

3R INTERNATIONAL

Zeitschrift für die Rohrleitungspraxis

Langzeitverhalten infrarotgeschweißter Rohrleitungssysteme aus PVDF und PP

Dr.-Ing. Joachim Hessel, Ing. Albert Lueghamer und Dipl.-Ing. Klaus Hackel

erschienen in 3R international Ausgabe 12/2002

Vulkan-Verlag GmbH, Essen

Ansprechpartner: N. Hülsdau (Tel. 0201/82002-33, E-Mail: n.huelsdau@vulkan-verlag.de)

Langzeitverhalten infrarotgeschweißter Rohrleitungssysteme aus PVDF und PP

Long-term performance of infrared welded PVDF and PP piping systems

Der vorliegende Beitrag beschäftigt sich im ersten Teil mit der allgemeinen Verfahrensbeschreibung des Infrarot-Heizelementstumpfschweißens sowie den damit erreichbaren Schweißfaktoren für Rohre aus PVDF. Im zweiten Teil¹⁾ werden weitere Untersuchungen von Rohr-Formteil-Verbindungen aus PVDF sowie IR-Schweißverbindungen von Rohren aus PP vorgestellt.

The first part of this article examines the general process profile of infrared heating element butt welding and the welding factors achievable using it on PVDF pipes. The second part will examine PVDF pipe-shape joints and IR welds in PP pipes.

Einleitung

In den aktuellen DVS-Richtlinien zum Fügen von Kunststoffen sind für Standard-Thermoplaste (PE, PP, PVDF) die Verfahren und die Durchführung von Heizelement-Stumpfschweißverbindungen beschrieben. Speziell für Infrarot-Heizelement-Stumpfschweißung werden hier keine Angaben gemacht. Eine Richtlinie, die sich mit dem Thema befasst, liegt als Entwurf vor.

Die vorhandenen Angaben zur Durchführung von Infrarot-Schweißungen beruhen auf Versuchen und Erfahrungswerten von Halbleitungs- und Maschinenherstellern sowie Anwendern.

Auf Grund der spezifischen Verfahrensabläufe der einzelnen Infrarot-Schweißsysteme gibt es bislang keine Regelung für eine einheitliche Kunststoffschweißerprüfung auf diesem Gebiet. Deshalb werden spezielle Trainingsprogramme auf Grundlage beste-

hender Richtlinien derzeit von den Systemanbietern angeboten.

Die Werkstoffe

Im Anlagenbau haben sich Polyvinylidenfluorid (PVDF) und Polypropylen (PP) in verschiedenen Modifikationen in den vergangenen Jahren durchgesetzt. Diese Werkstoffe zeichnen sich durch ihre besonderen Eigenschaften, ihre Anwendungssicherheit und die damit verbundenen Betriebsvorteile für die Anlagen aus.

Werkstoff Polyvinylidenfluorid (PVDF)

PVDF ist ein thermoplastisches Fluorpolymer mit ausgezeichneter Verarbeitbarkeit, Schweißbarkeit und Umformbarkeit. PVDF zeichnet sich durch seine hohe mechanische Festigkeit, seine sehr gute chemische Widerstandsfähigkeit – auch bei höheren Temperaturen – und durch seine physiologische Unbedenklichkeit aus.

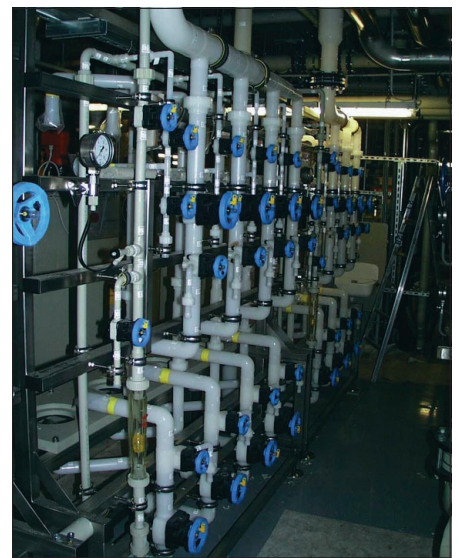


Bild 1: Rohrleitungssystem aus PVDF

Fig. 1: PVDF piping system



Bild 2: Rohrleitungssystem aus PP

Fig. 2: PP piping system

Deshalb eignet sich PVDF besonders für Anwendungen, bei denen unter hoher Temperaturbeanspruchung besondere Ansprüche an diese Eigenschaften gestellt werden. PVDF-Rohre und -Formteile werden in der chemischen Industrie sowie in der Lebensmittel- und Nuklearindustrie eingesetzt. Die Anwendbarkeit von Rohren aus PVDF für alkalische Medien muss im Einzelfall geprüft werden. Für Reinstwasser- und Reinstchemikalienanwendungen werden Rohre, Formteile und Armaturen aus PVDF in High-Purity-

¹⁾ Erscheint in 3R international, Ausgabe 5/2003



Dr.-Ing. Joachim Hessel
Hessel Ingenieurtechnik GmbH,
Roetgen
Tel. 02471/920220
E-Mail: info@hessel-ingtech.de



Ing. Albert Lueghamer
AGRU Kunststofftechnik GmbH,
Bad Hall
Tel. +43 7258/7900
E-Mail: l@agru.at



Dipl.-Ing. Klaus Hackel
Frank GmbH, Mörfelden
Tel. 06105/28256
E-Mail: k.hackel@frank-gmbh.de

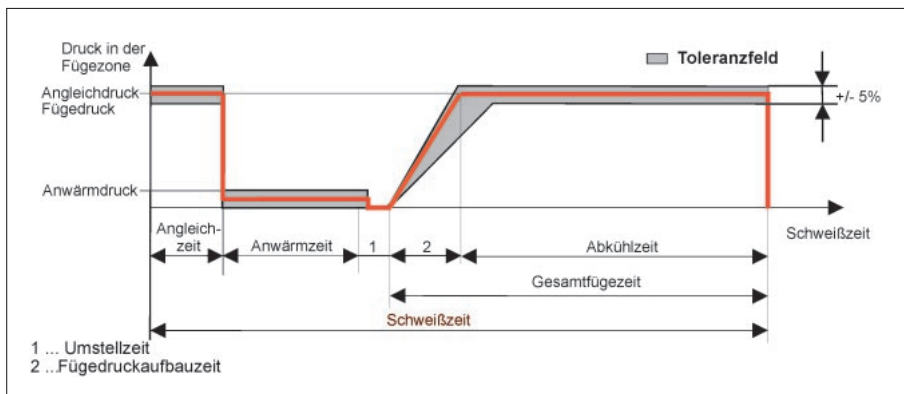


Bild 3: Verfahrensschritte beim HS-Schweißen (Fügedruck/Zeit)
Fig. 3: Process steps in HB welding (joining pressure/time)

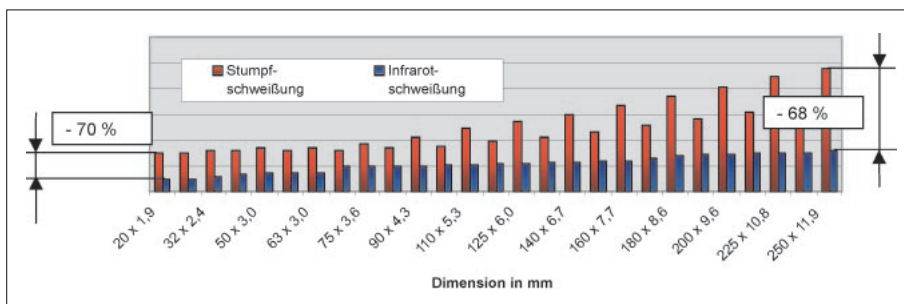


Bild 4: Schweißzeiten im Vergleich HS/HS-IR-d
Fig. 4: Welding times, comparison of HB/HB-IR-d

Qualität eingesetzt, die unter Reinraumbedingungen hergestellt werden. Das insbesondere für diesen Anwendungsfall entwickelte Infrarot-Heizelement-Schweißen ermöglicht eine anwendungsgerechte und sichere Verbindung der Rohre und Formteile.

Bei PVDF werden zwei verschiedene Werkstofftypen am Markt angeboten. Diese unterscheiden sich durch den jeweiligen Herstell-

lungsprozess Suspensions- oder Emulsionspolymerisation:

- Suspensionstyp (nach ASTM D 3222) oder Typ II,
- Emulsionstyp (nach ASTM D 3222) oder Typ I.

Das Suspensionsverfahren gestattet die Herstellung eines Polymerisats, das weniger Fehlstellen in den Molekülketten aufweist

und dadurch einen höheren Kristallinitätsgrad hat. Schmelztemperatur und thermo-mechanische Eigenschaften sind höher als bei Emulsions-Homopolymerisaten mit derselben mittleren molaren Masse. Ebenso weist PVDF Typ II gegenüber Typ I, der eine opake Farbe hat, einen besseren Farbindex auf. Trotz unterschiedlichem MFR (Melt Flow Rate) können beide Typen miteinander geschweißt werden (**Bild 1**).

Werkstoff Polypropylen (PP)

Polypropylen ist ein Thermoplast, der neben einem niedrigen spezifischen Gewicht eine ausgezeichnete Verarbeitbarkeit, Schweißbarkeit und Umformbarkeit aufweist. PP hat im Vergleich zu anderen Thermoplasten eine gute Wärmebeständigkeit. Polypropylen zeichnet sich durch hohe mechanische Festigkeit, sehr gute chemische Beständigkeit und durch seine physiologische Unbedenklichkeit aus.

Daher eignet sich PP besonders für Anwendungen in der chemischen Industrie, wo bei höheren Temperaturen große Anforderungen an die Beständigkeit gegenüber Chemikalien gestellt werden. Für Anwendung in der Reinstmedientechnik kann PP auch in High-Purity-Qualität eingesetzt werden. Polypropylen ist als Standardwerkstoff in der Farbe Grau/Beige (RAL 7032) verfügbar, wird aber auch speziell für Reinstmediensysteme auch in Natur (PP-n) angeboten (**Bild 2**). Im zweiten Teil dieses Beitrags wird näher auf den Werkstoff PP eingegangen.

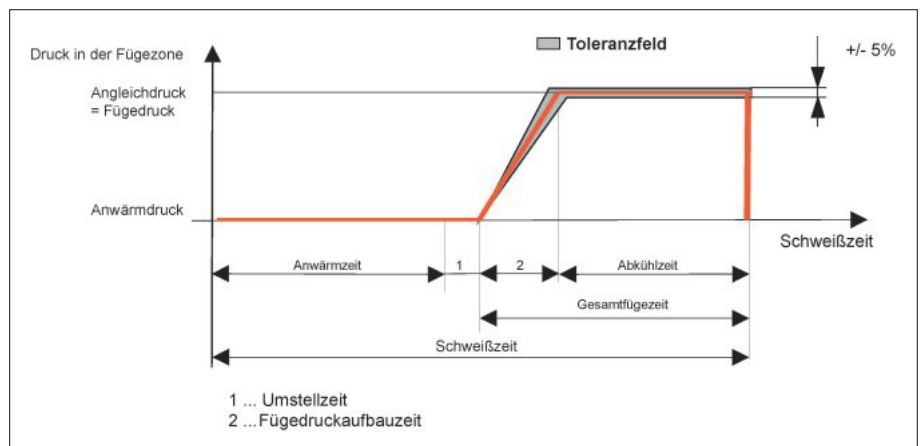
Schweißverfahren für thermoplastische Rohrleitungssysteme in PVDF und PP

Kunststoffschweißen ist das Verbinden von thermoplastischen Kunststoffen unter Anwendung von Wärme und Druck, mit oder

Bild 5: Druckgesteuerte Infrarotschweißmaschine SP 110
Fig. 5: SP 110 pressure-controlled infrared welding machine



Bild 6: Verfahrensschritte beim HS-IR-d-Schweißen
Fig. 6: Process steps in HB-IR-d welding



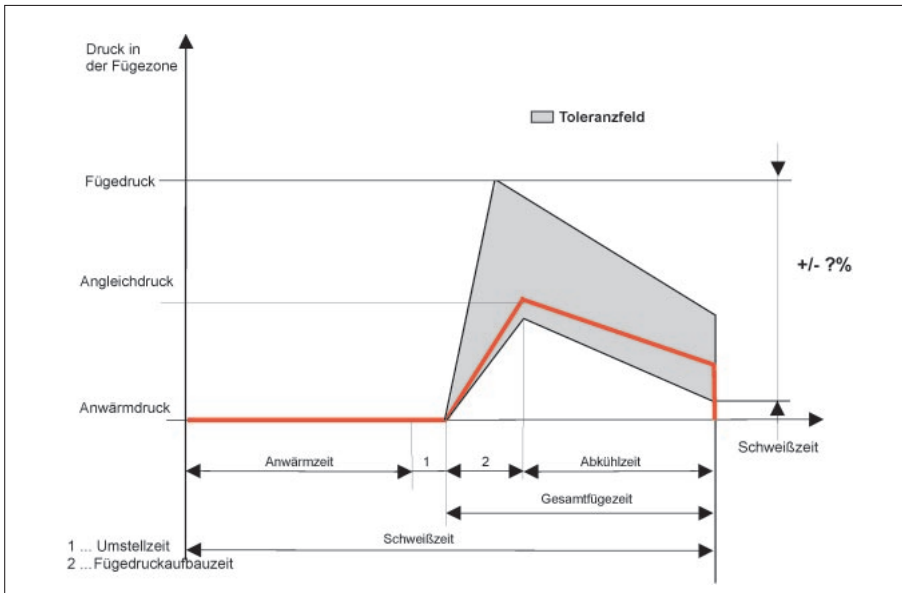


Bild 7: Verfahrensschritte beim HS-IR-w-Schweißen
Fig. 7: Process steps in HB-IR-w welding

ohne Schweißzusatz, innerhalb einer bestimmten Zeit.

Hieraus resultieren die drei grundlegenden Schweißparameter:

- Temperatur: zum Erwärmen der Fügeflächen in den thermoplastischen Zustand (Aufschmelzen),
- Druck: zum Fügen der Schweißpartner,
- Zeit: Temperatureinwirkzeit, Druckaufbauzeit, Abkühlzeit.

Diese Schweißparameter finden sich bei allen Schweißverfahren wieder und sind maßgeblich für die Reproduzierbarkeit einer Schweißverbindung.

Je nach der Art der Wärmeübertragung auf den Werkstoff unterscheidet man beim Heizelement-Schweißen von Rohrleitungssystemen nach folgenden Verfahren:

- Heizelement-Stumpfschweißen mit direkter Wärmeübertragung durch Kontakt mit dem Heizelement (HS),
- Heizelement-Stumpfschweißen mit indirekter Wärmeübertragung durch Wärme-

strahlung ohne Kontakt mit dem Heizelement (HS-IR),

- Heizwendelschweißen (HM),
- Heizelement-Muffenschweißen (HD).

Trotz der fortschreitenden Automatisierung in der Kunststoffschweißtechnik, liegt ein Schwerpunkt auf der sach- und fachgerechten Ausführung der Schweißungen und der Verlegung von Rohrleitungen. Neben den allgemeinen Kenntnissen des Kunststoffschweißens sind insbesondere für die Durchführung von Infrarot-Schweißverbindungen besondere Kenntnisse über die einzelnen Schweißsysteme notwendig.

Die Anforderungen an die Schweißmaschinen leiten sich aus den Forderungen nach Sicherheit sowie den Ansprüchen an die Fügeverbindungen ab. In der DVS-Richtlinie 2208 sind Angaben über Ausführung von Geräten und Anlagen zum Kunststoffschweißen zu finden. Dies sind unter anderem:

- Betriebssicherheit,

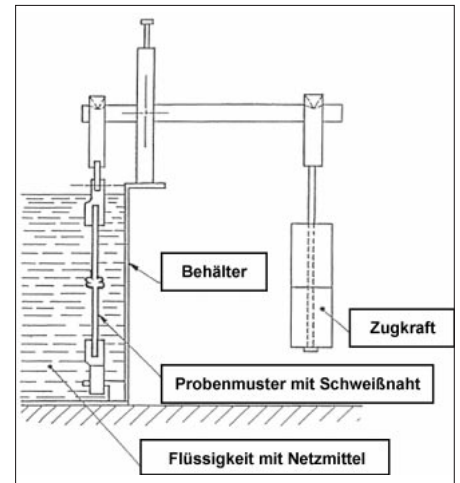


Bild 9: Zeitstandzugversuch
Fig. 9: Long-term tensile creep test

- Angaben zu Maßtoleranzen an den Maschinen, die Einfluss auf die Schweißnahtqualität haben können,
- konstruktive Gestaltungsmerkmale im Hinblick auf eine gleichbleibende Schweißnahtqualität.

Darüber hinaus werden an modernen Kunststoffschweißmaschinen weitere Anforderungen gestellt, wie beispielsweise:

- Reproduzierbarkeit der Fügeverbindungen durch spezielle Steuer- und Regeleinrichtungen,
- Dokumentation und Protokollierung der Schweißverbindung (PC-Schnittstelle),
- einfache Benutzerführung, z. B. durch Touch-Screen,
- Möglichkeit zur Montageschweißung an schlecht zugänglichen Stellen.

Die zwei in der Praxis wichtigsten Verfahren werden im Folgenden näher beschrieben.

Heizelement-Stumpfschweißen (HS)

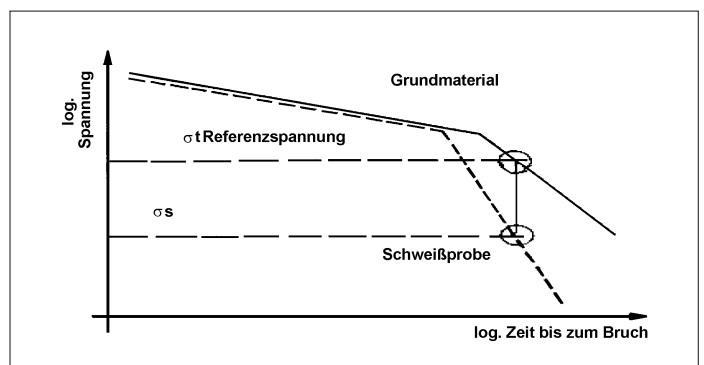
Das am häufigsten eingesetzte Verfahren zum Verbinden thermoplastischer Rohre und

Bild 8: Einflussfaktoren auf die Schweißnahtfestigkeit
Fig. 8: Factors influencing weld strength



Bild 10: Schematische Darstellung zur Bestimmung des Schweißfaktors im Zeitstand-Zugversuch

Fig. 10: Schematic view for determination of welding factor in the long-term tensile creep test



Tab. 1: Untersuchte Kombinationen Werkstoff/Schweißverfahren

Table 1: Material/welding process combinations investigated

Schweißverfahren	PVDF Materialtyp
IR druckgesteuert (HS-IR-d)	Suspensionstyp
IR weggesteuert (HS-IR-w)	Emulsionstyp
HS druckgesteuert (Referenzschweißverfahren nach DVS 2207-11)	Suspensionstyp

Rohrleitungsteile im industriellen Anlagenbau ist das Heizelement-Stumpfschweißen. An diesem Beispiel soll der Bindemechanismus beim Kunststoffschweißen dargestellt werden. Durch die eingebrachte Wärmeenergie lösen sich die intermolekularen Bindungskräfte zwischen den Polymerketten an

den Fügeflächen. Die Fügeflächen werden nach dem Entfernen des Heizelementes unter Druck miteinander in Verbindung gebracht, so dass die frei beweglichen Polymerketten beider Schweißpartner gemeinsame Überstrukturen (Kristallite) bilden können. Dieser als Kokristallisation bezeichnete Vorgang wird heute als der wahrscheinlichste Mechanismus beim Schweißen von Kunststoffen betrachtet.

Folgende grundlegende Schritte zur Durchführung einer Heizelement-Stumpfschweiß-Verbindung sind zu beachten:

- Einspannen und Ausrichten der Fügepartner,
- Reinigen der Fügeflächen durch spanende Bearbeitung (Planhobeln der Fügeflächen),
- Angleichen der Fügeflächen am Heizelement, damit die Fügeflächen beim An-

- wärmen vollständig am Heizelement anliegen,
- Anwärmen der Fügepartner,
- Umstellen (Heizelement aus der Fügezone ausfahren),
- Fügen der Schweißpartner unter definiertem Aufbau des Fügedruckes,
- Abkühlen der Schweißverbindung unter Fügedruck.

Der zeitliche Ablauf einer Heizelement Stumpfschweißverbindung ist in **Bild 3** dargestellt:

Die Heizelement-Stumpfschweißung zeichnet sich durch die einfache und sichere Handhabung sowie als kostengünstigste Variante im Vergleich zu anderen Fügeverfahren aus. Im Bereich der Reinstmedierversorgung birgt die Erwärmung der Fügepartner durch den direkten Kontakt mit dem Heizelement die Gefahr einer in diesem Anwendungsbereich unerwünschten Kontamination. Die Schweißwülste, die bei diesem Verfahren entstehen, sind größer als beim berührungslosen Erwärmen.

Bild 11: Standzeiten und Bestimmung des Schweißfaktors für HS-IR-d-geschweißten Suspensionstyp

Fig. 11: Service-lives and determination of welding for HB-IR-d welded suspension types

Probenkennzeichnung G: Grundmaterial S: Schweißung	Prüfspannung N/mm ²	Standzeit in Stunden	Geom. Mittelwert in Stunden	Standard- abweichung in Stunden	Bemerkung
G1.1	12,5	1274,9	1536,4	723,4	Spröbruchanteil > 30 %
G1.2		1253,9			
G1.3		2466,3			
G1.4		1239,8			
G1.5		1660,6			
G1.6		1620,2			
S2a/1	12,5	171,1	408,1	421,8	Bruchausgang von der Wulstkerbe; Spröbruchanteil >30 %
S2a/3		515,1			
S2a/4		644,3			
S2b/1		987,7			
S2b/5		380,8			
S2b/8		216,4			
S2a/10	8,8	>19162	>19162	-	Probe laufen noch (05.11.2002)
S2a/11		>19162			
S2a/12		>19162			
S2a/13		>19162			
S2a/14		>19162			
S2a/15		>19162			

Heizelement-Stumpfschweißen mit Infrarotwärmerung (HS-IR)

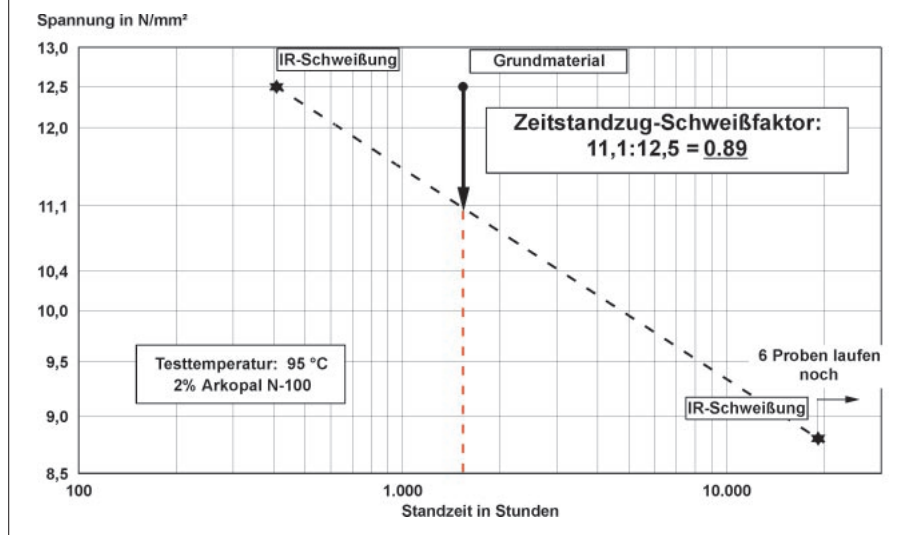
Die Infrarot-Schweißtechnologie (berührungslose Heizelement-Stumpfschweißung) hat sich für die Werkstoffe PVDF, PP, ECTFE und PFA in den vergangenen Jahren durchgesetzt. Die Vorteile dieser Schweißtechnologie, die in der Reinstmedierversorgung zum Tragen kommen, sind die reduzierte Wulstausbildung und die kontaminationsfreie Anwärmphase. Weitere Nebeneffekte, wie wesentlich reduzierte Schweißzeiten (**Bild 4**), zeichnen diese Schweißtechnik im Anlagenbau aus.

Die Infrarot-Schweißtechnologie erfordert wesentlich präzisere Schweißgeräte, als sie beim konventionellen Heizelement-Stumpfschweißen notwendig sind. Der Grund hierfür ist u. a. der überproportionale Einfluss des Heizelementabstandes von den Fügeflächen.

Je nach Art des Aufbringens des Fügedruckes unterscheidet man zwischen zwei Varianten, druckgesteuerter Aufbau und weggesteuerter Aufbau des Fügedruckes. Beide Verfahren werden im Folgenden kurz erläutert.

Infrarot-Schweißverfahren mit Drucksteuerung (HS-IR-d)

Das Aufbringen des Fügedruckes erfolgt durch mechanische Einrichtungen, wie z. B. Feder-, Hydraulik- oder Spindelantriebe (**Bild 5**). Der Fügedruck wird bei dieser Variante während des gesamten Schweißvorganges, insbesondere auch in der Abkühlphase, aufrecht erhalten bzw. nachgeregelt (**Bild 6**). Zugspannungen auf die Schweißung während der Abkühlung der Fügepartner werden somit ausgeschlossen. Durch Aufbringen



des definierten Fügedruckes werden herstellungsbedingte Unterschiede in den Schmelzviskositäten (soweit diese sich innerhalb zulässiger Toleranzen bewegen) beider Fügepartner, insbesondere bei der Verbindung Rohr/Formteil, kompensiert.

Alle weiteren Schweißparameter werden während des Fügevorganges kontinuierlich überwacht und dokumentiert. Dies gewährleistet reproduzierbare Schweißvorgänge. Die Protokolle werden auf elektronischem Wege erfasst und können damit jederzeit ausgewertet und verwaltet werden. Weiterhin erfolgt die Protokollierung jeder einzelnen Schweißnaht mit Hilfe von Klebetiketten, die eine Zuordnung zum Schweißprotokoll und die Rückverfolgbarkeit sicherstellen.

Infrarot-Schweißverfahren mit Wegsteuerung (HS-IR-w)

Bei diesem Verfahren wird der Fügedruck über einen definierten Fügweg, den die plastifizierten Fügeflächen beim Zusammenfahren zurücklegen, aufgebracht. Der entstehende Schweißdruck ist hierbei auch eine Funktion der Schmelzviskositäten der Fügepartner. Bei dieser Fügemethode ist der Fügedruckaufbau sowie der Fügedruck nicht kontrollierbar und besonders bei dickwandigen Rohrkomponenten über den Verlauf der Abkühlzeit auf Grund der thermischen Kontraktion der Fügepartner abfallend.

In Bild 7 ist der Fügedruckverlauf über der Zeit für das weggesteuerte HS-IR Schweißen dargestellt.

Moderne IR-Schweißgeräte verfügen über einen vollständig automatisierten Fügeprozess, wodurch der Einfluss des Schweißpersonals möglichst gering gehalten wird und damit eine gleichbleibende hohe Schweißnahtqualität sichergestellt ist. Durch die im Folgenden beschriebenen Untersuchungen wird herausgestellt, dass mit einem fügedruckgesteuerten Infrarot-Schweißsystem wesentlich bessere Schweißnahtfestigkeiten erzielt werden können als mit der herkömmlicher Stumpfschweißtechnologie.

Anforderungen an eine Schweißverbindung

An Kunststoffkonstruktionen (Rohrleitungssysteme, Apparate), die im industriellen Bereich Anwendung finden, werden neben den Anforderungen an die geeigneten Werkstoffe (Festigkeit, chemische Widerstandsfähigkeit usw.) auch erhöhte Ansprüche an deren Verbindungstechnik und die Gestaltung (Isometrie) gestellt.

Für Kunststoff-Schweißverbindungen gilt allgemein:

- dauerhaft, gleichbleibend hohe Schweißnahtqualität (Zeitstandinnendruck-, Zeitstandzugfestigkeit),

- Reproduzierbarkeit der Schweißnähte, um einen gleichbleibend hohen Standard zu gewährleisten,
- wirtschaftlich herstellbar.

Schweißnahteigenschaften und Einflussfaktoren

Die Schweißnahtqualität kann durch verschiedene Faktoren beeinflusst werden (Bild 8). Ein großer Anteil der Einflussfaktoren kann durch entsprechend ausgeführte Schweißgeräte kontrolliert und geregelt werden. Neben den vorgenannten Anforderungen an Schweißverbindungen sind weitere grundlegende Bewertungskriterien und Beurteilungsmerkmale sowie Vorgaben für die mechanisch-technologischen Prüfungen in den DVS-Richtlinien 2202 und 2203 beschrieben. Die hierin dargestellten Fehler und Prüfverfahren können grundsätzlich auf

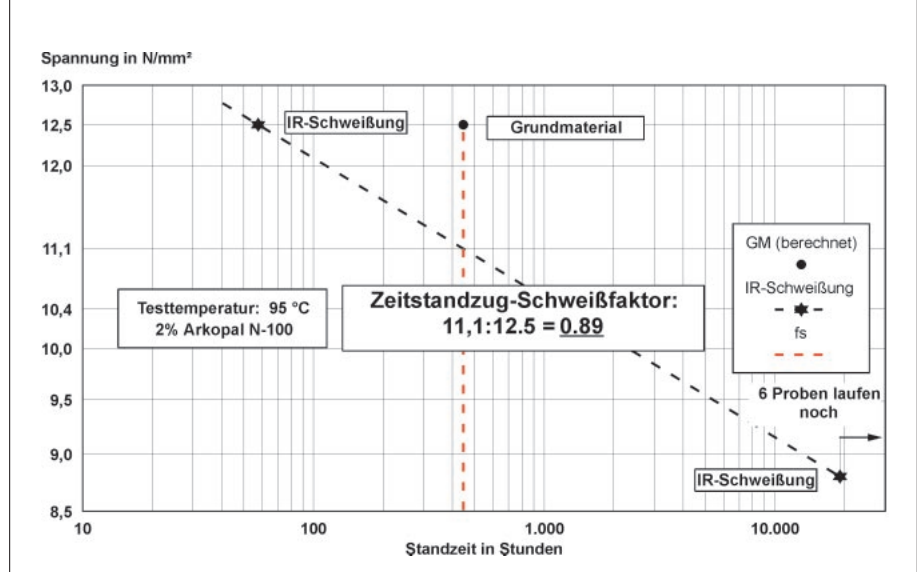
die mit der vorgestellten IR-Schweißtechnologie gefertigten Verbindungen übertragen werden. Aussagen über die mechanisch-technologischen Eigenschaften, insbesondere über das Zeitstandverhalten der Schweißverbindung, sollte daher jeder Systemhersteller liefern können. Neben den Einflüssen der gewählten Schweißtechnologie muss auch als weiterer wesentlicher Einflussfaktor für die erzielbare Langzeit-Schweißnahtfestigkeit die Wahl des Grundwerkstoffes (Formmassentyp) berücksichtigt werden.

Das Langzeitverhalten einer Schweißverbindung wird in hohem Anteil durch die Formmasse beeinflusst. Hierbei gilt als wichtigster Einflussparameter das Verhalten im FNCT (Full-Notch-Creep-Test) und der daraus resultierende Widerstand gegen langsames Risswachstum (Kerbempfindlichkeit). Beim FNCT werden Zugproben mit einer definierten umlaufenden Kerbe unter gleichbleiben-

Bild 12: Standzeiten und Bestimmung des Schweißfaktors für HS-IR-w-geschweißten Emulsionstyp

Fig. 12: Service-lives and determination of welding for HB-IR-w welded emulsion types

Probenkennzeichnung G: Grundmaterial S: Schweißung	Prüfspannung N/mm ²	Standzeit in Stunden	Geom. Mittelwert in Stunden	Standard- abweichung in Stunden	Bemerkung
G4.1	12.5	211,4	217,3	97,0	Sprödbbruchanteil < 30 %; Proben verstreckt
G4.2		397,5			
G4.3		157,1			
G4.4		140,1			
G4.5		239,7			
G4.6		237,5			
S5.2/1a	12.5	87,8	57,6	25,4	Bruchausgang von der Wulstkerbe; Sprödbbruchanteil > 30 %
S5.2/3a		56,9			
S5.2/5a		76,6			
S5.2/2		66,9			
S5.2/5		42,5			
S5.2/8		33,5			
S2a/10	8.8	>19100	>19100	-	Probe laufen noch (05.11.2002)
S2a/11		>19100			
S2a/12		>19100			
S2a/13		>19100			
S2a/14		>19100			
S2a/15		>19100			



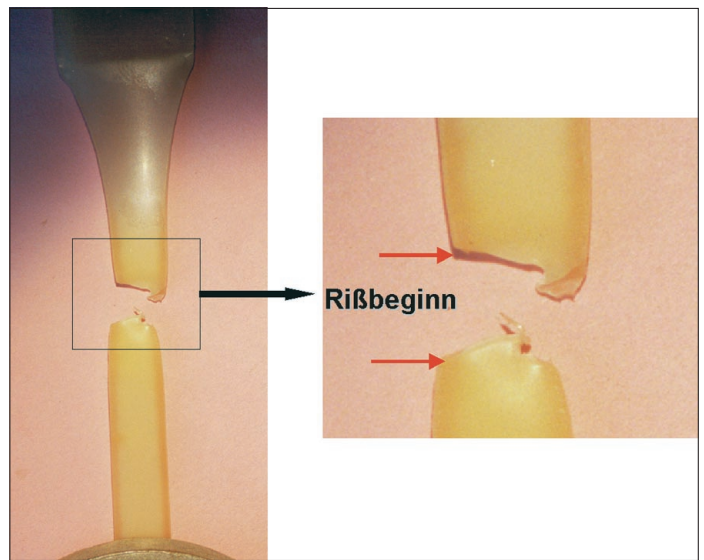
den Bedingungen auf ihre Kerbempfindlichkeit hin geprüft. Werkstoffe mit hoher Standzeit im FNCT und somit hohem Widerstand gegenüber langsamem Risswachstum zeichnen sich durch entsprechend hohe Standzeiten der Schweißverbindungen aus.

Im Rahmen mehrerer Versuchsreihen konnte nachgewiesen werden, dass sowohl bei PVDF als auch PP die Kerbempfindlichkeit des Werkstoffs, neben dem gewählten IR-System, einen wesentlichen Einfluss auf die Langzeitfestigkeit der Schweißverbindungen hat.

Langzeitverhalten von IR-Schweißverbindungen in PVDF

Zur Beurteilung der Qualität von Schweißverbindungen in Thermoplastkonstruktionen, insbesondere deren Zeitstandverhalten, hat sich der Zeitstand-Zugversuch bewährt. Die Prüfeinrichtung (Bild 9) nach Richtlinie DVS 2203-4 gewährleistet bei konstanter Temperatur eine gleichmäßig ruhende Zugkraft auf den Probekörper. In einem temperierten Bad wird die Probe mit einer konstan-

Bild 14: Bruchbild Grundmaterial (Suspensionstyp)
Fig. 14: Fracture image of parent material (suspension type)



ten Zugkraft beansprucht und die Zeit bis zum Bruch der Probe bestimmt.

Zur Ermittlung des Zeitstandzug-Schweißfaktors werden ungeschweißte Bezugspro-

ben und geschweißte Probekörper bei unterschiedlichen Spannungen im Zeitstand-Zugversuch bis zum Bruch geprüft.

Aus den daraus berechenbaren Zeitstandlinien der jeweiligen Proben wird der Zeitstandzug-Schweißfaktor als Quotient der jeweiligen Bruchspannungen von geschweißten und ungeschweißten Proben bei einer vorgegebenen Standzeit bestimmt (Bild 10).

Auf ähnlichem Wege kann der weniger aussagefähige Kurzzeit-Schweißfaktor ermittelt werden. Hierbei werden die im Kurzzeit-Zugversuch ermittelten Bruchspannungen gegenübergestellt.

Zusammenfassend kann man den Schweißfaktor als Verhältnis der Festigkeiten der geschweißten Proben zu ungeschweißten Probe bezeichnen.

In der Richtlinie DVS 2203-1 sowie DVS 2205-1 sind die Anforderungen an den Zeitstandzug-Schweißfaktor für verschiedene Werkstoffe und Verfahren festgelegt.

Im Rahmen der Untersuchungen wurden verschiedene IR-Schweißsysteme und PVDF-Formmassen getestet. Um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen, wurden alle Tests an der gleichen Rohrdimension ausgeführt und diese Schweißungen von ausgebildetem Personal unter kontrollierten Umgebungsbedingungen (Reinraum) ausgeführt. Die Herstellerangaben wurden bei der Probenherstellung berücksichtigt.

Getestet wurden die in Tabelle 1 dargestellten Kombinationen bei der gleichen Rohrdimension (63 x 3,0 mm SDR 21).

Bei den durchgeführten Langzeituntersuchungen hat sich bereits bei der Prüfung der Nullproben (Grundwerkstoff) herausgestellt, dass die erzielbaren Standzeiten auf Grund des Einflusses der Formmasse bei dem PVDF-Suspensionstyp um das Mehrfache über den Standzeiten des PVDF-Emulsionstyps lagen (Bild 11 und 12). Der gleiche Ef-

Bild 13: Standzeiten und Bestimmung des Schweißfaktors für HS-geschweißten Suspensionstyp

Fig. 13: Service-lives and determination of welding for HB welded suspension types

Probenkennzeichnung G: Grundmaterial S: Schweißung	Prüfspannung N/mm ²	Standzeit in Stunden	Geom. Mittelwert in Stunden	Standard- abweichung in Stunden	Bemerkung
G1.1	12.5	1274.9	1536.4	723.4	Spröbruchanteil >30 %
G1.2		1253.9			
G1.3		2466.3			
G1.4		1239.8			
G1.5		1660.6			
G1.6		1620.2			
S3a/10	10.0	>11882	>11882	-	Probe laufen noch (05.11.2002)
S3a/11		>11882			
S3a/12		>11882			
S3a/13		>11882			
S3a/14		>11882			
S3a/15		>11882			

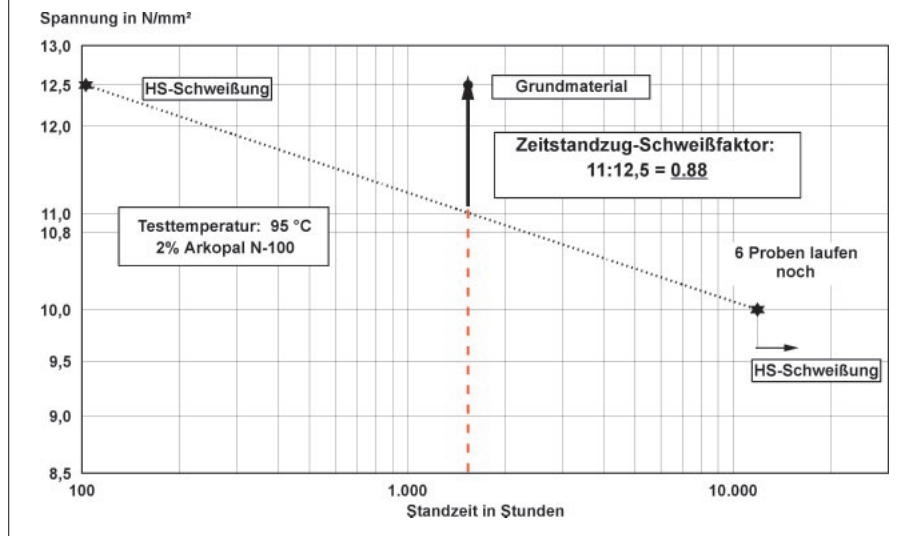




Bild 15: Bruchbild Schweißung Serie 5 , HS - IR-w, Emulsionstyp

Fig. 15: Fracture image, Series 5 weld, HB - IR-w, emulsion type

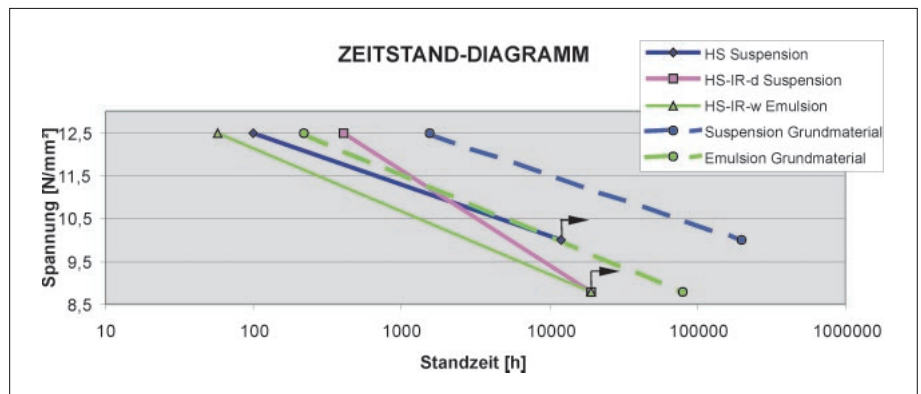


Bild 18: Vergleich der einzelnen Proberserien im Zeitstand-Diagramm

Fig. 18: Comparative assessment of the individual test series in a creep behaviour diagram

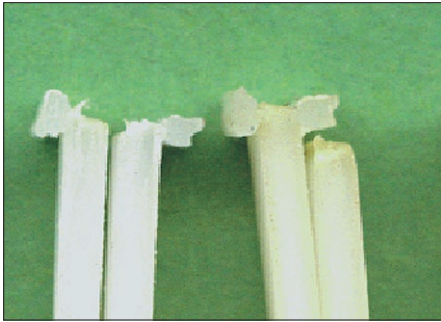


Bild 16: Bruchbild Schweißung Serie 3 , HS, Suspensionstyp

Fig. 16: Fracture image, Series 3 weld , HB, suspension type

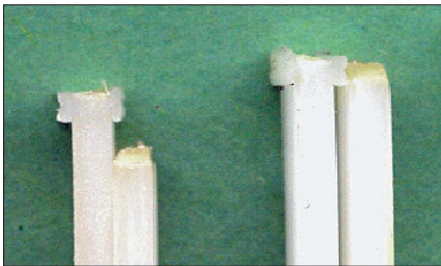


Bild 17: Bruchbild Schweißung Serie 2, HS-IR-d, Suspensionstyp

Fig. 17: Fracture image, Series 2 weld , HB-IR-d, suspension type

fekt ergab sich bei der Untersuchung der Standzeiten der Schweißnahtproben. Die erreichten Standzeiten waren ebenfalls – wie bei den Nullproben – bei dem PVDF-Suspen-

sionstyp um das Mehrfache höher als bei dem PVDF-Emulsionstyp. Der Grund hierfür ist die größere Kerbempfindlichkeit des untersuchten PVDF-Emulsionstyps.

Die zum Vergleich getestete HS-Schweißung mit PVDF-Suspensionstyp (**Bild 13**) dient dazu, festzustellen, welche Langzeitschweißfaktoren bei PVDF mit den verschiedenen Schweißverfahren erzielbar sind und inwieweit die Anforderungen der DVS 2203-1 hinsichtlich der Langzeitschweißfaktoren erfüllt oder überschritten werden.

Ausgehend von diesen Untersuchungen ist festzuhalten, dass, unabhängig vom Verfahren (druck-, weggesteuert) und dem jeweiligen Werkstofftyp, mit einer Infrarot-Heizelement-Stumpfschweißung ein Langzeitschweißfaktor von > 0,8 erreicht wird und dieser damit über dem in der DVS 2203-1 geforderten Wert von 0,6 für Heizelement-Stumpfschweißverbindungen für PVDF liegt. Dabei sind die effektiven Standzeiten der Proben aus dem Suspensionstyp wesentlich höher als die des Emulsionstyps.

Es wird deshalb für PVDF-HS-IR-Schweißungen die Festlegung eines Mindestwertes für den Zeitstandzug-Schweißfaktor von 0,8 vorgeschlagen.

In den **Bildern 14 bis 17** sind exemplarisch einige Bruchbilder der geprüften Serien dargestellt. Bei allen ist ein Spröbruchanteil > 30 % zu erkennen.

Schlussfolgerung

Bei den Untersuchungen hat sich herausgestellt, dass der Langzeitschweißfaktor für PVDF-IR- und HS-Schweißung mit > 0,8 festgelegt werden kann. Ferner hat sich gezeigt, dass neben der Betrachtung des Langzeitschweißfaktors das effektive Zeitstandverhalten des jeweiligen Werkstoffes von großer Bedeutung ist. Ein besseres Zeitstandverhalten des jeweiligen Formmasstyps bedeutet bei gleichem Schweißfaktor eine wesentlich höhere Standzeit und damit eine höhere Sicherheit der Schweißverbindung (**Bild 18**).

Die IR-Heizelement-Stumpfschweißverbindung stellt im Vergleich zur konventionellen Heizelement-Stumpfschweißung das für PVDF technologisch bessere Verfahren dar. Die kurzen Anwärmzeiten ohne Kontakt mit dem Heizelement vereinfachen den Schweißprozess und es ergibt sich dadurch eine wesentlich verbesserte Schweißnahtqualität.

Die IR-Technologie wird seit rund zehn Jahren mit großem Erfolg eingesetzt. Infrarot-Heizelement-Stumpfschweißmaschinen stehen für die Rohrdimension von 20 bis 315 mm Rohraußendurchmesser zur Verfügung.

Im zweiten Teil dieses Fachbeitrages werden weitere Untersuchungen an PVDF-HS-IR-Rohr-Formteil-Schweißverbindungen sowie an PP-HS-IR-Rohr-Schweißverbindungen vorgestellt.