkeit, Schmutz, Ölen, Fetten usw. sein und die Schweißbereiche müssen vor Nässe, Kälte und Wind durch geeignete Abdeckungen geschützt werden. Beim Schweißen höherfester Stähle ist die Einhaltung dieser Anforderungen besonders wichtig.
- Vorwärmen zum Schweißen. Die Wärmeführung beim Schweißen ist von besonderer Bedeutung für die Ausbildung des Gefüges und damit die Festigkeit und Härte der Schweißnaht. Die Naht darf nicht **zu schnell** erkalten. Dies hängt von einer größeren Anzahl von Einflussfaktoren ab. Besonders empfindlich sind hinsichtlich der richtigen Wärmeführung die höherfesten legierten Schiffbaustähle (etwas weniger die höherfesten TM-Stähle⁶).

⁶ TM-Stähle: thermomechanisch gewalzte Stähle

- Um die richtigen Umgebungsbedingungen zu erlangen, werden die zu fügenden Bauteile vorgewärmt (TM-Stähle bei sehr großen Blechdicken: mindestens 20 - 50° C, andere höherfeste Stähle je nach Blechdicke und Nahtart: 50 - 100° C). Das Vorwärmen erfolgt durch elektrische Heizbänder und/oder bewegliche Gasbrenner.
- Vermeiden von geometrischen oder metallurgischen Kerben auf den Nahtoberflächen und Bauteilen. Eventuelles Nachschleifen und Glätten an Kerbstellen.

3.3.6.1.7 Nahtgüte

Die Art der Schweißnaht wird vom Konstrukteur und/oder dem Schweißfachingenieur festgelegt. Die erforderliche Nahtgüte richtet sich nach folgenden Kriterien.

- Schiffstyp bzw. Bauweise
- Beanspruchung (Art und Größe)
- Lage der Schweißung zur Hauptbeanspruchungsrichtung
- Ausführungsformen der Bauteile
- Materialdicke

In der Norm EN 25817 „Lichtbogenschweißverbindungen an Stahl - Richtlinie für die Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten“ sind Bewertungsgruppen für noch zulässige Unregelmäßigkeiten gebildet worden. Im „Fertigungsstandard des Deutschen Schiffbaus“ (herausgegeben vom Verband für Schiffbau und Meerestechnik) wird die Tabelle der Unregelmäßigkeiten (Risse, Poren, Einschlüsse, Bindefehler, fehlerhafte Nahtformen usw.) in einer für den Schiffbau angepassten Form wiedergegeben. Der Fertigungsstandard listet in einer weiteren Tabelle auf, wie die Schweißnähte an Bauteilen eines Schiffes diesen Bewertungsgruppen zuzuordnen sind. Die Deckstringer-Schergang-Verbindung, die Schweißverbindungen im Bereich der oberen und unteren Gurtung und Stöße in und an überwiegend dynamisch beanspruchten Bauteilen werden beispielsweise danach der höchsten Bewertungsgruppe zugeordnet. Sie müssen also die höchste Nahtgüte besitzen, was sich aus der Bedeutung dieser Nähte für den gesamten Festigkeitsverband ergibt.

3.3.6.1.8 Geräte und Maschinen



Bild: Böckchenschweißen

Wie bereits oben ausgeführt wurde, befindet sich das Verfahren der *Handschweißung mit Stabelektroden* im Rückgang. Es wird vornehmlich noch zum Heften, für das Schweißen an unzugänglichen Stellen und im Ausrüstungsbereich eingesetzt.

Als eine sehr einfache Mechanisierung des Stabelektrodenverfahrens kann man das sog. „*Böckchenschweißen*“ oder Schwerkraftschweißen betrachten. Dieses Verfahren wird zum Schweißen waagrecht liegender gerader Kehlnähte verwendet. Es ist keine Nachführungssensorik erforderlich, die Elektroden brennen durch das eigene Gewicht belastet gleichmäßig in dem Winkel zwischen Platte und Profil ab.

Für die *Handschweißung mit Schutzgasverfahren* sind in den Werften zum Teil sehr zweckmäßige Schweißstationen entwickelt worden, bei denen die Zuführung von Schweißdraht, Schweißstrom, Schweißgas und die Absaugung der Schweißgase über einen Ausleger oder ein Portal von oben erfolgt. Der Schweißer kann sich die Geräte dann jeweils

leicht an den Arbeitsplatz heranholen.

In dem Bemühen, die schwierige Arbeit des Schweißens so weit wie möglich zu mechanisieren, werden bereits seit vielen Jahren Führungsgeräte eingesetzt, die mit Schutzgasschweißverfahren arbeiten. Hierbei kann man zwischen beweglichen Maschinen, die an das Werkstück herangebracht werden, und fest installierten (stationären) Maschinen unterscheiden

Bewegliche Führungsgeräte nennt man im allgemeinen *Schweißtraktoren*. Sie werden zum Schweißen gerader Horizontal- oder Vertikalnähte eingesetzt. Hierzu gehören die in der Vorfertigung eingesetzten Kehlnahtautomaten.

Die Bahnführung kann auch unter Zuhilfenahme einer Führungsschiene erfolgen. Ein Beispiel ist das Verschweißen von Außenhautnähten und -stößen. Hier wird vorteilhaft das Fülldraht-Schutzgasverfahren angewandt. Der Traktor wird an senkrechten oder waagerechten Schienen geführt, die neben der zu verschweißenden Naht angebracht worden sind. Die Schweißbadrückseite wird durch eine Keramikschiene gesichert. Der Schweißer beobachtet den Prozess und regelt gegebenenfalls manuell nach.

Stationäre Schweißmaschinen werden vor allem in mechanisierten Fertigungsstraßen (*Panel-Linien* usw.) eingesetzt. Es handelt sich dabei im allgemeinen um große Portale, an denen die eigentlichen Schweißköpfe beweglich angebracht sind.

Für das Zusammenschweißen der Einzelplatten zu Plattenplänen wird häufig das UP-Verfahren benutzt. Die Schweißstation ist mit Einrichtungen ausgerüstet, durch die die zu verschweißenden Bleche in einer Ebene gespannt werden. Hierfür können magnetische, pneumatische oder hydraulische Vorrichtungen verwendet werden. Die Verschweißung der Profile mit der Platte (Kehlnähte) erfolgt meist mit einem Schutzgasverfahren, wobei häufig zwei Schweißköpfe gleichzeitig zum Einsatz kommen. Vorher müssen, evtl. in einer besonderen Station, die Profile aufgesetzt, durch Spannvorrichtungen fest auf das Blech gedrückt und geheftet werden

Roboter

Zunächst soll ein Hinweis auf den Unterschied zwischen mechanisierten Verfahren und Robotern in der Schiffskörperfertigung gegeben werden:

Mechanisierte Verfahren nutzen **Führungsmaschinen**, an denen Arbeitsgeräte - Brenner, Schweißköpfe, Markiereinrichtungen - angebracht sind, die auf mechanisch zwangsgeführten, zumeist ebenen, Bahnen definierte, immer ähnliche Aufgaben erfüllen.

Beispiel: Brennmaschine, Schweißportal.

Roboter sind Führungsmaschinen für Arbeitsgeräte, die in gewissen Grenzen ihres Arbeitsbereiches beliebige räumliche Bewegungen ausführen, deren Bahnkoordinaten vorher in einem Bahnführungsprogramm berechnet wurden. Dabei werden sowohl die eigentlichen Arbeitsspuren als auch die räumliche Umgebung zur Vermeidung von Kollisionen rechnerisch behandelt.

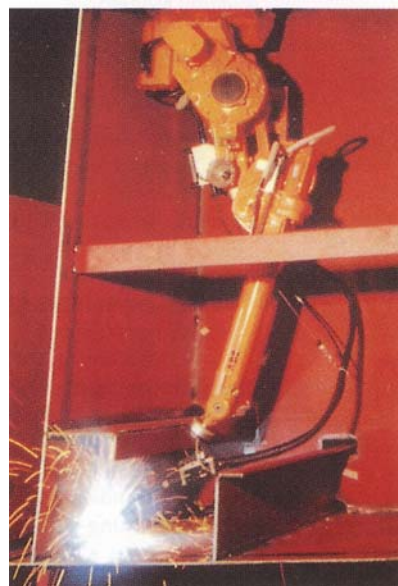


Bild:
Robotereinsatz im Schiffbau (TTS)



Beim derzeitigen Stand der Technik werden Roboter zum Ausschweißen vormontierter Untergruppen und Gruppen eingesetzt. Hierfür sind Roboter-Schweißstationen eingerichtet, die einen Arbeitsbereich haben, der der Größe der zu bearbeitenden Bauteile entspricht. Häufig sind die Roboter an verfahrbaren oder versetzbaren Roboterportalen angebracht, so dass sie auch große Bauteile bearbeiten können.

Exkurs: Einsatz von Robotern

Der Einsatz von Robotern ist sinnvoll, wenn sich die zu fertigenden Teile oft wiederholen oder wenn bei Teilen mit einer kleineren Losgröße gleiche Arbeitsaufgaben oft wiederkehren. Letzteres gilt z.B. für einfach strukturierte geradflächige Bauteile, bei denen sich gerade Nähte in immer wieder ähnlicher Form wiederholen. Man findet auf Werften deshalb sowohl einfache Knickarm-Roboter, die in der Untergruppenfertigung relativ simple Schweißungen mit hohem Wiederholgrad durchführen als auch Systeme mit großem Arbeitsbereich, die einen Doppelboden ausschweißen. Hier haben sich die sogenannten „Egg-Box“ Roboter bereits weit durchsetzen können. Innerhalb eines aus Längs- und Querträgern gebildeten Feldes übernimmt der Roboter alle Schweißaufgaben nach der Baugruppenmontage, d.h. die Ausschweißung der Vertikalnähte zwischen Längs- und Querträgern und an den Beulsteifen, sowie aller Kehlnähte in den Verbindungen zum Innenboden. Außerdem werden die vorher manuell gehefteten Riegelbleche an den Spantdurchführungen angeschweißt. Die Schweißfolge in den einzelnen Boxen und die Reihenfolge des Schweißens der einzelnen Boxen wird nach dem Gesichtspunkt der geringsten Schweißdeformation festgelegt.

Eine anspruchsvolle Aufgabe ist die Programmierung der Schweißroboter. Für die Bahnplanung wird auf die Geometrie-Information aus dem CAD-System zurückgegriffen. Mit einem zusätzlichen Programmmodul, welches die Robotergeometrie abbildet, wird die Kollisionsfreiheit während des Programmablaufs überprüft. Diese Arbeit wird im „off-line“-Verfahren geleistet, da mit „teach-in“-Methoden unzulässig hohe Ausfallzeiten für die eigentlichen Schweißaufgaben entstehen würden.

Bei der mathematischen Beschreibung der Roboterbewegung im Raum, z.B. beim Schweißen in einer „Egg-Box“ oder in einer gekrümmten Außenhautsektion liegt ein hochkomplexes dreidimensionales Problem vor, das mit der Anzahl der freien Roboterachsen steigt. Hier sind erst in jüngerer Zeit Rechenprogramme entwickelt worden, die die durch die Roboterkinematik gegebenen Verknüpfungen zwischen Schweißbahnplanung und Begrenzungen des Arbeitsraumes mit vertretbarem Rechenaufwand lösen können.

Neben den geometrischen Parametern müssen die aktuellen Schweißparameter je nach Schweißposition und erforderlicher Nahtgeometrie bereitgestellt werden. Die Sensorik ist zum Teil so weit, dass interaktiv, das heißt on-line in die Schweißbearbeitung durch die Steuerung eingegriffen werden kann. Da im allgemeinen mit wechselnder Größe des Luftspaltes zu rechnen ist, müssen Sensoren eingesetzt werden, die dies erfassen und die entsprechenden Informationen on-line einsteuern.