

Das Heizkeilschweißen von Kunststoffdichtungsbahnen mit Heizelementen aus Keramik – eine Bestandsaufnahme

Dipl.-Ing. Rolf Schicketanz
Prof. Dr. rer. nat. Rudolf Weissmann

1. Einleitung

Mit Beginn des vermehrten Einsatzes von technischen Produkten aus Kunststoff in den 30er Jahren - hier insbesondere aus PVC-U - wurden auch die Möglichkeiten der Verbindung von thermoplastischen Kunststoffen durch Schweißen erkannt und erste Verfahren z. B. von A. H. Henning, dem späteren Leiter des IKV und ISL in Aachen entwickelt.

Allgemein wird unter dem Schweißen von Thermoplasten das Aufschmelzen (Plastifizieren) von thermoplastischem Material in der Fügezone und das nachfolgende Erstarren dieser Schmelze in der gewünschten Teile-Position unter definiertem Druck verstanden. Daraus ergibt sich der wesentliche Unterschied zu den Schweißverfahren für metallische Werkstoffe, bei denen die Erstarrung der metallischen Schmelzen auch ohne Fügedruck zu einer festen Verbindung führt.

Bis heute wurden zahlreiche Schweißverfahren entwickelt, die sich untereinander durch die Art der in die Fügeebene eingebrachten Wärmeenergie und die Aufbringung des Fügedrucks unterscheiden. Die zwischenzeitlich zurückgezogene DIN 1910, Teil 1 [1] zeigte eine systematische Einteilung der bekannten Schweißverfahren.

Eines der technisch häufig eingesetzten Fügeverfahren ist das Heizelementschweißen, bei dem die Wärmeenergie in die Fügefläche mittels eines beheizten Heizelementes durch Berührung oder/und Strahlung eingebracht wird und anschließend unter Druck verschweißt wird. Als eines der zwischenzeitlich bedeutendsten kontinuierlichen Schweißverfahren unter den Heizelement-Fügeverfahren wurde das Heizkeilschweißen entwickelt, das zwar auf dem Prinzip des Heizelement-Schweißens beruht, jedoch z. B. gegenüber dem stationären Heizelementstumpfschweißen die Herstellung beliebig langer Überlapp-Fügenähte mobil ermöglicht.

Das Heizkeilschweißverfahren gestattet es somit, Überlappnähte an Kunststoffbahnen in nahezu unbegrenzter Länge in hoher Fügequalität kontinuierlich maschinell ohne Zusatzwerkstoff unter reproduzierbaren Schweißparametern herzustellen. Eine neuere Entwicklung dieses Verfahrens stellt der bisher aus Metall gefertigte Heizkeil aus Keramik dar, der aufgrund seiner speziellen Materialeigenschaften technische und ökonomische Vorteile zeigt.

In dieser Bestandsaufnahme sollen die Grundlagen dazu aufgezeigt werden.

2. Der Heizkeil-Schweißprozess

2.1 Historische Entwicklung

Nach den vom Autor einsehbaren Unterlagen wurde das Fügeverfahren mit einem beheizten Keilelement seinerzeit von Karl Pfaff und Heinrich Eckhard von der Firma G.M.PFAFF AG in Kaiserslautern erstmalig patentrechtlich angemeldet. Das Patent dazu wurde ihnen unter der Nummer 732 156 am 28.01.1943 [2] durch das Reichspatentamt erteilt. Es handelte sich bei der Erfindung um eine (stationäre) "Maschine zur fortlaufenden Nahtbildung an Stoffbahnen aus warmformbaren Kunststoffen". wobei (Zitat) "... die Ränder der Stoffbahnen an ihrer Innenseite durch den elektrischen Heizkörper zum Schmelzen gebracht und unmittelbar darauf durch den Druck der Rollen so miteinander verschweißt (werden), dass eine unlösbare ... Naht entsteht."

Aus dem Jahr 1976 ist die Patentschrift Nr. 608 417 [3] bekannt, die ein "Schweißgerät zum Verschweißen von Kunststoffbahnen" betrifft und von den Herren Hans und Jacques Trösch für die Firma SARNA Kunststoff AG, Sarnen, bei dem Eidgenössischen Amt für geistiges Eigentum angemeldet wurde. Das angemeldete Verfahren "... betrifft ein Schweißgerät zum Verschweißen von Kunststoffbahnen mit Gehäuserahmen und einem Heizkeil zum Erhitzen der Bahnen ...". Die Beschreibung der Erfindung zeigt schon alle Merkmale heutiger kontinuierlich arbeitender Kunststoff-Schweißmaschinen mit einem elektrisch geregelten Heizelement in Keilform.

Einen direkten "Boom" erlebte die Schweißmaschinenentwicklung mit elektrisch beheizten metallischen Heizkeilen in den 80er Jahren, z. B. durch die Markteinführung des Typs "8365" der PFAFF AG oder durch die Eigenentwicklung der ISOBAU GmbH mit der "HKS"-Maschinenreihe.

Parallel zu den europäischen Entwicklungen wurden in den USA durch die Firmen COLUMBINE International Ltd. und CONCORDE Geotechnical Association Mitte bis Ende der 80er Jahre Heizkeil-Schweißmaschinen für kontinuierlich herzustellende Überlappnähte an Dichtungsbahnen entwickelt und vertrieben. Auch hier wurden elektrisch beheizte metallische Heizkeile verwendet.

Eine andere Entwicklung in den 80er Jahren erfolgte z. B. durch die Firma LEISTER Process Technologies mit ihrem Gerät "X 10", das eine Art "Heizkeil" in Form einer Warmgasdüse einsetzte und dadurch auch kontinuierlich Überlappnähte erzeugen konnte. Eine weitere Art der Heizkeiltechnik mit Warmgasbeheizung stellten damals auch die handgeführten Schweißmaschinen "USG" der Firma SCHLEGEL Lining GmbH dar.

In der Zwischenzeit wurden verschiedene weitere Entwicklungen mit metallischen Heizkeilen bekannt, die aber häufig nur geringe Stückzahlen wie z. B. die Schweißmaschine "ALPHA 2000" der Firmen SYSTEC/DMT erreichten oder Einzelkonstruktionen wie z. B. die Kamin-ski-Schweißmaschine "Supra" blieben.

Auf diese Entwicklungen soll hier im Detail jedoch nicht näher eingegangen werden.

2.2 Grundlagen der Schweißtechnik mit Heizelementen

Die Vorgänge beim Fügen von thermoplastischen Kunststoffbahnen, bevorzugt aus Polyolefinen, wurden schon anschaulich z. B. von P. Michel [4] und anderen vor diesem Auditorium dargestellt, sollen aber in gekürzter Form nachfolgend nochmals in Erinnerung gerufen werden.

Beim kontinuierlichen Heizkeilschweißverfahren sind der Plastifizierungs- und der Fügevorgang räumlich und damit zeitlich voneinander getrennt. Der Schweißprozess beginnt mit dem Kontakt der Fügeflächen am erwärmten Heizkeil zunächst unter leichtem Führungsdruck, auch Angleichphase genannt und der weiteren drucklosen Plastifizierung des Fügebereiches mit der Erwärmungslänge L_E , dem fast unmittelbar danach der Fügevorgang durch die Antriebs- und gleichzeitig Fügedruckrollen folgt. Dem schließt sich die Abkühlung der gefügten Nahtspur drucklos ohne weitere Vorrichtungshilfen durch die niedrigere Umgebungstemperatur an.

Beim Erwärmungsvorgang (= thermische Prozessgröße) nimmt bei teilkristallinen Thermoplasten, wie z. B. Polyethylen, mit Überschreiten der Kristallitschmelztemperatur die Beweglichkeit der Molekülketten erheblich zu. Dieser Aggregatzustand "viskose Schmelze" hält beim Heizkeil-Schweißverfahren nur wenige Sekunden an, diese Zeitspanne lässt aber in Verbindung mit dem Fügedruck bei sachgerecht gewählten Maschinen-Einstellwerten durch Eigendiffusion bzw. intermolekulare Vorgänge eine Verhakung und Verschlaufung der Kettenenden der Fügepartner zu.

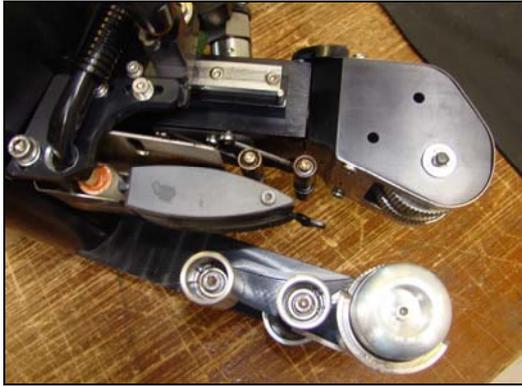
Durch den Fügedruck (= rheologische Prozessgröße) gleichen sich die beiden viskosen Schmelzeoberflächen durch Deformation an und bilden dadurch einen idealen Kontaktzustand. Dadurch können sich die Moleküle über die Grenzflächen hinweg in das Molekulargefüge des anderen Fügepartners bewegen. Ferner wird durch den Fügedruck ein Schmelzefluss bewirkt, wodurch (Zitat sinngemäß): "die Moleküle aus ihrer knäuelartigen Ruhelage in eine gestreckte Lage versetzt (werden) und die zugeführte kinetische Energie speichern. Nach Abklingen des Strömungsvorganges wird die gespeicherte Energie in erhöhte treibende Energie zur Eigendiffusion umgesetzt, die zu einer weiteren intensiven Verzahnung der Molekülketten führt".

Die Dicke der viskosen Schmelzeschicht als thermische Prozessgröße wird mit dem Term L_0 beschrieben und steht für die durch den Fügedruck hervorgerufene Dickenminderung, "Fügeweg" s_F bzw. auch Δd_N genannt, als rheologische Prozessgröße mit 50 bis 90 % zur Verfügung [5].

2.3 Heizkeile aus Keramikwerkstoff

Die Entwicklung und der Einsatz von Heizelementen aus spezieller Keramik stellt seit etwa 10 Jahren eine interessante Weiterentwicklung der Heizkeil-Technologie dar.

In den technischen Dokumentationen der Firma HERZ GmbH aus dem Jahr 2004 wird dargelegt, dass für Heizelemente aus Keramik zum Fügen von thermoplastischen Kunststoffen - hier insbesondere dem kontinuierlichen Heizkeilschweißverfahren - das vergleichsweise geringe Spezifische Gewicht, die hohe Festigkeit, die besondere Abrasionsbeständigkeit, die Korrosionsbeständigkeit gegenüber thermischen Zerfallsprodukten aus den zu fügenden Thermoplast-Bahnen bei hohen Heizkeiltemperaturen sowie einer erhöhten Wärmeleitfähigkeit zur Vergleichmäßigung des Temperaturprofils am Heizelement von Vorteil sind.



(Quelle: HERZ GmbH)

Bild 1: Eingebauter Heizkeil aus Keramik sowie Einzel-Keile aus Kupfer (seitliche Beheizung) und Keramik (Beheizung durch hintere Keramikplatte)

Die Vorteilen der Materialeigenschaften derartiger Heizelemente aus Keramik gegenüber solchen aus Metall bieten Einsatzmöglichkeiten, die über den bisherigen Rahmen hinausgehen.

Die Bestandsaufnahme aus den derzeitigen versuchstechnischen und insbesondere praktischen Erkenntnissen zeigt, dass Heizkeile aus Keramik:

- besonders korrosionsfest sind und damit sowohl bei kritischen Thermoplasten, die bei höheren Temperaturen korrosive Zerfallsprodukte abspalten (z. B. PVC) als auch in aggressiver Umgebung (z. B. Kalibergbau) eingesetzt werden können,
- gleichmäßigere Temperaturverteilung gegenüber Heizkeilen mit seitlicher Patronenbeheizung aufgrund von Heizelementen aus Keramikheizplatten aufweisen, die am hinteren Keilende angebracht sind,
- eine kürzere Einregelungs-Zeit auf die eingestellte Heizkeil-Solltemperatur bei Beginn des Füge-/Plastifizierungsvorganges an Dichtungsbahnen von über 50 % gegenüber Heizkeilen aus Metall aufweisen,
- ein geringeres Anhaften von überhitzten Kunststoffresten am aufgeheizten Heizkeil aufweisen und damit eine höhere Fügenaht-Qualität zu erwarten ist,
- bei den heute üblichen geprägten Strukturbahnen eine hochwertige Nahtqualität im Zeitstandversuch auch ohne Abarbeiten der Oberflächenstruktur ermöglichen,
- aufgrund ihrer hohen Festigkeit und der sehr großen Härte keine Einprägungen ergeben, wie sie bei Heizkeilen aus Kupfer an der vorderen Keilspitze beim versehentlichen Zusammendrücken der Antriebsrollen ohne Dichtungsbahn-Zwischenlage auftreten.

Mit dem Heizkeil aus einem keramischen Werkstoff können Einsätze zum Fügen thermoplastischer Kunststoffe, die bisher nur mit unterschiedlichen metallischen Heizkeilen aus Kupfer, Stahl, Aluminium oder sogar Silber möglich waren, sozusagen aus "einer Hand" realisiert werden.

3. Ergebnisse von Langzeituntersuchungen

Im Zusammenhang mit Schweißversuchen mit unterschiedlichen Parametereinstellungen unter Einsatz von Heizkeilschweißmaschinen mit Heizkeilen aus Keramik und Kupfer werden auch Zeitstand-Schälversuche in Anlehnung an DVS-Richtlinie 2226-4 bzw. DIN EN 12814-3 in Verbindung mit der BAM-Zulassungsrichtlinie für Kunststoffdichtungsbahnen [6] durchgeführt. Die Prüfungen erfolgen in einem Warmwasserbad bei 80°C wie nachfolgend dargestellt:



(Quelle: Autor)

Bild 2: Prüfeinrichtung für Zeitstand-Schälversuche der MPA Hannover und Kohäsionsbruch in der Fügeebene einer Überlapp-Schweißnahtspur

Aus umfangreichen Zeitstand-Schälversuchen des Autors an Überlappnähten mit Prüfkanal an der MPA Hannover in den Jahren 2000 bis 2002 (unveröffentlicht) ist bekannt, dass neben den gewählten Schweißparametern auch der Formstoff der Kunststoffdichtungsbahnen einen wesentlichen Einfluss auf die Standzeit unter den gewählten Prüfbedingungen ausübt. Gleiches ermittelte auch G. Lüders [7] in seinen umfangreichen Versuchen. Nach unseren Erfahrungen können somit nur Prüfergebnisse an Dichtungsbahnen aus gleichen Formstoffen miteinander verglichen werden. Fügenähte zwischen 2 Dichtungsbahnen aus unter-

schiedlichen Formstoffen tendierten zu dem Formstoff mit der geringeren Standzeit. Die nachfolgende Tabelle 1 zeigt diese deutliche Tendenz.

Die Proben wurden damals mit Schweißmaschinen gefertigt, die einen Heizkeil aus Kupfer aufwiesen.

Probenbezeichnung/Formstoff	Probenzahl	Fügewege s_f (Δd_N) mm	Standzeit (h)	Versagensart
DOWLEX 2342M	60	Bereich 0,50 - 0,65	$x > 300$	Kohäsionsbruch Fügeebene
VESTOLEN A 3512 R	50	Bereich 0,45 - 0,70	$x > 40$	siehe vor
INNOVEX LL 6908 AA	36	Bereich 0,45 - 0,65	$x > 100$	siehe vor
DOWLEX 2342M/ VESTOLEN A 3512 R	36	Bereich 0,50 - 0,65	$x > 60$	siehe vor

Tabelle 1: Heizkeil-Überlappnähte mit Prüfkanal

Für die zur Zeit an der MPA Hannover laufenden Zeitstand-Schälversuche an Fügenähten, die mit einer Schweißmaschine (Typ COMON) und einem Heizkeil aus Keramik und Dichtungsbahnen aus DOWLEX 2342M angefertigt wurden, liegen leider noch keine endgültigen Ergebnisse vor; sie werden anlässlich der Tagung vorgetragen werden.

Die Prüfungen in den Jahren 2000 bis 2002 erfolgten bei einer Badtemperatur von 80°C in deionisiertem Wasser unter Zugabe von 2 % Arkopal N 110 und 0,9 % Äthylenglykol bei ständiger Umwälzung. Die Prüflast betrug 4 N/mm. Die derzeitigen Versuche entsprechen den vorgenannten Versuchsbedingungen, jedoch mit einer Prüflast von 6 N/mm gemäß der aktuellen BAM-Zulassungsrichtlinie für Kunststoffdichtungsbahnen [6].

4. SiSiC-Keramik als Werkstoff für Heizkeile

Heizkeile aus einer technischen Keramik bieten aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften gegenüber Hezelementen aus Metallen, hier zumeist Kupfer oder Stahl, einige Vorteile.

Bisher bekannt geworden und praktisch erfolgreich erprobt wurden Heizkeile aus Siliziuminfiltriertem Siliciumcarbid (SiSiC), worüber nachfolgend berichtet wird.

Die vorgenannte technische Keramik wurde gewählt, um das von Metallen her bekannt hohe Wärmeleitvermögen zu erreichen, wobei das Hezelement (Heizkeil) aus einem keramischen Basiswerkstoff und einem einfiltrierten, gut wärmeleitenden Halbmetall besteht.

Der Werkstoff SiSiC besteht zu ca. 85 bis 94 % aus Siliciumcarbid (SiC) und entsprechend aus 15 bis 6 % metallischem Silicium [8]. SiSiC besitzt praktisch keine Restporosität. Dies wird erreicht, indem ein Formkörper aus Siliciumcarbid und Kohlenstoff mit metallischem Silicium infiltriert wird. Die Reaktion zwischen flüssigem Silicium und dem Kohlenstoff führt zu einer SiC-Bindungsmatrix, der restliche Porenraum wird mit metallischem Silicium aufgefüllt. Vorteil dieser Herstellungstechnik ist, dass im Gegensatz zu den Pulversintertechniken die Formkörper während des Silicierungsprozesses keine Schwindung erfahren. Daher können komplexe Bauteile mit präzisen Abmessungen hergestellt werden. Der Einsatzbereich des SiSiC ist aufgrund des Schmelzpunktes des metallischen Siliciums auf ca. 1400 °C begrenzt. Bis zu diesem Temperaturbereich weist SiSiC eine hohe Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit, verbunden mit guter Temperaturwechselbeständigkeit und Verschleißbeständigkeit auf.

Überraschenderweise wurde bei den zahlreichen Schweißversuchen und Praxisanwendungen zudem vergleichsweise nur geringe Anhaftungen des gefügten thermoplastischen Kunststoffes am Heizkeil festgestellt. Diese stoffabstossende Eigenschaft hat den Vorteil, dass die üblicherweise anhaftende, durch die hohen Heizkeiltemperaturen von 350 bis über 400 °C gecrackte Thermoplast-Rückstandsschicht nur zu geringen Maßen beim Fügevorgang in die plastische Schweißschmelze übertragen wird.

Zusammengefasst sind die speziellen Eigenschaften eines Hezelementes aus Keramik:

- sehr große Härte
- exzellente Korrosionsbeständigkeit auch bei sehr hohen Einsatztemperaturen
- Thermoschockbeständigkeit
- hohe Wärmeleitfähigkeit
- geringe Wärmedehnung
- hohe Verschleißfestigkeit und sehr gute Gleiteigenschaften.

Durch seine gute Wärmeleitfähigkeit und Temperaturbeständigkeit eignet sich dieser Werkstoff besonders für wärmetechnische Anwendungen. Einsatzgebiete sind zum Beispiel Kühlkörper und Kühlplatten für die Leistungselektronik in Fahrzeugen oder in der Elektrotechnik oder als Heizkörper, wie z. B. Heizkeile.

Für die Verwendung von SiSiC als Werkstoff für Heizkeilelemente sind die thermophysikalischen Materialeigenschaften von Wichtigkeit. Sie sind in der nachfolgenden Tabelle zusammen mit Kupfer und Stahl vergleichend zusammengestellt.

Material	ρ	λ	c_p	ϵ	a	b
SiSiC	3100	110	880	0.8	$4.0 \cdot 10^{-5}$	17323
Cu	8300	370	420	0.28	$1.1 \cdot 10^{-4}$	35900
Stahl	7600	25	500	0.2-0.3	$4.4 \cdot 10^{-6}$	7900

Tabelle 2: Thermophysikalische Materialeigenschaften [14]

4.1 Der Erwärmungsprozess

Die Erwärmung der Kunststoffdichtungsbahn wird bestimmt vom Wärmefluss, der vom Heizkeil in die zu schweißenden Dichtungsbahnen fließt. Dieser Wärmefluss wird von folgenden Parametern beeinflusst:

- Oberflächentemperatur des Heizkeils
- Wärmeleitung und Wärmekapazität des Heizkeils
- Wärmeleitung und Wärmekapazität der Kunststoffdichtungsbahn
- Kontaktdauer zwischen Heizkeil und Kunststoffdichtungsbahn
- Wärmestrahlung vom Heizkeil zur Kunststoffdichtungsbahn.

Bei Dichtungsbahnen ohne Oberflächenstruktur wird der Fügebereich durch Wärmeleitung von der Heizkeiloberfläche über die Oberfläche der Dichtungsbahn erwärmt. Eine bestimmende Größe ist hierbei die Kontakttemperatur T_K , die sich bei Berührung von Heizkeil und Dichtungsbahnoberfläche unmittelbar einstellt.

Die Kontakttemperatur T_K ergibt sich aus folgendem Ausdruck:

$$T_K = \frac{b_{HK} \cdot T_{HK} + b_{PE} \cdot T_{PE}}{b_{HK} + b_{PE}}$$

Wobei T_{HK} und T_{PE} die Oberflächentemperaturen des Heizkeils bzw. der Dichtungsbahn sind und b_{HK} und b_{PE} die jeweiligen dazugehörigen Wärmeeindringkoeffizienten. Bild 3 zeigt das Ergebnis der Berechnung.

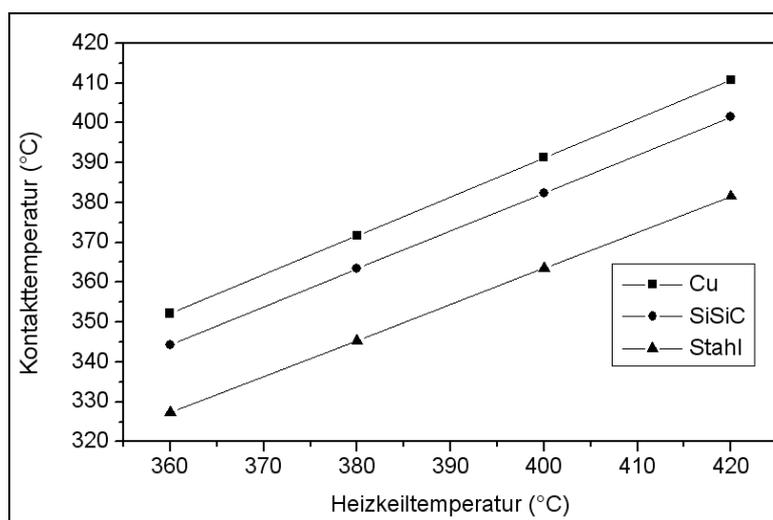


Bild 3: Abhängigkeit der Kontakttemperatur von Temperatur und Material des Heizkeils

Für die Berechnung wurde eine Ausgangstemperatur der Dichtungsbahn aus Polyethylen von 23°C zugrunde gelegt.

Eine weitere Größe, die einen Einfluss auf die Wärmeübertragung haben kann und meist nicht berücksichtigt wird, ist der Kontaktwiderstand auf den Wärmefluss durch die Grenzfläche Heizkeil/Dichtungsbahn. Der Kontaktwiderstand verursacht einen Sprung im Temperaturverlauf zwischen der Oberfläche des Heizkeils und der Dichtungsbahnoberfläche und zeigt dadurch eine merkliche Verringerung des Wärmeflusses vom Heizkeil in die Dichtungsbahn. Der Kontaktwiderstand ist abhängig vom Andruck der Dichtungsbahn an die Heizkeiloberfläche sowie von deren Oberflächenrauigkeit, von Oberflächendeformationen und von Korrosionsschichten. Starke Korrosionsschichten treten beispielsweise bei Kupfer-Heizkeilen auf, wenn PVC-Bahnen geschweißt werden, da das bei der hohen Heizelement-Temperatur durch Zerfall entstehende Chlor mit dem Kupfer des Heizkeils Kupfer(II)-chlorid bildet und

dadurch die Cu-Oberfläche angegriffen wird. Es entsteht CuCl_2 , das mit dem Luftsauerstoff zu CuO und Cl_2 weiterreagiert. Ein extremes Beispiel dafür zeigt Bild 4.



(Quelle: HERZ GmbH)

Bild 4: Korrodierter Cu-Heizkeil

Ein Heizkeil aus SiSiC ist dagegen völlig inert gegenüber dem beim Schweißen von PVC entstehenden Chlorgas.

Eine weitere Folge des Kontaktwiderstandes durch eine Korrosionsschicht ist, dass sich an der Kontaktfläche des Heizkeiles zur Dichtungsbahn die Kontakttemperatur nicht unmittelbar einstellt, sondern erst nach einer gewissen Kontaktzeit in Abhängigkeit vom Kontaktwiderstand [9]. Der Temperaturverlauf $T_0(t)$ ist wie folgt gegeben [10]:

$$T_0(t) = (T_{HK} - T_F) \cdot (1 - \text{erfc}(h_K \sqrt{at}) \cdot \exp(h_K^2 at)).$$

Dabei ist T_{HK} die Heizkeiltemperatur, T_F die Raumtemperatur der Dichtungsbahn und erfc ist die komplementäre Fehlerfunktion. Der Term a ist dabei der Temperaturleitwert des Materials der Dichtungsbahn und $h_K = 1/\delta$, wobei δ die effektive Dicke der Korrosionsschicht ist [10]. Für eine Korrosionsschicht aus CuO ist der verzögerte Anstieg der Temperatur an der Dichtungsbahnoberfläche für verschiedene effektive Dicken der Korrosionsschicht in Bild 5 dargestellt.

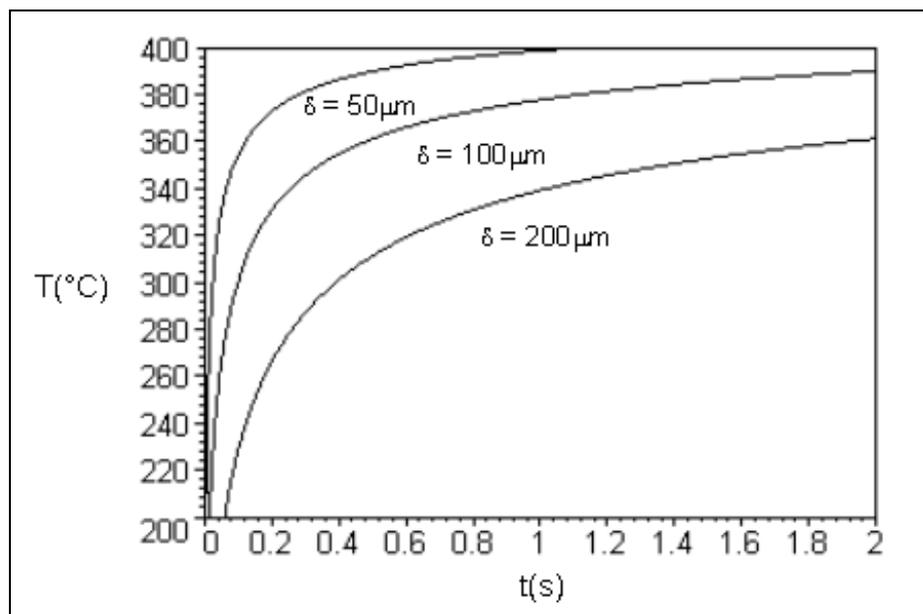


Bild 5: Zeitlicher Verlauf der Kontakttemperatur

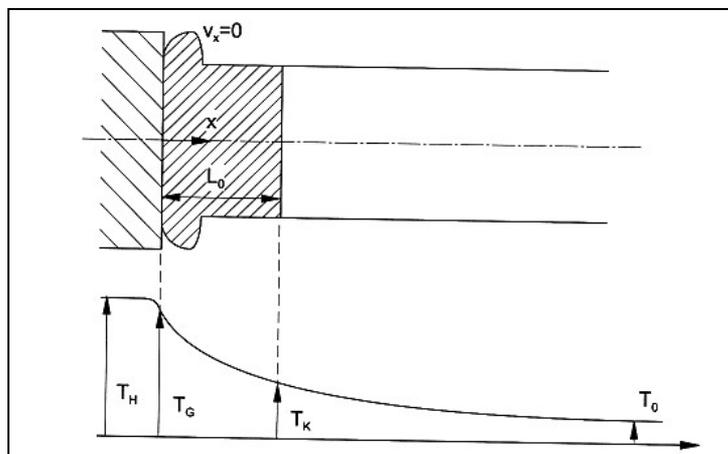
Bei einer beispielhaft angenommenen Schweißgeschwindigkeit von 1,3 m/min und einer Kontaktlänge am Heizkeil von 60 mm beträgt die Kontaktzeit etwa 2.8 sec. Unter Annahme einer effektiven Korrosionsschichtdicke von $\delta = 200 \mu\text{m}$ wird damit die für einen optimalen Fügevorgang erforderliche Grenzflächentemperatur zur Schmelzebildung bei weitem nicht erreicht. Damit werden auch die für den erfolgreichen Fügeprozess erforderlichen Prozessparameter nicht erzielt, um die geforderte Füge-Qualität der Überlappnaht zu erzielen.

4.2 Bestimmung der Schmelzeschichtdicke

Die Dicke L_0 der Schmelzeschicht ist ein entscheidender Prozessparameter für den Fügeprozess der Kunststoffdichtungsbahnen und bestimmt letztendlich die Qualität der Überlappnahte.

Die Bedeutung der Schmelzeschichtdicke L_0 für die Güte der Heizkeil-Überlappschweißnähte wurde von P. Michel, G. Lüders und W. Müller [4,7,11] auch vor diesem Auditorium schon hinreichend dargelegt. Ein Hinweis in der derzeit gültigen DVS-Richtlinie 2225-4, Abschnitt 5.2 [13], berücksichtigt die Möglichkeit der Parameterregelung über die Zielgrößen "Schmelzeschichtdicke L_0 " und "Fügeweg $\Delta d_{N1/2} (= s_F)$ ".

Da aber in der Praxis weiterhin Unklarheit über das L_0 -Modell herrscht, soll dieses an dem vereinfachten Beispiel des Heizelement-Stumpfschweißens kurz erläutert werden.

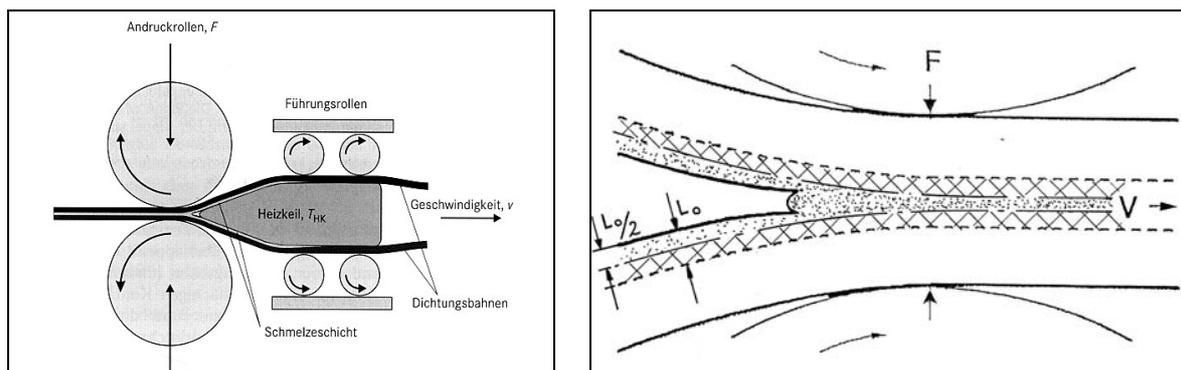


(Quelle [12])

Bild 6: Schematische Darstellung des Fügens (hier: Heizelementstumpfschweißen)

Das Bild zeigt ein Rohrwandelement, welches durch ein Heizelement (hier: Heizspiegel) erwärmt wurde. L_0 ist dabei der Bereich des sich in der Rohrwandung einstellenden Temperaturverlaufs zwischen Heizelement-Grenzflächentemperatur T_G und der Rohrwandtemperatur T_K , die das Ende des thermoplastischen Schmelzebereichs darstellt und nicht mehr für Fließvorgänge beim Fügen herangezogen werden kann. Untersuchungen für teilkristalline Thermoplaste, wie Polyethylen, haben gezeigt, dass für den Fügweg s_F zwischen etwa 50 % bis 90 % von L_0 zur Verfügung stehen.

Dieses Modell lässt sich nun - wie G. Lüders und andere aufgezeigt haben - auf das Fügen von Kunststoffdichtungsbahnen mittels des Heizkeilverfahrens übertragen [7,11]. In Bild 7 ist der Fügevorgang dargestellt, bei dem die viskose Schmelze - je nach Fügedruck - bis zu einem optimalen Anteil der Schmelzeschichtdicke L_0 durch einen rheologischen Fließvorgang zusammengedrückt wird und teilweise seitlich austritt.



(Quelle: [7, 11])

Bild 7: Schematische Darstellung des Fügevorganges des Heizkeil-Schweißverfahrens

Die sich im abgekühlten Zustand einstellende Dickenänderung in der Fügefläche wird als "Fügeweg" s_F bzw. $\Delta d_{N1/2}$ (nach DVS-Regelwerk) bezeichnet.

Zur Berechnung der entsprechenden Fügeparameter-Größen wurde vom Autor das Modell von H. Potente [12] und H.J. Michel [4] verwendet und zu einem Berechnungsprogramm ausgestaltet. Auf die Wiedergabe der einschlägigen Formeln und des Rechenganges wird hier verzichtet, da diese in der angegebenen Literatur zu finden sind. Die für die Rechnung benötigten thermophysikalischen Materialwerte des teilkristallinen PE-HD sind nachfolgend zusammengestellt.

ρ		λ		c_p		h_s	T_s
s	m	s	m	s	m		
960	790	0.44	0.25	1700	2300	$2.93 \cdot 10^5$	130

Tabelle 3: Thermophysikalische Materialwerte von PE-HD (s= solid, m= melt)

Basierend auf den Daten von Schweißversuchen mit unterschiedlichen Schweißparametern, die bei der Firma Herz GmbH in Neuwied mit einem Keramik- und einem Kupferheizkeil bei gleicher Maschinenkonstellation (Typ COMON, mit Datenlogger) durchgeführt wurden, konnten die Prozessparameter Schmelzeschichtdicke L_0 und Fügewegverhältnis s_F/L_0 berechnet werden (Tabelle 4). Zur Berechnung der Fügezeit t_F wurde für die Kontaktweglänge L_K ein Wert von 60 mm angenommen (siehe auch Bild 5, Sektion II). Die Fügezeit ist dann gegeben durch $t_F = L_K / v$, wobei v die Schweißgeschwindigkeit ist. Die Ergebnisse sind in Bild 8 auf-

getragen. In dem Diagramm wurde noch der anzustrebende Bereich der Prozessparameter nach G. Lüders [7] markiert:

Schmelzeschichtdicke L_0 0,75 bis 0,9 mm

Fügewegverhältnis s_f/L_0 0.50 bis 0.9.

Nr	Heizkeil	T_{HK} (°C)	v (m/min)	s_f (mm)	L_0 (mm)	s_f/L_0	Oberflächenstruktur
1	Keramik	400	1.3	0.64	0.76	0.84	glatt
2	Keramik	420	1.3	0.65	0.78	0.83	glatt
3P	Keramik	420	1.1	0.78	0.85	0.90	Struktur
4P	Keramik	415	1.1	0.75	0.85	0.88	Struktur
5P	Keramik	420	1.6	0,61	0.76	0.80	glatt
6	Kupfer	380	1.3	0,55	0.73	0.75	glatt
7	Kupfer	420	2.0	0.35	0.63	0.56	glatt
8	Kupfer	415	1.25	0.70	0.79	0.89	glatt

Tabelle 4: Prozessparameter der Schweißversuche

Das Diagramm zeigt, dass die Prozessparameter der Schweißversuche mit dem Keramikheizkeil im Bereich des nach G. Lüders anzustrebenden Bereiches liegen. Bei den Versuchen 3P und 4P handelt es sich um Schweißversuche mit Strukturbahnen. Hierzu ist jedoch kritisch anzumerken, dass dafür im Grunde genommen das Modell von H. Potente nicht anwendbar ist, da für Schweißungen an Strukturbahnen unterschiedliche Wärmeübertragungsmechanismen eine Rolle spielen (s. nachfolgendes Kapitel)

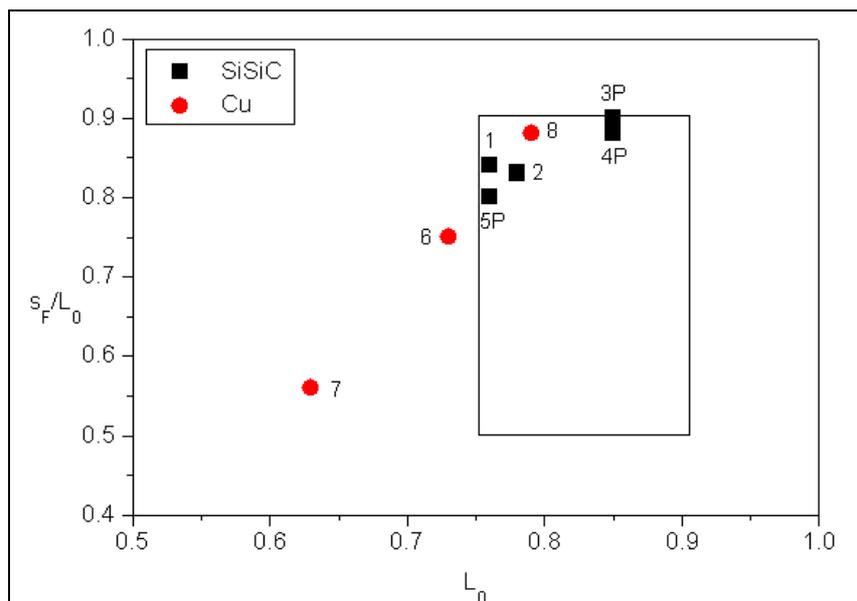


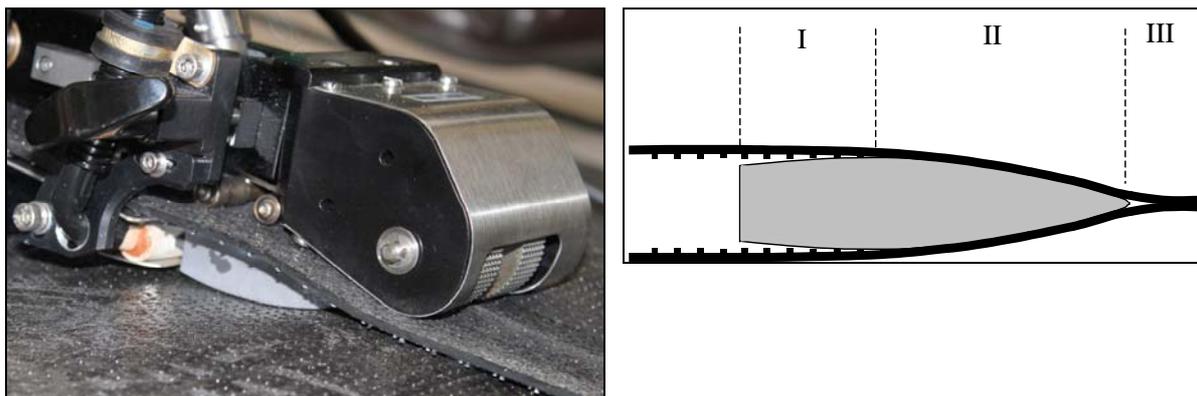
Bild 8: Prozessparameter für den SiSiC (■) – und den Kupferheizkeil (●)

5. Vorteil des Keramikheizkeils bei Strukturbahnen.

Das direkte Fügen von Dichtungsbahnen mit Oberflächenstruktur ohne deren vorherige Entfernung führte bisher auf Baustellen häufig zu Diskussionen. Der Schweißer hatte dabei die Hoffnung, dass ihm eine qualitativ gute und zeitstandfeste Fügenaht ohne Abarbeitung der Struktur gelingt. Zahlreiche Versuche haben aber bewiesen, dass dieses mit einem Heizkeil aus Metall nicht bzw. zumeist nicht möglich ist.

Aktuelle Versuche der Firma HERZ GmbH zeigen, dass beim Schweißen von Dichtungsbahnen mit strukturierter Oberfläche ohne Entfernung der Struktur (hier: Strukturtyp "Megafriktion MF/MF" und "Mikrospike MST/MSB") mit dem Keramikheizkeil ausreichend gute Ergebnisse erreicht werden können. Der Grund dafür ist, dass die Wärmestrahlung des Keramikkörpers einen merklichen Beitrag zur Erwärmung der Strukturbahnen leistet. Dies wird aus dem Bild 9 ersichtlich.

Der Erwärmungsprozess der Bahnen beim Gleiten über den Heizkeil bis zu den Fügerollen lässt sich in drei Zonen einteilen: Strahlungsheizung (I), Kontaktheizung (II) und Fügebereich (III).



(Quellen: HERZ GmbH, Autor)

Bild 9: Erwärmungszonen beim Heizkeilschweißen von Strukturbahnen:
I Strahlungsheizung, II Kontaktheizung, III Fügebereich

Maßgebend für den Beitrag zur Erwärmung der Dichtungsbahn durch Wärmestrahlung ist der Sektor I. Dieser Bereich zeichnet sich dadurch aus, dass noch kein vollständiger Kontakt zwischen Heizkeil und Dichtungsbahn vorhanden ist. Erst am Anfang des Sektors II sind die beidseitig ca. 1 mm hohen, geprägten Strukturnoppen der Dichtungsbahn soweit abgeschmolzen, dass nun ein flächiger Kontakt zustande kommt und sich eine Schmelzeschicht bilden kann.

Die Wärmestrahlung im Sektor I wird beschrieben durch das Plancksche Strahlungsgesetz:

$$I_{\text{rad}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{\text{HK}}^4$$

Dabei steht ε für die Emissivität der Oberfläche des Heizelements, $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ für die Stefan-Boltzmannkonstante und T_{HK} für die Temperatur des Heizelements in Kelvin. Die SiSiC-Keramik hat mit $\varepsilon = 0.8$ eine wesentlich höhere Emissivität als Kupfer mit 0.3 [14].

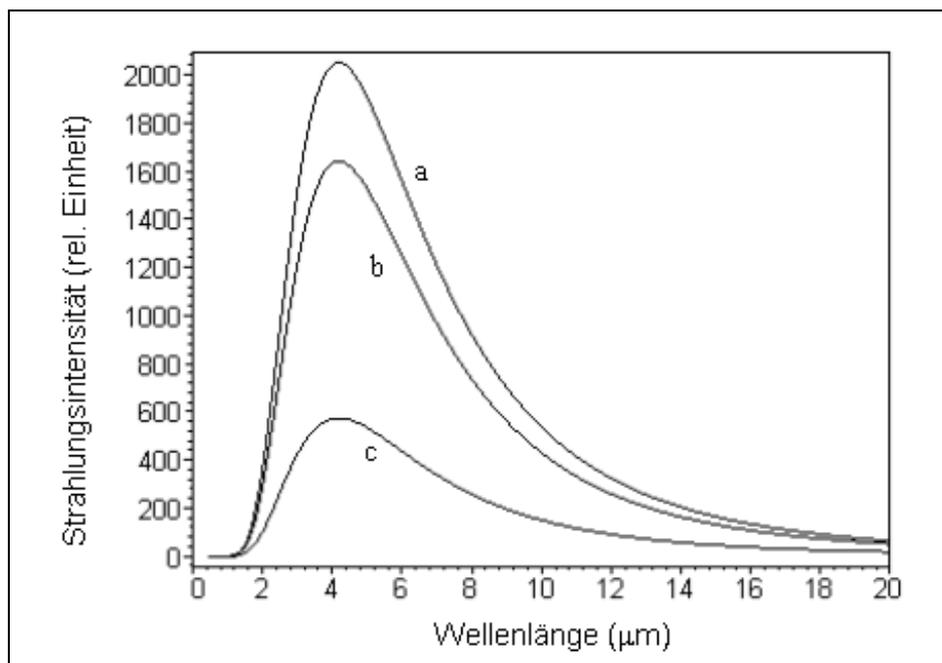


Bild 10: Vergleich der Wärmestrahlung eines Schwarzen Strahlers (a), SiSiC (b) und Kupfer (c)

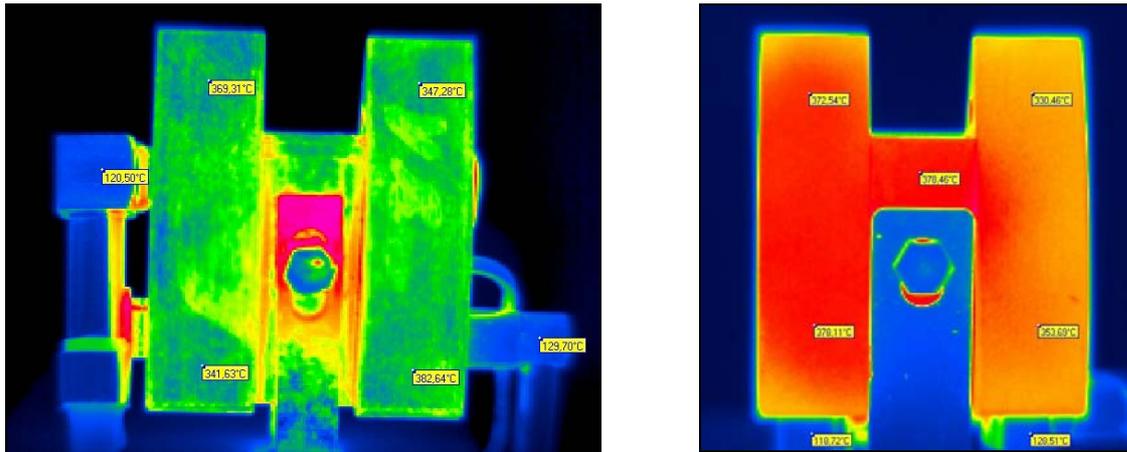
Bild 10 zeigt den Vergleich der spektralen Strahlungskurven für einen Schwarzen Strahler (a) mit $\epsilon = 1$, SiSiC (b) und Kupfer (c) bei einer Temperatur von 400 °C (673 K).

Das Diagramm zeigt, dass die Wärmestrahlung, die der Keramikheizkeil aussendet, deutlich höher ist im Vergleich zu einem Heizkeil aus Kupfer. Sie liefert damit einen höheren Beitrag zur Vorerwärmung der Strukturbahn im Sektor I, so dass insgesamt die Wärmebilanz und damit auch die Qualität der Fügenaht der Dichtungsbahnen besser ausfällt.

7. Gleichmäßige Temperaturverteilung am Heizkeil

Die Firma HERZ GmbH hat am Forschungsinstitut für Anorganische Werkstoffe - Glas/Keramik - GmbH in Höhr-Grenzhausen thermographische Untersuchungen mittels einer Infrarot-Thermokamera durchführen lassen [15]. Gemessen wurde die Temperaturverteilung auf der Heizkeiloberfläche aus Kupfer, Stahl und Keramik während der Aufheiz- und Abkühlphase. Dabei zeigte sich entsprechend Bild 11, dass die Temperatur auf der Oberfläche des Keramikheizkeils homogener verteilt ist als beispielsweise auf der des untersuchten Kupferkeils.

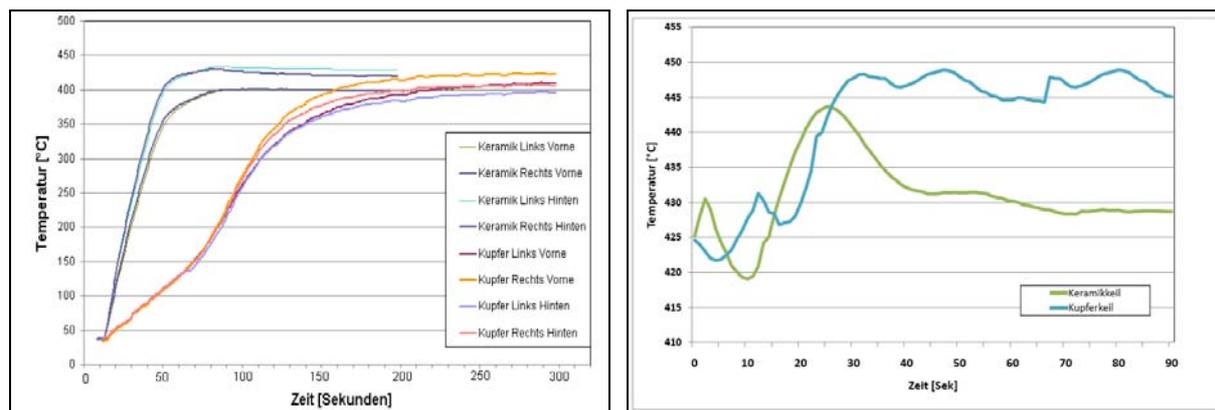
Die Ursache dafür muß noch genauer untersucht werden. Ein möglicher Grund könnten Inhomogenitäten im Kupfermaterial sein. Wahrscheinlicher ist, dass die gleichmäßige Temperaturverteilung beim SiSiC-Keil auf die neuen Flächenheizelemente aus Keramik zurückgeführt werden kann anstelle der üblicherweise seitlich angeordneten Heizpatronen, wie sie auf dem Bild des Kupferkeils zu sehen sind. Die Keramik-Flächenheizelemente ermöglichen im Vergleich zu den üblichen Heizpatronen einen gleichmäßigeren Wärmeeintrag in den Heizkeil, verbunden mit einer sensibleren Temperaturregelung.



(Quelle: HERZ GmbH)

Bild 11: Vergleich der Temperaturverteilung bei einem Keramik- und einem Kupferkeil durch thermographische Aufnahmen

Ferner hat sich aus ergänzenden thermographischen Untersuchungen ergeben, dass die Aufheizzeit bis zur Zieltemperatur (hier: 420°C) bei dem Keramikheizkeil mit Flächenheizelement ca. 3-fach kürzer gegenüber einem Patronen-beheizten Kupferkeil ist. Zudem wurde nach einer spontanen Oberflächenabkühlung in der Wiederaufheiz-Phase bei gleicher Regelungscharakteristik beim Keramikkeil eine Regelungsübersteuerung z. B. von 15°C über ca. 10 sec gegenüber am Patronen-beheizten Kupferheizkeil von 40°C über 45 sec. gemessen (s. a. Bild 12).



(Quelle: HERZ GmbH)

Bild 12: Aufheizkurven und Regelungs-Übersteuerung bei spontaner Oberflächenabkühlung

8. Zusammenfassung

Die in den 40-er Jahren begonnene Entwicklung des Heizkeilschweißens, zunächst als stationäre Technik, ab den 70-er Jahren schon als mobile Schweißmaschinen zur Herstellung großflächiger Abdichtungen mit Kunststoffdichtungsbahnen, hat heute einen technischen Stand erreicht, der eine Prozessfähigkeit des Fügevorganges mit Heizkeilschweißmaschinen nahe legt. Erste Ansätze dazu wurden von H. Potente, G. Lüders und anderen formuliert.

Seit etwa 5 Jahren steht für Heizkeile ein neuer Werkstoff in Form von Technischer Keramik zur Verfügung. Umfangreiche schweißtechnische Versuche und der nunmehr mehrjährige Praxiseinsatz haben die werkstofflichen Vorteile gegenüber traditionellen Heizkeilwerkstoffen gezeigt. Die weitere Entwicklung des Heizkeil-Materials hat so mit der Entwicklung der Regelungstechnik des Heizkeilschweißens Schritt gehalten, dass heute für unterschiedliche Anwendungen die geeignete Ausführung zur Verfügung steht.

Vor 2 Jahren gelang es auch, Flächenheizelemente aus Keramik anstelle der üblicherweise seitlich angeordneten 3 bis 4 Heizpatronen für die Erwärmung des Keramik-Heizkeiles zu entwickeln. Dadurch konnte die bisherige Heizleistung an Keramikkeilen von 1600 W auf 2300 W deutlich gesteigert werden. Durch das an der Rückseite des Heizkeils angeordnete flächige Heizelement kann nach Bedarf auch eine externe Temperaturüberprüfung während des Schweißvorganges durchgeführt werden.

In der vorliegenden Ausführung wurde eine Bestandsaufnahme des derzeitigen Kenntnisstandes zu dem neuen Heizkeilwerkstoff "Keramik" versucht, wobei sicherlich noch nicht alle Einsatz-Möglichkeiten und -Vorteile dieses Werkstoffes ausgeschöpft wurden.

Literatur

- [1] DIN 1910-1: "Schweißen; Begriffe, Einteilung der Schweißverfahren", 09-1977
- [2] Patentschrift Nr. 732 156; Reichspatentamt, 23. 02.1943
- [3] Patentschrift Nr. 608 417; Eidgenössisches Amt für Geistiges Eigentum, 15.01.1979
- [4] Michel, P. Qualitätssicherung beim Schweißen von Kunststoffdichtungsbahnen, in: Tagungsband der 11. Fachtagung "Die sichere Deponie", Süddeutsches Kunststoffzentrum Würzburg, 1995
- [5] Lüders, G. Praxiserprobung eines Modells zur Bewertung der Qualität von Heizkeilgeschweißten Überlappnähten, in: Tagungsband der 15. Fachtagung "Die sichere Deponie", Süddeutsches Kunststoffzentrum Würzburg, 1999
- [6] Richtlinie für die Zulassung von Kunststoffdichtungsbahnen für Deponieabdichtungen; Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), 3. Auflage, 03-2010
- [7] Lüders, G. Zeitstandsverhalten von Heizkanalschweißnähten in Zusammenhang mit ihren Schweißparametern, in: Tagungsband der 13. Fachtagung "Die sichere Deponie", Süddeutsches Kunststoffzentrum Würzburg, 1997
- [8] Shaffer, P. T. B. Engineering properties of Carbides, in: Engineered Materials Handbook, Vol. 4, Ceramic and Glasses, ASM International, 1991
- [9] Michel, H. J. Untersuchung zur Verschweißbarkeit unterschiedlicher HD-Polyethylene mittels Heizelementestumpfschweißen, Dissertation, RWTH Aachen 1984
- [10] Muchowski, E. Transient Heat Transfer Between a Perfect Conductor with Heat Generated in it and a Semi-infinite Solid Including a Contact Resistance, Wärme-und Stoffübertragung 12 (1979) 161-164
- [11] Müller, W. Handbuch der PE-HD-Dichtungsbahnen in der Geotechnik, Birkhäuser Verlag, Basel Boston Berlin, 2001
- [12] Potente, H. Fügen von Kunststoffen, Carl Hanser Verlag, München 2004
- [13] DVS-Richtlinie 2225-4 " Schweißen von Dichtungsbahnen aus Polyethylen (PE) für die Abdichtung von Deponien und Altlasten"; DVS-Verlag, Dezember 2006
- [14] Cengel, Y.A, Heat Transfer – A Practical Approach, McGraw Hill, Boston 1998
- [15] Projektbericht 21/3972/07, FGK, Höhr-Grenzhausen, 08-2007; unveröffentlicht

Symbole

a	Temperaturleitfähigkeit	m^2/s
b	Wärmeeindringkoeffizient $(\lambda\rho c_p)^{1/2}$	$Ws^{1/2}/mK$
c_p	Spezifische Wärme $\lambda/\rho c_p$	J/kgK
h_s	Schmelzwärme	J/kg
I_{rad}	spezifische Ausstrahlung	W/m^2
L_0	Schmelzschichtdicke	mm
L_E	Erwärmungslänge	mm
s_F	Fügeweg	mm
$\Delta d_{N1/2}$	Fügeweg (nach DVS)	mm
s_F/L_0	Fügewegverhältnis	--
t_F	Fügezeit	s
T_K	Kontakttemperatur	$^{\circ}C$
T_{HK}	Heizkeiltemperatur	$^{\circ}C$
T_{PE}	Anfangstemperatur der Dichtungsbahn	$^{\circ}C$
T_S	Schmelztemperatur	$^{\circ}C$
v	Schweißgeschwindigkeit	m/min
δ	Dicke der Korrosionsschicht	μm
ε	Emissivität	--
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/mK
ρ	Dichte	kg/m^3
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante	$5.67 \cdot 10^{-8} W/m^2K^4$