

# Das Langzeitverhalten von Schweißverbindungen an Halbzeugen aus Polyethylen

## – Eine Frage der Kerbempfindlichkeit

## The creep fracture behaviour of welded semi-finished products made from polyethylene

## – A matter of notch sensitivity

Joachim Hessel, HESSEL Ingenieurtechnik GmbH, Roetgen

### Zusammenfassung

Bei Heizelement-Stumpfschweißungen gemäß Richtlinie DVS 2207-1 an Halbzeugen aus Polyethylen treten im Zeitstandzugversuch die Brüche nicht in der Fügeebene, sondern von der Wulstkerbe ausgehend im Grundmaterial auf. Damit ist das Langzeitverhalten dieser Schweißverbindungen im wesentlichen eine Frage der Kerbempfindlichkeit des Grundmaterials.

Dementsprechend haben kerbunempfindliche Werkstoffe (z. B. PE 100-RC) Vorteile im Langzeitverhalten von Heizelement-Stumpfschweißverbindungen.

### Einleitung

Mit dem Beginn der industriellen Produktion von Rohren und Tafeln aus Polyethylen [1] zeigte sich unmittelbar die Notwendigkeit nach einer sicheren Verbindung dieser Halbzeuge. Auf dem Gebiet der Schweißmaschinen und –geräte werden heute CNC- gesteuerte Heizelementstumpf-Schweißmaschinen oder z. B. robotergeführte Extrusions-schweißgeräte verwendet.

Eng verknüpft mit der Verbesserung der Zeitstandfestigkeit von PE-Rohstoffen ist die Entwicklung von Prüfverfahren zur Charakterisierung des Langzeitverhaltens von Schweißverbindungen. Während vor 1980 das Langzeitverhalten von Schweißverbindungen durch die Prüfung in Wasser in vertretbaren Zeiten noch möglich war, mussten für die danach verwendeten Rohstoffe zeitraffendere Prüfmethoden eingesetzt werden.

Aufgrund der bekannten spannungs-rissfördernden Eigenschaften von wässrigen Tensidlösungen werden heute in nationalen Richtlinien und Normen (DIN, DIBt, DVS) sowie in Europäischen Normen (CEN) wässrige Tensidlösungen als Prüfmedium für Schweißverbindungen aus Polyolefinen vorgeschlagen.

Sämtliche für das Schweißen, Prüfen und Dimensionieren mit Schweißverbindungen aus Thermoplasten maßge-



Dr.-Ing. Joachim Hessel

Autorenprofil: **Author profile:**

[www.fuegen-von-kunststoffen.de/?id=201918](http://www.fuegen-von-kunststoffen.de/?id=201918)

[www.joining-plastics.info/?id=201918](http://www.joining-plastics.info/?id=201918)

[joachim.hessel@hessel-ingtech.de](mailto:joachim.hessel@hessel-ingtech.de)

benden Richtlinien sind im Taschenbuch Band 68/IV des DVS zusammengefasst und stellen den aktuellen Stand der Technik auf diesem Gebiet dar [2].

### Bruchverhalten von Schweißverbindungen

Die jetzt mehr als 25jährige Erfahrung bei der Zeitstandprüfung von Schweiß-



**Bild 1:** Heizelementstumpfschweißverbindung nach dem Zeitstandzugversuch (Wanddicke 45 mm)

### Summary:

Long-term creep rupture tests on heated tool butt welds which were produced according to DVS 2207-1 prove that the fracture does not occur in the fusion plane. The crack initiated by the notch between the bead and the surface of the welded part travels through the parent material. This means that the long-term creep rupture behaviour of these welded joints is related to the notch sensitivity of the parent material. Therefore, materials that are less sensitive to notches (e. g. PE 100-RC) will have welds with better long-term behaviour.

### Introduction

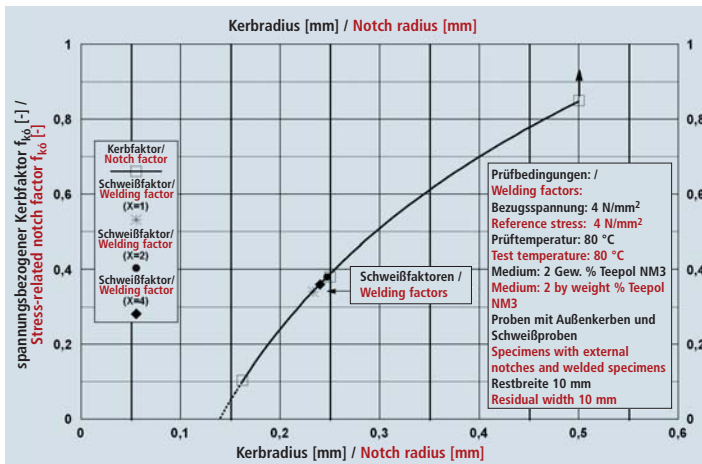
At the beginning of the industrial production of pipes and sheets made from polyethylene [1] reliable welding procedures for the joining of these semi-finished products became necessary. Today CNC-monitored heated tool butt welding machines and robotic extrusion welding machines are available.

The development of creep rupture test procedures for welded joints is closely connected to the improvement of the creep rupture strength of the PE resins. Creep rupture tests on welded joints in water were possible in a reasonable period of time until around 1980. However, the resins developed in the years since 1980 require new advanced time-saving test methods.

The accelerating effect of detergents in long-term creep rupture tests of polyethylene is well known. This is the reason why in national directives and standards (DIN, DIBt, DVS), as well as in European standards (CEN), detergents are recommended as the test medium for welded joint made from polyolefines. The relevant directives regarding welding, testing and designing of welded joints made from thermoplastics are summarized in the DVS handbook 68/IV and represent the state-of-the-art in this field [2].

### Failure behaviour of welded joints

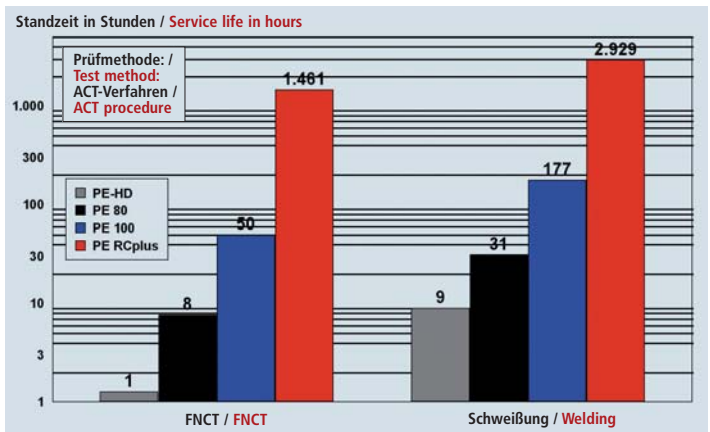
The experience during the last 25 years regarding creep rupture testing of welded joints indicates that creep rupture failure constantly is initiated by the notch between the bead and the surface of the semifinished product and



**Bild 2:** Vergleich des spannungsbezogenen Schweißfaktors und des spannungsbezogenen Kerbfaktors von Proben mit Außenkerben aus der PE 80 Platte  
**Fig. 2:** Comparison of the stress-related welding factor and the stress related notch factor for notched specimens from a PE 80 sheet

verbindungen zeigt, dass bei fachgerecht ausgeführten Schweißverbindungen (z. B. Heizelementstumpfschweißungen nach Richtlinie DVS 2207-1) der Zeitstandbruch immer von der Kerbe zwischen dem Schweißwulst und der Oberfläche des Halbzeuges ausgeht und sich der Riss dann durch das ungeschweißte Material fortsetzt (Bild1). Dieses typische Bruchverhalten wurde bisher im Wanddickenbereich von 10 mm bis 70 mm beobachtet. Obwohl der eigentliche Schweißvorgang in der Fügeebene in einer Tiefe von weniger als 0,1 µm stattfindet, ist das Langzeitbruchverhalten – beeinflusst durch den mittragenden Wulst – hier günstiger als das Langzeitbruchverhalten des ungeschweißten Materials unter dem Einfluss der Wulstkerbe. Demgemäß wird bei Schweißverbindungen nach DVS 2207-1 die Standzeit der Verbindung durch die „Schärfe“ der Wulstkerbe einerseits und den Widerstand des Grundmaterials gegenüber langsamem Rissfortschritt („Kerbempfindlichkeit“) andererseits bestimmt. Im Bild 2 sind einige Ergebnisse von Untersuchungen zur Quantifizierung der Wulstkerbe bei Heizelementstumpfschweißungen gezeigt. Es ergab sich für ein PE 80 (HD) ein wirksamer Radius im Kerbgrund von ca. 0,25 mm [3]. Bei diesen Untersuchungen wurde die sich beim Heizelementstumpfschweißen bildende Wulstkerbe durch definierte Außenkerben an ungeschweißten Proben (z. B. „spitze Kerbe“ oder „Rundkerbe“) simuliert. Der Schweißfaktor und der Kerbfaktor sind gleichsinnig definiert. Der Fügedruck nach DVS 2207-1 wur-

de variiert. Dabei bedeutet „X“ im Bild 2 das Vielfache des Fügedrucks nach DVS 2207-1. Es hat sich gezeigt, dass sich die Schärfe der Wulstkerbe bei den untersuchten Schweißungen nur in geringem (z. B. durch den Schweißdruck) Umfang beeinflussen lässt. Demzufolge ist die größte Einflussmöglichkeit auf die Standzeit der Schweißverbindung durch den Widerstand des Grundmaterials gegenüber langsamem Rissfortschritt („Kerbempfindlichkeit“) gegeben. Die von NEUBER für metallische Werkstoffe gefundenen Gesetzmäßigkeiten zur Spannungsüberhöhung bei Werkstoffanhäufungen bzw. Kerben [4] können sinngemäß auch auf das Langzeitverhalten von PE-Schweißverbindungen übertragen werden, wenn der Bruch nicht in der Fügeebene stattfindet. Eine geeignete Methode zur Bestimmung der Kerbempfindlichkeit von Polyethylen ist der Full Notch Creep Test (FNCT). Dieser ursprünglich in Japan zur Charakterisierung von Polyethylen-Werkstoffen entwickelte Versuch zeichnet sich bei entsprechend sorgfältiger Durchführung durch eine hohe Reproduzierbarkeit und Präzision aus. In der Europäischen Norm DIN EN 12814-3 (10/2005) wird bei der Prüfung von Schweißverbindungen auf den Zusammenhang zwischen Kerbempfindlichkeit des Grundmaterials und Langzeitbruchverhalten von Schweißverbindungen wie folgt hingewiesen: „Das Bruchverhalten der Schweißverbindungen, bei denen der Bruch im Grundwerkstoff auftritt und von der Kerbstelle zwischen Grundwerkstoff und



**Bild 3:** Zusammenhang zwischen Kerbempfindlichkeit und Langzeitbruchverhalten von Schweißverbindungen im ACT-Verfahren  
**Fig. 3:** Relation between notch sensitivity and long term creep rupture behaviour of welded joints in the ACT-test procedure (RCplus = PE 100-RC)

propagates through the parent material (Fig. 1). This typical failure behaviour has been observed for wall thicknesses from 10 mm to 70 mm. Although the welding in the fusion plane occurs to a depth of less than 0.1 µm, the creep rupture time in this area is better – due to the larger cross section because of the beads – than the creep rupture time of the unwelded material under the influence of the notch between the bead and the surface of the parent material. For this reason the time-to-rupture of welded joints produced according to DVS 2207-1 depends on a combination of the “sharpness” of the notch at the bead and the resistance to slow crack growth (“stress crack resistance”) of the parent material. Some results of an investigation to quantify the sharpness of the notch between the bead and the surface of the parent material of heated tool butt welded joints are given in fig. 2. The effective notch tip radius at butt welded PE 80 joints was found to be approx. 0.25 mm [3]. The notch at the bead was simulated by different notch tip radii in unwelded specimens (e. g. „sharp notch“ or „circular notch“). The long-term welding factor is defined as the ratio of the stress value of the weld and of the parent material at identical failure times. The long-term notch factor is defined as the ratio of the stress value of the notched specimen and of the parent material at identical failure times. In order to produce different notch tip radii at the beads the welding pressure

according to DVS 2207-1 was varied. The “X” in fig. 2 represents the factor that was used to multiply the „normal“ welding pressure according to DVS 2207-1. In this investigation it was observed that the welding pressure has only a limited influence on the sharpness of the notch at the bead. Therefore the resistance to slow crack growth of the parent material is the most important factor in determining the creep rupture time of welded joints. The formulas established by NEUBER for metallic materials to describe the stress peak at material accumulation or notches [4] can be transferred to the long-term behaviour of welded joints made from PE as long as the failure does not occur in the fusion plane. A suitable method to determine the notch sensitivity of polyethylene is the Full Notch Creep Test (FNCT). The FNCT - originally developed in Japan in order to characterize polyethylene resins - provides high reproducibility and precision as long as the test is performed carefully. In the European Standard EN 12814-3 (10/2005) where the long-term testing of welded joints is described the following information about the relation between the notch sensitivity of the parent material and the creep rupture behaviour of welded joint is given: „The fracture behaviour of welded joints, where fracture occurs in the parent material and is initiated from notch between the parent material and the weld bead is closely related to the resistance to slow crack growth of the parent material.

Schweißraupe ausgeht, steht in engem Zusammenhang mit der Beständigkeit des Grundwerkstoffs gegenüber langsamem Risswachstum.

Die Beständigkeit des Grundwerkstoffs gegenüber langsamem Risswachstum kann auch in einem Zeitstandversuch an einer Probe mit umlaufender Kerbe (FNCT-Versuch) bestimmt werden.“

Im Bild 3 ist am Beispiel von Polyethylen-Werkstoffen mit verschiedener Kerbempfindlichkeit deren Auswirkung auf die Standzeit von Heizelementstumpfschweißungen veranschaulicht.

Im Bild 4 ist das Bruchverhalten der entsprechenden Schweißproben dokumentiert.

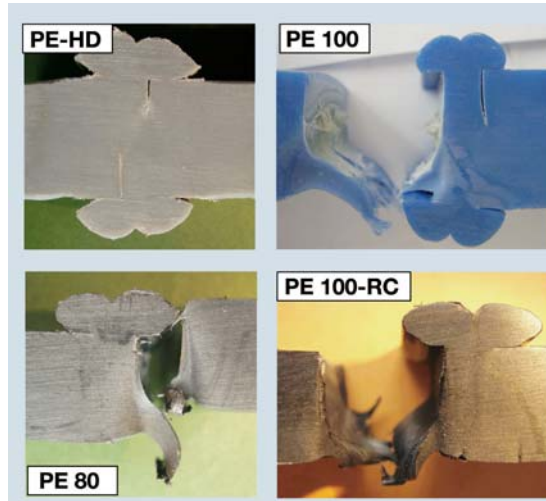
Bei allen Proben verläuft der Bruch von der Wulstkerbe ausgehend durch das Grundmaterial.

Dieses Bruchverhalten tritt immer dann auf, wenn keine Schwachstellen im Grundmaterial vorhanden sind, die sich stärker als die Spannungsüberhöhung durch die Kerbe zwischen Wulst und Grundmaterialoberfläche auswirken.

Eine weitere Ausnahme vom Rissverlauf außerhalb der Fügeebene ist denkbar, wenn die Standzeiten der Schweißverbindungen die Grenze der Wärmealterung erreichen und dann in der Fügeebene brechen. Dieses Bruchverhalten ist bei der Prüfung extrem spannungsrissebeständiger Werkstoffe z.B. wässriger Lösung mit Arkopal N-100, zu erwarten.

#### Ausblick

Aufgrund des typischen Bruchverhaltens von Schweißverbindungen nach DVS



**Bild 4:** Typisches Bruchverhalten von HS-Schweißungen nach Richtlinie 2207-1

**Fig. 4:** Typical fracture behaviour of heated tool butt joints, welded according to 2207-1

2207-1 kann die Frage der „Schweißbarkeit“ mit einem reduzierten Aufwand ermittelt werden. Es genügt demnach an einer genügenden Anzahl von Proben festzustellen, ob der Zeitstandbruch in der Fügeebene verläuft oder von der Wulstkerbe ausgehend durch das Grundmaterial fortschreitet.

Wird ausnahmslos festgestellt, dass der Bruch von der Wulstkerbe ausgehend durch das Grundmaterial verläuft, ist die „Schweißbarkeit“ gegeben.

Die Quantifizierung der Mindestlebensdauer ist danach durch Prüfungen nach der Richtlinie DVS 2203-4 Beiblatt 3 möglich und hängt nur noch von der Kerbempfindlichkeit („Spannungsrissebeständigkeit“) des Grundwerkstoffs ab. Mit steigender „Spannungsrissebeständigkeit“ des Grundwerkstoffs verlängert sich die Mindestlebensdauer der Schweißverbindungen aus diesen Werkstoffen (z. B. PE 100-RC).

The resistance to slow crack growth of the parent material can be determined using the Full Notch Creep test (FNCT)“

The effect on the times-to-rupture of different polyethylene materials with different notch sensitivities is shown in fig. 3. Fig. 4 shows the corresponding fracture appearance of the welded joints.

The fracture in all specimens is initiated by the notch at the weld bead and travels through the parent material.

This type of fracture is typical for the effect of the stress peak at the bead

notch but can change if weaker areas in the parent material dominate the fracture process. Another exception is possible if the testing times of the welded joints reach the time to thermal ageing of the PE material, for example for extremely stress crack resistant materials (e. g. PE 100-RC).

#### Outlook

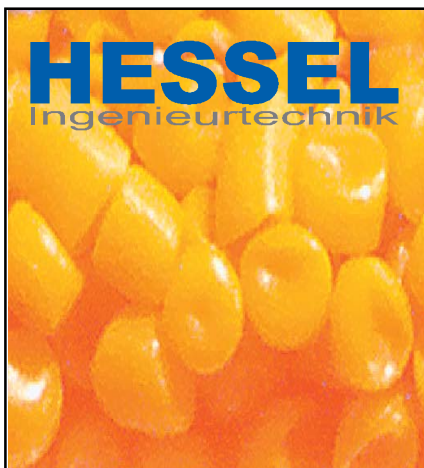
Due to the typical fracture behaviour of joints that are welded according to DVS 2207-1 the „weldability“ can be determined with reduced effort, provided that it is shown that the fracture is initiated from the bead notch and travels through the parent material rather than through the fusion plane using a reasonable number of specimens.

In this case the minimum service life of welded materials can be quantified by using DVS 2203-4 supplement 3 and depends only on the notch sensitivity („stress crack resistance“) of the parent material.

The minimum service life of welded materials with improved stress crack resistance (e. g. PE 100-RC) will be therefore be longer.

#### Literatur References

- [1] Hessel, J.: 50 Jahre Rohre aus Polyethylen – Eine ingenieurtechnische Betrachtung – 3R international (45) Heft 3-4/ 2006, Seite 128 – 133.
- [2] DVS-Taschenbuch „Fachbuchreihe Schweißtechnik, Band 68/IV, 11. Auflage, 2006, Verlag für Schweißen und verwandte Verfahren DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf
- [3] Grieser, J.: „Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Versagensverhalten von Schweißverbindungen an Polyethylen unter Berücksichtigung der Grundmaterialkerbempfindlichkeit bei langzeitiger Beanspruchung“, Diplomarbeit Januar 2003, Fachhochschule Aachen (unveröffentlicht)
- [4] Neuber, H.: „Kerbspannungslehre, Grundlagen für genaue Spannungsbeziehung“, Verlag von Julius Springer, Berlin, 1937.



With innovative test procedures we provide answers to your questions regarding the choice of materials, minimum remaining service life, and welding of thermoplastics. Please contact us!

Tel. 02471/920 220;

info@hessel-ingtech.de  
www.hessel-ingtech.de