

Forschungszentrum Karlsruhe
Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte
FZKA 6459

**Mechanische Eigenschaften von
Diffusionsschweissverbindungen
martensitischer Chromstähle**

L. Schäfer, H. Kempe

Institut für Materialforschung

Projekt Kernfusion

Association Forschungszentrum Karlsruhe/EURATOM

November 2000

Forschungszentrum Karlsruhe
Technik und Umwelt
Wissenschaftlicher Bericht
FZKA 6459

Mechanische Eigenschaften von
Diffusionsschweissverbindungen martensitischer
Chromstähle

L. Schäfer, H. Kempe

Institut für Materialforschung
Projekt Kernfusion
Association Forschungszentrum Karlsruhe/EURATOM

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe
2000

Als Manuskript gedruckt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor
Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe
Mitglied der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft
Deutscher Forschungszentren (HGF)
ISSN 0947-8620

Kurzfassung

Diffusionsschweißen ist eines der möglichen Verfahren zur Herstellung von Trennwänden mit Kühlkanälen für Fusionsreaktoren. Die Qualität der Schweissung wird je nach den auftretenden Belastungsarten in Zug-, Kerbschlag- und Ermüdungsversuchen gemessen. Die aussagefähigste Materialeigenschaft ist dabei die Verformbarkeit. Zur Optimierung der Schweissqualität wurden folgende Parameter untersucht: Anformdruck, Fügeflächenrauigkeit, Fügeflächenherstellung und –bearbeitung, Stahlsorte und Vergüten nach dem Schweißen. Es wurden Schweissqualitäten erreicht, die im Zugversuch mit dem ungeschweissten Grundwerkstoff identisch sind, die aber gleichzeitig im Kerbschlagversuch noch deutliche Unterschiede zeigen. Die Ermüdungsergebnisse waren zufriedenstellend. Die drei untersuchten Stähle waren unterschiedlich gut schweisbar. Es wird eine Empfehlung für optimierte Schweissparameter gegeben.

Abstract

Mechanical properties of diffusion welding joints of martensitic chromium steels

Diffusion welding is one of the methods available for manufacturing partition walls with cooling channels for fusion machines. The quality of the weld is measured in tensile, notch impact, and fatigue tests, depending on the types of loads occurring. The most informative material property is deformability. To optimize the welding quality, the following parameters and processes have been studied: Impact pressure, joining surface roughness, manufacturing and machining of joining surfaces, type of steel, and annealing upon welding. In tensile tests, the welding qualities achieved were found to be identical with the quality of the non-welded basic material. In contrast to this, the notch impact test results differed considerably. Satisfactory fatigue results were obtained. Weldability of the three types of steel investigated varied. In the present report, optimized welding parameters shall be recommended.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Experimentelles.....	3
2.1	Versuchsmaterial.....	3
2.2	Schweissmethode	4
2.3	Meßmethoden	4
3	Versuchsergebnisse.....	5
3.1	Mögliche Einflußgrößen	5
3.2	Anformdruck.....	6
3.3	Fügeflächenrauigkeit	6
3.4	Fügeflächenherstellung	7
3.5	Stahlsorten	7
3.6	Vergütung nach dem Schweißen	8
3.7	Zulässiger Anformdruck	8
3.8	Parameterempfehlung	9
4	Zusammenfassung und Ausblick	10
5	Literatur.....	11
6	Danksagung.....	11

1 Einleitung

Im europäischen Fusionstechnologie-Programm werden im Blanket-Projekt Verfahren zur Herstellung von Kühlwänden mit inneren Kühlkanälen erprobt. Dazu zählt auch das Diffusionsschweißen. Bei ihm werden zwei Stahlplatten, in die spiegelbildlich die gewünschten halben Kühlkanäle eingearbeitet worden sind, durch hohen Druck (ca. 30 MPa) bei hohen Temperaturen (ca. 1000°C) miteinander verschweißt. Die so erzeugten Kühlkanäle sollen bei erhöhtem Innendruck leckdicht sein, und die Schweißflächen der dazwischenliegenden Stege sollen dem Grundwerkstoff möglichst ähnliche mechanische Eigenschaften haben. Um letzteres zu beurteilen, wurden Schweißproben in Zug-, Ermüdungs- und Kerbschlagbiegeversuchen geprüft. Von allen Materialkennwerten, die diese Tests liefern, eignet sich vor allem die Gesamtverformung als Maß für die Qualität der Schweißnaht. Es wurde der Einfluss des Anformdruckes, der Fügeflächenrauigkeit, der Fügeflächenbearbeitung, der Stahlsorte und der Vergütung nach dem Schweißen untersucht. Da zwischen den Kühlkanälen nur schmale Stege stehen bleiben, wurde untersucht, wie diese infolge des Anformdruckes gestaucht und geknickt werden, d.h. welche maximalen Anformdrücke erlaubt sind.

2 Experimentelles

2.1 Versuchsmaterial

Die chemische Zusammensetzung der drei verwendeten martensitischen Chromstähle in Gew. % ist folgende:

Stahl	Charge	Cr	W (Mo)	V	Ta(Nb)	C	Mn	Ni	B, ppm
MANET-II	50805	10,3	(0,57)	0,19	(0,14)	0,1	0,75	0,65	75
OPTIFER-IV	986489	8,5	1,16	0,23	0,15	0,11	0,57	-	30
F82H mod.	9741	7,7	2,0	0,16	0,02	0,09	0,16	-	-

Die Schweisstemperatur betrug 980°C, der Anformdruck lag zwischen 16 und 48,2 MPa und der Schweißdruck zwischen 7 und 15 MPa. Die Anformzeit und die Schweißzeit betragen bei den meisten Proben jeweils 1 h. Die Fügeflächen wurden nass geschliffen und hatten eine Oberflächenrauigkeit R_z zwischen 0,5 und 8,5 μm . Sie wurden vor dem Schweißen wie in [1] gebeizt. Nach dem Schweißen wurden die Proben bei $T_{\text{AU}} = 980^\circ\text{C}$ austenitisiert und bei $T_{\text{AN}} 750^\circ\text{C}$ 3 oder 4 h angelassen. Die Versuchsproben haben folgende Abmessungen: Zugprobe: $3\varnothing \times 20$ mm; Biegeprobe: $5 \times 5 \times 30$ mm; Kerbschlagprobe: $3 \times 4 \times 27$ mm. Die Proben mit Stegen

(und Kanälen) hatten alle die gleiche Steghöhe von $6 + 6 = 12$ mm und Stegbreiten von 2, 4 bzw. 6 mm.

2.2 Schweissmethode

Fast alle Schweissungen wurden in unserem Auftrag im Forschungsinstitut für Kerntechnik und Energiewandlung e.V. (KE) der Universität Stuttgart durchgeführt. Die Versuchseinrichtung besteht aus einem beheizbaren Vakuumgefäß, in dem auf die Schweissproben ein einachsiger Druck ausgeübt wird [2].

Einige wenige Proben wurden auch im Institut für Materialforschung (IMF-III) des Vorschungszentrums Karlsruhe in einer heißisostatischen Presse (HIP) unter allseitigem Gasdruck verschweisst. Der Unterschied beider Verfahren besteht im wesentlichen darin, dass am Ende des Anformprozesses im einachsigen Spannungszustand die nominelle Druckspannung herrscht, während im mehrachsigen Spannungszustand die für die Anformung verantwortliche Vergleichsspannung dann Null ist. Die praktische Konsequenz daraus sind höhere Anformspannungen beim heissisostatischen Pressen. Weitere Diffusionsschweißverfahren kamen hier nicht zum Einsatz.

Vor dem Schweißen werden die Proben im Vakuum ausgeheizt ($\sim 300^\circ\text{C}$), um die Fügeflächen von absorbierten Gasen zu befreien. Der Schweissprozess besteht aus dem Anformvorgang bei hohem Druck (ca. 30 MPa) und dem anschließenden etwa gleich langen Schweissvorgang bei niedrigerem Druck (ca. 10 MPa). Danach erfolgt die Vergütung durch Austenitisieren (ca. 1000°C) und/oder Anlassen (ca. 730°C).

2.3 Meßmethoden

Um zu entscheiden welcher Materialkennwert zur Beschreibung der Qualität der Schweissnaht am geeignetsten ist, wurden Zug-, Biege- und Kerbschlagbiegeversuche in Kraft-Verformungs-Diagrammen dargestellt, wie es Bild 1,2 und 3 zeigen. Man sieht, daß alle Kraft-Verformungs- bzw. Spannungs-Dehnungs-Kurven der geschweissten Proben so lange ungefähr mit denen des Grundmaterials deckungsgleich sind, bis sie abbrechen. Man kann nun das Erreichen verschiedener Punkte im Spannungs-Dehnungs-Diagramm als Maß für die Qualität der Schweissnaht definieren. Man kann aber auch – wie in unserem Anwendungsfall – sagen, daß bei Unterschreitung der Streckgrenze die Schweissung als undiskutabel schlecht gelten soll. Dadurch kann die Bruchdehnung als alleiniges Maß für die Qualität der Schweissnaht benutzt werden. Dies ist analog im Zug-, Biege- und

Kerbschlagversuch möglich, weil die Spannungs-Dehnungs-Diagramme ähnlich aussehen [3]. Im Kerbschlagversuch gibt es eine sehr gute Korrelation zwischen der Verformung bis zum Sprödbbruch und der Schlagarbeit, weshalb auch letztere verwendet werden kann. Die Streuungen der Kurven in Bild 1 und 3 in Spannungsrichtung haben keine Korrelation zur Verformbarkeit, d. h. zur Qualität der Schweissnaht, sind also reine Streuungen des Grundwerkstoffes.

Nachdem als Maß für die Qualität der Schweissnaht die Bruchdehnung im Zugversuch, die Durchbiegung bis zum Anriß im Biegeversuch und die Durchbiegung bis zum Sprödbbruch im Kerbschlagversuch ausgewählt wurden, soll nun geprüft werden, wie diese Materialkenngrößen miteinander korrelieren und welche für unseren Anwendungsfall am geeignetsten sind. Bild 4 zeigt, daß diese Materialkennwerte aus Zug- und Biegeversuch gut miteinander korrelieren. An dem steilen Anstieg der Kurven vom Nullpunkt aus erkennt man aber, daß das Auflösungsvermögen für Schweissungen mit geringer Qualität im Zugversuch sehr viel besser ist als im Biegeversuch. Da der Kerbschlagversuch eine ähnliche Korrelation zum Biegeversuch aufweist, ist es nicht mehr erstaunlich, daß auch der Zugversuch mit dem Kerbschlagbiegeversuch gut korreliert [3]. Da der Kerbschlagversuch eine andere Belastungsart simuliert als der Zugversuch, sollte er zur Beurteilung der Qualität der Schweissnaht herangezogen werden, wenn das geplante Bauteil auch schlagartigen Belastungen unterliegt. Wird das Bauteil einer zyklischen oder einer Kriech-Belastung unterworfen, so ist zur Feststellung der Schweissqualität ein Ermüdungs- oder Kriechversuch notwendig, deren Qualitätskriterien dann natürlich die Lastspielzahl oder die Standzeit sind. Der Zug- und der Biegeversuch sind bei guten Schweissungen ungefähr gleichwertig. Bei schlechten Schweissungen ist allerdings der Zugversuch deutlich überlegen, so daß man ohne Verlust an Informationen auf den Biegeversuch verzichten kann.

3 Versuchsergebnisse

3.1 Mögliche Einflußgrößen

Zu den möglichen Einflussgrößen, die die Qualität der Schweissnaht bestimmen, gehören einmal die eigentlichen Schweissparameter wie Temperatur, Druck, Zeit, Vakuum beim Schweissen, Vergüten nach dem Schweissen, dann die Fügeflächenbehandlung wie Rauigkeit, Herstellungsart, Kaltverformungsgrad, Reinigung, Beizen, Zwischenschichten und schließlich die Stahlsorte mit ihrer chemische Zusammensetzung und dem Gefüge.

Von diesen Einflussgrößen werden in dieser Arbeit nur der Anformdruck, das Vergüten nach dem Schweissen, die Fügeflächenrauigkeit und die Stahlsorte untersucht. Weitere Parameterstudien sind in Arbeit.

Es sei schon hier darauf verwiesen, dass es keine Parameterkonstellation gibt, die für alle mechanischen Eigenschaften gleichzeitig optimale Werte ergibt. Manche Parameteränderungen führen in einer Meßmethode zu einer Verbesserung und in einer anderen zu einer Verschlechterung der Qualität der Schweissnaht.

3.2 Anformdruck

Im Zugversuch ist beim Stahl OPTIFER-IV der Anformdruck zwischen 16,2 MPa und 48,2 MPa ohne Einfluss auf die Qualität der Schweissnaht, die dem Grundwerkstoff entspricht. Lediglich beim niedrigsten Anformdruck von 16,2 MPa ist die Bruchdehnung um etwa 10 % reduziert, wenn die Fügeflächenrauigkeit oberhalb $R_z \approx 3,5 \mu\text{m}$ liegt. Bei hohem Anformdruck (35,9 MPa) wird trotz unterschiedlicher Fügeflächenrauigkeit ($R_z = 0,7$ bis $8,5 \mu\text{m}$) immer die Qualität des Grundwerkstoffes erreicht.

Stichprobenartig wurden die gleichen Ergebnisse für die Stähle MANET-II und F82H mod. gefunden. Zusammenfassend kann gesagt werden, daß sich bei einem Anformdruck von $\sigma_A = 15$ bis 50 MPa und einer Fügeflächenrauigkeit von weniger als $R_z = 10 \mu\text{m}$ alle martensitischen Chromstähle so diffusionsschweißen lassen, dass ihre Zugeigenschaften dem Grundwerkstoff entsprechen. In dem Bereich $\sigma_A < 1,2 R_z + 12,6$ (σ_A in MPa; R_z in μm) gilt dies nicht für die Bruchdehnung.

Im Kerbschlagbiegeversuch wurde bei allen drei untersuchten Stählen eine deutliche Abhängigkeit der Schlagarbeit vom Anformdruck (s. Bild 5 + 8) gefunden. Ob die Erhöhung des Anformdruckes über 50 MPa hinaus unter den gegebenen Umständen zu den Schlagarbeiten des Grundwerkstoffes führen würde ist, zumindestens bei den Stählen F82H mod. und MANET-II, sehr fraglich. Die Fraglichkeit wird in Bild 6 noch dadurch unterstützt, daß die Durchbiegung S_u (bis zum Einsetzen des Sprödbruches) oberhalb von $\sigma_A = 35$ MPa nicht mehr ansteigt, also auch den Wert des Grundwerkstoffes nicht erreicht.

3.3 Fügeflächenrauigkeit

Wie unter Punkt 3.2 bereits ausgeführt, gibt es beim Stahl OPTIFER-IV keine Abhängigkeit der Zugeigenschaften der Schweissnaht von der Fügeflächenrauigkeit bei $R_z < 10 \mu\text{m}$. Bei dem sehr niedrigen Anformdruck von $\sigma_A = 16,2$ MPa ist allerdings die Bruchdehnung bei einer Fügeflächenrauigkeit von $R_z > 3 \mu\text{m}$ um 10 % gegenüber dem Grundwerkstoff vermindert. Die Grenze des so beeinflussten $\sigma_A - R_z$ Raumes liegt etwa bei: $\sigma_A < 1,2 R_z + 12,6$ (σ_A in MPa; R_z in μm) (s. Pkt. 3.2).

Wahrscheinlich gelten diese Aussagen auch für die Stähle MANET-II und F82H mod. Dazu gibt es nur stichprobenartige Nachweise.

Im Kerbschlagversuch wurde beim Stahl OPTIFER-IV eine Abhängigkeit der Schlagarbeit von der Rauigkeit der Fügeflächen gefunden, die ein Optimum bei $R_z \approx 4 \pm 1 \mu\text{m}$ zeigt (Bild 7). Dieses Ergebnis ist zunächst noch nicht sehr plausibel. Es wird aber etwas unterstützt durch die Ergebnisse der Ermüdungsversuche (Bild 9), die ebenfalls ein Optimum der Werte bei einer Fügeflächenrauigkeit von $R_z \approx 4,5 \mu\text{m}$ zeigen und einen ähnlichen Kurvenverlauf wie in Bild 7 haben. Ein weiteres Experiment zeigte bei $R_z = 33 \mu\text{m}$ bessere Kerbschlageigenschaften als bei $R_z \approx 8,5 \mu\text{m}$. Anscheinend spielen hier noch weitere Parameter (z.B. Kaltverformungsgrad, Oxidschichten usw.) eine Rolle.

3.4 Fügeflächenherstellung

Zum Einfluss der Fügeflächenherstellung gibt es zunächst nur den Hinweis von K. Schleisiek et al. [4], dass die Kerbschlageigenschaften des diffusionsgeschweissten Stahles MANET-II dem Grundwerkstoff schon sehr nahe kommen, wenn die Fügeflächen nicht nass geschliffen, sondern trocken gefräst werden. Hierzu sind einige Experimente in Arbeit. Das aufwendige Beizen und Reinigen nach Haufler [1] scheint nicht immer gegenüber dem Reinigen mit Aceton von Vorteil zu sein [4]. Wahrscheinlich werden die Vorteile des Beizens teilweise kompensiert durch den Verlust an kaltverformter Oberfläche, die besonders diffusionsfähig ist.

Schweissnähte, die mit Zwischenschichten (z.B. Nickelfolien) hergestellt wurden, scheinen im Zugversuch verbesserte und im Kerbschlagversuch verschlechterte Ergebnisse zu liefern ([5] Bild 1, Probe 9).

3.5 Stahlsorten

Die ausgewählten martensitischen Chromstähle umfassen einen reichlich hoch legierten Stahl, MANET-II; eine mittlere niedrig aktivierbare Qualität, OPTIFER-IV, und einen (mit Ausnahme von W) sehr sparsam legierten niedrig aktivierbaren Stahl, F82H mod.. Erwartungsgemäss lässt sich der am höchsten legierte Stahl am schlechtesten schweissen, wenn man die Kerbschlagergebnisse aus Bild 8 zugrundelegt. Eindeutig ist, dass der am ausgewogensten legierte Stahl, OPTIFER-IV, sich auch am besten schweissen lässt. Diese Unterschiede findet man allerdings in den Zugversuchen nicht wieder. Dort sind alle Stähle ungefähr gleich gut

schweisbar. In einem weiteren Experiment erwies sich die Kerbschlagzähigkeit des geschweissten Stahles EUROFER'97 als noch besser als die des geschweissten Stahles OPTIFER-IV.

3.6 Vergütung nach dem Schweißen

Durch die schnelle Abkühlung der Schweissproben nach dem Schweißen erhält der Stahl ein martensitisches Gefüge, das relativ spröde ist. Daher wird der Stahl grundsätzlich (bei etwa 730°C) angelassen. Im nur angelassenen Zustand erreichen die Proben aber eine nur mässige Warmfestigkeit ($R_{p0,2}(250^\circ\text{C}) \approx 200 \text{ MPa}$; $R_m(250^\circ\text{C}) \approx 370 \text{ MPa}$) und eine mässige Übergangstemperatur der Schlagarbeit ($T_{\dot{U}} \approx -30^\circ\text{C}$). Führt man dagegen eine vollständige Vergütung (mit $T_{\text{au}} = 980^\circ\text{C}$ 0,5 h + $T_{\text{AN}} = 730^\circ\text{C}$ 3 h) aus, so verbessert sich die Warmfestigkeit wesentlich ($R_{p0,2}(250^\circ\text{C}) \approx 440 \text{ MPa}$; $R_m(250^\circ\text{C}) \approx 525 \text{ MPa}$) und die Übergangstemperatur der Schlagarbeit sinkt auf $T_{\dot{U}} \approx -80^\circ\text{C}$ ab (Bild 10). Daher wurde diese Vergütung bei allen Proben angewendet.

3.7 Zulässiger Anformdruck [6]

Wie schon erwähnt sind je nach Rauigkeit der Fügeflächen unterschiedliche Anformbedingungen vor dem eigentlichen Diffusionsschweißen notwendig, um einen möglichst lückenlosen Materialkontakt herzustellen. Dazu gehört auch der Anformdruck, der im allgemeinen möglichst hoch gewählt wird. Die realen Bauteile sind aber von eng beieinander liegenden Kühlkanälen durchzogen, zwischen denen nur noch schmale Verbindungsstege stehen bleiben, die verschweißt werden müssen. Diese Stege werden durch den Anformdruck sowohl gestaucht als auch geknickt.

Die Stauchung $-\varepsilon$ bei $T = 980^\circ\text{C}$ 1h beträgt beim Stahl MANET-II $-\varepsilon [\%] = K_1 \sigma^{n_1}$, wobei die Konstanten $K_1 = 3,5 \cdot 10^{-4}$, $n_1 = 2,8$ und σ in MPa zu verwenden sind. Für beispielsweise $\sigma = 20$ bzw. 50 MPa beträgt der Steghöhenverlust bzw. die Stauchung bei $T = 980^\circ\text{C}$ $-\varepsilon = 1,54 \%$ bzw. 20 %. Der Konstrukteur muß hier entscheiden, welche Stauchung er durch ein vorheriges Übermaß tolerieren kann. Die gleichzeitig stattfindende Knickung oder Durchbiegung der Stege ist in Bild 11 und 12 dargestellt. Bild 11 zeigt die Durchbiegung in Abhängigkeit von dem Verhältnis von Steghöhe zu Stegbreite, d.h. dem Schlankheitsgrad S der Stege (die Steghöhe beträgt konstant $H = 6 + 6 = 12 \text{ mm}$, und die Stegbreite B wurde mit $B = 2; 4$ oder 6 mm variiert). Bei einem Anformdruck von $\sigma = 35,9 \text{ MPa}$ und einem Schlankheitsgrad von $S = H : B = 12 : 2 = 6$ ist nur eine Durchbiegung von 0,13 mm zu erwarten. Ein Anformdruck von 48,2 MPa erzeugt bei $S = 6$ etwa die zehnfache Durchbiegung. Dies ist anschaulich in

Bild 12 am mittleren Steg zu sehen. Die Durchbiegung D läßt sich für den Druck $\sigma = 48,2$ MPa (bei $T = 980^\circ\text{C}$) in Abhängigkeit von der Schlankheit S der Stege folgendermaßen berechnen: $D(\sigma = 48,2 \text{ MPa}) = K_2 \cdot S^n$ mit $K_2 = 1,49 \cdot 10^{-2}$ und $n_2 = 2,54$. Die Durchbiegung beim Druck $\sigma = 38,5$ läßt sich wegen der Ungenauigkeit der Messungen nicht berechnen. Auch hier wird der Konstrukteur der Bauteile entscheiden müssen, welche Durchbiegung der Stege maximal tolerierbar ist und welche maximalen Anformdrücke und Schlankheitsgrade der Stege sich daraus ergeben.

Die Umrechnung der für $T = 980^\circ\text{C}$ gemessenen Durchbiegungen und Stauchungen auf andere Temperaturen ist nach Kriechgesetzen möglich:

$$\log \dot{\epsilon}_1 \approx \log \dot{\epsilon}_2 + \frac{Q}{2,3 \cdot R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)$$

Darin ist $\dot{\epsilon}$ die Kriechgeschwindigkeit, Q die Aktivierungsenergie des Kriechens

$Q(1000^\circ\text{C}) \approx 165$ Kcal/Mol; R die allgemeine Gaskonstante und T die Temperatur in K.

3.8 Parameterempfehlung

Nach den gegenwärtigen Versuchsergebnissen könnte man zur Sicherstellung eines relativ optimalen Schweißergebnisses folgende Empfehlungen aussprechen:

- Man verwende einen gut schweisbaren Stahl, z.B. OPTIFER-IV oder EUROFER '97.
- Man erzeuge die Fügeflächen durch trockenes Fräsen.
- Die Fügeflächenrauigkeit soll bei 2 bis 5 μm liegen.
- Die Fügeflächen werden mit Aceton gereinigt.
- Ausheizen der Fügeflächen im Vakuum bei etwa 300°C .
- Anform- und Schweißtemperatur $T = 980^\circ\text{C}$.
- Anformdruck und -zeit: 50 MPa 1 h

- Diffusionsschweisssdruck und –zeit $\sim 10 \pm 3 \text{ MPa } 1 \text{ h}$
- Vergüten der Schweissung bei: $T_{AU} = 980^\circ\text{C } 0,5 \text{ h}$ und $T_{AN} = 730^\circ\text{C } 3 \text{ h}$
- Beurteilung der Qualität der Schweissnaht nach der Schlagarbeit im Kerbschlagbiegeversuch bei $T_p = -20$ und $+ 40^\circ\text{C}$ (entsprechend Bild 5)

In dieser Empfehlung ist am ehesten noch die Reinigung der Proben mit Aceton fragwürdig d.h. der Verzicht auf das übliche Beizen [1].

4 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit ist es gelungen, einen breiten Bereich im Parameterfeld anzugeben, in dem optimale Diffusionsschweissergebnisse erzielbar sind, sofern der Zugversuch als Mass für die Qualität der Schweissung akzeptiert wird. Andere Belastungsarten und Prüfverfahren können durchaus andere Werte der untersuchten Parameter für optimale Schweissergebnisse erfordern. Für den Kerbschlagbiegeversuch ist es bisher nicht gelungen, Schweissbedingungen herauszufinden, die mit dem Grundwerkstoff identische Testergebnisse erbringen. Manche Autoren [2] meinen, dass dies prinzipiell nicht möglich sei wegen der Anisotropie der neugebildeten Körner, die die beiden ursprünglichen Fügeflächen miteinander verbinden. Möglicherweise sind die erzielten Ergebnisse aber ausreichend. Man sollte auch beachten, dass sich nicht jeder martensitische Chromstahl gleich gut schweissen lässt (Bild 6), dass die drei untersuchten Stähle aber eher zu den gut schweisbaren zählen (s. Zugversuche).

In zukünftigen Untersuchungen wäre es vielleicht empfehlenswert, die Ermüdungsversuche, die hier auf Anrieb recht gute Ergebnisse geliefert haben, auf eine breitere experimentelle Basis zu stellen. Desweiteren sollten wenigstens stichprobenartig Zeitstandversuche einbezogen werden. Vielleicht könnte auch einmal die sehr aufwendige und wenig attraktive Untersuchung der Schweissparameter Temperatur und Zeit in Angriff genommen werden. Auf jeden Fall müssen aber mit jedem neuentwickelten Stahl (z.B. EUROFER '97) einige stichprobenartige Vergleichsversuche gemacht werden.

5 Literatur

- [1] G. Haufler: Diffusionsschweißen von Probelplatten aus MANET-II für gekühlte Blanketstrukturen. (Abschlußbericht zum Teil A und B) Bericht des KE e.V. Stuttgart, Nr. 1-TB-241/94 (1994).
- [2] G. Haufler, H.-G. Mayer: Werkstoff- und bauteilbezogene Untersuchungen zum praktischen Einsatz des Diffusionsschweißens. In: Hart- und Hochtemperaturlöten und Diffusionsschweißen: DVS-Berichte Band 69 (1981) S. 141 – 147.
- [3] L. Schäfer: Zug-, Biege- und Kerbschlagbiegeversuche an Diffusionsschweißverbindungen eines martensitischen Chromstahls. Vorträge der Tagung "Werkstoffprüfung 1997" am 4. und 5.12.1997 in Bad Nauheim. DVM, Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung e.V., S. 337 – 343.
- [4] K. Schleisiek, T. Lechler, L. Schäfer, P. Weimar: Diffusion Welding Parameters and Mechanical Properties of Martensitic Chromium Steels. Ninth International Conference on Fusion Reactor Materials. ICFRM-9, October 10 – 15, 1999, Colorado Springs, Col. USA.
- [5] L. Schäfer: Mechanische Eigenschaften von Diffusionsschweißverbindungen des Stahles MANET-II. Jahrestagung Kerntechnik '97, Aachen, KTG u. Deutsches Atomforum e.V. Tagungsbericht, INFORUM-Verl., Bonn (1997) S. 546 – 549.
- [6] L. Schäfer: Mechanische Eigenschaften von Diffusionsschweißverbindungen martensitischer Chromstähle. Jahrestagung Kerntechnik '99, Karlsruhe, KTG u. Deutsches Atomforum e.V., Tagungsbericht, INFORUM-Verl., Bonn (1999) S. 569 – 573.

6 Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen des Projekts Kernfusion des Forschungszentrums Karlsruhe durchgeführt und ist ein von der Europäischen Gemeinschaft geförderter Beitrag zum Fusionstechnologieprogramm.

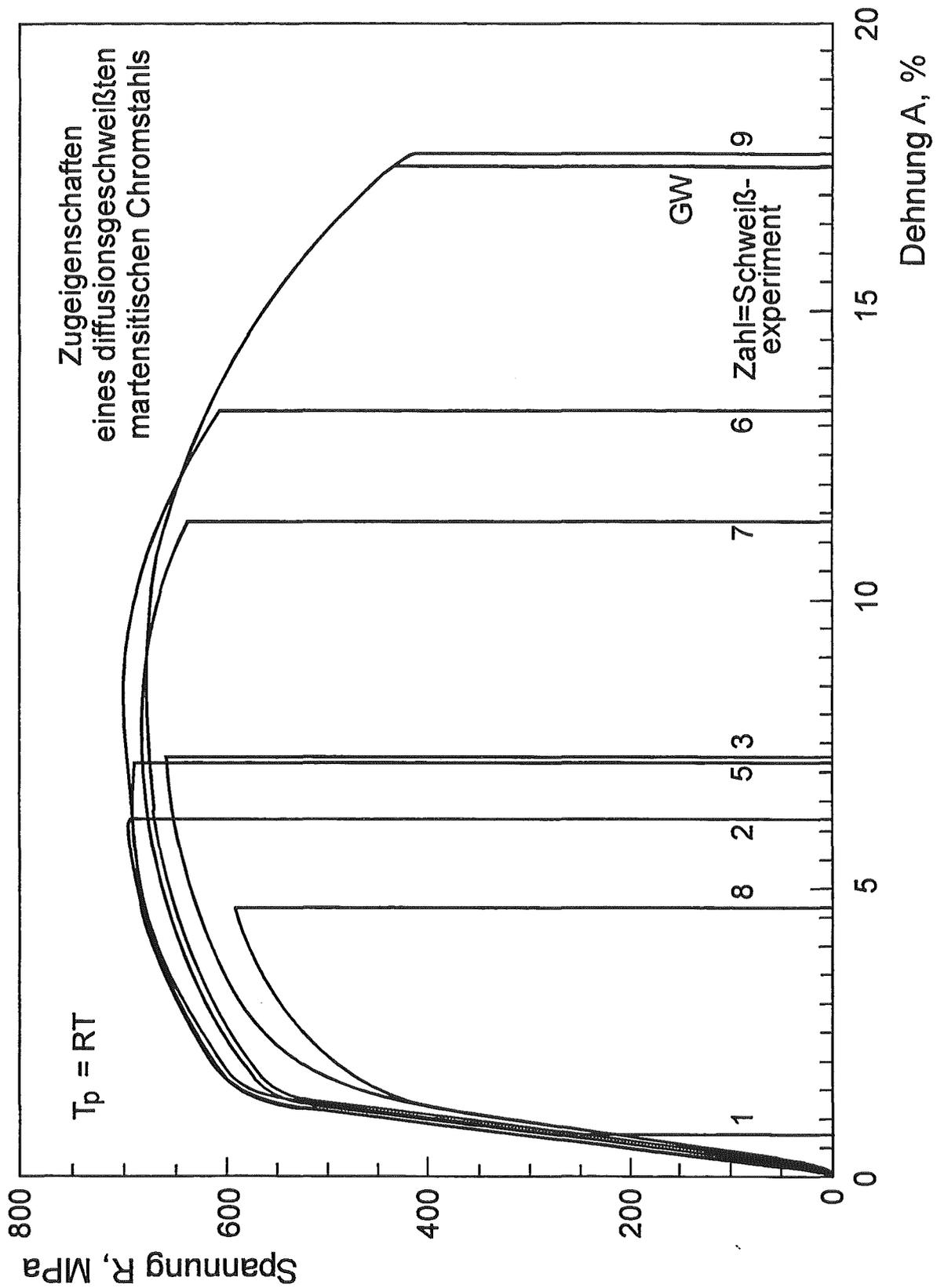


Bild 1: Spannungs-Dehnungs-Diagramme aus Zugversuchen eines diffusionsgeschweißten martensitischen Stahls. Die unterschiedlichen Qualitäten der Schweißnähte zeigen sich in der zum Grundwerkstoff (GW) unterschiedlichen Bruchdehnung A.

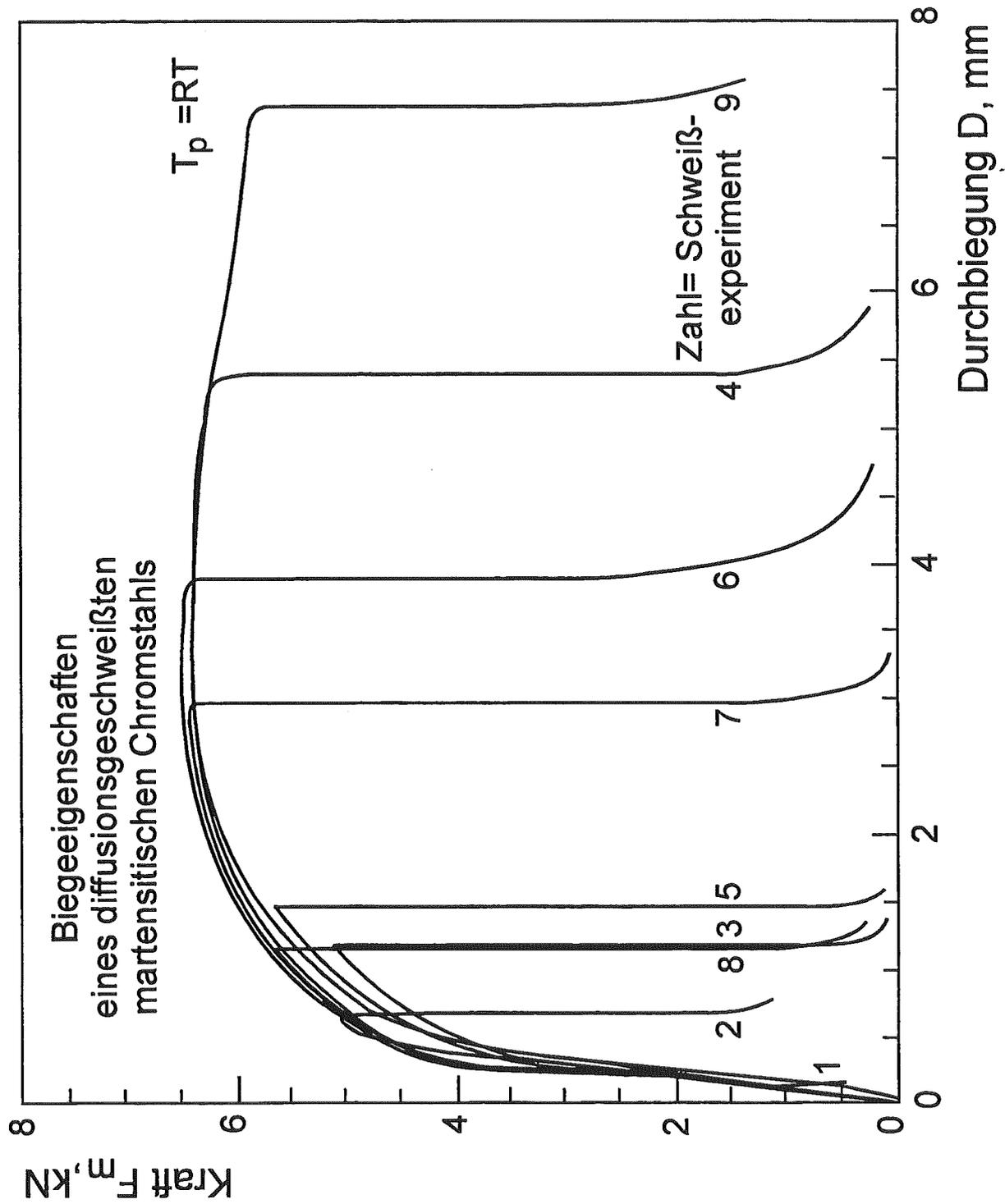


Bild 2: Kraft-Durchbiegungs-Diagramme aus 3Punkt-Biegeversuchen eines diffusiongeschweißten martensitischen Chromstahls. Die unterschiedlichen Qualitäten der Schweißnähte zeigen sich in der unterschiedlichen maximalen Durchbiegung D .

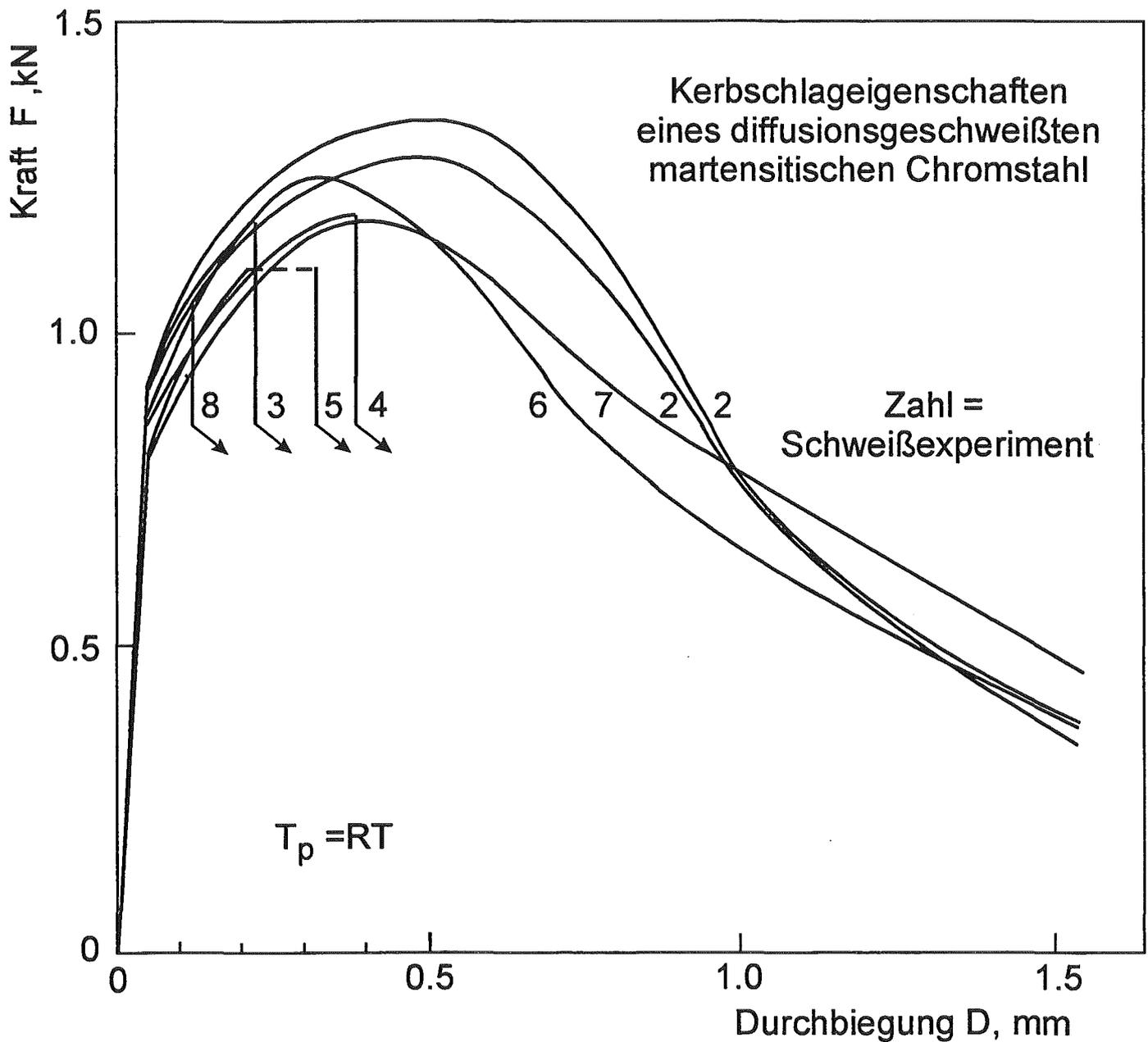


Bild 3: Kraft-Durchbiegungs-Diagramm in geglätteter Form aus Kerbschlagbiegeversuchen eines diffusionsgeschweißten martensitischen Chromstahls. Die unterschiedlichen Qualitäten der Schweißnähte zeigen sich in der unterschiedlichen Durchbiegung bis zum Sprödbruch S_U (Proben 8, 3, 5 u. 4).

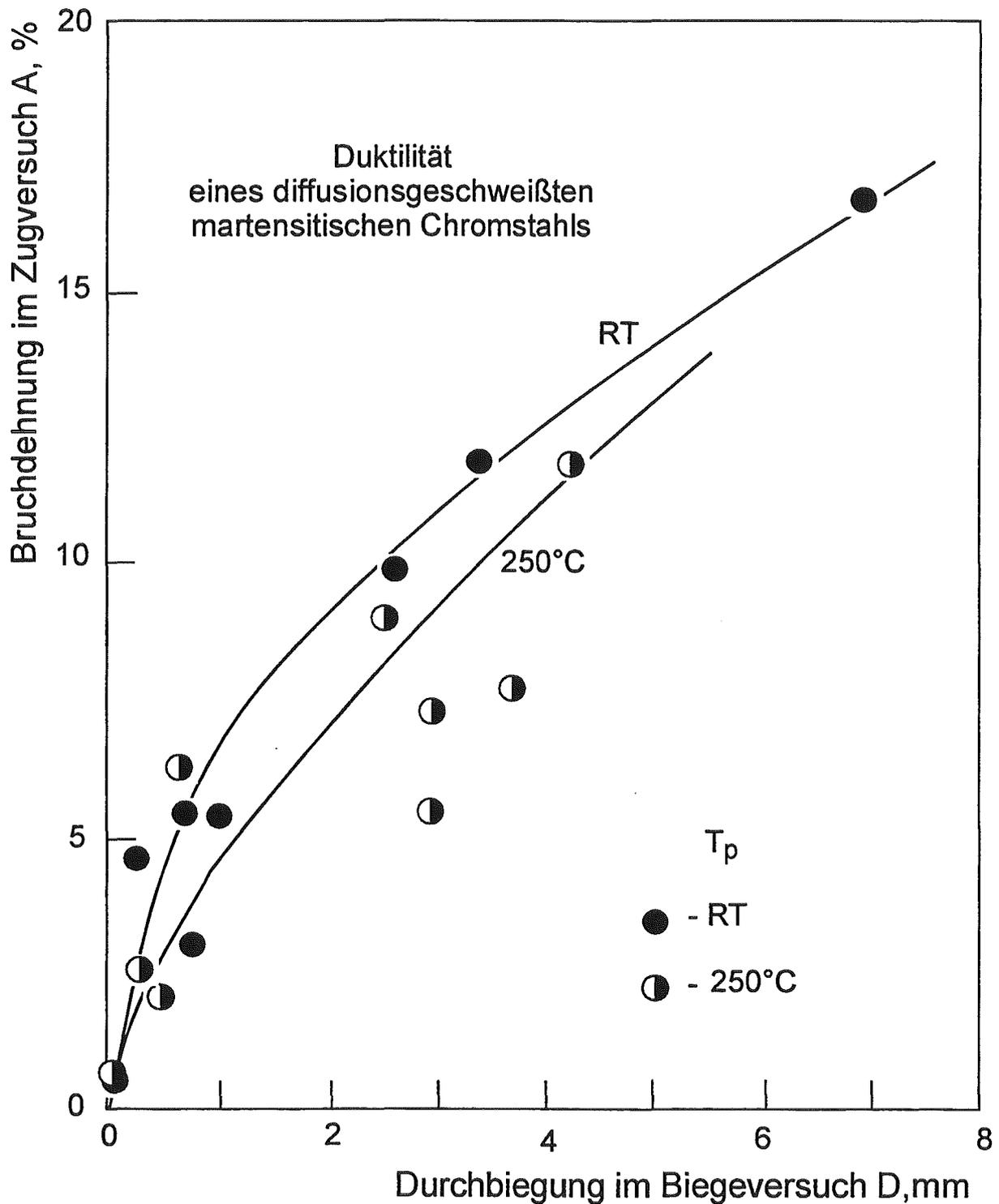


Bild 4: Korrelation zwischen der Bruchdehnung im Zugversuch A und der Durchbiegung im Biegeversuch D eines diffusionsgeschweißten martensitischen Chromstahls. Bei schlechten Schweissqualitäten, d.h. niedrigen Werten für A und D, ist das Auflösungsvermögen der Bruchdehnung höher als das der Durchbiegung. Danach ist der Zugversuch dem Biegeversuch vorzuziehen.

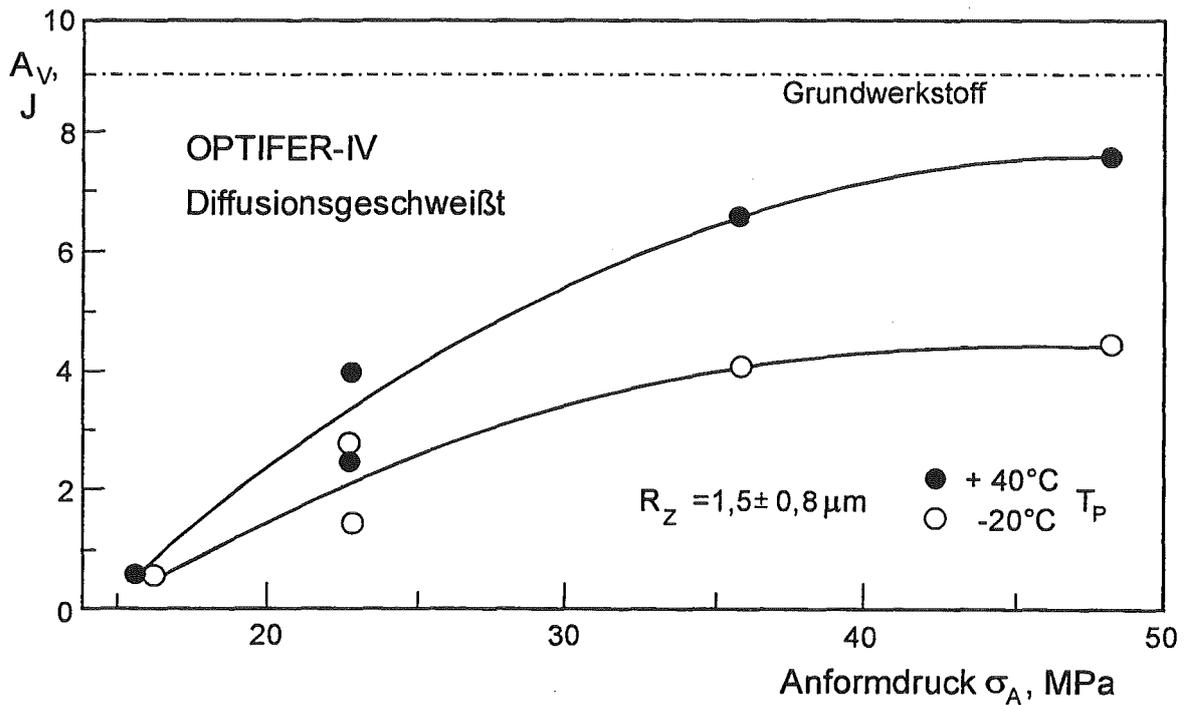


Bild 5: Schlagarbeiten aus Kerbschlagbiegeversuchen an dem diffusionsgeschweißten Stahl OPTIFER-IV in Abhängigkeit vom Anformdruck beim Schweißen. Es ist nicht erkennbar, ob mit zunehmendem Anformdruck der Wert des Grundwerkstoffes erreicht werden kann.

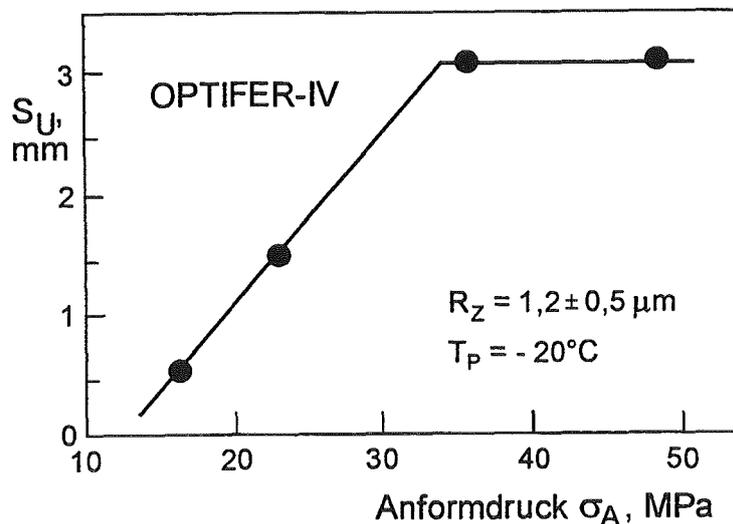


Bild 6: Durchbiegung bis zum Sprödbbruch S_U aus Kerbschlagbiegeversuchen an dem diffusionsgeschweißten Stahl OPTIFER-IV in Abhängigkeit von Anformdruck beim Schweißen. Die Sättigung von S_U oberhalb 35 MPa verstärkt die Annahme, dass eine Erhöhung des Anformdruckes nicht ausreicht, um die Kerschlageigenschaften des Grundwerkstoffes zu erreichen.

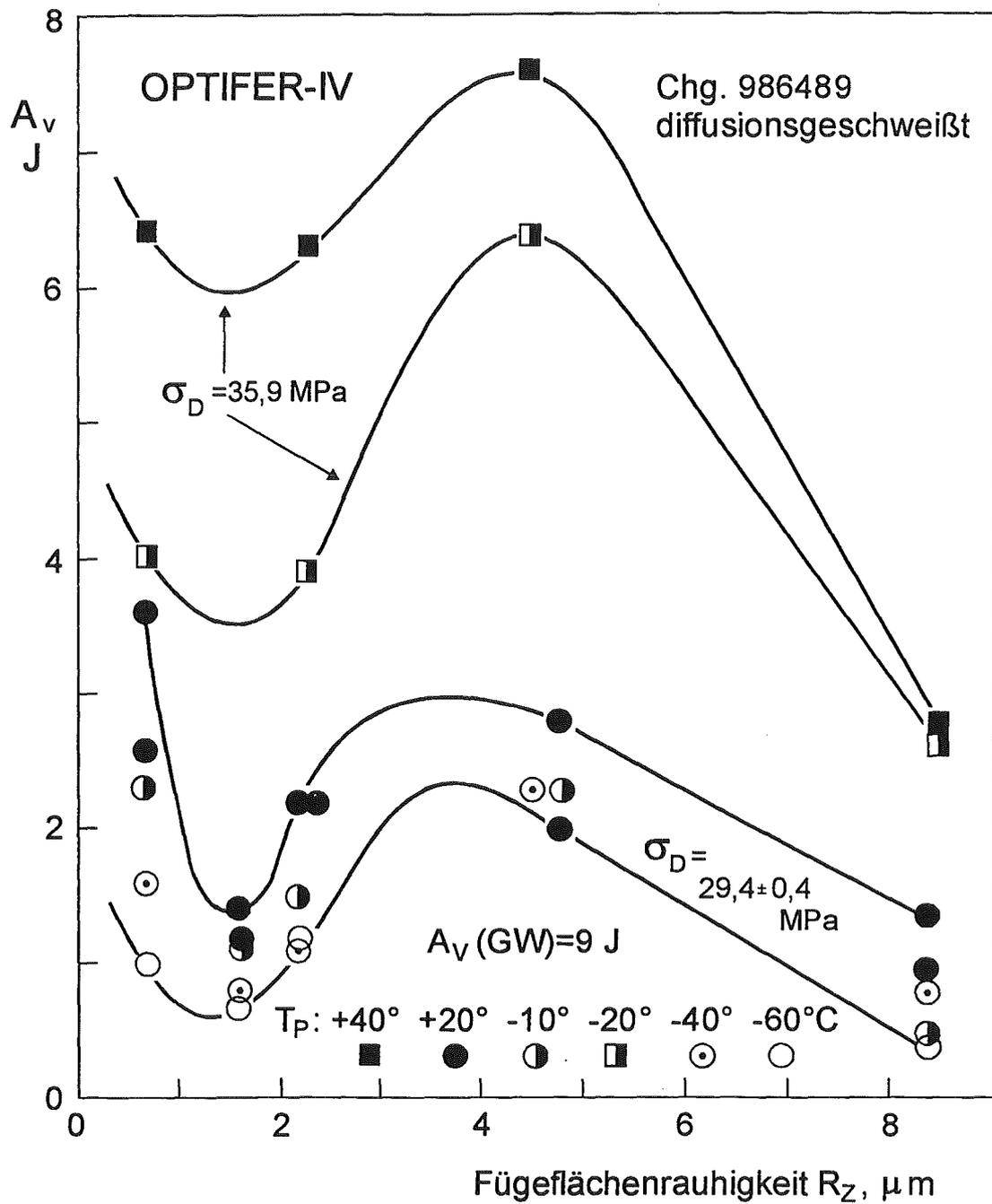


Bild 7: Schlagarbeiten aus Kerbschlagbiegeversuchen an dem diffusionsgeschweissten Stahl OPTIFER-IV in Abhängigkeit von der Rauigkeit R_z der Fügeflächen. Eine Rauigkeit von $R_z \approx 4,5 \mu\text{m}$ ergibt die beste Kerbschlagzähigkeit.

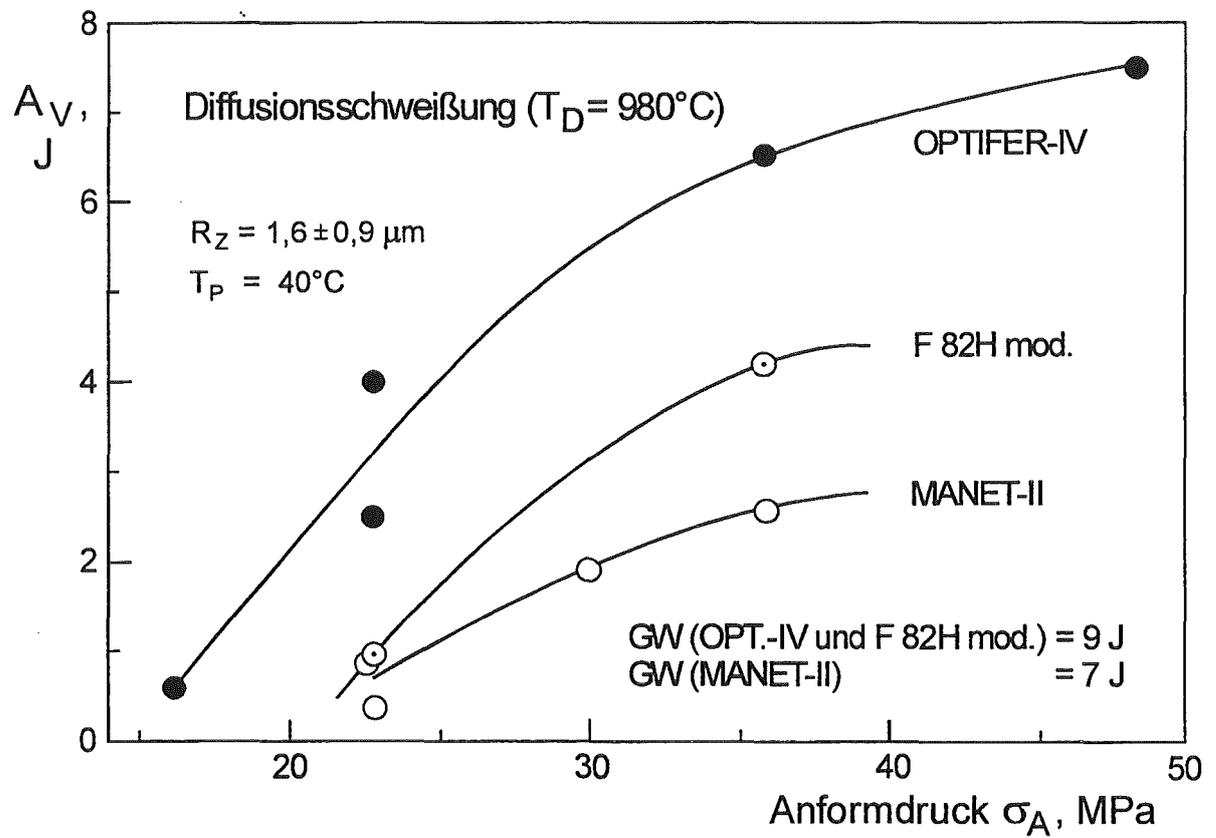


Bild 8: Schlagarbeiten aus Kerbschlagbiegeversuchen an drei diffusionsschweißten martensitischen Chromstählen in Abhängigkeit von Anformdruck beim Schweißen. Der Stahl OPTIFER-IV lässt sich am besten schweißen.

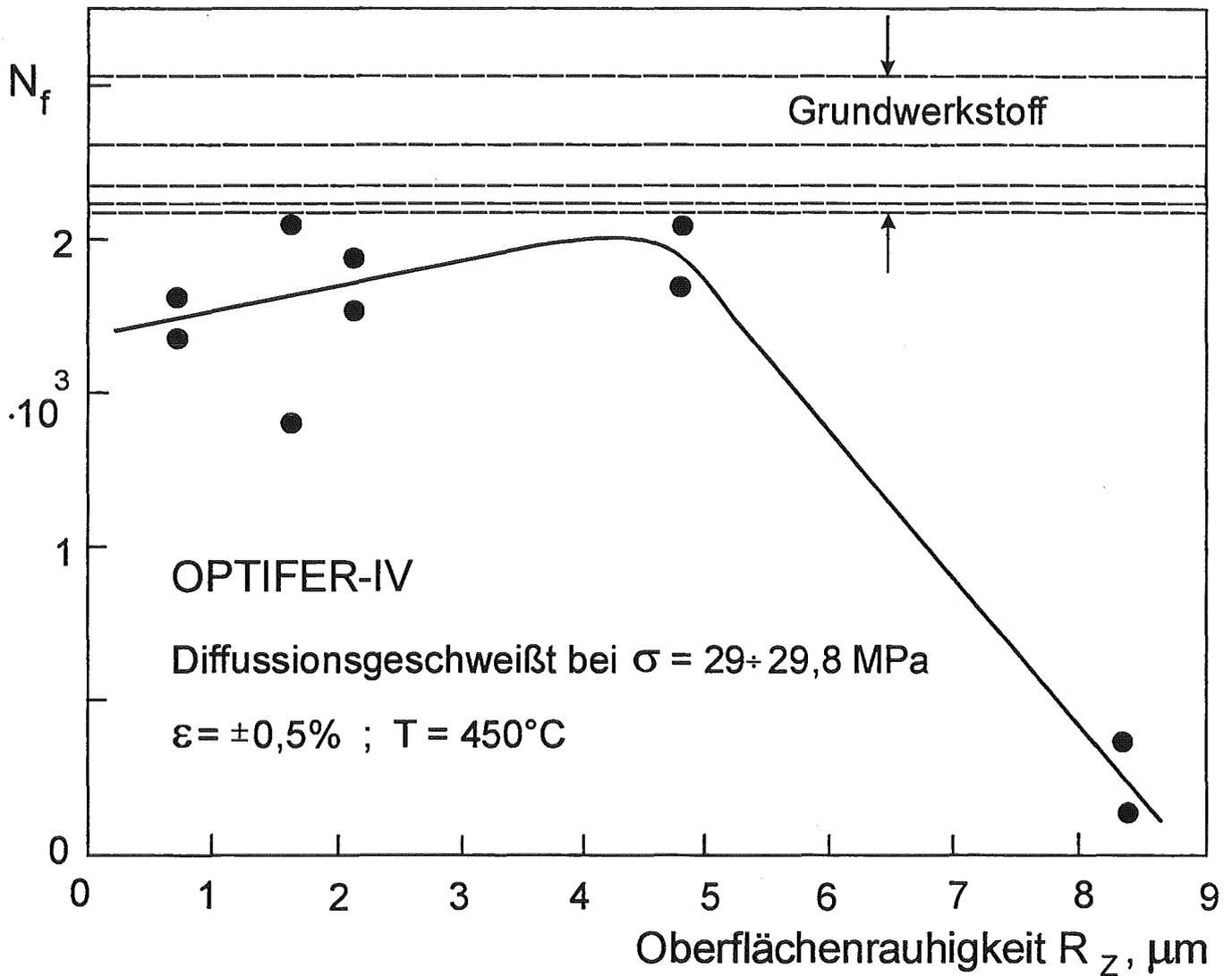


Bild 9: Bruchlastspielzahl N_f aus low cycle fatigue-Versuchen an dem diffusionsgeschweiseten Stahl OPTIFER-IV in Abhängigkeit von der Oberflächenrauigkeit R_z . Bei einer Rauigkeit von $R_z \approx 4,5 \mu\text{m}$ wird die Bruchlastspielzahl des Grundwerkstoffes in etwa erreicht.

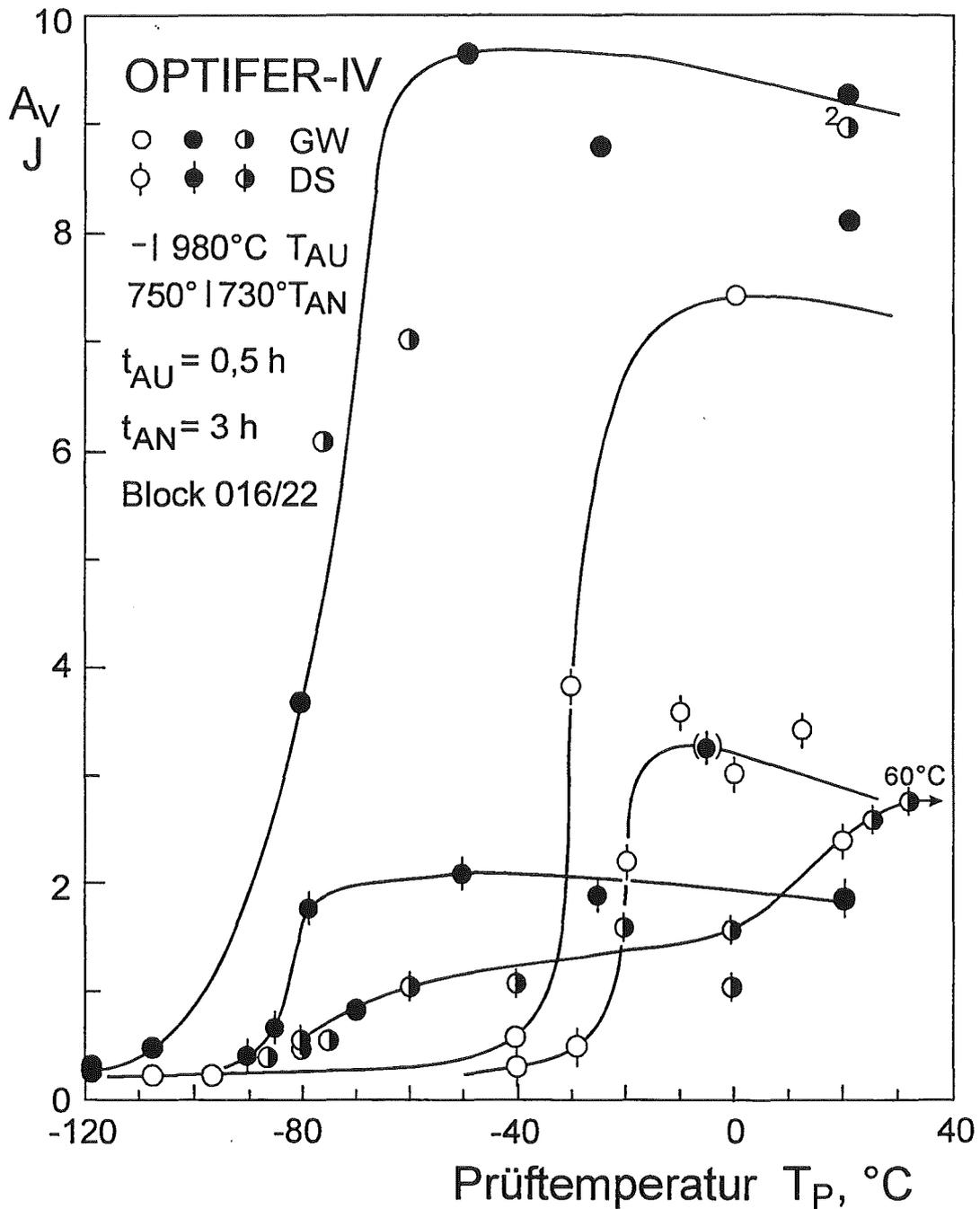


Bild 10: Schlagarbeiten aus Kerbschlagbiegeversuchen an dem diffusionsgeschweissten Stahl OPTIFER-IV in Abhängigkeit von der Prüftemperatur. Sowohl beim Grundwerkstoff als auch bei den geschweissten Proben verbessert sich die Übergangstemperatur der Schlagarbeit (Steilabfall), wenn nach dem Schweißen nicht nur angelassen, sondern auch austenitisiert wird.

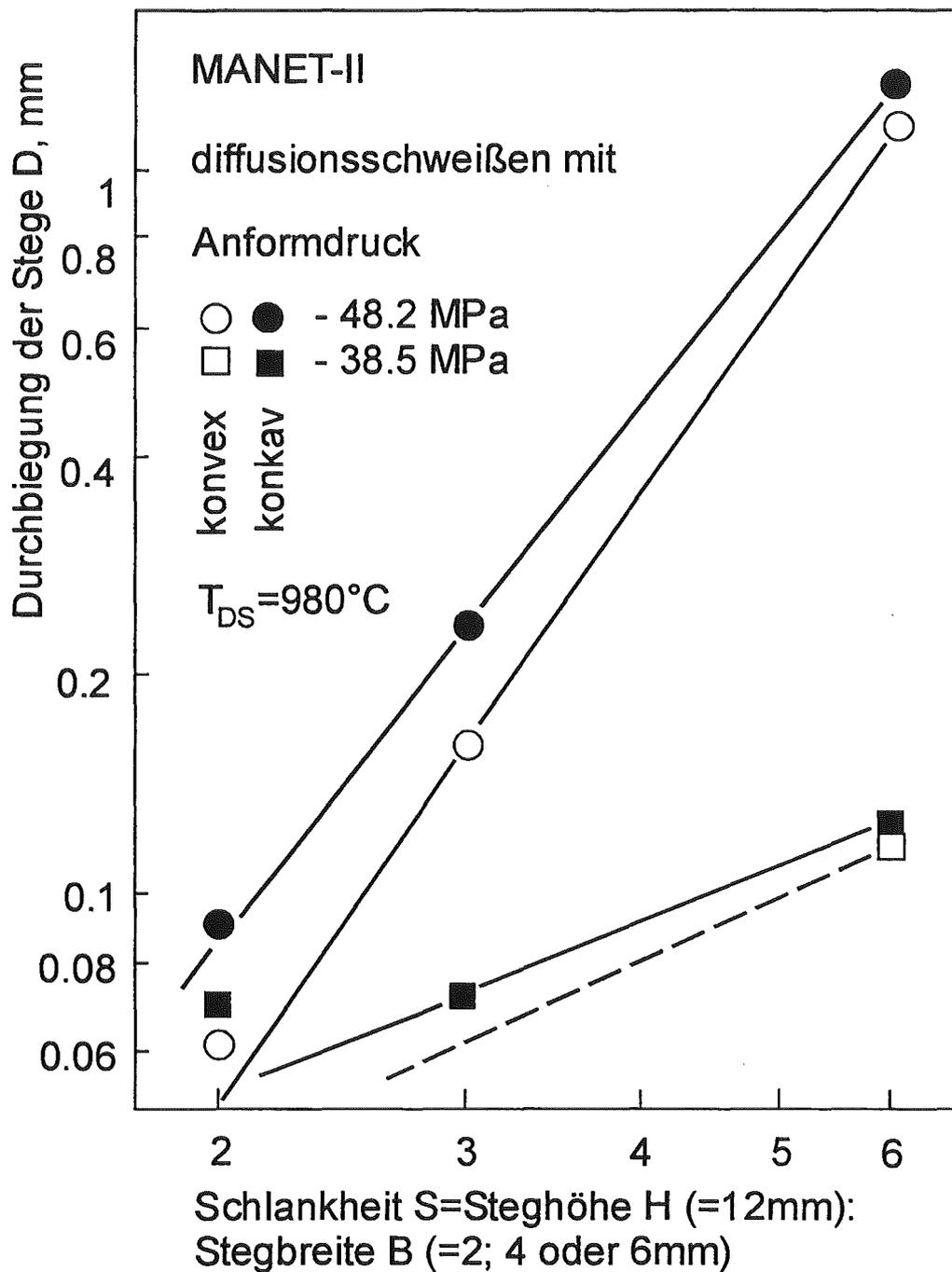


Bild 11: Durchbiegung der Stege zwischen den Kühlkanälen in Abhängigkeit von der Schlankheit (Steghöhe: Stegbreite) der Stege bei $T = 980^\circ\text{C}$ und $\sigma_A = 48,2$ bzw. $38,5$ MPa. Aus der zulässigen Durchbiegung der Stege und deren Schlankheit kann man den maximal zulässigen Anformdruck bei $T = 980^\circ\text{C}$ abschätzen.

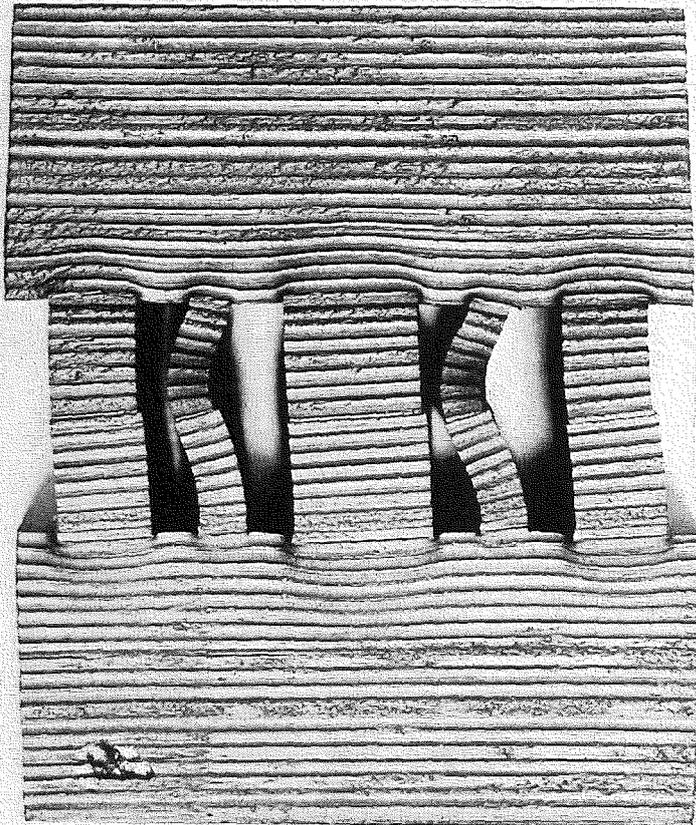
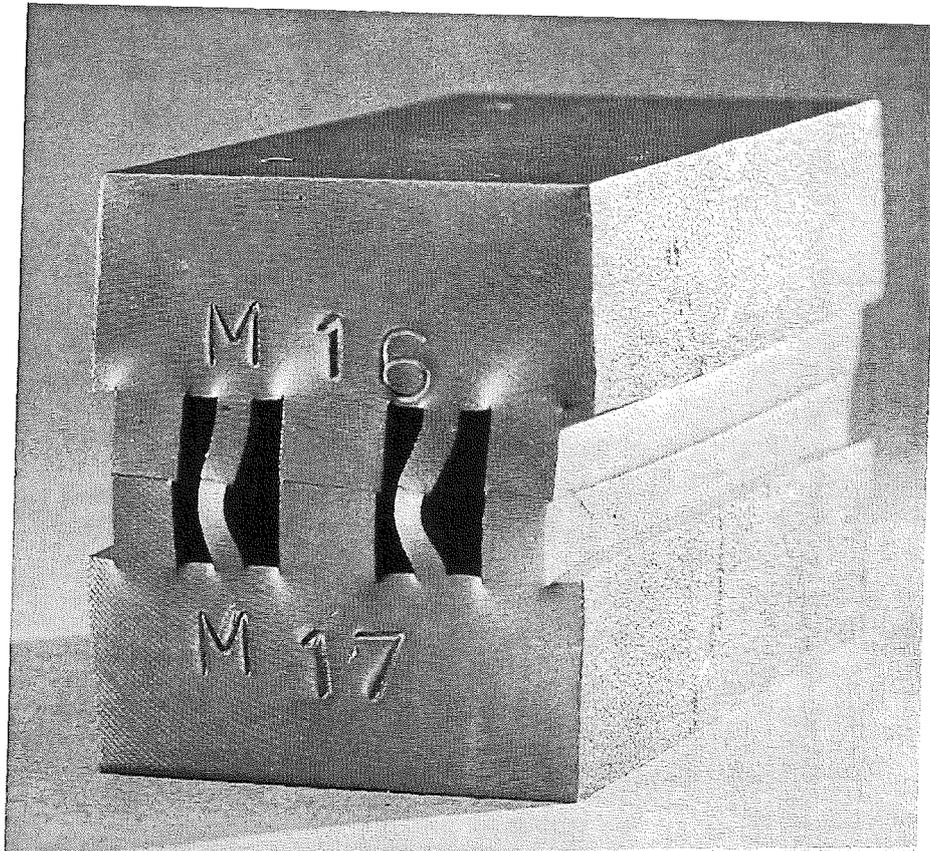


Bild 12: Die beiden Fotos zeigen drei Stegtypen mit 2; 4 und 6 mm Stegbreiten, die mit einem Anformdruck von $\sigma_A = 48,2 \text{ MPa}$ bei 980°C verschweisst worden sind. Ein Foto zeigt die Rückseite des anderen. Obwohl die Ober- und Unterseite nicht genau spiegelbildlich zueinander sind, gibt es nur bei den extrem schlanken Stegen eine gut sichtbare Ausknickung.