

# Fügen von Kunststoffen

Grundlagen, Verfahren, Anwendung (Print-on-Demand)

Bearbeitet von  
Helmut Potente

1. Auflage 2004. Buch. XII, 348 S. Hardcover

ISBN 978 3 446 22755 2

Format (B x L): 17,3 x 24,4 cm

Gewicht: 770 g

[Weitere Fachgebiete > Technik > Werkstoffkunde, Mechanische Technologie > Materialwissenschaft: Polymerwerkstoffe](#)

Zu [Inhaltsverzeichnis](#)

schnell und portofrei erhältlich bei

The logo for beck-shop.de features the text 'beck-shop.de' in a bold, red, sans-serif font. Above the 'i' in 'shop' are three red dots of increasing size. Below the main text, the words 'DIE FACHBUCHHANDLUNG' are written in a smaller, red, all-caps, sans-serif font.

**beck-shop.de**  
DIE FACHBUCHHANDLUNG

Die Online-Fachbuchhandlung [beck-shop.de](http://beck-shop.de) ist spezialisiert auf Fachbücher, insbesondere Recht, Steuern und Wirtschaft. Im Sortiment finden Sie alle Medien (Bücher, Zeitschriften, CDs, eBooks, etc.) aller Verlage. Ergänzt wird das Programm durch Services wie Neuerscheinungsdienst oder Zusammenstellungen von Büchern zu Sonderpreisen. Der Shop führt mehr als 8 Millionen Produkte.

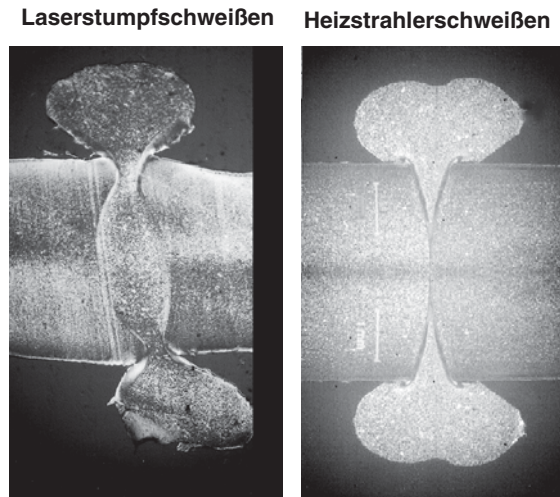


Bild 5.140: Dünnschnitaufnahmen des Gefüges [164]

### 5.5.2.3 Festigkeit

#### Teilkristalline Thermoplaste

Teilkristalline Thermoplaste (PE-HD, PPN) weisen in weiten Bereichen nur eine geringe Abhängigkeit der Kurzzeitzugfestigkeit von den Kennzahlen  $L_0/d$  und  $s_F/d$  auf (Bild 5.141, 5.142). Sie entsprechen der Kurzzeitgrundmaterialfestigkeit. Schweißfaktorwerte  $f_z > 1$  sind vermutlich darauf zurückzuführen, dass der Wulst einen gewissen Einfluss hatte.

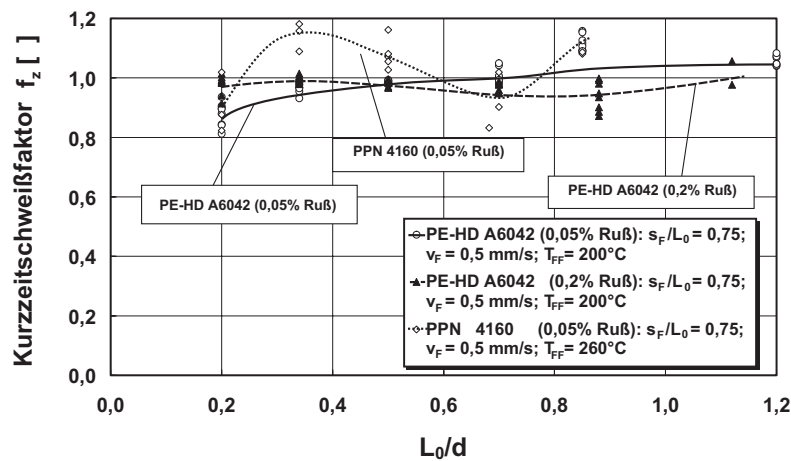
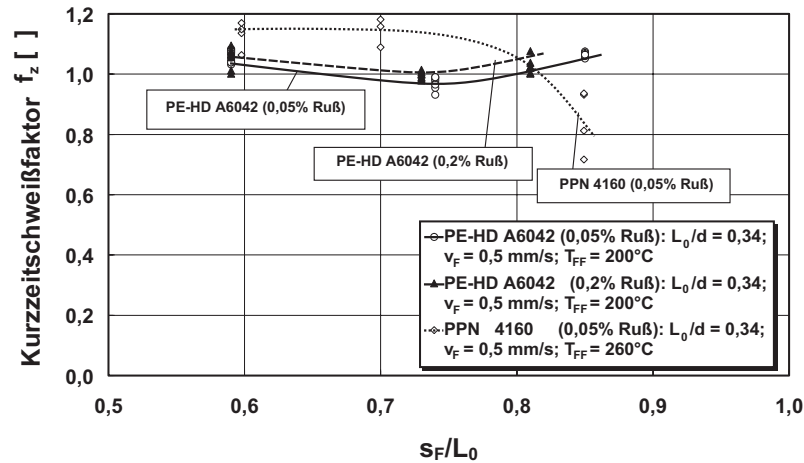


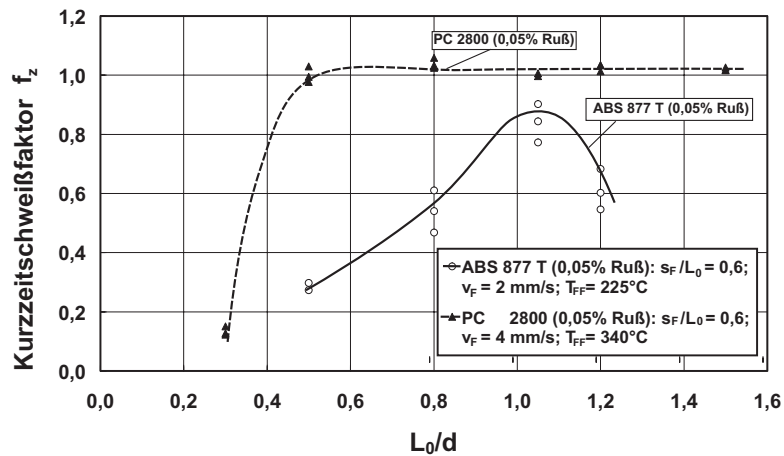
Bild 5.141: Schweißnahtfestigkeit von teilkristallinen Thermoplasten als Funktion der dimensionslosen Schmelzeschichtdicke [164]



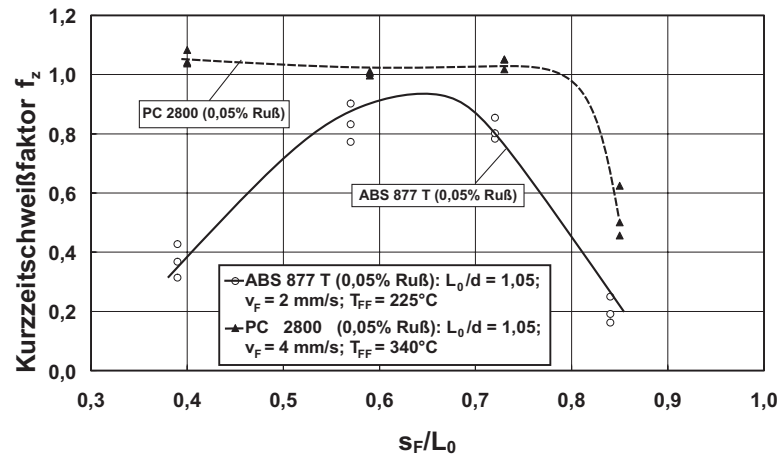
**Bild 5.142:** Schweißnahtfestigkeit von teilkristallinen Thermoplasten als Funktion des Verhältnisses Fügweg zu Schmelzeschichtdicke [164]

#### Amorphe Thermoplaste

In Analogie zu den teilkristallinen Thermoplasten ist bei amorphen Thermoplasten über weite Bereiche ebenfalls keine Abhängigkeit der Kurzzeitfestigkeit von den Kennzahlen  $L_0/d$  und  $s_F/d$  zu finden. Dies gilt jedoch nicht generell, wie aus Bild 5.143 und 5.144 zu ersehen ist. ABS weist die typischen Maxima auf, die auch beim Heizelementschweißen auftreten. Die weitgehende Unabhängigkeit der Kurzzeitfestigkeit von den beiden Kennzahlen beim Laserschweißen dürfte möglicherweise auf die unterschiedlich ausgebildete Nahtgeometrie zurückzuführen sein (Bild 5.140).



**Bild 5.143:** Schweißnahtfestigkeit von PC 2800 und ABS 877T als Funktion der dimensionslosen Schmelzeschichtdicke [164]



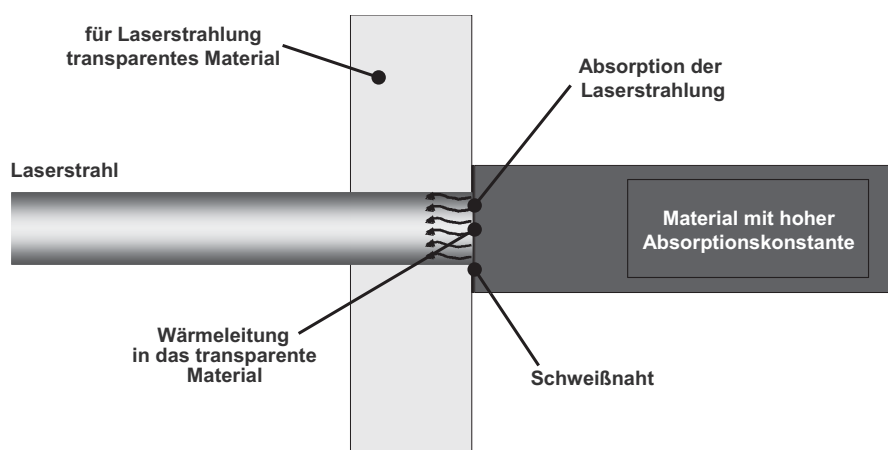
**Bild 5.144:** Schweißnahtfestigkeit von PC 2800 und ABS 877 T als Funktion des Verhältnisses Fügeweg  $s_F$  zu Schmelzeschichtdicke  $L_0$  [164]

### 5.5.3 Durchstrahlschweißen

#### 5.5.3.1 Verfahrensvarianten

Mit dem Laserdurchstrahlprinzip können Thermoplaste mit unterschiedlichen Absorptionseigenschaften gefügt werden. Die beiden Fügeteile werden vor der Schweißung in Kontakt gebracht, der Laserstrahl durchdringt das für ihn transparente Fügeteil und wird im absorbierenden Fügeteil in Wärme umgewandelt. Durch Wärmeleitung wird das transparente Fügeteil ebenfalls erwärmt und plastifiziert, so dass es zur Schweißung kommt (Bild 5.145). Man unterscheidet zwischen dem

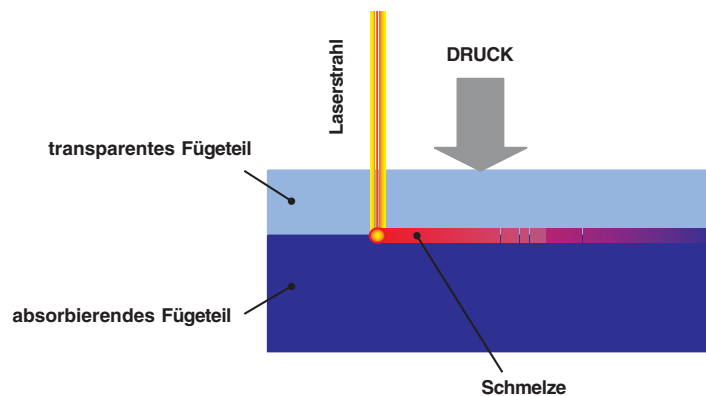
- Konturschweißen,
- Quasisimultanschweißen,
- Simultanschweißen mit mehreren Dioden und
- Schweißen mit Masken.



**Bild 5.145:** Erwärmprinzip des Laser-Durchstrahlschweißens

Beim Verfahrensprinzip des Konturschweißens scannt der Laserstrahl die Fügekontur ein- bzw. zweifach. Die Führung des Strahls erfolgt mittels Lichtwellenleiter und Handlinggerät. Die Verfahrensgeschwindigkeit ist bei diesem Verfahren in Abhängigkeit von der zur Verfügung stehenden Leistung zu sehen, da die beiden Parameter Leistung und Scangeschwindigkeit die Energieeinbringung in die Fügezone maßgeblich bestimmen.

Bild 5.146 zeigt den Verfahrensablauf, bei dem Erwärm- und Fügephase gleichzeitig ablaufen. Unbedingt notwendige Voraussetzung zur Anwendung dieses Verfahrens ist der Kontakt zwischen beiden Fügeteilen während der Schweißung, da das transparente Bauteil nur durch Wärmeleitung aufgeschmolzen wird. Lediglich sehr geringe Formteiltoleranzen (Spalte) können überbrückt werden. Wie bei jedem anderen Fügeverfahren gewährleistet aber auch hier eine verfahrensgerechte Gestaltung der Fügezone ein gutes Schweißergebnis.



**Bild 5.146:** Verfahrensprinzip des Laser-Durchstrahlenschweißens

Bei „langen“ Schweißnähten kann es zu einer Erstarrung bereits aufgeschmolzener Bereiche kommen, bevor die gesamte Kontur abgescannt worden ist. Dies führt zu einem dazu, dass es bei diesem Verfahren nicht zu einem Angleichen und damit Ausgleichen von Formteiltoleranzen kommt, zum anderen bedeutet dieser Sachverhalt aber auch, dass kein ausgeprägtes Quetschfließen wie z.B. beim Heizelementschweißen vorliegt und somit wulstfreie Verbindungen herstellbar sind, die hohen optischen Anforderungen genügen.

Beim Quasisimultanschweißen (Bild 5.147) wird der Laserstrahl mit Hilfe von Scannerspiegeln mit einer hohen Geschwindigkeit von z.B. 10m/s entlang der Schweißkontur geführt. Dadurch kann die Fügefläche z.B. 40x je Sekunde abgefahren werden, wodurch die gesamte Fügefläche mit der punktförmigen Energiequelle nahezu zeitgleich erwärmt und plastifiziert wird. Da auch hier beide Fügepartner während des Schweißvorgangs aufeinander gedrückt werden, können Formteiltoleranzen abgeschmolzen und in den Schweißwulst gedrückt werden. Das F-Theta-Objektiv gleicht Verzerrungen des Laserstrahls aus.

Beim Simultanschweißverfahren wird die gesamte Schweißnaht gleichzeitig bestrahlt. Dadurch wird eine homogene und zeitgleiche Plastifizierung der Fügezone erreicht. Es können damit qualitativ gute Verbindungen von toleranzbehafteten Bauteilen hergestellt werden, da Formteiltoleranzen durch relativ große Fügewege ausgeglichen werden können. Die gleichzeitige Erwärmung wird durch eine der Bauteilkontur speziell angepassten Anordnung von Laserdiodenbarrn erreicht (Bild 5.148).

Beim Maskenschweißen werden Flächen, die nicht geschweißt werden sollen, durch Masken abgedeckt. Sehr feine Schweißnähte sind dadurch herstellbar.

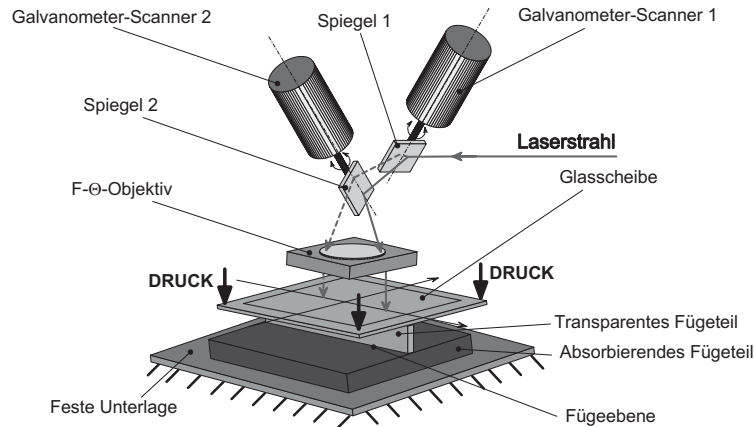


Bild 5.147: Prinzip des Quasi-Simultanschweißens

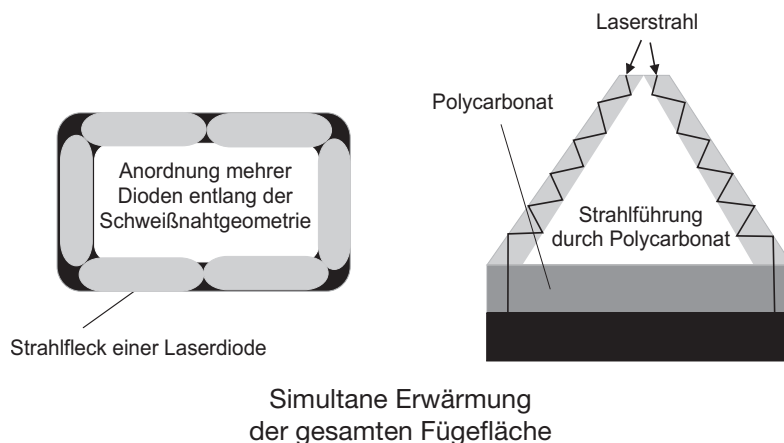


Bild 5.148: Weitere Strahlführungskonzepte

### 5.5.3.2 Temperaturentwicklung und Schmelzeschichtdicke

Wie bereits erläutert, liegt bei hohen Absorptionskoeffizienten  $\kappa$  eine Oberflächenabsorption vor. Das Temperaturfeld in den beiden Fügeparten lässt sich dann mit den Gln. (4.85 und 4.86) aus Kapitel 4 bestimmen. Das Ergebnis ist in Bild 5.149 dargestellt. Besonders bei teilkristallinen Materialien kann der Laserstrahl an den Sphäroliten gestreut und damit aufgeweitet werden. Dies ist bei der Festlegung von  $\dot{q}_G$  zu beachten.

Bei niedrigem Absorptionskoeffizient  $\kappa$ , d.h. bei einer Volumenabsorption, muss das Temperaturfeld numerisch berechnet werden. Die FE-Rechnung – dargestellt in Bild 5.150 – zeigt sehr deutlich die Asymmetrie der erwärmten Zonen. Das Maximum der Temperatur liegt im absorbierenden Fügepart hinter der Fügefläche. Dementsprechend ist auch die Schweißnaht asymmetrisch (Bild 5.151). Bei der FE-Rechnung wurde das parallel zur Erwärmung auftretende Quetschfließen besonders beim Simultan- und Quasi-Simultanschweißen nicht berücksichtigt. Für die Strahleinwirkzeit beim Kontur- und Quasi-Simultan-Schweißen gilt Gl. (5.101).

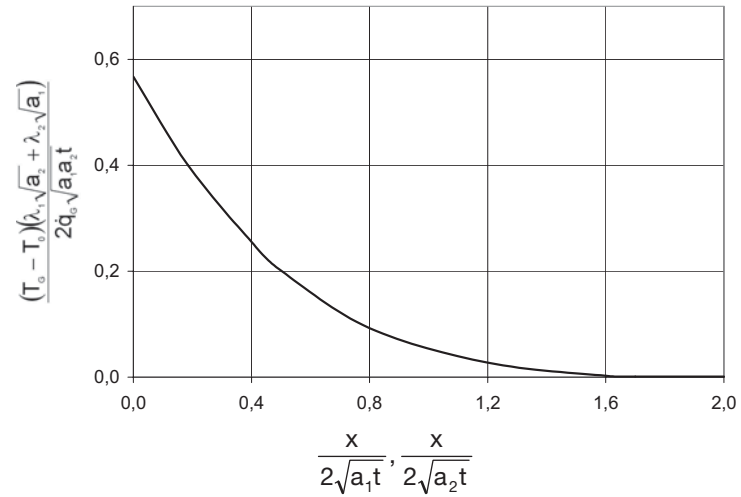


Bild 5.149: Kennlinie des Laserdurchstrahlenschweißens

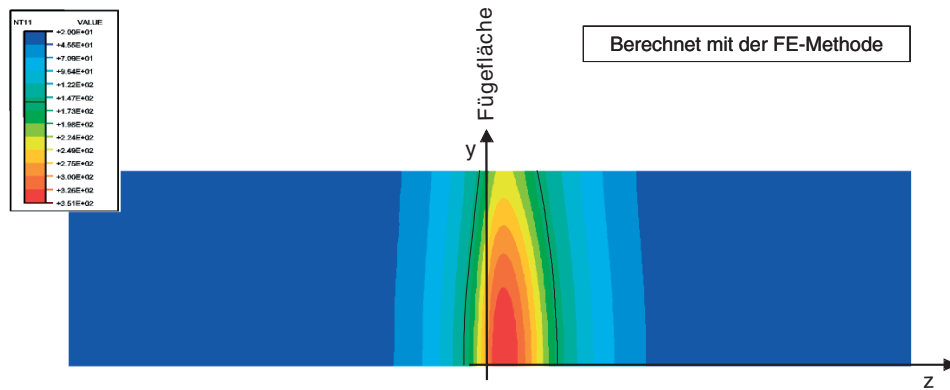


Bild 5.150: Temperaturprofil nach der Erwärmphase beim Laser-Durchstrahlenschweißen [174]

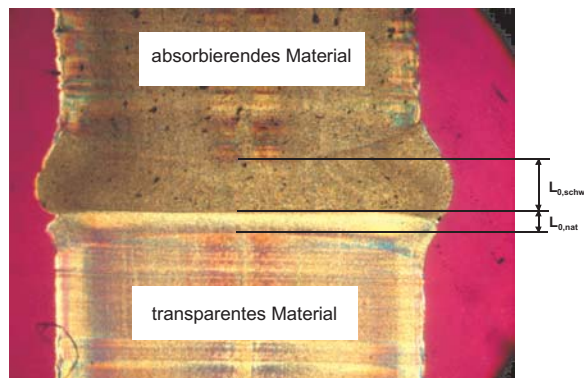


Bild 5.151: Gefügeaufnahme einer laserdurchstrahlgeschweißten Probe [174]

### 5.5.3.3 Festigkeit

Wie beim Heizelement-, Reib- und Laserstumpf-Schweißen beeinflusst die Restschmelzefilmdicke die Nahtfestigkeit ganz erheblich. Da diese im Prozess jedoch nicht messbar ist, wird als Ersatzgröße oft nur der Abschmelzweg herangezogen. Hinreichend ist dies, wenn nur dichte Schweißungen verlangt werden.

Beim Konturschweißen konnte zumindest experimentell nachgewiesen werden, dass zwischen Kurzzeit-Schweißnahtfestigkeit und Fügweg ein Zusammenhang besteht (Bild 5.152). Der negative Fügweg ist auf die Wärmedehnung zurückzuführen. Grundsätzlich ist der Fügweg, sofern er nicht durch Anschläge begrenzt wird, und damit die Nahtfestigkeit abhängig von der Laserleistung, der Scangeschwindigkeit und dem Fügedruck (Bild 5.153).

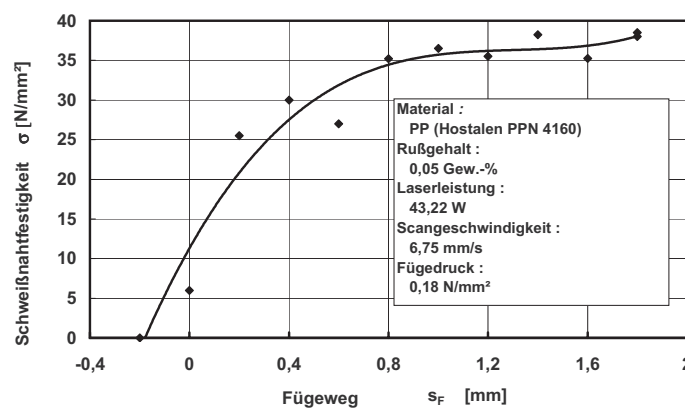


Bild 5.152: Festigkeit in Abhängigkeit vom Fügweg [174]

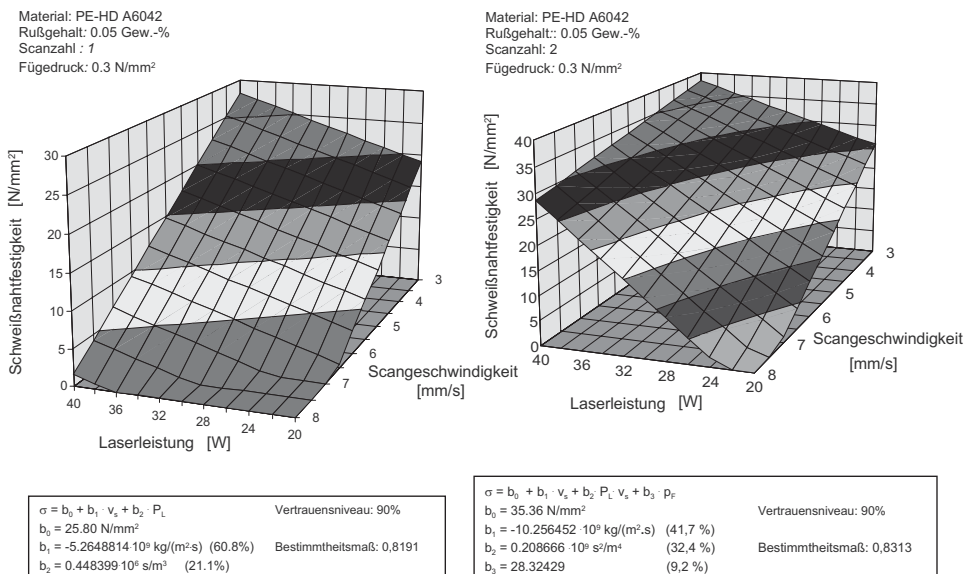
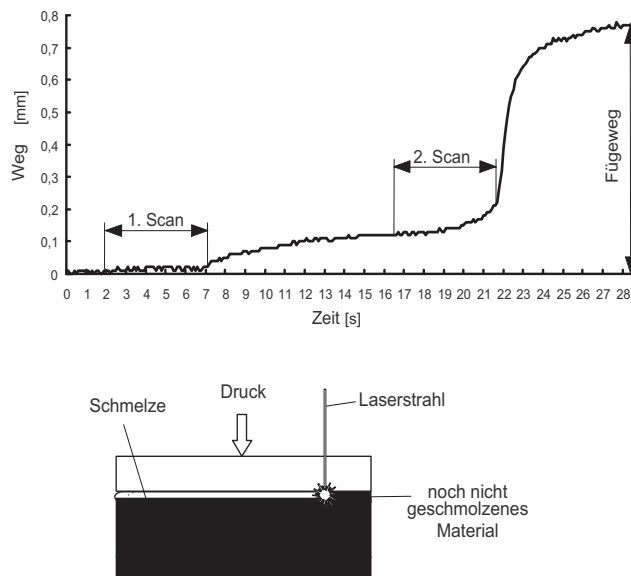


Bild 5.153: Schweißnahtfestigkeit in Abhängigkeit von der Scanzahl [174]



Verzogene Formteile bzw. Fügeflächen lassen sich in der Regel durch entsprechende Fügedrücke beim Konturschweißen ausgleichen. Problematisch sind lokale Spalte, z. B. beim Spritzgießen durch Rippen verursachte Einfallstellen. Die Spaltüberbrückbarkeit infolge von Formteiltoleranzen muss beim Konturschweißen daher stets beachtet werden. Sie ist möglich durch Abschmelzen infolge eines Mehrfachscannens. Bei einem Einfachscann können dagegen nur sehr kleine Spalte überwunden werden. Die Spaltüberbrückbarkeit hängt dabei von der Wärmeausdehnungszahl, der Temperatur sowie dem Temperaturprofil und damit von der Absorptionszahl des absorbierenden Fügeteils ab. Bild 5.154 zeigt exemplarisch die Fügeweg-Zeit-Kurve für 2 Scans. Solange der Laserstrahl noch nicht die gesamte Fügezone abgescannt hat, verhindert noch nicht angeschmolzenes Material die Ausbildung eines Fügewegs. Erst nach der Plastifizierung der gesamten Fügezone kann Schmelze infolge des Quetschflusses teilweise in den Wulst gedrückt werden.



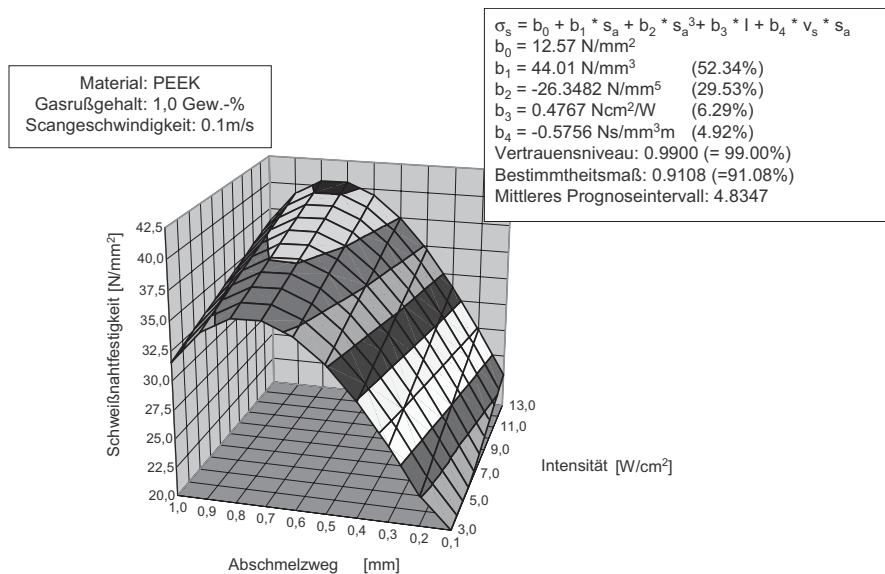
**Bild 5.154:** Qualitativer Verlauf des Fügeweges [164]

Nach dem zweiten Abscannen der Fügezone kann bei Materialien mit relativ geringen Absorptionskonstanten ein ausgeprägter Quetschfluss beobachtet werden. Der Grund hierfür ist einerseits der gute Wärmekontakt zwischen den Fügeteilen nach dem ersten Abscannen und andererseits der Sachverhalt, dass ein Teil der Energie des ersten Abscannens noch in der Fügezone vorhanden ist.

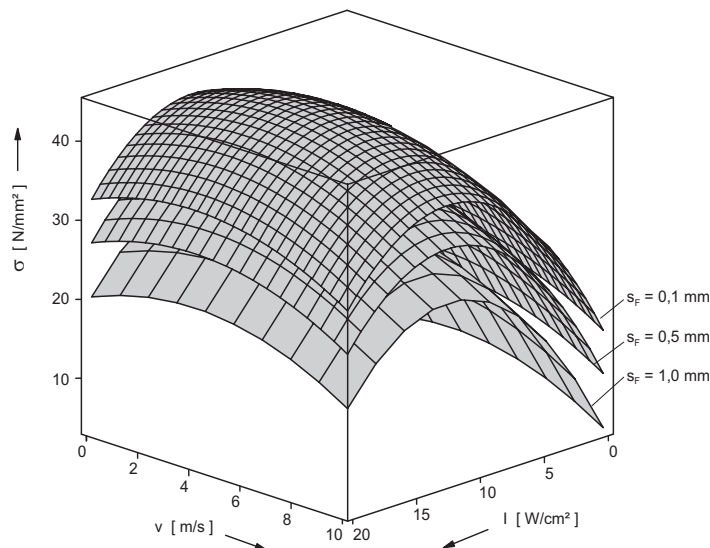
Im Vergleich zum Konturschweißen ist beim Quasi-Simultanschweißen die Scangeschwindigkeit um mehrere Größenordnungen höher. Die Schweißnahtfestigkeit ist hier ebenfalls wieder von der Laserleistung bzw. Laserintensität ( $\text{W}/\text{cm}^2$ ) der Scangeschwindigkeit und dem Fügeweg abhängig. Für das Material PEEK z. B. steigt zunächst die Nahtfestigkeit in Abhängigkeit vom Abschmelzweg an, durchläuft ein Maximum und sinkt dann wieder (Bild 5.155). Letzteres ist ungewöhnlich, da der Prozess in einen stationären Zustand übergeht, wo die zugeführte Energie gleich der abgeführten ist, d. h. die Nahtfestigkeit auf einem konstanten Niveau bleibt, wenn der Fügedruck konstant ist. Möglicherweise ist das Maximum auf die bei den Untersuchungen benutzte T-Stoß-Naht zurückzuführen bzw. auf die mit zunehmenden Fügeweg sich verändernden Kerben zwischen Schweißwulst und Grundmaterial.

Beim glasfasergefüllten PA 66-GF 30 nimmt die Nahtfestigkeit sogar mit zunehmendem Fügeweg ständig ab (Bild 5.156). Dies lässt sich allerdings plausibel erklären. Bei kleinen Abschmelzwegen – z. B.  $s = 0,1$  mm – sind die Fasern noch fest im unaufgeschmolzenen Material verankert. Sie durchstechen daher die Schmelzeschicht und wirken so verstärkend. Mit zunehmendem Abschmelzweg richten sich dann ständig mehr Fasern in Schmelzefließrichtung aus. Sie wirken dann nicht mehr festigkeitssteigernd sondern festigkeitsmindernd. Die Schweißnahtfestigkeit nimmt ab.

Beim Simultanschweißen müssen zwischen der Nahtfestigkeit und dem Abschmelzweg sowie der Laserintensität die gleichen Zusammenhänge gelten wie beim Quasi-Simultanschweißen.



**Bild 5.155:** Schweißnahtfestigkeit von PEEK in Abhängigkeit von dem Abschmelzweg und der Laser-Intensität



**Bild 5.156:** Modell der Schweißnahtfestigkeit als Funktion der Intensität und der Strahlgeschwindigkeit

### 5.5.4 Heizstrahlerstumpfschweißen

Beim Heizstrahlerstumpfschweißen ist der Fügweg-Zeit-Verlauf qualitativ der gleiche wie beim Laserstrahlstumpfschweißen (Bild 5.134). Die Fügenahtgeometrie ist jedoch deutlich anders (Bild 5.140). Sie ähnelt der, die beim Heizelementstumpfschweißen auftritt, und ist auf Konvektion an der Strahleroberfläche und Seitenstrahlung zurückzuführen. Dadurch gewinnen die Kennzahlen des Heizelementschweißens offensichtlich wieder einen größeren Einfluss. Die Kurzzeitzugfestigkeit wird wieder eine Funktion von  $L_0/d$  und  $s_F/L_0$ , d.h. vom Quotienten der Schmelzefilmdicke nach der Bestrahlung zur Fügeteildicke und dem Fügweg-Schmelzefilmdickenverhältnis (Bild 5.157 und 5.158). Bei einer mittelwelligen Strahlung sind die auftretenden Maxima stärker ausgeprägt als bei einer kurzwelligen Strahlung. Sie können bei letzterem sogar nahezu ganz verschwinden (Bild 5.159). Ein Grund hierfür könnte die größere Eindringtiefe der kurzwelligen Strahlung und die damit einhergehende Veränderung der Nahtgeometrie sein.

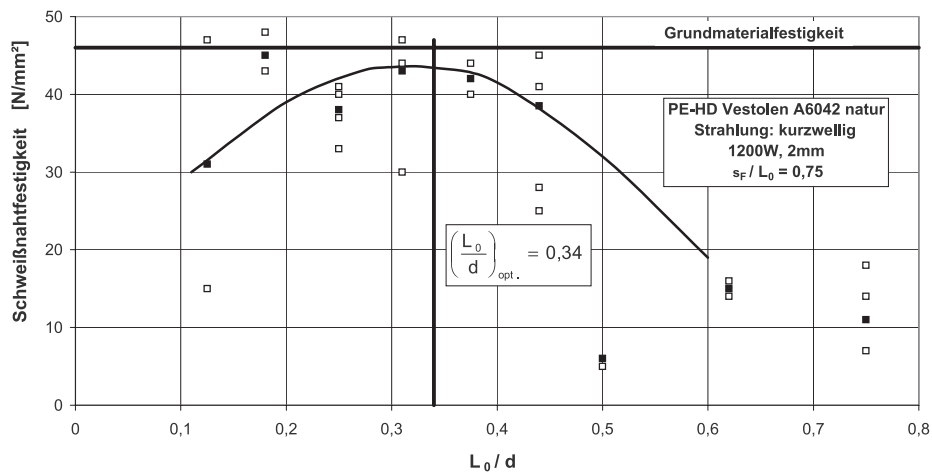


Bild 5.157: Schweißnahtfestigkeit von PE-HD natur als Funktion von  $L_0/d$  bei  $s_F/L_0 = 0,75$  [180]

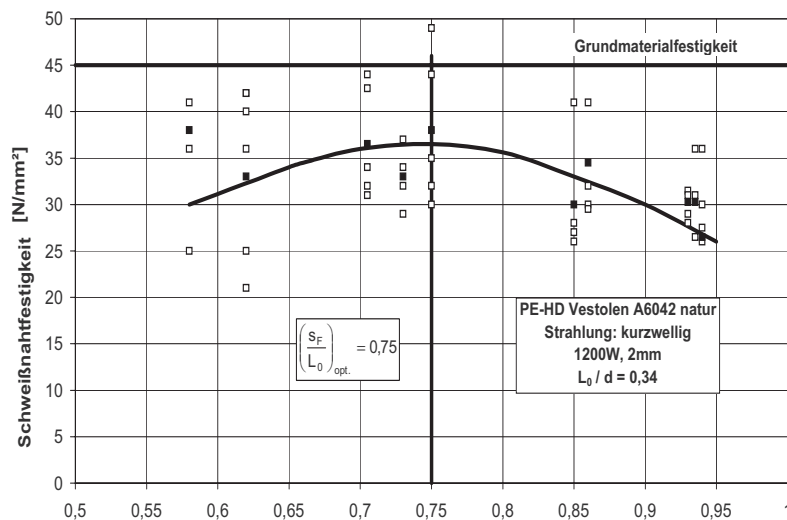
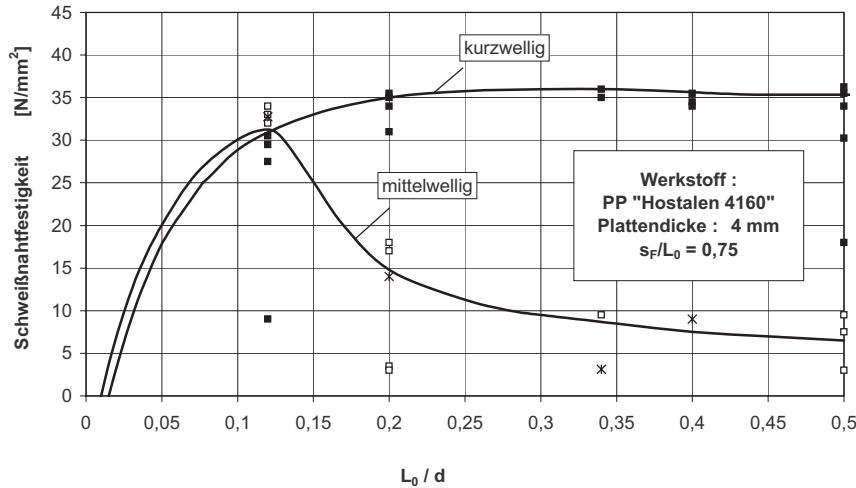


Bild 5.158: Schweißnahtfestigkeit von PE-HD natur als Funktion von  $s_F/L_0$  bei  $L_0/d = 0,34$  [180]



**Bild 5.159:** Schweißnahtfestigkeit von PP als Funktion von  $L_0/d$  bei  $s_F/L_0 = 0,75$  [180]

## 5.6 Erwärmung durch Konvektion

### 5.6.1 Einordnung der Verfahren

Die Erwärmung durch Konvektion wird beim Extrusionsschweißen, Warmgasschweißen und beim Heizkeilschweißen anstatt eines Heizkeils benutzt. Das letztgenannte Verfahren wurde bereits behandelt.

Das Extrusionsschweißen wird im Kunststoffapparatebau und bei der Verlegung von Dichtungsbahnen eingesetzt. Es wurde aus dem Warmgasschweißen von dickwandigen Halbzeugen im Apparatebau entwickelt.

Das Warmgasschweißen ist ein rein manuelles Verfahren. Es wird vornehmlich nur bei dünnwandigen Bauteilen ( $d \leq 5$  mm) benutzt. Wie beim Extrusionsschweißen sind Schweißzusätze erforderlich.

### 5.6.2 Extrusionsschweißen

#### 5.6.2.1 Verfahrensvarianten und Verfahrensablauf

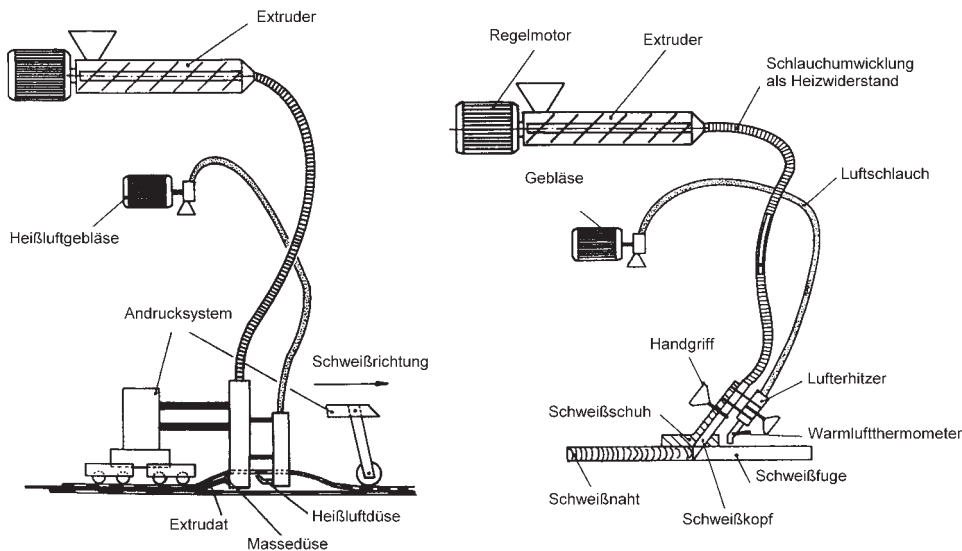
Das Extrusionsschweißverfahren ist durch vier charakteristische Merkmale gekennzeichnet:

- Der Schweißzusatz tritt als Strang aus einer Plastifiziereinheit aus.
- Der Schweißzusatz ist homogen und vollständig plastifiziert.
- Die Fügeflächen sind auf Schweißtemperatur erwärmt und plastifiziert.
- Der Fügevorgang erfolgt unter Druck.

Die Aufbereitung des Schweißzusatzes erfolgt während des Schweißens kontinuierlich durch einen Extruder. Der Zusatzwerkstoff besteht in der Regel aus demselben Werkstoff wie die Fügeteile und wird dem Extruder in Form eines Endlosdrahtes oder als Granulat zugeführt. Der plastifizierte Strang wird dann unter Vermeidung einer Abkühlung mit Druck in den vorgewärmten Schweißstoß eingebracht. Die Erwärmung des Grundwerkstoffs an den Fugenflanken erfolgt mit Warmgas oder in seltenen Fällen durch Wärmestrahlung. Hierdurch wird an der Oberfläche der Fugenflanken ein Schmelzefilm erzeugt, der ein Ineinanderfließen

ßen von aufgeschmolzenem Grundwerkstoff und plastifiziertem Zusatzwerkstoff ermöglicht. In der anschließend stattfindenden drucklosen Abkühlphase entsteht eine stoffschlüssige Verbindung.

Bild 5.160 zeigt die beiden Hauptvarianten des Extrusionsschweißens. Die linke Variante wird beim Schweißen von Bahnen eingesetzt, die rechte bei dickwandigen Platten. Des Weiteren gibt es Systeme, bei denen der Schweißschuh direkt an den Kleinextruder angeflanscht ist. Sie werden bei rein manuellen Schweißungen benutzt.



**Bild 5.160:** Varianten des Extrusionsschweißverfahrens

Statt eines extrudierten Schmelzestrangs kann der Zusatzwerkstoff auch ein Draht sein. Dieser wird in einer beheizten Kammer aufgeschmolzen und über eine Zwangsförderung der Schweißnaht zugeführt. Beim Schweißen von Platten werden V-Nähte oder X-Nähte verwendet.

### 5.6.2.2 Temperaturentwicklung und Schmelzschichtdicke in der Fügezone

Die Temperatur in der Fügezone lässt sich mit Gl. (4.51) aus Kapitel 4 beschreiben, wobei für die Heißluftereinwirkzeit bei Lochdüsen z. B. (Bild 5.161) in erster Näherung die Heißluftdüsenlänge  $l_{eff}$  dividiert durch die Vorschubgeschwindigkeit  $v$  des Schweißschuhs einzusetzen ist. Die Schmelzschichtdicke lässt sich dann näherungsweise durch Gl. (4.59) in Kapitel 4 bestimmen. Man erhält

$$L_0 = 1,6\Theta_1 \sqrt{a_{eff} \frac{l_{eff}}{v}} \quad (5.106)$$

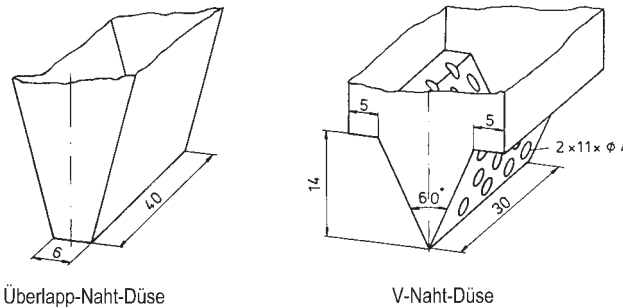
mit

$$\Theta_1 = \frac{T_G - T_{fl}}{T_G - T_0} \quad (5.107)$$

$$T_G = T_0 + (T_\infty - T_0) \left(1 - e^{Bi^2} \operatorname{erfc}(Bi)\right) \quad (5.108)$$

$$Bi = \frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{a_{eff} \frac{l_{eff}}{v}} \quad (5.109)$$

wobei  $T_\infty$  die Warmgasttemperatur,  $T_0$  die Halbzeugtemperatur vor der Erwärmung,  $T_G$  die Oberflächentemperatur der erwärmten Zone und  $T_{fl}$  die Kristallitschmelztemperatur bei teilkristallinen bzw. die Glasübergangstemperatur bei amorphen Thermoplasten ist. Problematisch ist die Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$ . Er ist abhängig von der Nußelt-Zahl und diese wiederum von der Reynolds- und Prandl-Zahl sowie der Düsengeometrie und der Vorschubgeschwindigkeit des Schweißschuhs.



**Bild 5.161:** Düsengeometrien

Wie bereits erläutert, unterscheidet man beim Extrusionsschweißen zwei grundsätzliche Verfahren, das V-Nahtschweißen und das Überlappnahtschweißen. Für vergleichbare Wärmeübergangskoeffizienten müssen daher die geometrischen Verhältnisse von Breitschlitzdüsen für das Überlappnahtschweißen und Lochdüsen für das V-Nahtschweißen (Bild 5.161) einander ähnlich sein, d.h. die Luftaustrittsfläche der V-Düse muss der der Breitschlitzdüse entsprechen. Das folgende Nußelt-Gesetz wurde gefunden [181]:

$$Nu = \operatorname{Pr}^{0,33} \operatorname{Re}^{0,5} \left( \frac{d_{hyd}}{hk_1} \right)^{0,5} \left( \frac{t}{t_0} \right)^{-0,124} k_2 k_3 k_4 \quad (5.110)$$

mit

$$Nu = \frac{\alpha d_{hyd}}{\lambda_L} \quad (5.111)$$

$$\operatorname{Re} = \frac{d_{hyd} v_L}{v} \quad (5.112)$$

$$\operatorname{Pr} = \frac{v}{a_{eff}} \quad (5.113)$$

Wobei  $\nu$  kinematische Viskosität,  $h$  Abstand der Düsenaustrittsöffnungen von der Fügenahtoberfläche,  $d_{\text{hyd}}$  hydraulischer Durchmesser der Austrittsöffnungen, Quotient aus Querschnittsfläche und Umfang,  $v_L$  Luftgeschwindigkeit in den Austrittsöffnungen und  $t_0$  Bezugszeit (1 s) ist.

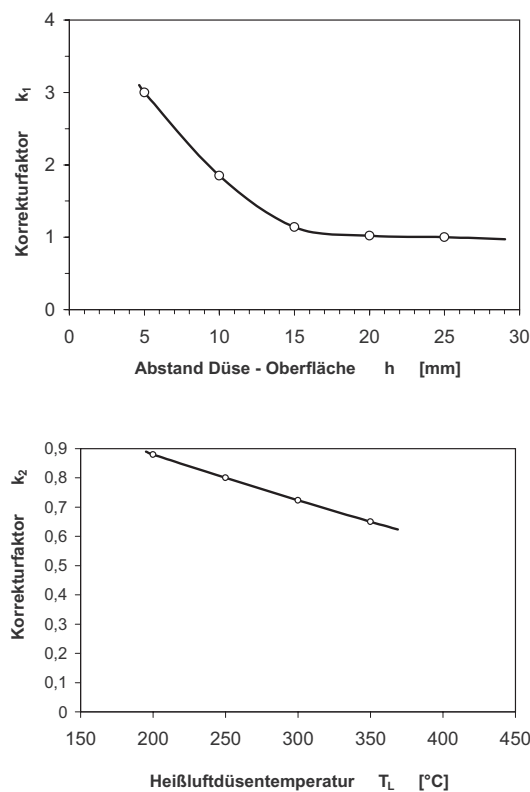
Die Korrekturfaktoren  $k_1$  bis  $k_4$  sind in Bild 5.162 und 5.163 dargestellt. Der Korrekturfaktor  $k_4$  kann eins gesetzt werden, da in der Praxis der Anstellwinkel größer als  $75^\circ$  ist. Bild 5.164 zeigt die Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  von einigen Parametern.

Bild 5.165 zeigt gemessene Schmelzschichtdicken in Abhängigkeit von der Schweißschuhvorschubgeschwindigkeit  $v$  mit der Wärmegastemperatur  $T_\infty$  als Parameter. Sehr deutlich wird der starke Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit.

Die Temperatur des Schmelzestrangs sollte den üblichen Verarbeitungstemperaturen bzw. Schweißtemperaturen entsprechen. Bei gleichen Materialien ergibt sich dann für die Grenzflächentemperatur in erster Näherung

$$T_G = \frac{1}{2}(T_{M1} + T_{M2}) \quad (5.114)$$

mit  $T_{M1}$  Temperatur des Schmelzestrangs,  $T_{M2}$  Schmelzetemperatur der erwärmten Halbzeugoberfläche.



**Bild 5.162:** Korrekturfaktoren  $k_1$  und  $k_2$  [181]

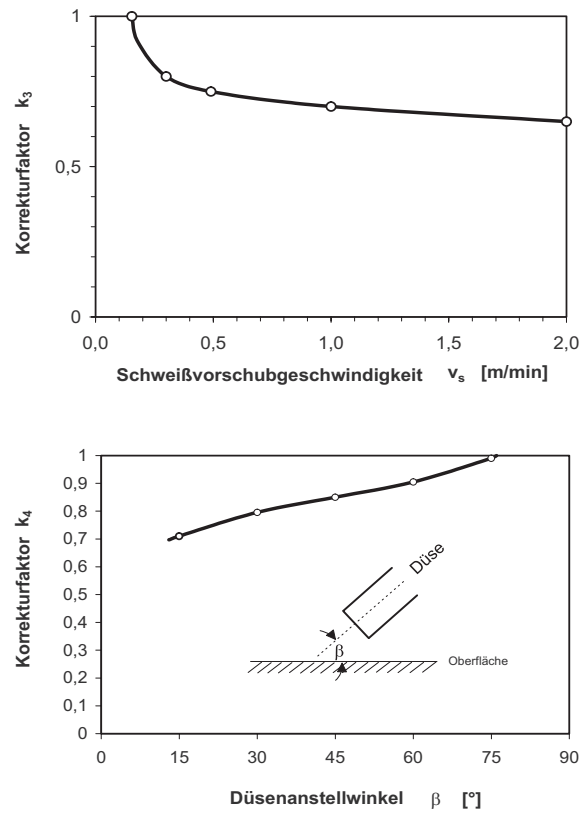
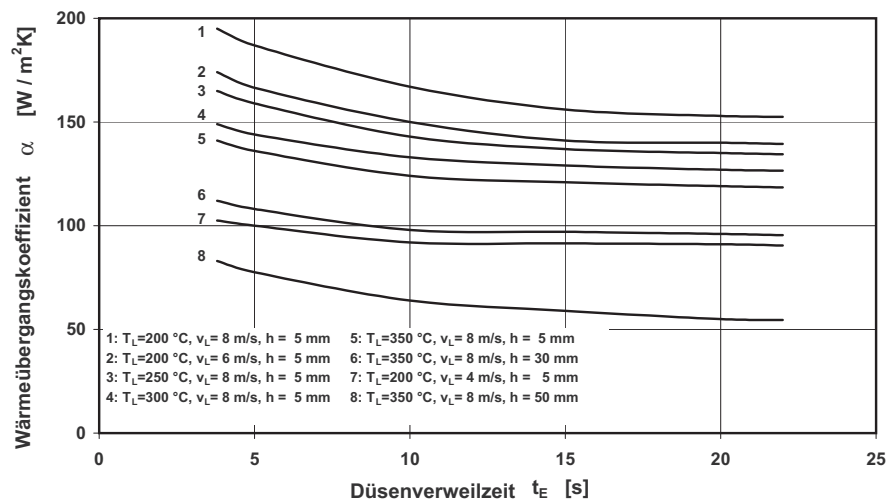
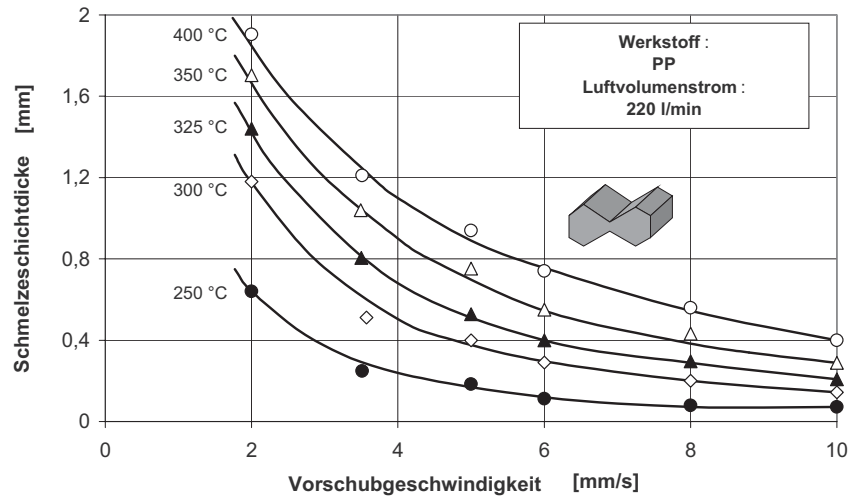
Bild 5.163: Korrekturfaktoren  $k_3$  und  $k_4$  [181]

Bild 5.164: Berechneter Wärmeübergangskoeffizient als Funktion der Düsenverweilzeit bei Variation der Temperatur, der Luftgeschwindigkeit und des Düsenabstandes

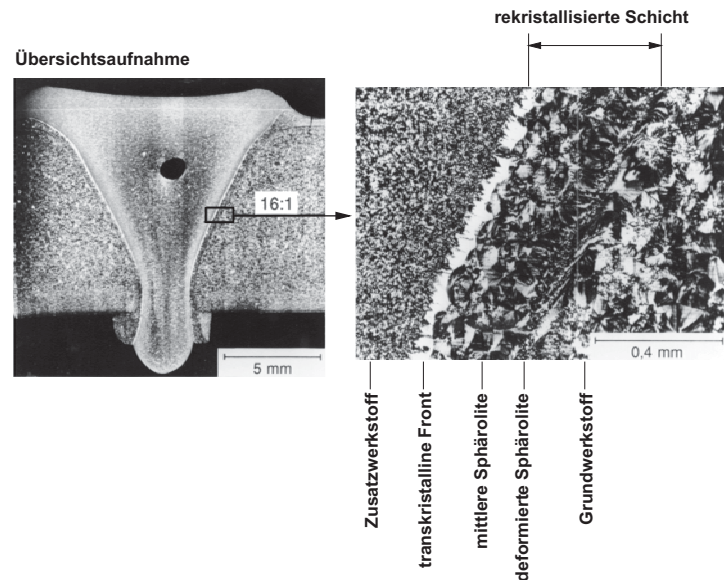




**Bild 5.165:** Schmelzeschichtdicke als Funktion der Vorschubgeschwindigkeit bei unterschiedlicher Wärmegastemperatur [182]

Durch das Quetschfließen während des Fügens wird die ursprüngliche Schmelzeschichtdicke reduziert. Bild 5.166 zeigt als Beispiel die strukturelle Ausbildung des Fügebereichs bei einem Polypropylen. Die Fügezone gliedert sich in fünf unterschiedliche Strukturbereiche:

- Grundwerkstoff,
- deformierte Sphärolite,
- mittlere Sphärolite der rekristallisierten Schicht,
- transkristalline Front,
- Zusatzwerkstoff.



**Bild 5.166:** Typische Ausbildung der Fügeebene, links: Gesamtansicht makroskopisch, rechts: Detailvergrößerung der Fügeebene. Werkstoff: PP (polarisationsoptische Dünnschnittaufnahmen) [182]

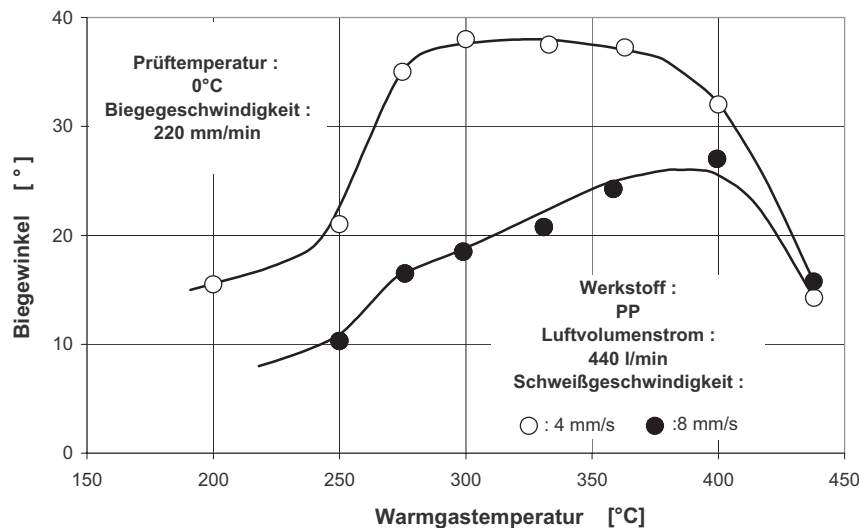
Die Temperatur in der Zone deformierter Sphärolite liegt im Kristallitschmelzbereich. In der transkristallinen Front ist ein richtungsorientiertes Wachstum von  $\beta$ -Sphäroliten aufgetreten. Der linke Rand dieser Zone markiert die Fügeebene. Der Kontakt zwischen Zusatzwerkstoff und Grundwerkstoff erzeugt eine hohe Keimdichte. Sie ist Ausgangspunkt der gerichteten Kristallisation. Der Bereich zwischen Grundwerkstoff und Fügeebene wird als rekristallisierte Schicht bezeichnet. Die transkristalline Zone in der rekristallisierten Schicht ist von der Warmgastemperatur und der Schweißgeschwindigkeit abhängig. Bei hohen Geschwindigkeiten und niedrigen Temperaturen verschwindet sie. Es tritt dann eine Fließlinienstruktur auf.

### 5.6.2.3 Schweißparameter und Nahtfestigkeit

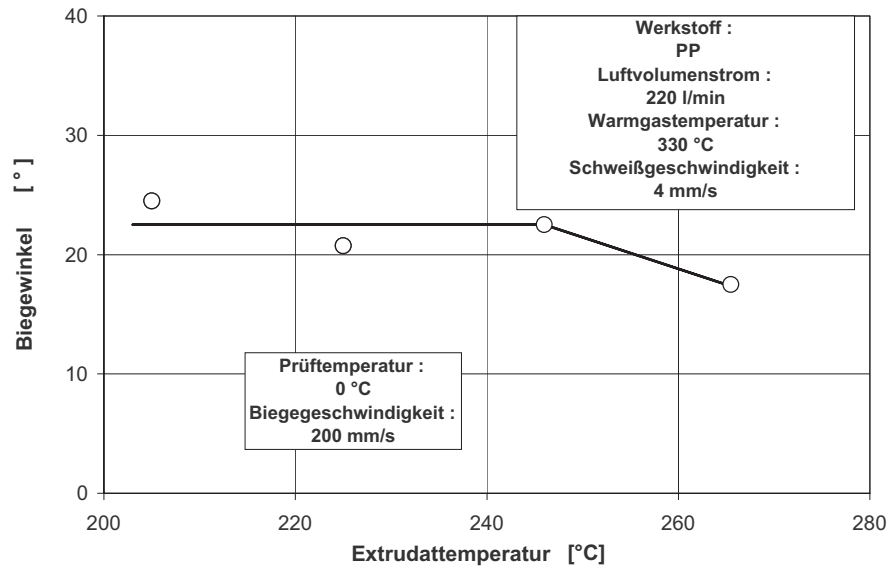
Bild 5.167 und 5.168 zeigen Ergebnisse des technologischen Biegeversuchs. Bei diesem Versuch wird die im Biegezugbereich befindliche Probenseite bis zum Bruch belastet. Mit dem Anriss der Probe sinkt die Biegekraft. Der Biegewinkel in diesem Punkt der Kraft-Verformungslinie ist der Messwert.

Die Biegewinkel durchlaufen in Abhängigkeit von der Warmgastemperatur Maxima, wobei das Maximum bei hohen Schweißgeschwindigkeiten niedriger ist und bei höheren Temperaturen auftritt als bei niedrigen Schweißgeschwindigkeiten. Der Steilabfall der Kurven ist dagegen nicht mehr von der Schweißgeschwindigkeit abhängig. Dies deutet auf einen Materialabbau hin. Die Temperatur des Extrudatstrangs hat dagegen über einen weiten Temperaturbereich keinen signifikanten Einfluss (Bild 5.168).

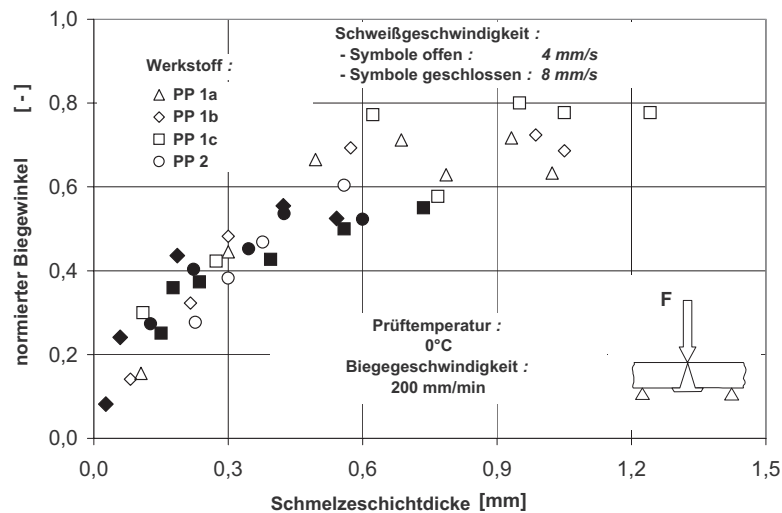
In den folgenden Darstellungen wurden die Messwerte des Steilabfalls der Kurven (Bild 5.167) aufgrund der aufgetretenen Materialschädigung nicht mehr berücksichtigt. Des Weiteren wurden die Messwerte mit den Grundmaterialbiegewinkeln normiert. Die Ergebnisse der Biegeversuche lassen sich dann in einem schmalen Streuband darstellen, wenn sie in Abhängigkeit von der Schmelzeschichtdicke aufgetragen werden (Bild 5.169), da die Schmelzeschichtdicke von der Warmgastemperatur, der Schweißgeschwindigkeit und dem Material abhängig ist. Zu beachten ist dabei, dass die Biegekraft an der Wurzel der Schweißnaht angreift.



**Bild 5.167:** Biegewinkel in Abhängigkeit der Warmgastemperatur bei unterschiedlicher Schweißgeschwindigkeit, Material: PP [182]



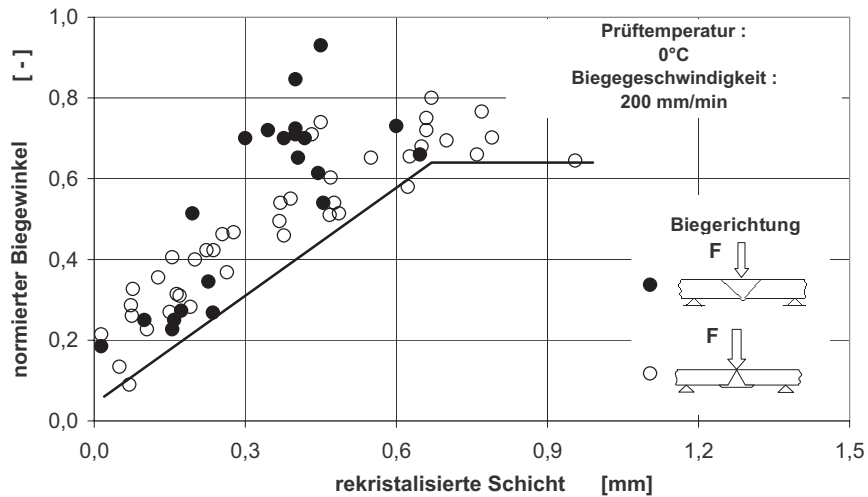
**Bild 5.168:** Biegewinkel in Abhängigkeit der Extrudattemperatur, Material: PP, Plattendicke: 15 mm [182]



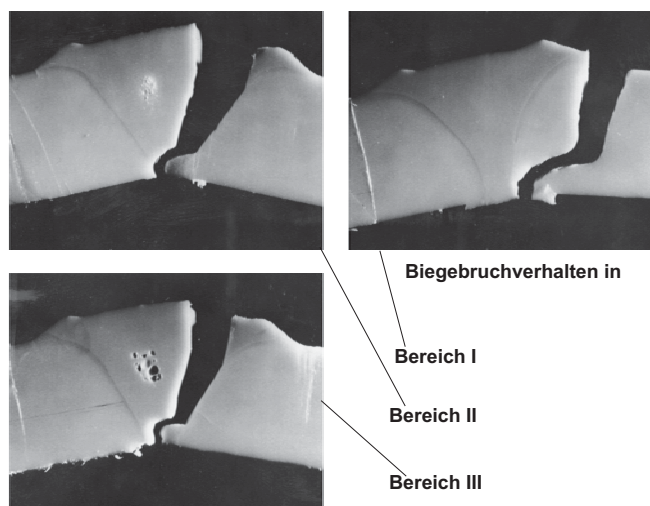
**Bild 5.169:** Normierter Biegewinkel in Abhängigkeit der Schmelzeschichtdicke, Werkstoff: PP [182]

Das Festigkeitsverhalten in beiden Biegerichtungen lässt sich eindeutiger beurteilen, wenn es der Dicke der rekristallisierten Schicht zugeordnet wird (Bild 5.170). Hierdurch werden unterschiedliche Fließbedingungen während des Fügens und ihre Auswirkungen auf den Nahtaufbau mit berücksichtigt. Die Dicke der rekristallisierten Schicht im Biegezugbereich ist kennzeichnend für die Deformationsfähigkeit der Verbindung.

Bild 5.171 zeigt Bruchbilder, wie sie beim Versagen im Zeitstandzugversuch auftreten. Es gibt drei typische Bruchverläufe. Die höchsten Standzeiten werden grundsätzlich von Proben mit



**Bild 5.170:** Normierter Biegewinkel als Funktion der rekristallisierten Schicht der Biegezugzone für beide Biegerichtungen. Material: PP [182]



**Bild 5.171:** Bruchverhalten im Biegeversuch (makroskopische Darstellung) [182]

Grundwerkstoffbrüchen erreicht (Bereich I). Wenn Lunker auftreten, deren Durchmesser größer als 10% der Plattendicke sind, bestimmen sie den Bruchverlauf (Bereich III). Die Standzeit ist geringer. Ein Bruch in der Fügeebene tritt bei zu geringen Warmgastemperaturen bzw. Schmelzeschichtdicken oder bei zu hohen werkstoffschädigenden Warmgastemperaturen auf (Bereich II).

Grundsätzlich kann gesagt werden, dass die Schmelzeschichtdicke vornehmlich durch die Schweißgeschwindigkeit, die Materialschädigung dagegen durch die Warmgastemperatur beeinflusst wird. Bild 5.172 zeigt das Verarbeitungsfenster für verschiedene PP-Typen. Es wird begrenzt durch eine Mindestschmelzeschichtdicke, eine von der Schweißgeschwindigkeit ab-

hängige Schmelzeschichtdicke und die Schädigungskurve. Je höher die Schweißgeschwindigkeit ist, desto kleiner ist das Verarbeitungsfenster.

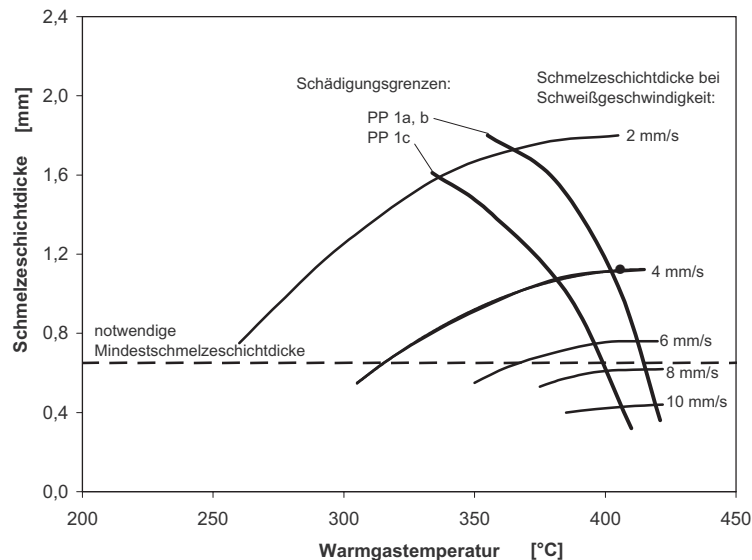


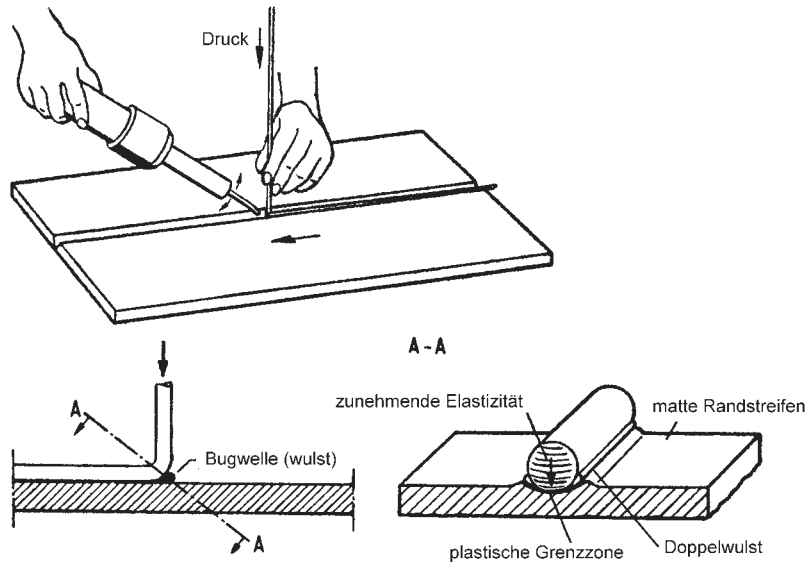
Bild 5.172: Schmelzeschichtdicke, Schädigungsgrenzen und Verarbeitungsfenster [182]

### 5.6.3 Warmgasschweißen

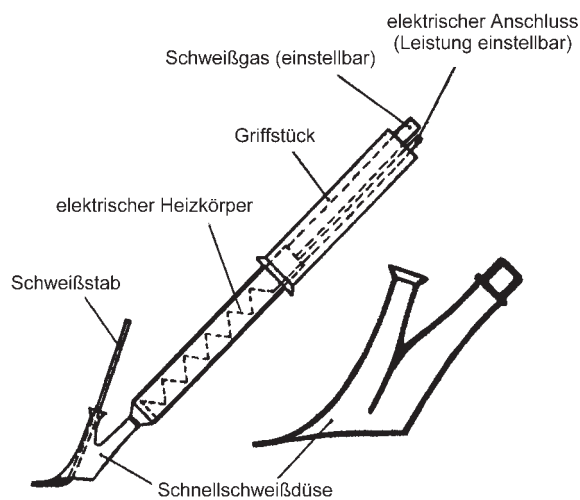
Beim Warmgasschweißen werden die Fügeflächen und die Außenzonen des Schweißzusatzes mit Warmgas – in der Regel Luft – in einen plastischen Zustand gebracht und unter Druck gefügt. Abhängig von Werkstoff und Schweißnahtformen wird das manuelle Fächelschweißen (Bild 5.173) mit Runddüse oder das manuelle, auch mechanische Schnellschweißen mit Zieh- oder Mehrfachdüsen (Bild 5.174) angewendet.

Beim Fächelschweißen werden durch Auf- und Abbewegen der Düse von Hand Grundwerkstoff und Schweißstab im Warmgasstrom örtlich in den thermoplastischen Zustand gebracht. Mit der anderen Hand wird der Schweißstab senkrecht in die Schweißzone gedrückt, so dass in Schweißrichtung vor dem Schweißstab in der hochviskosen Kunststoffschmelze eine Bugwelle entsteht. Seitlich der Schweißbraupe tritt beim Schweißen von Polyvinylchlorid (PVC) ein schaumiger, beim Schweißen von Polyolefinen ein glatter Doppelwulst aus. Düsen- und Schweißstabführung sind neben konstanter Wärmegastemperatur und -menge Hauptkriterien für die Schweißnahtgüte, die visuell an der Form der Schweißbraupe und der Färbung des Schweißwulstes beurteilt werden kann. Das Verfahrensprinzip ist bei allen Ausführungsarten des Warmgasschweißens gleich.

Das Fächelschweißen wird in schwierigen Schweißlagen (Rohrleitungs- und Apparatebau) angewendet. Es sind Schweißgeschwindigkeiten bis zu 25 cm/min erreichbar. Bei den Schnellschweißverfahren wird der Warmgasstrom in Zieh- oder Mehrfachdüsen mehrfach geteilt und zum Vorwärmen oder Aufschmelzen direkt auf Grund- und Zusatzwerkstoff geleitet. Der Zusatzwerkstoff kann beliebig profiliert, der Grundwerkstoff entsprechend weich oder hart sein, da er in der Düse geführt ist. Die Druckaufbringung erfolgt mit Hilfe eines an der Düse angebrachten Schuhs oder über eine gesonderte Andrückrolle. Es sind Schweißgeschwindigkeiten zwischen 40 und 100 cm/min erreichbar. Die Warmgasschweißverfahren werden hauptsäch-



**Bild 5.173:** Schema des Warmgasschweißens und Darstellung einer Auftragsschweißraupe



**Bild 5.174:** Warmgasschweißgerät mit Schnellschweißdüse (schematisch)

lich bei den Kunststoffen PVC hart, PVC weich, Polyolefine, modifizierte Styrolpolymere angewendet. Schweißnahtvorbereitung und Schweißnahtaufbau richten sich nach DIN 16930, DIN 16931, DIN 16932 und DIN 16960.

Die Formen der Schweißnähte entsprechen im Wesentlichen denen bei Metallen. Für die Auswahl von Nahtformen an Behältern und Apparaten gelten in Deutschland die DVS-Richtlinien DVS 2205 Teil 3 und 5.