

3 Schweißen

Dr.-Ing. M. Gehde, Wegener GmbH – Aachen (Kap. 3.1.1; 3.2.1; 3.2.2; 3.6; 3.7.3);
Dipl.-Ing. U. Ernst, EMPA – St. Gallen (Kap. 3.1.2);
Dr.-Ing. J. Korte, Bayer AG – Leverkusen (Kap. 3.3.1; 3.3.3);
Dipl.-Ing. M. Welz, – Bad Dürkheim (Kap. 3.1.1; 3.3.2; 3.3.3; 3.4.2; 3.7.2);
W. Strohsfuß, Branson Ultraschall – Dietzenbach (Kap. 3.4.1);
Dipl.-Ing. J. Vetter, Branson Ultraschall – Dietzenbach (Kap. 3.4.3);
Prof. Dr.-Ing. H. Potente, KTP – Universität Paderborn (Kap. 3.5.1);
Dipl.-Ing. O. Karger, KTP – Universität Paderborn (Kap. 3.5.1);
Dr. R. Emmerich, FHG für Chemische Technologie – Pfinztal/Berghausen (Kap. 3.5.2);
Prof. Dr.-Ing. P. Mitschang, Inst. f. Verbundwerkstoffe GmbH – Kaiserslautern (Kap. 3.5.3);
Prof. Dr.-Ing. E. Haberstroh, IKV – RWTH Aachen (Kap. 3.5.4);
Dr.-Ing. H. Klingenuß, SKZ-TeConA GmbH – Würzburg (Kap. 3.1.1; 3.7.1);
Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. G. W. Ehrenstein, LKT – Universität Erlangen-Nürnberg (Kap. 3.7.2);
Dipl.-Ing. (FH) F. Krause, Bayer AG – Leverkusen (Kap. 3.7.2);
Dipl.-Ing. C. Tüchert, Robert Bosch GmbH – Waiblingen (Kap. 3.7.3);
Dipl.-Ing. W. Langlouis, SKZ-ToP gGmbH – Würzburg (Kap. 3.7.4)

3.1 Erwärmung durch Leitung

3.1.1 Heizelementschweißen

3.1.1.1 Einleitung

Das Heizelementschweißen mit Kontakterwärmung ist das älteste mechanisierte Verfahren zum Schweißen von Kunststoffen. Es basiert auf der direkten Erwärmung der Fügeflächen an einem Heizelement, wobei eine Schmelzeschicht an den Fügeflächen aufgebaut wird. Dann wird das Heizelement entfernt und die Fügeile werden unter Druck gefügt. Eine Antihafbeschichtung des Heizelementes verhindert die Schmelzhaftung auf der Heizelementoberfläche.

Erste Maschinen mit automatisiertem Prozeßablauf wurden in den frühen 60er Jahren gebaut. Bis heute behauptet dieses Verfahren einen Spitzenplatz in der Anwendung sowohl im Halbzeugbereich als auch in der Großserienfertigung. Trotz der prinzipbedingten Nachteile wie mehrstufigem Prozeß, Temperatureinschränkungen, Schmelzeanhaftungsprobleme am Heizelement und vergleichsweise hoher Taktzeit wird das Heizelementschweißen immer dann angewendet, wenn hohe Bauteilanforderungen gestellt werden und große Verfahrenssicherheit gefordert wird. Im Laufe der Entwicklung in unterschiedlichen Anwendungsbe-
reichen haben sich verschiedene Verfahrensvarianten entwickelt, welche anwendungsspezi-
fisch zu unterschiedlichen Prozeßführungen geführt haben.

3.1.1.2 Prozeßbeschreibung

Das Heizelementschweißen basiert auf der Fremderwärmung der Fügeflächen an einem Heizelement bis in den Schmelzbereich und dem darauf folgenden Fügen unter Druck [1]. Ein Teil der Schmelze wird dann in den Schweißwulst gedrängt. Dem rheologischen Vorgang beim Fügen und der resultierenden Schweißnahtstruktur wird in der Literatur der Schlüssel zu den Nahtigenschaften zugeschrieben [2-5]. Im praktischen Einsatz des Verfahrens wird dieser wenig bekannten wissenschaftlichen Basis durch teilweise präzise vorgegebene Parameterfenster Rechnung getragen [6-10]. Die Prozeßführung basiert in der Regel auf einer Kraft-Zeit Regelung, in einigen Anwendungen wird statt dessen ein weggeregelter Prozeß, zumeist mit mechanischen Anschlägen in der Maschine gewählt.

Der Verfahrensablauf des Heizelementkontaktschweißens ist in Bild 3.1 dargestellt.

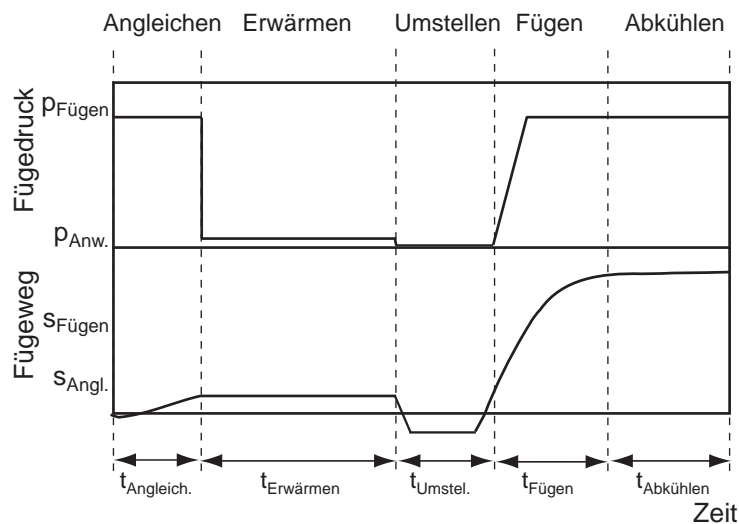


Bild 3.1 Verfahrensablauf beim Heizelementschweißen mit Kraftvorgabe
prinzipieller Kraft-Zeitverlauf, abhängiger Weg-Zeitverlauf

Angleichen

In der Angleichphase werden die Füge Teile mit erhöhtem Druck beidseitig am Heizelement angelegt. Die Fügeflächen erhalten durch schnelles "Abschmelzen" vollflächigen Kontakt mit dem Heizelement. Dadurch bewegen sich die Füge Teile auf das Heizelement zu.

Erwärmen

In der drucklosen Erwärmphase wird eine Schmelzeschicht mit definierter Dicke an den Fügeflächen aufgebaut. Die Füge Teile stehen dabei still, es wird kein Weg zurückgelegt.

Umstellen

Die Fügeiteile werden vom Heizelement weggefahren und das Heizelement aus der Fügezone entfernt.

Fügen

Die Fügeiteile werden unter Druck gefügt. Dabei bildet sich der Schweißwulst. Der sich einstellende Fügeweg ist beim druckgeregelten Schweißen eine Funktion der Schmelzeviskosität und des Fügedruckes.

Kühlen

Die Abkühlphase erfolgt in der Regel unter Beibehaltung des Fügedruckes. Durch das Schwinden während des Abkühlens wird eine geringe Wegzunahme festgestellt.

*3.1.1.3 Prozeß-Struktur-Eigenschaftsbeziehung***Nahtfestigkeit und Rheologie**

Bei dem Begriff der Nahtfestigkeit wird in erster Linie an die Verbindungsfestigkeit der Fügeebene gedacht, also der eigentlichen Kontaktebene der beiden Fügepartner. Die Fügeebene selbst ist jedoch in den meisten Fällen nicht der relevante Schwachpunkt einer Schweißnaht. Die Schweißnaht ist vielmehr als eigene Werkstoffzone innerhalb des Bauteils zu betrachten, mit spezifischem, vom Grundmaterial unterschiedlichem mechanischen Verhalten. Die mechanischen Eigenschaften einer Schweißnahtprobe sind häufig deutlich schlechter als die vergleichbaren Werte des entsprechenden Grundmaterials, obwohl das Versagen nicht in der Fügeebene, also der eigentlichen Berührebene der beiden Fügepartner auftritt.

Bindemechanismus

Die Fügeebenenfestigkeit wird beim Schweißen durch eine Abfolge von molekularer Orientierung mit nachfolgender Relaxation erklärt. Makroskopische Mischungsvorgänge der beiden Schmelzeoberflächen finden nicht statt. Die Schmelze wird in der Fügephase in Form einer beschleunigten Strömung in Richtung Wulst gedrängt. Die beschleunigte Strömung orientiert und streckt die Makromoleküle. Nach dem Ende des Fließprozesses, also bei Beendigung der Fügebewegung relaxieren die orientierten Moleküle. Dabei wird die stoffliche Grenzfläche beider Fügepartner aufgelöst und in der folgenden Kühl- bzw. Rekristallisationsphase ein homogener Werkstoffbereich geschaffen.

Schweißnahtstruktur

Eine Schweißnaht bewirkt lokal veränderte mechanische Eigenschaften im Bauteil. Die Ursache hierfür ist in dem Zusammenwirken zwischen äußerer Kerbe, bedingt durch den Schweißwulst, und im inneren, morphologischen Aufbau des Schweißnahtbereiches zu suchen, welche beide die mechanischen Schweißnahteigenschaften dominieren.

Die Morphologie der Naht kann als strukturelle Kerbe bezeichnet werden, der Schweißwulst ist eine äußere, geometrische Kerbe. Den typischen Schweißnahtaufbau zeigt Bild 3.2 anhand einer polarisationsoptischen Dünnschnittaufnahme einer Schweißverbindung aus Polypropylen.

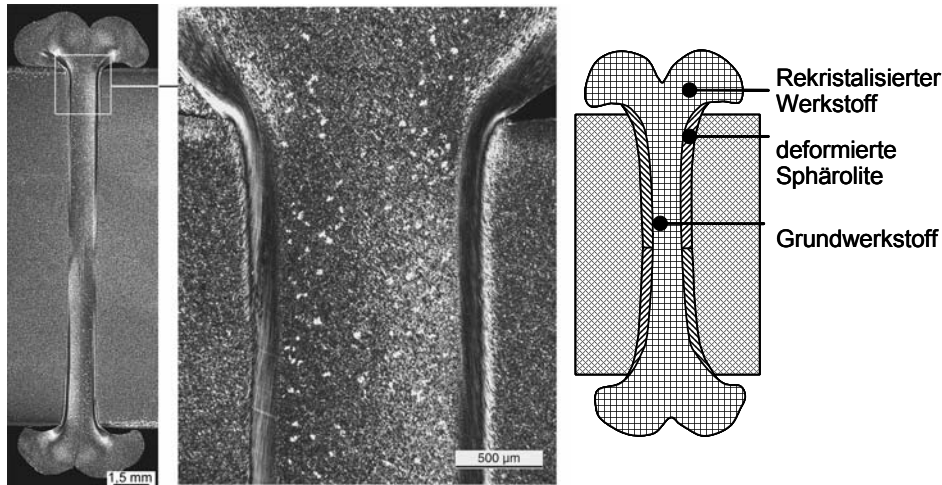


Bild 3.2 Polarisationsmikroskopische Dünnschnittaufnahme einer Heizelementschweißnaht aus PP, Querschnitt und Prinzipbild des Nahtaufbaus [3]

In der Übersichtsdarstellung links ist der Fügeitlquerschnitt mit den äußeren Schweißwulsten zu erkennen, die Detailvergrößerung in der Mitte zeigt den sphärolithischen Aufbau einer Nahthälfte. In der schematischen Darstellung sind drei grundsätzlich unterschiedliche Bereiche zu erkennen.

Grundwerkstoff

Fügeitlbereiche, welche während des Schweißprozesses nicht oberhalb der Kristallit-schmelztemperatur erwärmt wurden und daher ihre Struktur erhalten haben.

Deformierte Sphärolithe

In dieser Zone war das Material auf Temperaturen im Bereich der Kristallit-schmelztempera-tur erwärmt, aber noch nicht vollständig aufgeschmolzen. „Alte“ Strukturen haben sich beim Fließen der Schmelze erhalten und erstarren in deformierter Form.

Rekristallisierter Werkstoff

Das Material war komplett in Schmelze und ist aus der Schmelze nach dem Fließprozeß neu rekristallisiert. Diese Werkstoffzone weist keine polaristionsoptisch erkennbaren Orientie-rungen auf. Die Kontaktzone beider Werkstoffe ist durch eine besondere Sphärolithstruktur in der Fügeebene zu erkennen.

3.1.1.4 Parametereinfluß beim Schweißen mit Kontakterwärmung

Beim Heizelementschweißen lassen sich im Unterschied zu anderen Verfahren die Schmel-zeschichterzeugung und die Fügephase, der Werkstofffluß unabhängig voneinander mittels der Parameter beeinflussen. Die Nahteigenschaften beeinflussenden relevanten Schweißpa-rameter sind:

- Heizelementtemperatur,
- Angleichzeit/Weg,
- Erwärmzeit,
- Erwärmdruck,
- Umstellzeit,
- Fügedruck/Druckaufbauzeit,
- Fügeweg,
- Kühlzeit.

Heizelementtemperatur

Die Heizelementtemperatur wird werkstoff- und prozeßspezifisch konstant gehalten. Die Antihaftbeschichtung auf Basis von PTFE limitiert die Dauergebrauchstemperatur von Kontaktheizelementen auf ca. 270 °C. Die erforderliche Heizelementtemperatur beim konventionellen Schweißen mit Kontakterwärmung kann näherungsweise wie folgt angenommen werden:

- teilkristalline Thermoplaste: $T_k + 70 \text{ °C}$
- amorphe Thermoplaste: $T_g + 140 \text{ °C}$

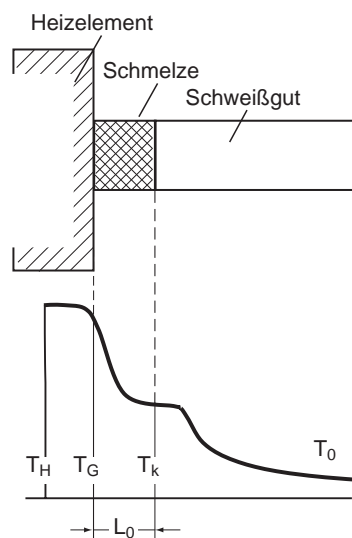


Bild 3.3 Temperaturverlauf im Fügelement während der Anlaufphase

T_H = Heizelementtemperatur

T_k = Kristallitschmelztemperatur

L_0 = Schmelzeschichtdicke

T_G = Kontaktflächentemperatur

T_0 = Umgebungstemperatur

In der Praxis basiert die Heizelementtemperatur auf Vorversuchsreihen, so daß anwendungsbezogen durchaus mit unterschiedlichen Temperaturen bei dem gleichen Werkstoff gearbeitet wird. Beim Serienschweißen und beim Schweißen dünnwandiger Füge­teile wird häufig eine erheblich höhere Heizelementtemperatur eingesetzt als bei dickwandigen Bauteilen wie z.B. beim Halbzeugschweißen.

Hohe Heizelementtemperatur und entsprechend kurze Erwärmzeit haben den Vorteil einer kurzen Zykluszeit und eines geringeren Energieeintrages ins Bauteil. Neben der verbesserten Wirtschaftlichkeit wird möglicher Bauteilverzug reduziert. Als Nachteile ergeben sich eine niedrigere Schmelzviskosität mit erhöhter Anhaftungsneigung am Heizelement, sowie ein häufig spröderes mechanisches Verhalten der so hergestellten Verbindung. Hohe Temperaturen schädigen leichter die thermisch/antioxydative Stabilisierung des Materials, so daß Schweißnähte dieser Art eine geringere Langzeitfestigkeit aufweisen können. In mechanischen Kurzzeitversuchen ist dieser Effekt nicht nachzuweisen.

Speziell bei den immer häufiger eingesetzten Rezyklaten oder Rezyklatbeimischungen ist eine Senkung der Heizelementtemperatur gegenüber reiner Neuware oft notwendig.

Angleichen, Angleichzeit, Angleichweg

Die Angleichphase ist charakterisiert durch eine Zustellbewegung der Füge­teile an das Heizelement, solange, bis alle Unebenheiten der Füge­teile "abgeschmolzen" sind und die vollflächige Anlage und Materialkontakt am Heizelement erreicht sind. Ein komplett um die Füge­flächen umlaufender Wulst signalisiert das Ende der notwendigen Angleichzeit. Übliche Angleichdrücke bewegen sich zwischen 0,1 und 0,8 N/mm², wobei Werkstoff, Bauteil­steifigkeit und Maschinenauslegung (Füge­teilaufnahme, Steuerungsauslegung) die relevanten Kriterien sind.

Beim Serienschweißen wird die Angleichphase entweder über eine feste Zeit oder einen bestimmten Angleichweg (Anschläge, Wegmessung) festgelegt, beim Einzelteilschweißen wird häufig der visuellen Kontrolle des Angleichwulstes der Vorzug gegeben.

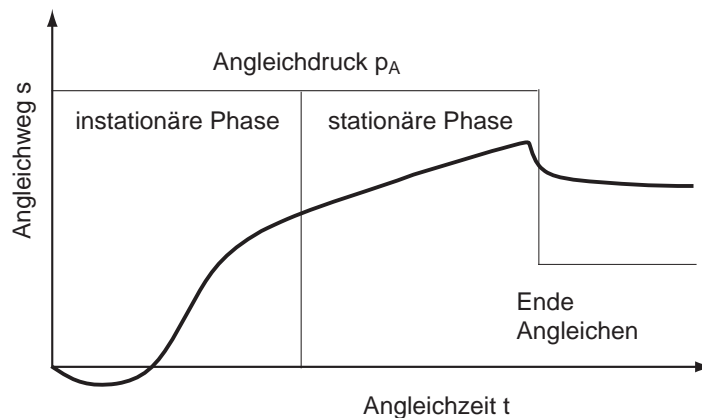


Bild 3.4 Abschmelzverhalten während der Angleichphase

Erwärmzeit/Erwärmdruck

Während des Angleichens werden die Fügeflächen bereits vollständig aufgeschmolzen. Bei der anschließenden "Erwärmung" werden sie weiter bis zu der gewünschten Tiefe plastifiziert. Die optimale Schmelzeschichtdicke L_0 ist abhängig vom Thermoplasttyp und von der Wanddicke. Übliche Bereiche sind:

- teilkristalline Thermoplaste: $L_0 / d = 0,2 - 0,4$
- amorphe Thermoplaste: $L_0 / d = 0,4 - 1,2$

L_0 : Schmelzeschichtdicke; d : Wanddicke

Die Zeit bis zum Erreichen der gewünschten Schmelzeschichtdicke ist vor allem von der Heizelementtemperatur und der Wärmeleitfähigkeit des Materials abhängig und muß durch Vorversuche ermittelt werden, wenn keine Daten für das Material vorliegen. Für PE und PP sind in Richtlinie DVS 2215-2 [11] entsprechende Diagramme zu finden (s.a. Kap. 3.1.1.5, Tabelle 3.1).

In der Parameteroptimierung wird die Schmelzeschichtdicke mittels Hochdruckfügeversuchen mit begleitender Fügewegmessung ermittelt, wobei Fügedrucke von 0,5-1,5 N/mm² eingestellt werden. Dabei kann von einer ca. 95 %igen Schmelzeverdrängung ausgegangen werden. Nach dem Angleichen wird der Druck stark reduziert und während der Erwärmphase auf einem so niedrigen Niveau gehalten, daß kaum weitere Schmelze austritt, aber ein für den Wärmeübergang notwendiger Kontakt zwischen Heizelement und Fügeteilen aufrecht erhalten wird (z.B. 0,01 N/mm²).

Umstellen

Während der Umstellphase kühlt die Fügefläche ab. Zusätzlich befindet sie sich im Kontakt mit Luftsauerstoff und kann oxydieren. Die Umstellzeit muß daher so kurz wie möglich sein.

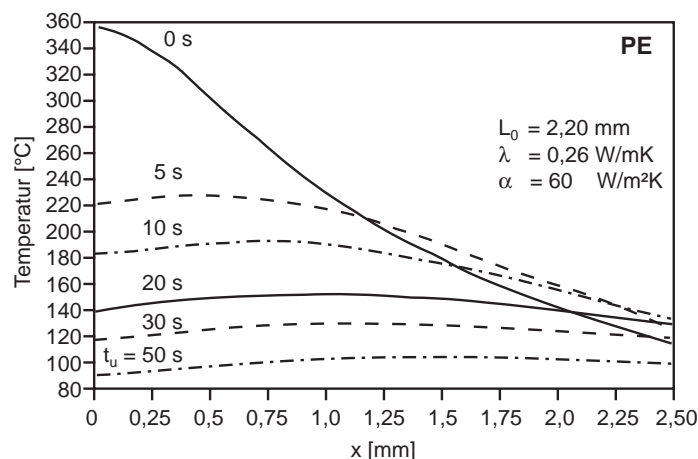


Bild 3.5 Berechnetes Temperaturprofil nach dem Umstellen beim Schweißen im Hochtemperaturfeld (Werkstoff PE)

Je nach Fertigung gibt es Umstellzeiten zwischen ca. 1 s bei kleinen Serienteilen und bis zu 25 s [6] beim Schweißen von Großrohren im Feld. Umstellzeitkritische Materialien wie z.B. PVC oder PVDF tolerieren unabhängig von der Wanddicke nicht mehr als 2,5 s. Kritisch sind auch dünnwandige Teile mit geringen Schmelzeschichtdicken, bei denen die Fügeflächentemperatur nach wenigen Sekunden unter die Erstarrungstemperatur fällt.

Fügedruck, Fügedruckaufbauzeit

Nach dem Umstellen sollen sich die Schmelzeschichten theoretisch druckfrei berühren, bevor ohne zeitliche Verzögerung der Fügedruckaufbau erfolgt. Der Fügedruck führt durch den Schmelzefluß zur Ausbildung des Schweißwulstes. Eine sog. Restschmelzeschicht verbleibt im Nahtbereich. In der Praxis wird überwiegend mit dem Fügedruck als Parameter gearbeitet. Für den größten Teil der Thermoplaste gelten Fügedrücke im Bereich von 0,1 - 0,3 N/mm² als optimal, verschiedene Typen des PVC werden mit 0,6 - 0,8 N/mm² gefügt, für ultrahochmolekulares PE werden bis zu 2,5 N/mm² eingestellt, dagegen reichen 0,05 N/mm² bei leichtfließenden teilkristallinen Thermoplasten oft aus. Eine Fahrweise mit Fügeweg-Einstellung ist ebenfalls möglich, insbesondere dann, wenn die Schmelzeschichtdicke bekannt ist und daher der Fügeweg s_f vorgegeben werden kann. Der Schlüssel der mechanischen Nahteigenschaften liegt im Fließverhalten der Schmelze. In vereinfachter Betrachtung wird das rheologische Verhalten durch das Verhältnis von Fügeweg zu Schmelzeschichtdicke: s_f/L_0 charakterisiert. Es kann davon ausgegangen werden, daß bei ungefähr 75 %iger Schmelzeverdrängung, also bei $s_f/L_0 = 0,75$ sowohl für amorphe als auch für teilkristalline Werkstoffe ein Optimum der Nahtfestigkeit erreicht wird.

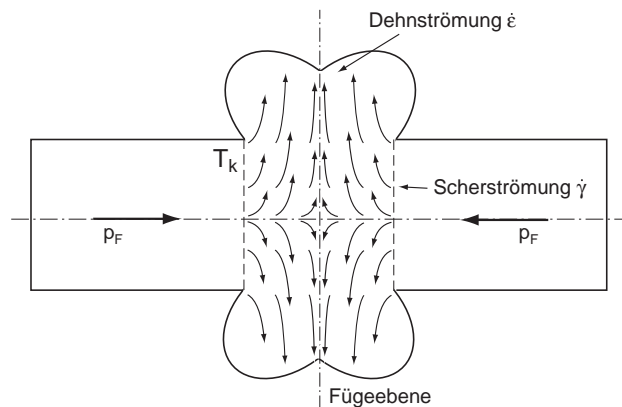


Bild 3.6 Fließverhalten der Schmelze an der Fügestelle, schematisch

T_k = Kristallitschmelztemperatur

Kühlen

Die Abkühlung erfolgt durch Wärmeleitung ins Bauteil und natürliche Konvektion. Während der Abkühlphase wird der Fügedruck in der Regel mindestens bis zum Unterschreiten

der Rekristallisationstemperatur bzw. der Glasübergangstemperatur im gesamten Fügequerschnitt aufrechterhalten. Lunkerbildung aufgrund der thermisch- und kristallisationsbedingten Dichtezunahme sowie die Bildung von Eigenspannungen werden dadurch minimiert. Eigenspannungen lassen sich aber prinzipiell nicht verhindern. Über den Einfluß von Zwangskühlung liegen bisher keine fundierten Erkenntnisse vor.

3.1.1.5 Prozeßvarianten

Kontakterwärmung mit Hochtemperatur

In einigen Anwendungen beim Serienschweißen wird im Hochtemperaturkontaktschweißen gearbeitet. Hochtemperaturheizelemente sind nicht antihafbeschichtet. Beim Hochtemperaturschweißen werden Heizelementtemperaturen zwischen 300 und 450 °C gewählt, die im Bereich oder oberhalb der Zersetzungstemperatur des zu schweißenden Werkstoffes liegen. Angleichen und Anwärmen werden zu einem wenige Sekunden dauernden gemeinsamen Schritt zusammengefaßt. Es wird dabei in Kauf genommen, daß die am Heizelement anliegenden Werkstoffbereiche thermisch abbauen. Bei geringen Fügeteilwanddicken von 2 bis 3 mm wird davon ausgegangen, daß die abgebauten und dadurch sehr niedrigviskosen Werkstoffbereiche komplett in den Schweißwulst gedrängt werden. Je nach Fügeteilwerkstoff und Heizelementtemperatur tritt eine Selbstreinigung des Heizelementes durch Verdampfen der Anhaftungsrückstände auf. Da keine empfindliche Antihafbeschichtung aufgebracht wurde, kann die Heizelementoberfläche auch nach jedem Zyklus durch automatische Vorrichtungen gereinigt werden.

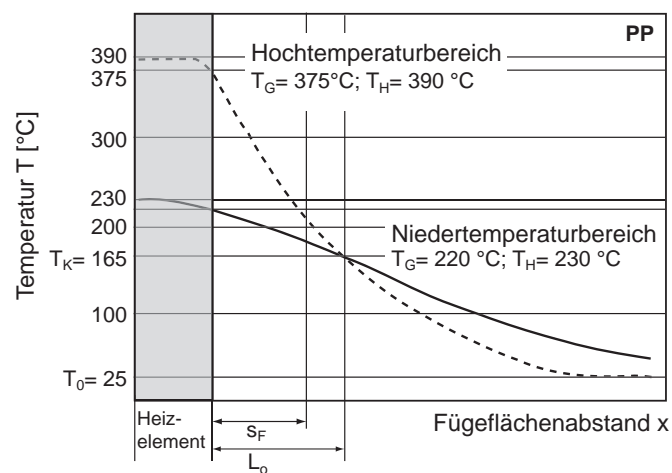


Bild 3.7 Temperaturprofile in der Schmelzeschicht bei Hoch- und Niedertemperaturerwärmung

T_G = Kontaktflächentemperatur

s_F = Fügeweg

L_o = Schmelzeschichtdicke

T_H = Heizelementtemperatur

T_K = Kristallitschmelztemperatur

T_0 = Raumtemperatur

Das Hochtemperaturschweißen wird mit guten Schweißnahteigenschaften vor allem für Polypropylen, ABS und PMMA in Serienanwendungen eingesetzt (PE nur mit Einschränkungen nach DVS 2215-2 [11]). Beim Hochtemperaturschweißen beträgt die Zykluszeit nur etwa ein Viertel der Zeit des "normalen" Heizelementschweißens, da wegen der geringeren Schmelzeschichtdicke auch die Kühlzeit entsprechend kürzer ist.

Berührungsloses Hochtemperaturschweißen

Beim berührungslosen Hochtemperaturschweißen wird das Heizelement als Strahlungsheizelement eingesetzt. Die Arbeitstemperaturen betragen bis zu 600 °C. Die Fügeile werden zum Anwärmen auf sehr geringen Abstand zum Heizelement gebracht, wofür üblicherweise anschlussgeregelte bzw. weggesteuerte Maschinen verwendet werden. Das Angleichen entfällt natürlich.

Die Heizelemente bei dieser Prozessvariante sind Dunkelstrahler, also langwellige Strahler, deren Intensität mit dem Quadrat des Abstandes zwischen Strahleroberfläche und Fügeile abnimmt. Diese Strahlungscharakteristik bedingt extrem geringen Abstand zwischen Fügeile und Strahleroberfläche. In der Praxis werden Abstände von 0,5-1,5 mm realisiert. Um eine gleichmäßige Schmelzeschichtdicke an der gesamten Fügefläche einzuhalten, dürfen die Abstandsdifferenzen nur sehr gering sein und müssen sich im Bereich von +/- 0,1 mm konstant halten lassen, zumal die entstehende Schmelze expandiert und den Abstand zum Heizelement verringert.

Die erforderlichen Genauigkeiten lassen sich bei Spritzgußfügeileilen nur bei sehr kleinen Bauteilen sicherstellen. Es gibt auch die Möglichkeit der spanenden Vorbereitung der Fügeflächen in der Maschineneinspannung. Dies wird z.B. beim berührungslosen Hochtemperaturschweißen von PVDF-Rohren im Nahrungsmittel- und Reinraumbereich durchgeführt, wobei die Rohrenden durch rundlaufende Hobel präzise geplant werden (weiter Ausführungen s.a. Kap. 3.3.1 und 3.3.2).

Schweißparameter bei Kontakterwärmung

Material	Dicke [mm]	AD [N/cm ²]	AZ [min:s]	WD [N/cm ²]	WZ [min:s]	FD [N/cm ²]	FZ [min:s]	TH [°C]
PP	10	10	1:30	1	3:40	10	17:00	210
PE-HD	10	15	1:30	1	1:40	15	13:00	215
PVC extr.	10	10	1:30	1	2:30	30	10:00	220
PVC gepr.	10	60	0:30	4	1:45	60	10:00	215
PVDF	10	10	0:45	1	2:20	10	14:00	240

Tabelle 3.1 Vergleich der Schweißparameter für klassifizierte Standardkunststoffe

AD = Angleichdruck

WD = Wärmdruck

FD = Fügedruck

TH = Heizelementtemperatur

AZ = Angleichzeit

WZ = Wärmzeit

FZ = Fügezeit/Kühlzeit

Im folgenden sind beispielhaft Schweißparametersätze von handelsüblichen, klassifizierten Extrusionswerkstoffen in Abhängigkeit der Fügeteildicke aufgeführt: Unter Verwendung dieser Parameter werden optimale Schweißnahtfestigkeiten mit einer Zeitstandfestigkeit (siehe Kap. 3.7.2) von mindestens 0,8 erreicht.

Beim Schweißen in der Serienfertigung werden in der Regel Spritzgußteile geschweißt. Die Schweißparameter werden jeweils anwendungs- und bauteilspezifisch optimiert. Meistens wird mit erheblich höheren Heizelementtemperaturen und kürzeren Erwärm- und Kühlzeiten gearbeitet, um die Gesamtenergieeinbringung und die Zykluszeit zu reduzieren.

3.1.1.6 Konstruktive Gestaltung der Fügeteile

Die Fügeteile müssen schweißgerecht konstruiert sein und aus für das Heizelementschweißen geeigneten Werkstoffen bestehen. Die Fügeflächen sollen durch das Heizelement gleichmäßig und vollständig erwärmt und aufgeschmolzen werden. Durch den Fügedruck ist über die gesamte Schweißnahtlänge ein möglichst gleichmäßiger Schmelzefluß zu erzeugen. Dabei sollen die Fügeteile Angleich-, Füge- und Einspannkkräfte ohne schädigende Deformation ertragen können.

Beim Heizelement-Stumpfschweißen von Halbzeugen (Platten, Profile, Rohre) mit sich selbst oder mit Formteilen liegen in der Regel planparallele Fügeflächen vor. Dagegen weisen beim Serienschweißen Fügeteile, die durch Spritzgießen, Blas- oder Thermoformen hergestellt wurden, oft komplizierte, räumlich gekrümmte Nahtkonturen auf. Dabei ist zu beachten, daß bei kleineren Winkeln zur Füge-richtung (normal 90°) auch der Abschmelzweg im Vergleich zum eingestellten Fügeweg kleiner wird (s.a. Kap. 3.4.2, Bild 3.89). Im Bereich der Schweißnaht sollten vermieden werden: Bindenähte, zu kleiner Abstand zu Bohrungen und Durchbrüchen, scharfkantige Ecken und Wanddickensprünge.

Die Fügezonengeometrie ist der Anwendung anzupassen, bevorzugt werden einfache, stirnflächig zu schweißende Fügeflächen. Bei Sichtteilen kann der beim Heizelementschweißen nicht zu vermeidende Schweißwulst entweder nachträglich abgearbeitet oder in der Konstruktion versteckt werden. Vorschläge für geeignete Nahtkonturen sind in [11] dargestellt, sie reichen von einfachen umlaufenden Stegen ("modifizierter Stumpfstoß") bis zur vollständigen Abdeckung der Naht durch entsprechende Lippen. Umlaufende Stege können auch als Einspannhilfe bzw. Anschlag für Spannwerkzeuge eingesetzt werden.

3.1.1.7 Materialeinfluß

Grundsätzlich sind alle Thermoplaste und thermoplastische Elastomere im Heizelementverfahren schweißbar, es gibt jedoch erhebliche Unterschiede im Schweißverhalten. So sind insbesondere hochmolekulare Polyolefine, PVC und andere Thermoplaste, vor allem amorphe mit hoher Schmelzeviskosität gut schweißbar, da die Klebneigung am Heizelement gering und die Schmelze sehr stabil ist. Bei sehr leichtfließenden Materialien, wie sie im Spritzguß bevorzugt eingesetzt werden, treten häufig Probleme durch Ankleben auf. Voraussetzung für gute Schweißnähte sind eine geeignete Materialauswahl, die materialgerechte Verarbeitung zu den Fügeteilen und eine Lagerung, die Feuchtigkeitsaufnahme oder Verschmutzung ausschließt.

Im Normalfall werden Fügeile aus gleichen Materialien geschweißt, wobei außer dem Thermoplasttyp auch die Schmelzeviskosität gleich sein sollte. Es lassen sich mit dem Heizelementverfahren aber auch Kombinationen aus verschiedenen Materialien schweißen, so z.B. verstärkte mit unverstärkten oder verstärkte mit elastomermodifizierten. Weiterhin sind auch einige ganz unterschiedliche Thermoplaste zu kombinieren, wie das Beispiel PKW-Rückleuchte aus ABS und PMMA zeigt [11].

Bei miteinander verträglichen Thermoplasten mit extrem unterschiedlichen Schmelzbereichen und/oder Viskositäten ist mit dem Heizelementverfahren dann ein Verschweißen möglich, wenn ein Doppelheizelement eingesetzt wird, bei dem zwei unterschiedliche Oberflächentemperaturen eingestellt werden können. Das Schweißverfahren wird zwar von dem Grundwerkstoff dominiert, aber auch von den Zusatzstoffen mitbestimmt. So verändern Füll- und Verstärkungsstoffe, Flammenschutzmittel, Gleit- und Schmiermittel u.s.w. die physikalischen Eigenschaften und somit auch das Schweißverhalten. Selbst geringe Zusätze wie z.B. Pigmente können bei teilkristallinen Thermoplasten das Kristallwachstum beeinflussen und somit das Aufschmelzen und Erstarren.

Feuchtigkeit in den Fügeileilen kann zu blasigen und damit unbrauchbaren Schweißnähten führen. Bei einigen Kunststoffen bewirkt die Feuchtigkeit in Verbindung mit der hohen Schweißtemperatur einen molekularen Abbau und damit eine Reduktion der mechanischen Eigenschaften. Wird bei der Fügeileilherstellung Trennmittel eingesetzt, kann eine Reinigung der Fügeileilen vor dem Schweißen erforderlich sein. Ist das Schweißverhalten einer Werkstoffkombination nicht bekannt, wird empfohlen, Vorversuche an einfachen Prüfkörpern durchzuführen.

3.1.1.8 Maschinentchnik

Maschinen zum Heizelementstumpfschweißen arbeiten alle nach dem prinzipiellen Verfahrensablauf wie vorn beschrieben, sind aber in ihrer technischen Ausführung so unterschiedlich wie die unterschiedlichen Anwendungsfälle. Eine logische Unterscheidung kann getroffen werden zwischen halb- und vollautomatischen Serienschweißanlagen für große Stückzahlen und zwischen Einzelteilschweißmaschinen für unterschiedlich dimensionierte Fügeileile, z.B. Halbzeuge oder unterschiedliche Kleinserien.

Beim Schweißen großer Serien hat die Formteilaufnahme bzw. die Spanntechnik der Fügeileile hohe Bedeutung, da häufig mit automatischem Beladehandling gearbeitet wird. Die Werkzeugtechnik muß die Fügeileile schnell und präzise aufnehmen, spannen und auch wieder freigeben. Vorhandener Verzug der Fügeileile darf die Lage und die sichere, reproduzierbare Positionierung der Teile nicht beeinflussen und muß "ausgespannt" werden.

Maschinen für Kleinserien oder variable Fügeileile arbeiten eher mit einfachen Spann- oder Haltesystemen. Die exakte Positionierung der Fügeileile in den Spannsystemen muß dann vom Bediener, teilweise mit sog. Richtansschlägen sichergestellt werden.

Heizelemente

Bei den weitaus meisten Anlagen bestehen die Heizelemente aus elektrisch beheizten Platten aus gut wärmeleitfähigen Materialien wie Aluminium-Legierungen (z.B. Aluminium-Bronze) oder zunderfreien Spezialstählen für Temperaturen über 500 °C. Zum Erreichen

kurzer Anheizzeiten sind hohe spezifische Heizleistungen zwischen 4 und 20 W/cm² erforderlich. Für räumlich gekrümmte Schweißnähte werden Aufsätze auf den Heizplatten verwendet, die gegebenenfalls mit einer zusätzlichen, regelbaren Heizung versehen sind. Es werden aber auch vollkommen anders gestaltete Heizelemente eingesetzt (s.a. Heizelementmuffenschweißen [6]).

Um ein Anhaften der Schmelze an Heizelementen zu vermeiden, werden diese mit Antihafbeschichtungen auf PTFE-Basis versehen oder, insbesondere bei plattenförmigen Heizelementen, mit leicht auszuwechselnden PTFE-beschichteten Glasfasergeweben umspannt. Diese Beschichtungen und Bespannungen auf PTFE-Basis dürfen im Dauereinsatz nur bis 270 °C verwendet werden. Auf die Verwendung von Trennmittelsprays muß grundsätzlich verzichtet werden.

Die Anforderungen an die Temperaturverteilung auf der Arbeitsfläche ist abhängig von dem zu schweißenden Material (zulässiger Verarbeitungstemperaturbereich), der Teilegeometrie und den Verfahrensbedingungen. Die zulässigen Temperaturdifferenzen sind bei einfach gestalteten Heizelementen abhängig vom Diagonalmaß (z.B. bei 350 mm 10 °C). Der Temperaturabfall während eines Schweißzyklusses sollte maximal 10 °C nicht überschreiten [11]. Bei horizontal arbeitenden Schweißmaschinen mit senkrecht stehendem Heizelement kann eine Unterteilung des Elementes in mehrere getrennt geregelte Heizzonen erforderlich sein, um Temperaturunterschieden in der Höhe durch Abkühlung infolge Konvektion vorzubeugen. Einzelne Anwendungen, insbesondere bei dünnwandigen Teilen aus Materialien mit engem Verarbeitungsbereich, kann eine Abschirmung der vom Heizelement ausgehenden Wärmestrahlung erforderlich sein.

Antriebstechnik

Der Antrieb der Werkzeugträger und der Heizanlage erfolgt pneumatisch, hydraulisch oder elektromechanisch. Die Elektromechanik bietet systembedingt die besten Prozeßführungsmöglichkeiten, da sie wahlweise kraftgeregelt oder auch weggeregelt und positionierend schweißen kann. Aus Kostengründen hat sie aber nur geringe Verbreitung. Die Wahl zwischen hydraulischen oder pneumatischen Antrieben wird im Wesentlichen ebenfalls durch die Kosten dominiert, weniger durch technische Anforderungen. Der prinzipbedingt weiche Druckaufbau eines pneumatischen Antriebes kommt den Anforderungen an den Schmelzefließprozeß beim Fügen sehr nahe, die Beherrschung der Maschinendynamik bei großen Massen ist jedoch regelungstechnisch schwieriger. Bei hydraulischen Antrieben ist dies genau umgekehrt. Um weiche Druckaufbringung zu gewährleisten, ist der regelungstechnische Aufwand höher, jedoch fällt die Beherrschung der bewegten Massen aufgrund der steifen Übertragung leichter.

Die präzise Führung der Schweißwerkzeuge hat enorme Bedeutung für die Konstanz der Nahtqualität innerhalb eines Fügeteiles. Die Kraftaufbringung erfolgt selten in der zentralen Achse der Fügeteile, sondern bewirkt in der Regel ein Dreh- oder Biegemoment auf die Werkzeuge. Dennoch dürfen die Werkzeuge unter Last nicht klaffen oder sich verziehen, da der Fügeweg, der im mm Bereich liegt, an allen Stellen der Schweißnaht exakt gleich sein muß. Diese Maschineneigenschaft muß entweder maschinenbautechnisch oder regelungstechnisch sichergestellt werden. Nur dann kann von gleichmäßiger Kraftübertragung ins Bauteil ausgegangen werden. Bei einigen Maschinen wird dies vernachlässigt.

Steuerung

Je nach Fertigungsumfeld reicht die Spannweite an Steuerungen von der rein manuell betätigten Maschine bis zur freiprogrammierbaren Steuerung mit integrierter online Qualitätssicherung. Aus Qualitätsgründen wird in der Regel mindestens eine SPS mit automatischem Schweißablauf verwendet, in den der Bediener nicht eingreifen kann. Spezielle Datenbanken sichern auch bei Kleinserienmaschinen und Einzelteilschweißmaschinen eine hohe, konstante Schweißqualität.

Serienschweißmaschinen

Im Bild 3.8 ist beispielhaft eine vertikal arbeitende Serienschweißmaschine mit starr geführtem Heizelement und beweglicher oberer und unterer Werkzeugeinheit dargestellt. Maschinen mit zwei bewegten Werkzeugen und starrem Heizelement erlauben sehr kurze Umstellzeiten, da beide Fügeteile in der Umstellphase mit einer kurzen, harten Bewegung vom Heizelement abgelöst werden können und dieses mit hoher Beschleunigung in die Parkposition fährt.

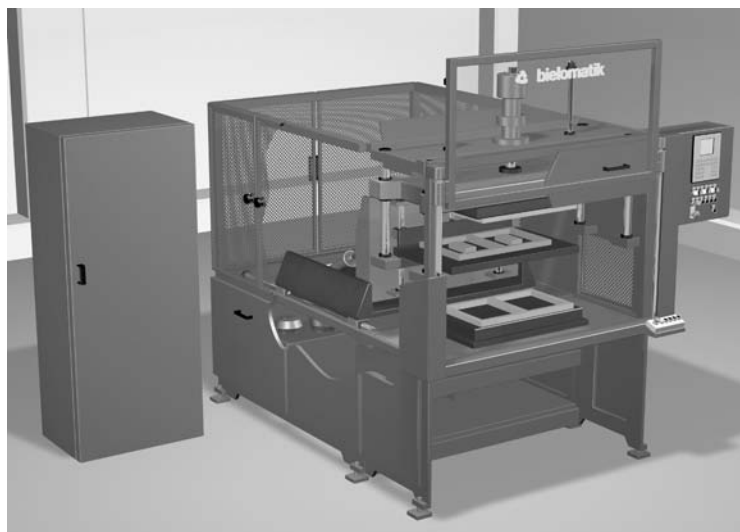


Bild 3.8 Vertikalheizelementmaschine mit oberer und unterer Preßeinheit

Quelle: Werksfoto Bielomatik GmbH & Co

Die Anzahl an Einzelschweißteilen bei einem Kfz-Tank ist beispielhaft in Bild 3.9 dargestellt.

Bei Serienteilen mit verschiedenen Einzelschweißungen, typischerweise Kfz-Kraftstofftanks, wurden früher Bearbeitungslinien aufgebaut, welche im Prinzip Transferstraßen darstellten.

Neuere Schweißanlagen arbeiten häufiger als flexible, mit Handlingsystemen ausgestattete Bearbeitungslinien, wie Bild 3.10 zeigt.



Bild 3.9 Kfz-Tank und einzuschweißende Einzelteile

Quelle: Werksfoto Bielomatik GmbH & Co

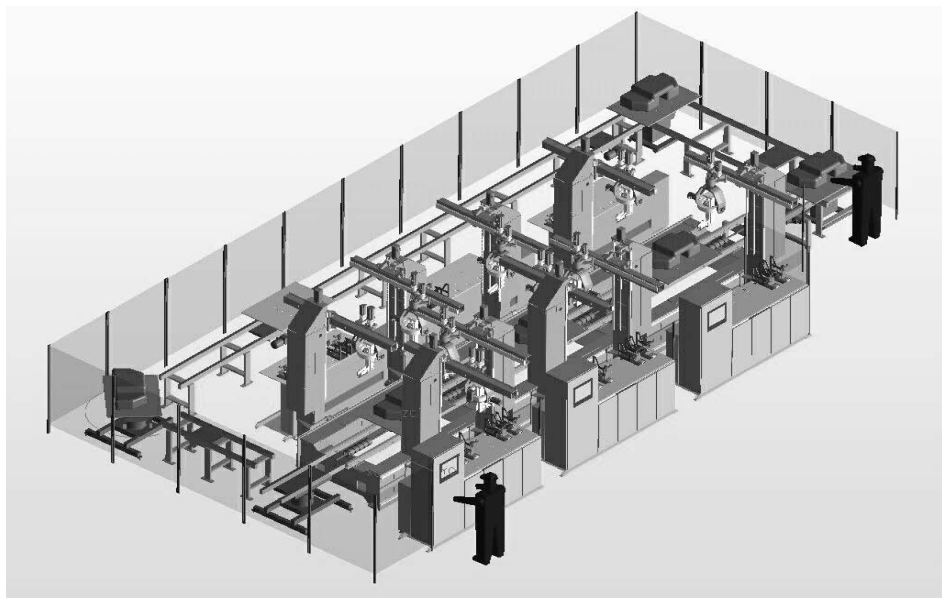


Bild 3.10 Flexible Bearbeitungslinie, Kfz-Tank

Quelle: Werksfoto Bielomatik GmbH & Co

Auf diesen flexiblen Bearbeitungslinien sind Umstellungen in der Serie erheblich schneller und kostengünstiger zu realisieren als früher.

Halbzeugschweißmaschinen

Maschinen zum Halbzeugschweißen müssen in der Fertigung sehr flexibel auf unterschiedliche Dimensionen und auch für verschiedene Werkstoffe eingestellt werden können. Die in Bild 3.10 gezeigte Maschine zum Verarbeiten plattenförmiger Halbzeuge hat einen geregelten Kraftbereich von 1000 bis 100.000 N und ist in der Lage, auch ultrahochmolekulares Polyethylen (PE-UHMW) sicher zu schweißen.



Bild 3.11 Horizontale 4 Meter Heizelementstumpfschweißmaschine für plattenförmige Halbzeuge und extreme Fügekräfte z.B. für PE-UHMW

Quelle: Wegener GmbH, Aachen

Für PE-UHMW werden Fügedrücke im Bereich des 20-fachen vom normalem PE-HD benötigt. Dennoch soll die gleiche Maschine auch dünnwandiges PE-HD qualitätsgesichert schweißen können, so daß eine enorme Kraftspreizung mit hoher Regelgenauigkeit sichergestellt sein muß. Die Maschine arbeitet mit pneumatischen Antrieben und CNC Steuerung.

3.1.1.9 Schweißen von Kunststoff-Fenstern aus PVC-HI

Von Kunststoffenstern wird eine Lebensdauer von 50 Jahren erwartet. Die geschweißten Ecken eines Fensters sind die am stärksten beanspruchten Stellen (Biegung, Torsion). Sie können nicht wie der übrige Rahmen mit Stahlprofilen verstärkt werden. Durch diese

Schweißnähte müssen sie die vorgesehene Lebensdauer erreichen. Kunststoffenster werden aus zugesägten Profilabschnitten hergestellt. Die Profilabschnitte werden von Hand in eine zunächst senkrecht stehende oder eine horizontal liegende Schweißmaschine eingelegt. Eine moderne Maschine kann gleichzeitig 4 Ecken und bis zu 2 Pfosten schweißen. Dies bedeutet, daß bis zu 12 Schweißnähte in einem Arbeitsgang millimetergenau geschweißt werden. Um diese Genauigkeit zu erreichen, dürfen die Fügeflächen nur um 0,5 mm vom Sollwert (Winkel, Ebenheit) abweichen. Es gibt Sondermaschinen, bei denen zwei Fensterrahmen übereinander liegend gleichzeitig geschweißt werden können [7].

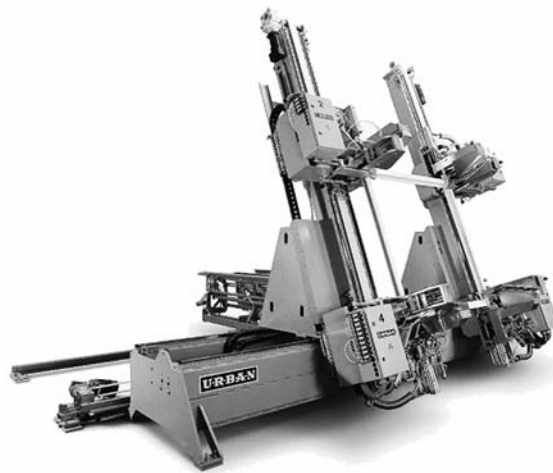


Bild 3.12 Schwenkbare 4-Kopf-Schweißmaschine zum vertikalen Einlegen der Profilschenkel

Quelle: Werksfoto Urban GmbH & Co

Da fast jedes Fenster unterschiedliche Maße aufweist, wird der Arbeitsablauf in den einzelnen Bearbeitungsstationen von einem Fertigungsleitsystem gesteuert. Die einzelnen Stationen melden Ereignisse an den zentralen Server zurück, der damit den Fertigungsablauf optimiert und auf notwendige Wartungsarbeiten, z.B. Wechseln von Heizelementfolien oder von Fräsern, hinweist. In vielen Fertigungen sind die Profilschnitte zusätzlich mit einem Strichcode versehen, damit die Einzelteile und später das Fenster jederzeit identifiziert und dem Auftraggeber zugeordnet werden können. Die Schweißmaschine "weiß" daher, wie groß die Profilschenkel des gerade zu schweißenden Fensters sind und wie weit die Spannelemente zum Einlegen auseinander fahren müssen. Außerdem stellt sie den Maschinen- druck optimal auf die unterschiedlichen Profilquerschnitte ein.

Um einen möglichst kurzen Schweißzyklus mit hohen Festigkeitswerten zu erreichen, werden mit PTFE-beschichtete Glasfasergewebe bespannte Heizelemente mit Temperaturen bis zu 265 °C eingesetzt. Die geschweißten Fensterrahmen werden fast immer am Ende der Fügezeit horizontal aus der Schweißmaschine entnommen und automatisch abgelegt. Nach

einer kurzen Abkühlzeit werden die Schweißwulste durch Hobeln und Fräsen entfernt sowie die Aussparungen und Bohrungen für die Beschläge mit schnellen CNC-Maschinen eingebracht. Der Schweißzyklus beträgt einschließlich der Zeit für das Einlegen der Profile 120 s.

Schweißnahtqualität der Ecken

Bemerkenswert ist, daß eine optimale Eckfestigkeit bei den geringen Wanddicken (< 3 mm) eines Fensterprofils nur erreicht wird, wenn beim Angleichen und beim Fügen viel Material in den Wulst fließt. Wenn die Wulstbildung nach außen durch eine Wulstbegrenzung einseitig verhindert wird, verringert sich die Festigkeit um 30 %. Eine optimale Eckfestigkeit gibt es daher nur, wenn das aufgeschmolzene Material in der Naht stetig nach innen und außen fließen kann. Die Schweißbeignung der Fensterprofile wird im Rahmen der Qualitätssicherungsmaßnahmen während der Fertigung im Druckversuch geprüft. Die Mindestanforderungen an eine moderne Schweißmaschine und an die Festigkeit einer Fensterecke sind in DVS 2207-25 [7] mit $\sigma > 35 \text{ N/mm}^2$ festgelegt. Da sehr viele Einflüsse die Festigkeit beeinträchtigen können, müssen während der Fertigung in regelmäßigen Abständen Ecken geprüft und die Ergebnisse aufgezeichnet werden (s.a. Kapitel 3.6.1).

3.1.2 Wärmekontaktschweißen/-siegeln

3.1.2.1 Begriffe

Das **Wärmekontaktverfahren** ist ein Verfahren zum Heißsiegeln⁵ oder Schweißen⁶ von thermoplastischen Kunststoffen. Es wird häufig in der Verpackungstechnik zum Verbinden von Packstoffen, vorzugsweise Kunststofffolien, eingesetzt. Die zum Aufschmelzen benötigte Wärme wird von permanent beheizten Werkzeugen (Siegelbacken), welche auf die zu versiegelnden Materialien gepreßt werden, an diese abgegeben und gelangt durch Wärmeleitung an die Innenflächen. Die Temperatur der beiden Werkzeuge kann verschieden sein. Die Verbindung der beiden Teile erfolgt nach Aufschmelzen der Innenflächen unter Druck. Nach dem Verbinden wird die Siegelnaht in heißem Zustand aus dem Bereich der Siegelwerkzeuge entfernt.

Das Wärmekontaktsiegelgerät ist in der Regel wie folgt aufgebaut: Presse mit zwei Siegelbacken, die eine beweglich. Der Schließdruck ist einstellbar über einen Druckregler. Jede Siegelbacke ist separat heizbar und enthält die entsprechenden Heizelemente und Temperaturregler. Die Siegelzeit (Schließzeit der Siegelbacken) ist bei der Praxisanwendung mit der Taktzeit der Gesamtanlage, in welche der Siegelapparat integriert ist, gekoppelt. Bei Laborsiegelgeräten ist eine separate Uhr zur Einstellung vorhanden. Art und Form der Siegelbacken sind individuell dem Anwendungszweck angepaßt. Zum Vermeiden des Anhaftens der heißen Kunststoffe sind die Siegelwerkzeuge mit PTFE-beschichtetem Glasgewebe überzogen. Bild 3.13 zeigt ein typisches Wärmekontakt-Laborsiegelgerät.

⁵ **Heißsiegeln** ist das Verbinden der thermoplastischen Beschichtung von Trägerstoffen unter Einwirkung von Wärme und Druck, wobei die Trägerstoffe selbst nicht aufgeschmolzen werden.

⁶ **Schweißen** ist das Verbinden von thermoplastischen Kunststoffen unter Einwirkung von Wärme mit oder ohne Druck.