

EUR 2367.d

EUROPÄISCHE ATOMGEMEINSCHAFT - EURATOM

**ELEKTRO-SCHLACKE-SCHWEISSEN
VON REAKTORSTÄHLEN**

von

**O. BECKEN und H. WIRTZ
(S L V)**

1966



Zusammenarbeit EURATOM/USA

**EURAEK-Bericht Nr. 1408 abgefasst von der
Schweisstechnischen Lehr- und Versuchsanstalt Duisburg, Deutschland**

Euratom Vertrag Nr. 046-61-3 RDD

HINWEIS

Das vorliegende Dokument ist mit Unterstützung und Förderung der Kommission der Europäischen Atomgemeinschaft (EURATOM) im Rahmen des in dem Abkommen über Zusammenarbeit zwischen der Europäischen Atomgemeinschaft und der Regierung der Vereinigten Staaten von Amerika vom 8. November 1958 festgelegten Gemeinsamen Programms ausgearbeitet worden.

Es wird darauf hingewiesen, daß die Euratomkommission, die Regierung der Vereinigten Staaten, die United States Atomic Energy Commission, ihre Vertragspartner und alle in deren Namen handelnden Personen :

weder ausdrücklich noch stillschweigend eine Gewähr dafür übernehmen, daß die im diesem Dokument enthaltenen Informationen richtig, vollständig und nützlich sind oder daß die Verwendung der in diesem Dokument enthaltenen Informationen oder der in diesem Dokument beschriebenen technischen Anordnungen, Methoden und Verfahren nicht gewerbliche Schutzrechte verletzt;

keine Haftung im Falle der Verwendung der in diesem Dokument enthaltenen Informationen oder der in diesem Dokument bekanntgegebenen technischen Anordnungen, Methoden und Verfahren oder für Schäden übernehmen, die infolge dieser Verwendung entstehen.

Dieser Bericht wird in den auf der vierten Umschlagseite genannten Vertriebsstellen

zum Preise von DM 5.60	FF 7.—	FB 70	Lit. 870	Fl. 5.10
------------------------	--------	-------	----------	----------

verkauft.

Es wird gebeten, bei Bestellungen die EUR-Nummer und den Titel anzugeben, die auf dem Umschlag jedes Berichts aufgeführt sind.

Gedruckt von VAILLANT-CARMANNE
Lüttich, Februar 1966

EUR 2367 . d

ELEKTRO-SCHLACKE-SCHWEISSEN VON REAKTORSTÄHLEN
von O. BECKEN und H. WIRTZ (SLV)

Europäische Atomgemeinschaft - EURATOM

Zusammenarbeit EURATOM/U. S. A.

EURAEK - Bericht Nr. 1408 abgefasst von der Schweisstechnischen

Lehr- und Versuchsanstalt Duisburg (Deutschland)

Euratom Vertrag Nr. 046-61-3 RDD

Brüssel, Februar 1966 - 58 Seiten - 16 Abbildungen - FB 70

Die Arbeit zerfällt in zwei Gruppen :

1. Untersuchung der Wirkung verschiedener Einflußgrößen auf die Gütwerte, insbesondere die Kerbschlagzähigkeitswerte, von Elektro-Schlacke-Schweißungen an Reaktorstählen sowie deren Verbesserung.
2. Entwicklung einer neuen Schweißtechnologie für geschlossene Rundnähte mit dem Elektro-Schlacke-Schweißen.

Vorzugsweise an Stahl ASTM 302 Grad B und 13 CrMo 44 wurde die Wirkung von Schweißpulvern verschiedener Basizität und Zusatzdrähte mit Beimengungen von Al, AlN, Ni, B, V, Zr, Nb, Mo, Ti und kombinierter Desoxydationsmittel auf Makro- und Mikrostruktur sowie auf die Gütwerte untersucht. Einbezogen wurde der Einfluß des Phosphor- und Schwefelgehaltes, der Strom-

EUR 2367 . d

ELECTRO-SLAG WELDS IN REACTOR STEELS

by O. BECKEN and H. WIRTZ (SLV)

European Atomic Energy Community - EURATOM

EURATOM/US Agreement for Cooperation

EURAEK Report No. 1408 prepared by the Schweisstechnischen

Lehr- und Versuchsanstalt Duisburg (Germany)

Euratom Contract No. 046-61-3 RDD

Brussels, February 1966 - 58 Pages - 16 Figures - FB 70

The work is split up into the following two groups :

1. Investigation of the effect of various parameters on quality factors, especially the notch-impact strength, of electro-slag welds in reactor steels, and on their improvement.
2. Development of a new welding technique for circular welds by the electro-slag technique.

Using preferably steel ASTM 302 Grade B and 13 CrMo 44, tests were carried out to determine the effect on the macro- and microstructure, and also on quality factors, of welding powders of varying basicity and filler rods with additions of Al, AlN, Ni, B, V, Zr, Nb, Mo, Ti and combined deoxidizing

EUR 2367 . d

ELECTRO-SLAG WELDS IN REACTOR STEELS

by O. BECKEN and H. WIRTZ (SLV)

European Atomic Energy Community - EURATOM

EURATOM/US Agreement for Cooperation

EURAEK Report No. 1408 prepared by the Schweisstechnischen

Lehr- und Versuchsanstalt Duisburg (Germany)

Euratom Contract No. 046-61-3 RDD

Brussels, February 1966 - 58 Pages - 16 Figures - FB 70

The work is split up into the following two groups :

1. Investigation of the effect of various parameters on quality factors, especially the notch-impact strength, of electro-slag welds in reactor steels, and on their improvement.
2. Development of a new welding technique for circular welds by the electro-slag technique.

Using preferably steel ASTM 302 Grade B and 13 CrMo 44, tests were carried out to determine the effect on the macro- and microstructure, and also on quality factors, of welding powders of varying basicity and filler rods with additions of Al, AlN, Ni, B, V, Zr, Nb, Mo, Ti and combined deoxidizing

EUR 2367 . d

ELECTRO-SLAG WELDS IN REACTOR STEELS

by O. BECKEN and H. WIRTZ (SLV)

European Atomic Energy Community - EURATOM

EURATOM/US Agreement for Cooperation

EURAEK Report No. 1408 prepared by the Schweisstechnischen

Lehr- und Versuchsanstalt Duisburg (Germany)

Euratom Contract No. 046-61-3 RDD

Brussels, February 1966 - 58 Pages - 16 Figures - FB 70

The work is split up into the following two groups :

1. Investigation of the effect of various parameters on quality factors, especially the notch-impact strength, of electro-slag welds in reactor steels, and on their improvement.
2. Development of a new welding technique for circular welds by the electro-slag technique.

Using preferably steel ASTM 302 Grade B and 13 CrMo 44, tests were carried out to determine the effect on the macro- and microstructure, and also on quality factors, of welding powders of varying basicity and filler rods with additions of Al, AlN, Ni, B, V, Zr, Nb, Mo, Ti and combined deoxidizing

art, Polarität, Stromstärke, Schweißspannung, Pendelgeschwindigkeit, Kühlung, verschiedener Wärmebehandlungen und der Anwendung von Schutzgas. Die Kerbschlagzähigkeiten lassen sich ohne Glühbehandlung verbessern durch

- optimale Abstimmung der Legierungselemente
- niedrigen Gehalt an P, S, O, N und H
- basisches Schweißpulver mit geringem P- und S-Gehalt
- Wechselstrom
- optimale Abstimmung von Strom, Spannung, Pendelgeschwindigkeit
- intensive Kühlung der Gleitschuhe.

Weitere Verbesserung ergaben

- Spannungsarmglühen bei ASTM 302 Grad B
- Luftvergüten bei 13 CrMo 44
- dem Schweißen unmittelbar nachfolgendes Anlassen.

Zum Schweißen geschlossener Rundnähte wurde eine neue Technologie entwickelt, bei welcher der Beginn in ein inneres hohles Anlaufstück des Schusses verlegt wird. Dort wird das Schlackenbad entwickelt, das über ein schräges Kupferstück langsam in die Fuge hinübertritt und dort sofort einen Einbrand erzeugt. Nach dem Herumführen um den Umfang läuft die Schweißung in einen Kupfertrichter aus. Das bisherige Ausbrennen eines schlechten Anlaufstückes entfällt. Ein Film erläutert den Vorgang.

agents, factors considered were the influence of the phosphorus and sulphur content, the type of current, polarity, strength of current, welding voltage, oscillation rate, cooling, various heat-treatments and the use of shielding gas. Notch-impact strength values can be improved without annealing by means of :

- optimum selection of the alloy elements
- low P, S, O, N and H content
- basic welding fluxes with low P- and S-content
- alternating current
- optimal combination of current, voltage, oscillation rate
- intensive cooling of the flanges.

Further improvement was obtained by the following :

- stress-relief annealing with ASTM 302 Grade B
- air hardening with 13 CrMo 44
- tempering immediately after welding.

For the execution of full circumferential welds a new process was developed, which begins in a hollow internal run-up section in the ring. Here the slag-bath is developed, it then passes slowly over a slanting copper channel into the joint, where it causes an immediate fusion. After flowing round the perimeter of the section, the weldmetal issues into a copper funnel. The burning out of poor run-up pieces hitherto experienced is avoided. A film explains the process.

agents, factors considered were the influence of the phosphorus and sulphur content, the type of current, polarity, strength of current, welding voltage, oscillation rate, cooling, various heat-treatments and the use of shielding gas. Notch-impact strength values can be improved without annealing by means of :

- optimum selection of the alloy elements
- low P, S, O, N and H content
- basic welding fluxes with low P- and S-content
- alternating current
- optimal combination of current, voltage, oscillation rate
- intensive cooling of the flanges.

Further improvement was obtained by the following :

- stress-relief annealing with ASTM 302 Grade B
- air hardening with 13 CrMo 44
- tempering immediately after welding.

For the execution of full circumferential welds a new process was developed, which begins in a hollow internal run-up section in the ring. Here the slag-bath is developed, it then passes slowly over a slanting copper channel into the joint, where it causes an immediate fusion. After flowing round the perimeter of the section, the weldmetal issues into a copper funnel. The burning out of poor run-up pieces hitherto experienced is avoided. A film explains the process.

agents, factors considered were the influence of the phosphorus and sulphur content, the type of current, polarity, strength of current, welding voltage, oscillation rate, cooling, various heat-treatments and the use of shielding gas. Notch-impact strength values can be improved without annealing by means of :

- optimum selection of the alloy elements
- low P, S, O, N and H content
- basic welding fluxes with low P- and S-content
- alternating current
- optimal combination of current, voltage, oscillation rate
- intensive cooling of the flanges.

Further improvement was obtained by the following :

- stress-relief annealing with ASTM 302 Grade B
- air hardening with 13 CrMo 44
- tempering immediately after welding.

For the execution of full circumferential welds a new process was developed, which begins in a hollow internal run-up section in the ring. Here the slag-bath is developed, it then passes slowly over a slanting copper channel into the joint, where it causes an immediate fusion. After flowing round the perimeter of the section, the weldmetal issues into a copper funnel. The burning out of poor run-up pieces hitherto experienced is avoided. A film explains the process.

EUR 2367.d

EUROPÄISCHE ATOMGEMEINSCHAFT - EURATOM

**ELEKTRO-SCHLACKE-SCHWEISSEN
VON REAKTORSTÄHLEN**

von

**O. BECKEN und H. WIRTZ
(S L V)**

1966



Zusammenarbeit EURATOM/USA

**EURAEK-Bericht Nr. 1408 abgefasst von der
Schweisstechnischen Lehr- und Versuchsanstalt Duisburg, Deutschland**

Euratom Vertrag Nr. 046-61-3 RDD

ZUSAMMENFASSUNG

Die Arbeit zerfällt in zwei Gruppen :

1. Untersuchung der Wirkung verschiedener Einflußgrößen auf die Gütewerte, insbesondere die Kerbschlagzähigkeitswerte, von Elektro-Schlacke-Schweißungen an Reaktorstählen sowie deren Verbesserung.
2. Entwicklung einer neuen Schweißtechnologie für geschlossene Rundnähte mit dem Elektro-Schlacke-Schweißen.

Vorzugsweise an Stahl ASTM 302 Grad B und 13 CrMo 44 wurde die Wirkung von Schweißpulvern verschiedener Basizität und Zusatzdrähte mit Beimengungen von Al, AlN, Ni, B, V, Zr, Nb, Mo, Ti und kombinierter Desoxydationsmittel auf Makro- und Mikrostruktur sowie auf die Gütewerte untersucht. Einbezogen wurde der Einfluß des Phosphor- und Schwefelgehaltes, der Stromart, Polarität, Stromstärke, Schweißspannung, Pendelgeschwindigkeit, Kühlung, verschiedener Wärmebehandlungen und der Anwendung von Schutzgas. Die Kerbschlagzähigkeiten lassen sich ohne Glühbehandlung verbessern durch

optimale Abstimmung der Legierungselemente
niedrigen Gehalt an P, S, O, N und H
basisches Schweißpulver mit geringem P- und S-Gehalt
Wechselstrom

optimale Abstimmung von Strom, Spannung, Pendelgeschwindigkeit
intensive Kühlung der Gleitschuhe.

Weitere Verbesserung ergaben

Spannungsarmglühen bei ASTM 302 Grad B
Luftvergüten bei 13 CrMo 44
dem Schweißen unmittelbar nachfolgendes Anlassen.

Zum Schweißen geschlossener Rundnähte wurde eine neue Technologie entwickelt, bei welcher der Beginn in ein inneres hohles Anlaufstück des Schusses verlegt wird. Dort wird das Schlackenbad entwickelt, das über ein schräges Kupferstück langsam in die Fuge hinübertritt und dort sofort einen Einbrand erzeugt. Nach dem Herumführen um den Umfang läuft die Schweißung in einen Kupfertrichter aus. Das bisherige Ausbrennen eines schlechten Anlaufstückes entfällt. Ein Film erläutert den Vorgang.

INHALTSVERZEICHNIS

1 — GÜTE DER SCHWEISSVERBINDUNGEN	5
1.1 — Möglichkeiten, die in der Praxis leicht anwendbar sind	6
1.1.1 Legierungszusammensetzung des Schweisszusatzwerkstoffs.	6
1.1.2 Vergleich von Massivdraht- und Falzdrahtelektroden etwa gleicher Zusammensetzung	6
1.1.3 Zusammensetzung und Basizität des Schweisspulvers bzw. der Schlacke	7
1.1.4 Einfluss von Stromart und Polung der Drahtelektrode	9
1.1.5 Wahl und Kombination günstiger Schweissparameter und deren Einfluss auf die Gütewerte	10
1.1.6 Wirkung eines Abschirmens von Schweissbad und Schweissnaht durch Schutzgas	10
1.2 — Güteverbesserung von Elektro-Schlacke-Schweissverbindungen durch nachfolgende Wärmebehandlung	10
1.2.1 Stahl ASTM 302 Grad B	10
1.2.2 Stahl 13 CrMo 44	11
1.2.3 Einfluss des Behandlungszustandes auf den Restaustentitgehalt ...	11
1.2.4 Örtliche, anschliessende Wärmebehandlung (Anlassen)	12
1.3 — Weitere Möglichkeiten zunächst noch mehr theoretischer Art	12
1.3.1 Wirkung von kornverfeinernden Sonderzusätzen	12
1.3.2 Einfluss der Grundwerkstoffzusammensetzung	13
1.3.3 Wirkung eines Wasserstoffreiglühens des Grundwerkstoffes vor dem Schweissen	13
1.4 — Zusammenfassende Betrachtungen.	13
1.4.1 Makro- und Mikrogefügestruktur der Elektro-Schlacke-Schweiss- verbindungen	13
1.4.2 Einflüsse auf die Kerbschlagzähigkeitswerte des Schweissgutes . .	14
2 — HERSTELLEN VON GESCHLOSSENEN RUNDNÄHTEN	15
2.1 — Sachlage zum Zeitpunkt der Inangriffnahme	15
2.2 — Schwierigkeiten bei den bis zum Zeitpunkt der Inangriffnahme üblichen Verfahrensweisen	17
2.3 — Neue Technologie der SLV Duisburg.	17
2.3.1 Prinzip	17
2.3.2 Beschreibung der Einrichtung	18
2.3.3 Wichtige Einzelheiten der Einrichtung und Erfahrung damit . . .	19

2.4 — Vergleich der neuen Technologie mit bekannten Methoden	21
2.4.1 Methode von Paton	21
2.4.2 Methode von Burden und Ellis	21
2.4.3 Methode von Thrän und Maushake	21
TABELLEN	22
ABBILDUNGEN	45

ELEKTRO - SCHLACKE - SCHWEISSEN VON REAKTORSTÄHLEN (*)

1 — GÜTE DER SCHWEISSVERBINDUNGEN

Untersuchung über die Wirkung verschiedener Einflußgrößen auf die Gütewerte, insbesondere auf die Kerbschlagzähigkeitswerte, von Elektro-Schlacke-Schweißungen an Reaktorstählen sowie deren Verbesserung.

Im Zeitraum von etwa dreieinhalb Jahren wurden 184 Schweißversuche durchgeführt und ausgewertet, um die Wirkung verschiedener Einflußgrößen auf die Gütewerte, insbesondere auf die Kerbschlagzähigkeitswerte, von Elektro-Schlacke-Schweißungen zu überprüfen mit dem Ziel, dieselben zu verbessern. Zum geringeren Teil handelte es sich bei den Schweißversuchen um das Erschmelzen von reinem Schweißgut in einer wassergekühlten Kupferkokille; in der Mehrzahl wurden Schweißverbindungen an den Stählen :

St 37-2 nach DIN 17 100	}	für Vor- und Orientierungsversuche
St 37-2 in Sondergüte mit geringen Phosphor- und Schwefelgehalten		
Wel-Monix (MnNiMoV-legierter Sonderstahl der HOAG/Oberhausen)		
ASTM 302 Grad B nach DIN 50 049/3 C	}	für Hauptversuche
13 CrMo 44 nach DIN 17 155		

hergestellt, Tabelle I. Hierbei wurden sowohl handelsübliche Schweißzusatzwerkstoffe, Schweißpulver und Sonderzusätze als auch solche eigener Entwicklung benutzt, Tabelle II bis IV.

Es wurden unter anderem folgende Abhängigkeiten untersucht :

1. Einfluß eines Zusatzes von Al, Al + N, AlN, AlN + Ni, B, FeV, FeZr, FeNb, Mo, Ni, Ti und kombinierter Desoxydationslegierungen zum Schweißgut auf die Makro- und Mikrogefügestruktur sowie auf die Gütewerte.
2. Einfluß niedriger Phosphor- und Schwefelgehalte im Schweißzusatzwerkstoff und im Grundwerkstoff auf die Gütewerte.
3. Einfluß von Zusammensetzung und Basizität des Schweißpulvers bzw. der Schlacke auf die Gütewerte und das Schweißverhalten.
4. Einfluß der Legierungszusammensetzung des Schweißzusatzwerkstoffes auf die Gütewerte.
5. Vergleich von Massivdraht- und Fülldrahtelektroden etwa gleicher Zusammensetzung im Hinblick auf die erzielten Gütewerte.
6. Einfluß von Stromart und Polung der Drahtelektrode auf die Gütewerte und das Schweißverhalten.
7. Einfluß einer nachfolgenden Wärmebehandlung auf die Makro- und Mikrogefügestruktur sowie auf die Gütewerte der Schweißverbindung : Wasserstofffreiglühen, Spannungsfreiglühen, Normalglühen, Luftvergüten.

(*) Manuskript erhalten am 8. Oktober 1965.

8. Einfluß einer örtlichen, anschließenden Wärmebehandlung (Anlassen) auf die Güte der Schweißverbindung.
9. Wirkung eines Wasserstofffreiglühens des Grundwerkstoffes vor dem Schweißen.
10. Wirkung eines Abschirmens von Schweißbad und Schweißnaht durch Schutzgas.
11. Einfluß von Wahl und Kombination günstiger Schweißparameter wie : Spannung, Strom, Pendelgeschwindigkeit, Kühlung der Kupfergleitschuhe.

Anschließend wird über die wichtigsten Ergebnisse berichtet, wobei unterschieden wird in :

- 1.1 Möglichkeiten, die in der Praxis leicht anwendbar sind,
- 1.2 Verbesserung der Güte von Elektro-Schlacke-Schweißverbindungen durch nachfolgende Wärmebehandlung,
- 1.3 Weitere Möglichkeiten (zunächst noch mehr theoretischer Art).

1.1 — Möglichkeiten, die in der Praxis leicht anwendbar sind

1.1.1 — Legierungszusammensetzung des Schweißzusatzwerkstoffes

Die benutzten Grundwerkstoffe wurden mit einer größeren Anzahl von Schweißzusatzwerkstoffen verschweißt. Dabei zeigte sich, daß bei dem

Stahl ASTM 302 Grad B der Schweißzusatzwerkstoff S 3/Mo + 1,0 Ni + wenig Mn und bei dem

Stahl 13 CrMo 44 der Schweißzusatzwerkstoff S 2/CrMo + 1,0 Ni

günstige Ergebnisse liefert. Der Einfluß der Legierungszusammensetzung des Schweißzusatzwerkstoffes auf die Kerbschlagzähigkeit des Schweißgutes für den Schweißzustand ist aus Tabelle XI ersichtlich (die betreffende Vers.-Nr. im Vierteljahresbericht findet sich unter der jeweiligen Positions-Nr.). Von großer Bedeutung für die erreichbaren Gütegrade sind möglichst geringe Gehalte an P, S, N, O und H im Schweißzusatzwerkstoff.

Es wurde eine gemeinsame Auswertung von 32 Schweißversuchen mit verschiedenen Grundwerkstoffen, Schweißpulvern, Stromarten und Polungen der Drahtelektrode im Hinblick auf den Einfluß der Legierungszusammensetzung des Schweißzusatzwerkstoffes durchgeführt, Tabelle XII; hierin sind allerdings die beiden vorher genannten Schweißzusatzwerkstoffe S 3/Mo + 1,0 Ni + wenig Mn und S 2/CrMo + 1,0 Ni noch nicht enthalten. Bei den meisten Drahtgruppen ist die Tendenz der Kurven « Kerbschlagzähigkeit aufgetragen über dem Gehalt an (5 N + P + O) » für den ungealterten und gealterten Zustand weitgehend gleich. Daraus kann geschlossen werden, daß die sich überlagernden Einflüsse von Probenherstellung und Prüfung gering sind. Es läßt sich tendenzmäßig die Abhängigkeit der Kerbschlagzähigkeit ungealtert und gealtert vom (5 N + P + O)-Gehalt feststellen : mit steigendem (5 N + P + O)-Gehalt fällt die Kerbschlagzähigkeit ab. Diese Abhängigkeit wird allerdings stark von anderen Einflußgrößen wie Schweißgutzusammensetzung (abhängig von Schweißdraht- und Grundwerkstoffzusammensetzung sowie deren Mischungsverhältnis), verwendetes Schweißpulver, benutzte Stromart und Polung der Drahtelektrode und anderen überlagert.

1.1.2 — Vergleich von Massivdraht- und Falzdrahtelektroden etwa gleicher Zusammensetzung

Bei Kokillenschweißungen mit Falzdraht wurde festgestellt, daß in den meisten Fällen die sich einstellende Schweißgutzusammensetzung nicht der von uns geforderten Soll-Zusammensetzung entsprach. Insbesondere fielen die Nickelgehalte teilweise erheblich zu

gering aus. Bei in etwa gleicher Schweißgutzusammensetzung zeigt der Vergleich von Falzdraht- und Massivdrahtelektrode bei derselben Stromart und Polung der Drahtelektrode für den Massivdraht günstigere Kerbschlagzähigkeitswerte, Tabelle XIII.

Bei einer Verbindungsschweißung an Stahl ASTM 302 Grad B mit der Falzdrahtelektrode S 3/Mo + 2,5 Ni/4 y (SW 29 nach Tabelle II) wurden ungealtert und gealtert bessere Kerbschlagzähigkeitswerte erhalten als unter sonst gleichen Bedingungen mit der Massivdrahtelektrode S 3/Mo (SW 11 nach Tabelle II). Die Werte sind aber schlechter als diejenigen, die z.B. mit der Massivdrahtelektrode S 3/Mo + 1,0 Ni (SW 13 nach Tabelle II) und dem Schweißpulver AN 8 oder mit dem Schweißdraht S 3/Mo + 2,5 Ni (SW 14 nach Tabelle II) und dem Schweißpulver AN 22 bei sonst gleichen Bedingungen erreicht wurden.

Wegen der nicht übermäßig günstigen Ergebnisse wurden die Schweißversuche in dieser Richtung nicht fortgesetzt.

1.1.3 — Zusammensetzung und Basizität des Schweißpulvers bzw. der Schlacke

Neben einer Aufzählung der benutzten Schweißpulver bzw. Schweißpulvermischungen und ihrer Charakterisierung durch Angabe des Basizitätsgrades enthält Tabelle III eine Beurteilung des jeweiligen Einbrandes und Schweißverhaltens. Daraus geht hervor, daß mit zunehmendem Basizitätsgrad im allgemeinen der Einbrand abnimmt und das Schweißverhalten sich verschlechtert. Dies dürfte mit unterschiedlichen Schlackeneigenschaften im Hinblick auf Temperatur, Viskosität, Oberflächenspannung, Benetzungsfähigkeit, elektrische sowie Wärmeleitfähigkeit und anderen zusammenhängen.

Den Einfluß von Schweißpulverzusammensetzung und -basizität auf Schweißgutzusammensetzung, Kerbschlagzähigkeitswerte und Einbrand beim gleichen Grundwerkstoff, aber unterschiedlichen Schweißzusatzwerkstoffen zeigt Tabelle VII (die betreffende Vers.-Nr. im Vierteljahresbericht findet sich unter der jeweiligen Positions-Nr.). Es ist festzustellen, daß mit zunehmendem Basizitätsgrad :

1. der Siliziumgehalt im Schweißgut abnimmt,
2. der Mangangehalt im Schweißgut zunimmt,
3. die Kohlenstoff-, Phosphor- und Schwefelgehalte im Schweißgut sich praktisch nicht ändern,
4. der Einbrand geringer wird,
5. die Kerbschlagzähigkeitswerte, insbesondere für den gealterten Zustand, überwiegend zunehmen.

Ein Schlackenwechsel während des Schweißens, der bei einem Schweißversuch (Vers.-Nr. 61) teils diskontinuierlich, teils kontinuierlich, durchgeführt wurde, hatte nicht die erwarteten niedrigen Phosphor- und Schwefelgehalte im Schweißgut zur Folge, Tabelle VIII. Es ist anzunehmen, daß entweder die Phosphor- und Schwefelgehalte im benutzten Schweißpulver selbst zu hoch lagen oder sein Basizitätsgrad nicht groß genug war.

Die Wirkung besonderer Schweißpulverzusätze auf die Schweißgutzusammensetzung bestimmter Kokillen- und Verbindungsschweißungen zeigt Tabelle IX. An den Ergebnissen der Verbindungsschweißungen ist zu sehen, daß mit zunehmendem Basizitätsgrad der Schweißpulvermischung :

1. der Siliziumgehalt im Schweißgut abnimmt,
2. der Mangangehalt im Schweißgut zunimmt,
3. die Phosphor- und Schwefelgehalte im Schweißgut geringer werden,
4. der Kohlenstoffgehalt praktisch unverändert bleibt.

Bei den Kokillenschweißungen, die allerdings im Gegensatz zu den erwähnten Verbindungsschweißungen mit einem phosphor- und schwefelarmen Zusatzwerkstoff hergestellt

wurden, zeigte sich ein basisches Schweißpulver, hergestellt aus reinen Ausgangsstoffen (AN 22 rein = SP 9), hinsichtlich der mechanischen Güterwerte dem gleichen, aber handelsüblichen Schweißpulver (AN 22 normal = SP 4) reproduzierbar unterlegen, Tabelle IX. Ein Zusatz von Bariumoxyd zum Schweißpulver (SP 10) hatte ebenfalls kein günstiges Ergebnis, Tabelle IX, Pos. 6.

Durch Mikrogefügeuntersuchungen der beiden erstgenannten Kokillenschweißungen, die lichtmikroskopisch und elektronenmikroskopisch erfolgten, ließen sich die stark unterschiedlichen Kerbschlagzähigkeitswerte nicht ohne weiteres erklären, da die Bilder keine deutbaren Unterschiede zeigten. Rückstandsanalyse und Röntgenfeinstrukturuntersuchung ergaben folgendes :

In der Grundmasse liegt in allen Fällen neben der starken Primärphase des Ferrits noch eine schwache Sekundärphase vor. Für die Hauptphase wurde ein Parameter von $a_0 = 2,868 \text{ \AA}$ gemessen. Das entspricht einem Mischkristall Fe-Mn-Mo. Da die schwächere zweite Phase jedoch die Struktur des α -Mn aufweist, dürfte sich Mangan bevorzugt in der Sekundärphase ausgeschieden haben. Bei den Proben mit schlechter Kerbschlagzähigkeit wurde außerdem eine schlechte Gitterausbildung mit bevorzugten Ebenen beobachtet. Diese Gitterstörungen ergeben sich einerseits aus Verformungstexturen, andererseits können sie auch auf Grobkornbildung beruhen. Eine metallographische Untersuchung ergab jedoch bezüglich unterschiedlicher Korngröße keinen hinreichenden Aufschluß.

Zur Ermittlung der Art der Ausscheidungen wurden die Versuchsproben isoliert. Es ergaben sich jedoch nur geringe Ausscheidungsmengen, die im Durchschnitt nicht mehr als 0,2 Gew. % betragen. Der Hauptanteil der Ausscheidungen besteht aus Oxyd und Mangansulfid. Das Sulfid blieb bei allen Proben qualitativ und quantitativ konstant. Bei den Oxyden wurden jedoch unterschiedliche Bindungsverhältnisse beobachtet. Meistens wurde eine einphasige Verbindung FeO-SiO_2 gefunden. Lediglich bei der Probe 71 (Pos. 5) wurde getrennt Fe_3O_4 und SiO_2 ermittelt. Zur Überprüfung der Röntgenfeinstrukturanalyse hinsichtlich der Oxydbildung wurde nochmals eine metallographische Untersuchung an den festen Proben durchgeführt, wobei die kugelig-glasigen Einschlüsse als typische Silikat-Ausscheidungen erkannt wurden. Eine Schlackenzählung, der Befund ist nicht beigefügt, zeigte bei der Probe 72 (Pos. 4) höhere Werte als bei der schlechten Probe 71. Demnach dürfte die Sulfid- wie Silikatausscheidung die Kerbschlagzähigkeit *nicht* beeinflusst haben.

Der wesentliche Faktor scheint eine dritte Phase zu sein, die in den Isolaten der Probe 71, bevorzugt in der gealterten Probe, ermittelt wurde. Allem Anschein nach handelt es sich um eine Nitrid-Verbindung, Es wurde zumindest eine gute Übereinstimmung der Hauptinterferenzen mit den Strukturaufzeichnungen eines Si_xN gefunden. Diese Phase erscheint bei den Proben mit schlechter Kerbschlagzähigkeit sehr ausgeprägt, wogegen sie bei den Isolaten der Probe 72 gar nicht bzw. sehr schwach und diffus, d. h. in feinsten Verteilung, vorliegt. Leider ließ sich an den Isolaten eine N_2 -Bestimmung nicht durchführen, da die Ausscheidungsmenge nicht ausreichte. Wenn die Minderung der Kerbschlagzähigkeit im Ausscheidungsverhalten zu suchen ist, so dürfte mit hoher Wahrscheinlichkeit diese Nitridphase die Ursache sein. Leider muß die letzte Bestätigung offen bleiben, da ein sicherer Nachweis des unterschiedlichen N_2 -Gehaltes aus den Isolaten nicht erbracht ist.

Bei der Mehrzahl der Schweißversuche wurden die Schweißpulver AN 22 und AN 8 verwendet. Im Hinblick auf den Einfluß der beiden Schweißpulver auf die Kerbschlagzähigkeitswerte wurde eine Auswertung von 32 Schweißversuchen mit verschiedenen Grundwerkstoffen, Schweißzusatzwerkstoffen, Stromarten und Polungen der Drahtelektrode vorgenommen. Dabei fanden nur Schweißversuche Berücksichtigung, bei denen die Kerbschlagzähigkeit ungealtert und gealtert mit Charpy-V-notch-Proben ermittelt wurde. Ferner beschränkt sich die Auswertung nur auf Proben aus dem Schweißgut. Dabei ergab sich, Tabelle X :

Die Mehrzahl der mit dem Schweißpulver AN 22 geschweißten Versuche liegt im linken und mittleren Teil des Feldes « Kerbschlagzähigkeit gegen (5 N + P + O)-Gehalt », also bei niedrigen (5 N + P + O)-Gehalten. Der Durchschnitt der Kerbschlagzähigkeitswerte liegt mittel bis hoch.

Die Mehrzahl der mit dem Schweißpulver AN 8 geschweißten Versuche liegt im mittleren und rechten Teil des Feldes, also bei hohen (5 N + P + O)-Gehalten. Der Durchschnitt der Kerbschlagzähigkeitswerte liegt trotzdem relativ hoch.

Hierbei ist zu berücksichtigen, daß für die Auswertung mehr als fünfmal soviel Schweißversuche mit AN 22 als mit AN 8 zur Verfügung standen und daß das Schweißpulver AN 8 nur bei vier von insgesamt sieben in die Auswertung einbezogenen Drahtgruppen Verwendung fand. Mit Hinweis auf diese Einschränkung ist der prozentuale Anteil von Schweißversuchen mit Kerbschlagzähigkeitswerten ungealtert und gealtert $\cong 3,5$ mkp/cm² bei AN 8 größer als bei AN 22. Daneben zeigt das Schweißpulver AN 8 ein besseres Schweißverhalten und erleichtert dadurch den Schweißprozeß.

1.1.4 — *Einfluß von Stromart und Polung der Drahtelektrode*

Verschiedentlich wurde der Einfluß von Stromart und Polung der Drahtelektrode auf die Kerbschlagzähigkeitswerte sowohl an Kokillenschweißungen als auch an Verbindungsschweißungen untersucht, Tabelle XIV. Hierbei konnte jedoch keine eindeutige Abhängigkeit erkannt werden. Einen großen Einfluß scheint jedenfalls die vorliegende Legierungszusammensetzung auszuüben. Es wurde festgestellt, daß ein Schweißen mit Gleichstrom das Zünden des Schweißvorganges und das Anlaufen des Schweißprozesses wesentlich erleichtert, wohingegen beim Schweißen mit Wechselstrom und gleichzeitig bei einer höherlegierten Schweißschmelze sich die Neigung zum Seigern verringert.

Eine Auswertung von 32 Schweißversuchen mit verschiedenen Grundwerkstoffen und Schweißpulvern im Hinblick auf den Einfluß von Stromart und Polung der Drahtelektrode auf die Kerbschlagzähigkeitswerte läßt folgendes erkennen, Tabelle XV :

Betrachtet man die Lage der Kerbschlagzähigkeitswerte (Charpy-V-notch-Probe; Kerb in Schweißnahtmitte) aller in die Auswertung einbezogenen Schweißversuche in dem Feld « Kerbschlagzähigkeit gegen (5 N + P + O)-Gehalt », so läßt sich feststellen :

1. Die Mehrzahl der mit Wechselstrom geschweißten Versuche befindet sich im linken Teil des Feldes, also bei niedrigen (5 N + P + O)-Gehalten, und weist im Durchschnitt relativ hohe Kerbschlagzähigkeitswerte sowohl ungealtert als auch gealtert auf.
2. Auch die Mehrzahl der mit Gleichstrom, Drahtelektrode am Pluspol, geschweißten Versuche befindet sich im linken Teil des Feldes, also bei niedrigen (5 N + P + O)-Gehalten. Im Durchschnitt liegen die Kerbschlagzähigkeitswerte ungealtert und gealtert jedoch etwas tiefer als diejenigen der mit Wechselstrom geschweißten Versuche.
3. Alle mit Gleichstrom, Drahtelektrode am Minuspol, geschweißten Versuche befinden sich im mittleren bzw. rechten Teil des Feldes, also bei hohen (5 N + P + O)-Gehalten. Die Kerbschlagzähigkeitswerte ungealtert und gealtert liegen im Durchschnitt am niedrigsten.

Eine zahlenmäßige Auswertung ergab, daß der größte prozentuale Anteil an Schweißversuchen mit Kerbschlagzähigkeitswerten ungealtert und gealtert $\cong 3,5$ mkp/cm² beim Schweißen mit Wechselstrom anfiel.

Beim Schweißen mit Gleichstrom, Drahtelektrode am Minuspol, ist das prozentuale Ergebnis am schlechtesten.

Beim Schweißen mit Gleichstrom, Drahtelektrode am Pluspol, liegen die Ergebnisse näher denen, die beim Schweißen mit Wechselstrom erhalten wurden.

Diese grundsätzlich zu beobachtende Tendenz wird offenbar durch mehrere Einflußgrößen, vor allem durch die Legierungszusammensetzung des Schweißgutes, überlagert.

1.1.5 — *Wahl und Kombination günstiger Schweißparameter und deren Einfluß auf die Gütewerte*

Die richtige Zuordnung der Schweißparameter : Spannung, Strom, Pendelgeschwindigkeit und Kühlung der Kupfergleitschuhe hat einen erheblichen Einfluß auf die erzielbaren Gütewerte in der Schweißverbindung, Tabelle XX und Tabelle XXI.

Beim Stahl ASTM 302 Grad B wurden bei den Schweißdaten der Pos. 7 in Tabelle XX besonders günstige Kerbschlagzähigkeitswerte erreicht. Besonders die Einflüsse eines Pendelns und der Pendelgeschwindigkeit erweisen sich als erheblich.

Beim Stahl 13 CrMo 44 konnten mit den Schweißdaten der Pos. 5 in Tabelle XXI brauchbare Kerbschlagzähigkeitswerte erzielt werden. Die Einflüsse eines Pendelns und der Pendelgeschwindigkeit treten gegenüber den Einflüssen geänderter Schweißspannung und Schweißstromstärke zurück. Hierbei ist zu berücksichtigen, daß bei dem Stahl 13 CrMo 44 auf Grund seines Legierungstyps (warmfester (Luft-) Vergütungsstahl) *nur* hohe und höchste Kerbschlagzähigkeitswerte *nach durchgeführter Wärmebehandlung* vorliegen können (Luftabkühlen von Austenitisierungstemperatur + Anlassen).

1.1.6 — *Wirkung eines Abschirmens von Schweißbad und Schweißnaht durch Schutzgas.*

In bestimmten Fällen bringt ein Abschirmen von Schweißbad und Schweißnaht mit Schutzgas gegen die umgebende Atmosphäre einen Vorteil, Tabelle XIX.

Bei einer Kokillenschweißung brachte ein Schutz der Schweißbadoberfläche durch eine Propanflamme kein günstigeres Ergebnis (Pos. 1 und 2).

Ein allseitiger Argonschutz von Schweißbad und Schweißnaht bewirkt, falls es sich um vor dem Schweißen nicht wasserstofffreigelegte Bleche handelt, eine leichte Steigerung der Gütewerte (Pos. 3 und 4, 7 und 8). Dieselbe ist jedoch nicht so groß, daß sich der damit verbundene Aufwand in der Mehrzahl der Fälle rechtfertigen würde.

1.2 — **Güteverbesserung von Elektro-Schlacke-Schweißverbindungen durch nachfolgende Wärmebehandlung**

Durch eine nachfolgende, der Werkstoff- bzw. Legierungszusammensetzung angepaßte Wärmebehandlung kann die Güte von Elektro-Schlacke-Schweißverbindungen z.T. erheblich verbessert werden. Dies wurde an den Stählen ASTM 302 Grad B und 13 CrMo 44 nachgewiesen.

1.2.1 — *Stahl ASTM 302 Grad B*

Tabelle XVI zeigt die Ergebnisse verschiedener Wärmebehandlungen an Schweißverbindungen des Stahles ASTM 302 Grad B. Demnach können bei diesem Stahl durch ein Spannungsfreiglühen nach dem Schweißen die Kerbschlagzähigkeitswerte wesentlich verbessert werden, und zwar in höherem Maße als nach einem Normalglühen.

Aus den Versuchswerten geht hervor, daß sich bezüglich der Alterungskerbschlagzähigkeit im Schweißgut nach einem Spannungsfreiglühen der Schweißdraht S 3/Mo + 1,0 Ni günstiger als der Schweißdraht S 3/Mo + 2,5 Ni verhält. Der Einfluß der Schweißgutzusammensetzung ist offenbar hierfür entscheidend. Im letzteren Falle, d.h. bei dem Schweißdraht S 3/Mo + 2,5 Ni, zeigte sich bei einer Mikrogefügeuntersuchung besonders deutlich, daß

insbesondere nach dem Spannungsfreiglühen die Korngrenzen stark mit Ausscheidungen belegt sind, die ursächlich für den gefundenen geringeren Anstieg der Kerbschlagzähigkeitswerte nach der genannten Wärmebehandlung im Vergleich zum Schweißdraht S 3/Mo + 1,0 Ni sein dürften. Im allgemeinen übt das Spannungsfreiglühen eine günstige Wirkung (Herabsetzen der Übergangstemperatur, Erhöhen der Kerbschlagzähigkeit bei Raumtemperatur und bei niedrigen Temperaturen) auf un- oder niedriglegiertes Schweißgut aus. Diese günstige Wirkung nimmt mit steigender Festigkeit des Schweißgutes ab, und schließlich erweist sich das Spannungsfreiglühen für bestimmte Schweißgutzusammensetzungen mit verhältnismäßig hoher Festigkeit von ca. 80 kg/mm² (Pos. 2 in Tabelle XVI : Festigkeit im Schweißzustand : 75,3/76,6 kg/mm²; Festigkeit nach Spannungsfreiglühen : 77,4/82,7 kg/mm²) als ungünstig. Diese Erscheinung wurde im Schrifttum verschiedentlich als « sekundäre Aufhärtung » bezeichnet : das Schweißgut nimmt nach dem Glühen eine erhöhte Sprödigkeit an. Sie kann so gedeutet werden, daß der Vorgang, der die Aufrechterhaltung oder sogar die Erhöhung der Festigkeit infolge der Wärmebehandlung bewirkt, ebenfalls eine Erhöhung der Sprödigkeit (Anlaßsprödigkeit) hervorruft. Man kann annehmen, daß die Zähigkeit des nickelhaltigen Schweißgutes durch einen geringeren Gehalt an Spurenelementen wie P, S, As, Sb, Sn usw. noch verbessert werden kann. Möglicherweise ist auch der Molybdängehalt im Schweißgut etwas zu hoch; als günstig werden etwa 0,35 % angesehen.

Ein Wasserstofffreiglühen nach dem Schweißen ergibt gleichfalls eine Steigerung der Gütewerte und ist mit weniger Aufwand als die anderen Glühverfahren durchzuführen.

Makro- und Mikrogefügebilder in den verschiedenen Behandlungszuständen zeigen die Abbildungen 1 bis 6.

1.2.2 — Stahl 13 CrMo 44

Tabelle XVII läßt die Wirkung verschiedener Wärmebehandlungen an Schweißverbindungen des Stahles 13 CrMo 44 auf die Gütewerte erkennen. Daraus ist zu entnehmen, daß die höchsten Kerbschlagzähigkeitswerte nach dem Luftvergüten vorliegen.

Das Spannungsfreiglühen bringt für das Schweißgut keine entscheidende Verbesserung der Alterungskerbschlagzähigkeit. Die Kerbschlagzähigkeit des Schweißgutes im ungealterten Zustand wird dagegen erheblich gesteigert. Der Stahl 13 Cr Mo 44 ist dem Legierungscharakter nach ein niedriglegierter, warmfester Vergütungsstahl. Er erreicht deswegen seine günstigsten mechanisch-technologischen Eigenschaften nur im luftvergüteten Zustand, d.h. bei Vorliegen eines feinkörnigen, gleichmäßigen Anlaßgefüges. In diesem Behandlungszustand ist daher die Alterungskerbschlagzähigkeit in der ganzen Schweißverbindung, auch im Schweißgut, voll ausreichend und erreicht hohe Beträge.

Eine gewisse, aber nicht hohe Steigerung der Gütewerte ist nach einem Glühen zum Entfernen von Wasserstoff zu erwarten.

Makro- und Mikrogefügebilder in verschiedenen Behandlungszuständen zeigen die Abbildungen 7 bis 10.

1.2.3 — Einfluß des Behandlungszustandes auf den Restaustenitgehalt

An Proben aus bestimmten Versuchsschweißungen mit den Stählen ASTM 302 Grad B und 13 CrMo 44 wurde eine Röntgenfeinstrukturuntersuchung zur Bestimmung des (Rest-) Austenitgehaltes durchgeführt. Hierbei sollte festgestellt werden, wie hoch der Austenitgehalt im Schweißzustand bei verschiedenen Schweißbedingungen ist und in welchem Maße er durch die verschiedenen nachfolgenden Wärmebehandlungen verändert wird; ferner, ob ein Zusammenhang zwischen Restaustenitgehalt und Kerbschlagzähigkeitswerten besteht.

Die Prüfung wurde an Makroquerschliffen jeweils in Schweißnahtmitte und im Übergang schweißgutseitig (etwa 1,5 mm von der Schmelzlinie entfernt in Richtung Schweißgut)

durchgeführt. Das Ergebnis war wie folgt : Die Aufnahmen zeigen stets α -Fe (Ferrit), die Proben im Schweißzustand sowohl in der Mitte als auch am Rande außerdem geringe Mengen γ -Fe (Austenit). Demnach setzen alle durchgeführten Wärmebehandlungen den Austenitgehalt unter die Nachweisgrenze herab. Auf eine Abschätzung der Austenitmengen im Schweißzustand mußte verzichtet werden, da die vielfach grobkörnigen Proben keine durchgehende Beugungslinie lieferten.

1.2.4 — *Örtliche, anschließende Wärmebehandlung (Anlassen)*

Ein Orientierungsversuch zeigte die günstige Wirkung einer dem Schweißen unmittelbar nachfolgenden örtlichen Wärmebehandlung (Nach- bzw. Anlaßglühen) auf die Gütwerte in der Schweißverbindung. Hierfür wurden zwei Anwärmbrenner benutzt, die mit den Kupfergleitschuhen gemeinsam weiterbewegt wurden. Die Kerbschlagzähigkeitswerte des Schweißgutes im ungealterten Zustand erhöhten sich dabei von im Mittel 7,2 mkp/cm² auf im Mittel 9,5 mkp/cm². Es dürfte sich hierbei um eine verhältnismäßig einfach durchzuführende und nicht zu aufwendige Maßnahme zur Verbesserung der Kerbschlagzähigkeitswerte handeln.

1.3 — Weitere Möglichkeiten zunächst noch mehr theoretischer Art

Es wurden noch weitere Möglichkeiten überprüft, die geeignet zu sein schienen, eine höhere Güte von Elektro-Schlacke-Schweißverbindungen erreichen zu lassen.

1.3.1 — *Wirkung von kornverfeinernden Sonderzusätzen*

Beim Erstarren einer Elektro-Schlacke-Schweißverbindung treten ähnliche Kristallisationsercheinungen ein wie beim Stahlvergießen in Kokillen : es liegt meist ein grobkörniges Gußgefüge vor, das den Abfall der Kerbschlagzähigkeit in der Schweißnaht bedingt. Der Gedanke liegt deshalb nahe, die Kristallisation des Primär- und Sekundärgefüges durch kornverfeinernde und als Keimbildner bekannte Spurenelemente (Modifikatoren) zu beeinflussen und damit die Gütwerte zu verbessern.

Es wurde die Wirkung eines Zusatzes von Al, Al + Ni, AlN, AlN + Ni, B, FeV, FeZr, FeNb, Mo, Ni, Ti sowie kombinierter Desoxydationslegierungen auf die Makro- und Mikrogefügestruktur des Schweißgutes sowie auf seine Gütwerte überprüft, Tabelle V. Die Zusätze wurden teils über eine entsprechend legierte Massivdrahtelektrode, teils über die an die Schweißkanten angehefteten Füllstäbe und vereinzelt über das Schweißpulver dem Schweißbad zugeführt. Die Legierungsstoffe AlN, AlN + Ni, FeV, FeB, FeZr bewirkten zwar eine feinkörnige Makrogefügestruktur, führten jedoch zu einer mehr oder weniger großen Versprödung. Al sowie Al + Ni in wohlabgestimmten Verhältnis förderten eine feinkörnige Makrogefüge- und z.T. Mikrogefügestruktur bei gleichzeitig verbesserten Alterungskerbschlagzähigkeitswerten. Bei zu hohen Nickelgehalten treten in der Kombination Al + Ni Seigerungen auf. Mo scheint keinen großen zähigkeitssteigernden Einfluß zu besitzen und wirkt in Verbindung mit Al ungünstig, außerdem kommt es leicht zu Seigerungen. Ein Zusatz von Mo in Form von an die Schweißkanten angehefteten Füllstäben hat eine ungünstigere Wirkung als das Einbringen von Mo über die Massivdrahtelektrode. Nb in richtiger Menge zugefügt hatte gegenüber dem Ausgangszustand eine Verbesserung der Kerbschlagzähigkeitswerte bei gleichzeitig feinkörnig ausgebildeter Makrogefügestruktur zur Folge.

Bei den Untersuchungen wurde erkannt, daß eine feinkörnige Makrogefügestruktur nicht gleichbedeutend ist mit einer feinkörnigen Mikrogefügestruktur und umgekehrt, Abbildungen 11 bis 14. Ni hat bezüglich Kornverfeinerung des Sekundärgefüges und Verbesserung der Kerbschlagzähigkeit eine besonders günstige Wirkung. Bei den hier beschriebenen Untersuchungen handelt es sich z.T. um Testversuche, deren Anzahl und Umfang nicht ausreichen,

um ein abschließendes Urteil zu bilden. Es dürfte erfolgversprechend sein, in dieser Richtung weiter zu arbeiten, um die optimalen Gehalte und Kombinationen an Keimbildnern herauszufinden.

1.3.2 — *Einfluß der Grundwerkstoffzusammensetzung*

Da das Schweißgut in einer Schweißverbindung eine Legierung von eingeschmolzenem Schweißzusatzwerkstoff und aufgeschmolzenem Grundwerkstoff darstellt, ist die Grundwerkstoffzusammensetzung insbesondere im Hinblick auf den Reinheitsgrad gleichfalls von großer Bedeutung für das Erzielen höchstmöglicher Kerbschlagzähigkeitswerte in einer Elektro-Schlacke-Schweißverbindung ohne Wärmenachbehandlung. Auch muß der Grundwerkstoff so beschaffen sein, daß er die in der Wärmeeinflußzone neben der Schweißnaht beim Elektro-Schlacke-Schweißen langfristig auftretenden hohen Temperaturen ohne zu großen Abfall an Kerbschlagzähigkeit verträgt.

Tabelle VI zeigt unter Pos. 1 und 2 am Beispiel einer Kokillenschweißung, also an reinem Schweißgut, den günstigen Einfluß niedriger Phosphor- und Schwefelgehalte im Schweißzusatzwerkstoff.

Die gleiche Tabelle zeigt unter Pos. 3 und 4 am Beispiel einer Verbindungsschweißung mit den Stählen St 37-2 in Normal- und in Sondergüte den gütesteigernden Einfluß niedriger Phosphor- und Schwefelgehalte im Grundwerkstoff. So liegt unter sonst gleichen Bedingungen beim Stahl St 37-2 in Sondergüte die Alterungskerbschlagzähigkeit um mehr als doppelt so hoch wie beim Stahl St 37-2 in Normalgüte.

1.3.3 — *Wirkung eines Wasserstoffreiglühens des Grundwerkstoffes vor dem Schweißen*

Vergleicht man bei sonst gleichen Schweißdaten die Kerbschlagzähigkeitswerte von Schweißverbindungen an vor dem Schweißen wasserstoffreigeglihten Blechen aus Stahl ASTM 302 Grad B mit solchen, die vor dem Schweißen nicht wasserstoffreigegliht wurden, so ist festzustellen, daß im ersteren Falle bereits im Schweißzustand Kerbschlagzähigkeitswerte vorliegen können, die sonst erst nach einem Wasserstoffreiglühen der geschweißten Verbindung erzielt werden, Tabelle XVIII.

In bestimmten Fällen dürfte daher die Verwendung von vor dem Schweißen wasserstoffreigeglihten Blechen Vorteile bieten.

1.4 — **Zusammenfassende Betrachtungen**

1.4.1 — *Makro- und Mikrogefügestruktur der Elektro-Schlacke-Schweißverbindungen*

Insbesondere die unter 1.3.1 beschriebenen Versuche haben gezeigt, daß die Makro- und Mikrogefügestruktur des Schweißgutes über kornverfeinernde Zusätze zu beeinflussen ist. Dabei wurde jedoch festgestellt, daß eine feinkörnige Makrogefügestruktur nicht mit einer feinkörnigen Mikrogefügestruktur gleichbedeutend sein muß und umgekehrt. Für die Verbesserung der Kerbschlagzähigkeit ist vor allem ein feinkörniges Sekundärgefüge wichtig, das aus einer zähen, verformungsfähigen Grundmasse, z.B. Nickelferrit oder Nickel-Mangan-Ferrit bestehen muß.

Bezüglich der kornverfeinernden Wirkung bestimmter Legierungsstoffe läßt sich folgendes ausführen: Nach den Vorstellungen über eine Phasenneubildung ist dann eine Erhöhung der Keimzahl zu erwarten, wenn es gelingt, den Gesamtbetrag der zur Keimbildung notwendigen Oberflächenarbeit zu verringern, indem man in der flüssigen Phase durch Addition geeigneter Stoffe Fremdoberflächen der festen Phase erzeugt. Daneben sind für die Beeinflussung der metallischen Erstarrung außer dem Oberflächeneinfluß auch die Auswirkungen

der Gittergeometrie zu berücksichtigen. Zum größten Teil dürften die reinen Metallkomponenten nicht selbst die Keimwirkung hervorrufen. Vielmehr scheint eine Wechselwirkung bzw. Reaktion mit dem im Stahl gelösten Kohlenstoff, Sauerstoff, Stickstoff oder Wasserstoff möglich und die verstärkte Keimbildung damit auf die Karbide, Oxyde, Nitride oder Hydride dieser Elemente zurückführbar. Bei überhöhten Zusätzen oder ungünstigen Kombinationen tritt jedoch statt der erwarteten günstigen Auswirkung eine Versprödung ein.

Im Fall des Nickels ist die Wirkungsweise sicherlich von dem geschilderten Mechanismus verschieden.

Durch Wärmebehandlung, die mit einer Umkristallisation im festen Zustand und mit einer Kornverfeinerung verbunden ist, kann ebenfalls die Makro- und Mikrogefügestruktur beeinflusst werden. Es lassen sich gegenüber dem Schweißzustand (unbehandelt) verbesserte mechanische Eigenschaften nachweisen, siehe 1.2.

Eine Beeinflussung der Makro- und Mikrogefügestruktur der Schweißverbindung durch Pendeln der Drahtelektrode konnte nicht eindeutig nachgewiesen werden, wengleich hierdurch die Gütewerte verbessert wurden. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, daß die mechanischen Eigenschaften der Gefügezonen in der Schweißverbindung nicht nur von der Korngröße, sondern auch von anderen Faktoren wie z.B. der chemischen Zusammensetzung, der Struktur der Korngrenzen, der Ausbildungsform und Verteilung der nichtmetallischen Einschlüsse u.a. beeinflusst werden.

1.4.2 — Einflüsse auf die Kerbschlagzähigkeitswerte des Schweißgutes.

Bei der Mehrzahl aller Versuche, die sich mit der Auswertung bestimmter Einflußgrößen auf die Kerbschlagzähigkeitswerte vor allem des Schweißgutes befaßten, wurde festgestellt, daß mit einer Verbesserung der Kerbschlagzähigkeit im ungealterten Zustand auch eine solche im künstlich gealterten Zustand verbunden ist. Diese Feststellung beschränkt sich auf das Verhalten bei Umgebungstemperatur (Raumtemperatur), da die Prüfungen überwiegend hierbei ausgeführt wurden.

Die unter 1.1 bis 1.3 beschriebenen Untersuchungen hatten alle zum Ziel, die Kerbschlagzähigkeitswerte in der Schweißverbindung, vorzugsweise im Schweißgut, zu erhöhen. Die angeführten und überprüften Möglichkeiten sind in unterschiedlichem Maße hierzu geeignet. Sie unterscheiden sich ferner durch den notwendigen Aufwand.

Von den Möglichkeiten, die in der Praxis verhältnismäßig leicht auwendbar sind, erscheinen besonders bemerkenswert :

1. Die Legierungszusammensetzung des Schweißzusatzwerkstoffes im Hinblick auf eine optimale Abstimmung der Legierungselemente und besonders niedrige Gehalte an Verunreinigungen wie P, S, O, N, H.
2. Die Wahl eines basischen Schweißpulvers, das gleichzeitig noch gute Schweißigenschaften besitzt und arm an schädlichen Verunreinigungen, vor allem an P und S ist.
3. Ein Schweißen möglichst mit Wechselstrom, allenfalls mit Gleichstrom, Drahtelektrode am Pluspol.
4. Richtige Zuordnung und Abstimmung wichtiger Schweißparameter wie Spannung, Strom, Pendeln und Pendelgeschwindigkeit der Drahtelektroden, Kühlung der Kupfergleitschube.

Eine weitere Güteverbesserung ist durch nachfolgende Wärmebehandlung der Schweißverbindung möglich :

1. Bei einem Stahl, der üblicherweise im normalgeglühten Zustand verwendet wird (ASTM 302 Grad B), wurden für das Schweißgut nach einem Spannungsfreiglühen günstigste Kerbschlagzähigkeitswerte erzielt.

2. Bei dem Stahl 13 CrMo 44, der üblicherweise im luftvergüteten Zustand eingesetzt wird, wurden für das Schweißgut günstigste Kerbschlagzähigkeitswerte nach einem Luftvergüten erzielt.
3. Eine dem Schweißen unmittelbar nachfolgende örtliche Wärmebehandlung (Anlassen) hat ebenfalls eine Güteverbesserung zur Folge.

Weitere Möglichkeiten zunächst noch mehr theoretischer Art sind folgende :

1. Verbesserungen der Makro- und Mikrogefügestruktur und damit in bestimmten Fällen der Kerbschlagzähigkeit durch Hinzufügen kornverfeinernder Zusätze.
2. Verwenden eines Grundwerkstoffes bestimmter Zusammensetzung, insbesondere mit hohem Reinheitsgrad, um dadurch eine ungünstige Aufmischung des Schweißgutes gering zu halten.
3. In bestimmten Fällen Wasserstofffreigühen des Grundwerkstoffes vor dem Schweißen.

Bezüglich der jeweils erzielten Ergebnisse wird auf die entsprechenden vorausgegangenen Kapitel verwiesen.

2 — HERSTELLEN VON GESCHLOSSENEN RUNDNÄHTEN

2.1 — Sachlage zum Zeitpunkt der Inangriffnahme

Das Elektro-Schlacke-Schweißen ist zum Herstellen von geschlossenen Rundnähten geeignet und wird vor allem in Russland auf vielen Fertigungsgebieten eingesetzt. Hinsichtlich der Technologie des Schweißens unterscheiden sich die Rundnähte von den Längsnähten :

- 2.1.1 in der konstruktiven Ausbildung der Einrichtungen zum Formen der Schweißnaht : den Bauelementen zur Badsicherung,
- 2.1.2 durch das notwendige Schließen der Rundnaht : das Verbinden von Nahtende mit Nahtanfang.

Die Formung der Nahrückseite kann verwirklicht werden :

- 2.1.3 durch einen (wasser- oder luft-) gekühlten anliegenden Kupferring bzw. einzelne Kupferstücke als Teile desselben.
- 2.1.4 durch einen am Schweißteil (zunächst) verbleibenden Stahlring,
- 2.1.5 durch einen auf der Nahrückseite angebrachten gekühlten Kupfergleitschuh.

2.1.3

Die Verwendung eines gekühlten anliegenden Kupferringes bietet folgende Vorteile :

- 2.1.3.1 Ein ständiges Beobachten während des Schweißens fällt fort. Dies kann besonders dann wichtig sein, wenn auf der Rückseite der Schweißnaht kein Platz für einen Beobachter ist.
- 2.1.3.2 Man benötigt keine Spann- oder Heftvorrichtungen (z.B. Bügel) großer Abmessungen, wie es beim Schweißen mit einem hinteren Gleitschuh notwendig ist.
- 2.1.3.3 Der Schweißspalt zwischen den Fugenflanken bleibt frei, da ein Aufhängen des hinteren Gleitschuhes entfällt. Dies ist beim Schweißen von Rundnähten von besonderer Bedeutung, wo eine Aufhängung, sofern sie nicht entfernt wird, das Schließen der Naht verhindert.

2.1.3.4 Die Anordnung von Teilen des rückseitig anliegenden Kupferringes an einem anderen Schweißstoß kann während des Schweißens des vorhergehenden Schweißteils erfolgen, wodurch sich die Einschaltdauer der Schweißanlage erhöht.

Außerdem gelten noch folgende Überlegungen :

Da beim Rundnahtschweißen die gesamte Naht oder ein Teil von ihr in geneigter Lage geschweißt wird, sind die Schwierigkeiten des Führens bzw. Einstellens der Drahtelektroden und der Kontrolle des Einbrandes auf der Innenseite größer als beim Schweißen gerader Schweißnähte. Die Verwendung eines Kupferringes macht eine sehr genaue Kontrolle des Schweißbadniveaus und eine sorgfältige Ausrichtung der Drahtelektrode nach ihrem Austritt aus der Drahtführung notwendig, besonders beim Schweißen großer Dicken. Daher ist ein Kupferring als Badsicherung nur für Rundnähte mit verhältnismäßig geringer Wanddicke zu empfehlen, die ohne Pendeln der Drahtelektrode zu schweißen sind, oder in Fällen, wo andere Verfahrensweisen nicht angewendet werden können.

2.1.4

Ein anzuschweißender Stahlring erfordert in seiner Bearbeitung keine so große Genauigkeit wie ein Kupferring, da zufällige Ausbrüche einer Lichtbogenentladung bei zu großer Annäherung der Drahtelektrode den Schweißvorgang hier nicht ernsthaft gefährden können. Es sind jedoch folgende Nachteile zu beachten :

hoher Stahlverbrauch;

Schwierigkeiten im Anpassen bei Kantenversatz;

Rißgefahr in der Schweißnaht, wenn der Stahlring als ausschließliches Heftelement für das Festlegen der beiden Hälften beim Zusammenbau verwendet wird.

Die Anwendung eines Stahlringes als innenseitige Badsicherung ist nur dann möglich, wenn die Konstruktion und spätere Verwendung des Werkstückes seine Beseitigung nicht erfordern oder das Werkstück nach dem Schweißen einer mechanischen Bearbeitung unterzogen wird.

2.1.5

Ein auf der Nahrückseite angebrachter gekühlter Gleitschuh als Badsicherung hat folgende Vorteile :

2.1.5.1 Er ermöglicht eine gute Sicht in den Schweißpalt und auf das Schweißbad von der Rückseite. Dieser Umstand ist besonders beim Mehrdrahtelektrodenschweißen mit Pendeln derselben wichtig, da die gerade und mittige Ausrichtung der hinteren Drahtelektrode kontrolliert werden kann.

2.1.5.2 Beim Mehrdrahtelektrodenschweißen hat man die Möglichkeit, beim Ausfall einer äußeren Drahtelektrode mit den restlichen bei vergrößertem Pendelweg fertig zu schweißen. Wird mit einem Kupfer- oder Stahlring als Badsicherung auf der Nahtinnenseite gearbeitet, ist dies nur bei Ausfall der vorderen Drahtelektrode möglich.

2.1.5.3 Ein Gleitschuh macht keine zusätzlichen Vorrichtungen für die Befestigung nicht beweglicher Unterlagen notwendig.

2.1.5.4 Gegenüber einem Kupferring entsteht für den Gleitschuh ein geringerer Kupferverbrauch und ein kleinerer Aufwand für das Herstellen.

2.1.5.5 Es ist möglich, ein Schmelzbadniveau-Meßgerät wahlweise auf zwei Seiten arbeiten zu lassen.

Der rückseitige Gleitschuh wird überall dort angewendet, wo Form und Zugänglichkeit des zu schweißenden Werkstückes es zulassen. Sein Hauptvorteil liegt darin, daß die Möglich-

keit einer Kontrolle der Drahtelektrodenausrichtung und des ausreichenden Einbrandes auf der Innenseite gegeben sind. Nachteilig ist die Schwierigkeit der Anordnung in geschlossenen Behältern.

2.2 — Schwierigkeiten bei den bis zum Zeitpunkt der Inangriffnahme üblichen Verfahrensweisen

Voraussetzung für ein Gelingen des Rundnahtschweißens ist äußerste Sorgfalt beim Vorbereiten, Zusammenbauen und Heften der Teile. Die Drehung der zu verbindenden Schüsse muß um eine gemeinsame Achse erfolgen und die Lage des Schweißspaltes darf sich gegenüber der Schweißanlage bzw. dem Schweißkopf nicht verändern. Schwierigkeiten bestehen :

- 2.2.1 in der zweckmäßigen konstruktiven Ausbildung, Anordnung und Aufhängung der äußeren und inneren Badsicherungselemente, insbesondere im Hinblick auf das Anlaufen des Schweißvorganges und das Schließen der Rundnaht;
- 2.2.2 im Zusammenführen des Nahtendes mit dem Nahtanfang, dies um so mehr, je größer das Verhältnis der Wanddicke zum Durchmesser des Kesselschusses ist;
- 2.2.3 im Entfernen des fehlerhaften Anlaufstückes der Schweißnaht.

Bei den bisher bekannten Verfahrensweisen wurde das Schweißen durch Zünden z.B. auf einem etwa 40 mm hohen und im Schweißspalt eingepassten Stahlblöckchen begonnen. In einem anderen Fall wurde statt dessen ein trichterförmig ausgearbeitetes Kupferstück gewählt. In allen Fällen mußte aber der unbrauchbare Anfangsabschnitt der Rundnaht während des Schweißens entfernt werden, und zwar nachdem etwa 120° Nahtumfang geschweißt war. Dann nimmt nämlich der Anfangsabschnitt eine günstige Stellung zum Ausarbeiten einer um 20 bis 30° gegen die Oberfläche geneigten Fläche ein. Für das Entfernen des fehlerhaften Anlaufstückes werden das autogene Brennschneiden, das Lichtbogennbrennschneiden oder das Schmelzschnneiden gewählt. Versuche, das Entfernen des Anlaufstückes mit einer der genannten Methode zu vermeiden, z.B. durch Erwärmen und Aufschmelzen des Anfangsabschnittes der Naht durch hochoberhitze Schlacke und flüssiges Schweißgut in Verbindung mit günstigen Schweißdaten haben sich noch nicht als brauchbar erwiesen. Bisher ist keine Möglichkeit bekannt, das fehlerhafte Anlaufstück aus dem Bereich der Gesamtnaht herauszuführen.

Um den fehlerhaften Auslaufabschnitt aus dem Nahtbereich herauszuführen, wird :

- 2.2.4 entweder die äußere Badsicherung mit Aufsätzen (Auslauftrichter) ausgerüstet, in die gekühlte Einschiebestücke eingepasst werden können, oder
- 2.2.5 während des Schweißens und nach Entfernen des fehlerhaften Anlaufstückes werden im Bereich des Nahtauslaufes auf der Außenseite zwei prismatische Stahlblöckchen angeschweißt, die kleine Kühlschuhe aufnehmen können. Der äussere Gleitschuh kommt kurz vor dem Schließen der Rundnaht an dieser Auslaufvorrichtung zum Stehen und das Schweißbad steigt in den Hohlraum, der aus den Fugenflanken der beiden Schüsse, der abgeschrägten Fläche, den prismatischen Stahlblöckchen und den Kühlschuhlen gebildet wird.

2.3 — Neue Technologie der SLV Duisburg

2.3.1 — Prinzip

Das Prinzip der in der SLV Duisburg erarbeiteten neuen Verfahrensweise zum Schweißen geschlossener Rundnähte ergibt sich aus folgenden Punkten :

1. Der Schweißbeginn wird aus dem Bereich des Bleches heraus in das Innere des Kesselschusses verlegt.

2. Zu diesem Zweck dient eine Formbacke, in welcher der Schweißprozess eingeleitet wird.
3. Die in der Formbacke gebildete Schlacke wird auf einem schrägen Kupferstück in den Bereich der künftigen Naht hinübergeleitet, so daß von Beginn an im Blech ein ausreichender Einbrand entsteht.
4. Das Kupferstück wird während des Schweißens aus der Fuge herausgenommen. Die dabei zu Tage tretende Flanke des Nahtanfangs wird beim Schließen der Naht nochmals aufgeschmolzen.
5. Das Nahtende wird in bekannter Weise in einen Auslauftrichter an der Aussenfläche des Kesselschusses verlegt.

Auf diese Weise gelingt es mühelos, den schlechten Nahtanfang gänzlich aus dem Nahtbereich herauszulegen; er befindet sich ausschließlich innerhalb der Formbacke im Inneren des Kesselschusses. Im Werkstück selbst entsteht also keinerlei schlechtes Stück Schweißnaht.

Demzufolge läßt sich bei Anwendung dieser Verfahrensweise das bisher notwendige Herausbrennen eines fehlerhaften Anlaufstückes mit den oben beschriebenen Nachteilen vermeiden. Vielmehr wird bei geeigneter Ausbildung der Teile der auf diese Weise erzeugte Nahtanfang unmittelbar mit dem Nahtende zu einer in sich geschlossenen Rundnaht verbunden.

2.3.2 — Beschreibung der Einrichtung

Abbildung 15 zeigt 6 aufeinander folgende Stadien der Entstehung der Naht. In den Bildern, die einen Schnitt durch die Nahtebene senkrecht zur Achse des Kesselschusses darstellen, bedeuten

- a* Kesseltrommel
- b* Rollenbock
- c* Schweißbrüsel für Schweißdraht und Strom
- d* äusserer Gleitschuh mit Auslauftrichter
- e* Kupferstück für den Anlauf
- f* innere Formbacke für den Anlauf
- g* innerer Gleitschuh
- h* fixierte Achse
- i* Schmelzbad
- k* Schlackenbad
- l* bereits geschweißte Naht
- m* Anfangskante der bereits geschweißten Naht
- n* Anlaufnase
- o* Auslaufnase

Das Bild 1 der Abbildung 15 entspricht der Situation unmittelbar vor dem Beginn des Schweißens. Die innere Formbacke *f* bildet mit dem Kupferstück *e* eine Tasche, in deren Grund ein Stückchen Flacheisen liegt. Der Schweißbrüsel *c* führt den Schweißdraht so, daß der Lichtbogen zum Einleiten des Schweißens zwischen dem Draht und dem Flacheisenstück brennt. In der Tasche bildet sich die flüssige Schlacke, die in demselben Maße aufwärts steigt, wie Schweißdraht abschmilzt. Nach einiger Zeit tritt die aufsteigende Schlacke aus der Tasche auch in den Bereich des zu schweißenden Werkstoffes über und erwärmt diesen. Wenn das Schmelzbad, das sich aus dem abgeschmolzenen Draht gebildet hat, das Werkstück erreicht, hat dort bereits das Aufschmelzen der Fugenflanken angefangen.

In diesem Stadium wird mit der Drehbewegung des Werkstückes begonnen. Dabei macht der innere Gleitschuh *g* die Drehbewegung solange mit, bis er dem äusseren Gleitschuh

d gegenübersteht. In dieser Stellung, die nach etwa 35° Drehwinkel erreicht ist, wird der innere Gleitschuh *g* durch einen Anschlag festgehalten, Bild 2 der Abbildung 15. Kurz danach wird während des Schweißens das Kupferstück *e* aus der Fuge zwischen den Werkstückteilen herausgenommen. Um das Festkeilen des Kupferstückes *e* zwischen den Fugenflanken infolge des Schrumpfens des bereits geschweißten Nahtteiles zu verhindern, hat das Kupferstück an den an den Fugenflanken anliegenden Flächen je eine Nut, in die eine Asbestschnur eingelegt ist. Das Kupferstück *e* läßt sich dann mühelos herausziehen, so daß die Anfangskante *m* der bereits geschweißten Naht nunmehr freiliegt. An dieser Stelle beginnt auch schon der volle Einbrand in den Werkstückteilen; die Naht besteht von der Anfangskante *m* ab vollständig aus gesundem Werkstoff ohne Einbrandfehler oder Schlackeneinschlüsse. Den Zustand unmittelbar nach dem Herausziehen des Kupferstückes *e* zeigt Bild 3 der Abbildung 15.

Der weitere Schweißvorgang vollzieht sich nun stetig weiter in der Fuge, wobei sich die Anfangskante *m* schließlich von oben her der Schweißstelle nähert, Bild 4 der Abbildung 15. Schließlich berührt der untere Teil der inneren Formbacke *f* den oberen Teil des Gleitschuhes *g*, der bis dahin dem äusseren Gleitschuh *d* gegenübergestanden hat. Der innere Gleitschuh *g* wird dadurch — nach Lösen der bis dahin wirksamen Arretierung — etwa 5-7° mitgenommen, und das Schlackenbad gelangt nun zunächst an das Anlaufstück, das sich beim Beginn des Schweißens in der inneren Formbacke *f* gebildet hatte. In diesem Augenblick, der in Bild 5 der Abbildung 15 dargestellt ist, wird die Drehbewegung des Werkstückes beendet. Mit hochsteigender Schlacke erreicht das Schlackenbad *k* auch die Anfangskante *m* der bereits geschweißten Naht, an der ebenfalls ein Einbrand entsteht. Dabei wird der Schweißbrüsel *c* nach Maßgabe der steigenden Schlacke *k* nach oben und aussen bewegt, bis der Schweißdraht völlig außerhalb des Werkstückes in dem Auslauftrichter des äusseren Gleitschuhes *d* abschmilzt. Dort wird der Prozess solange weitergeführt, bis Schlacke überläuft und als Folge des schließlich zu niedrig werdenden Schlackenbades der Vorgang instabil wird. Sodann werden der Strom und Drahtvorschub abgeschaltet, und das Schweißen ist beendet. Während des Herausziehens der Schweißstelle in den Auslauftrichter vergrößert sich der Querschnitt des Schlackenraumes, so daß die Schlackenhöhe sich vermindert; in diesem Stadium muß deshalb reichlich Pulver nachgeschüttet werden.

Nach dem Abkühlen werden der innere Gleitschuh *g*, die innere Formbacke *f* und der äussere Gleitschuh *d* entfernt. Der Zustand nach dem Schweißen geht aus Bild 6 der Bildtafel 15 hervor. Dabei ist *n* die Anlaufnase, die Schlackeneinschlüsse enthalten kann, welche jedoch gänzlich außerhalb des Werkstückquerschnittes liegen, und *o* die Auslaufnase, die im oberen Teil Lunkerstellen haben kann, aber ebenfalls vollständig außerhalb des Werkstückes.

Das Bild auf der letzten Seite dieses Berichtes zeigt einen Längsschliff durch An- und Auslaufstück einer Rundnaht.

2.3.3 — Wichtige Einzelheiten der Einrichtung und Erfahrungen damit

Eine der Hauptschwierigkeiten in der Durchführung des Elektro-Schlacke-Schweißens besteht darin, das Auslaufen des Schlackenbades zu verhindern, da hierdurch der Schweißprozess unterbrochen wird. Dies gilt für die Rundnaht in verstärktem Maße, da die hierbei auftretenden Toleranzen größer als bei ebenen Blechen sein können. Insbesondere sind es Toleranzen der Rundheit, die zum Auslaufen der Schlacke führen können. Daraus haben sich im Verlauf unserer Arbeiten einige Regeln ergeben, die im Interesse eines glatten Ablaufes der Schweißung unbedingt beachtet werden sollten :

1. Schon beim Rollen der Mäntel sollte auf möglichste Rundheit der Werkstückteile geachtet werden, soweit dies aus arbeitstechnischen und kostenmäßigen Gründen irgend vertretbar ist.

2. Die Bereiche, in denen die Gleitschuhe auf den Werkstückteilen schleifen, sollten durch Überschleifen geglättet und von vorstehenden Pickeln befreit werden.
3. Die Radien der Gleitschuhe sollen dem Innen- bzw. Aussenradius des Kesselschusses gut angepasst sein.
4. Die Gleitschuhe sollen quer zur Naht auf Gleitschienen wenigstens ± 30 mm zum Einrichten und auch während des Schweißens verstellt werden können.
5. Die Gleitschuhe sollen sich um eine Achse, die parallel zur Achse des Werkstückes ist, leicht drehen können, damit sie sich dem Werkstück stets genau anpassen. Ebenso sollen sie um eine senkrechte Achse drehbar sein, um Toleranzen in der Bündigkeit beider Werkstückteile auszugleichen. Zum Erleichtern des Anpassens wird der äussere Gleitschuh zweckmäßig aus zwei in Schweißrichtung hintereinander liegenden Teilen zusammengesetzt, die durch ein Gelenk miteinander verbunden sind.
6. Die Gleitschuhe müssen mit Hilfe von Federn gegen die Werkstückteile gedrückt werden. Die Federkraft soll auf etwa 30 kp einstellbar sein, wobei sich diese Kraft bei 1 mm Federweg um nicht mehr als etwa 1,5 kp ändern soll. Lange Schraubenfedern haben sich gut bewährt. Der untere Teil des äusseren Gleitschuhes bekommt eine gesonderte Andrückfeder.
7. Der äussere Gleitschuh besitzt eine herausnehmbare Rückwand, die während des Schweißens entfernt ist, um die Kurzschlußgefahr durch Berühren mit dem Schweißrüssel zu vermeiden. Die Rückwand wird erst dann eingesetzt, wenn kurz vor dem Beenden des Schweißens die Schlacke im Auslauftrichter hochzusteigen begonnen hat.
8. Wo zwei Teile, deren Stoßstelle während des Schweißens dem Schlackenbad ausgesetzt ist, zusammenstoßen, wird die Berührungsstelle zweckmäßig stufenförmig gestaltet, um das Auslaufen der Schlacke an dieser besonders kritischen Stelle sicher zu vermeiden.
9. Es ist dafür zu sorgen, daß die Spaltbreite zwischen den Werkstückteilen sich während des Schweißens nicht verkleinert. Ditem Zweck dienen 3 oder 4 auf dem Umfang verteilte Distanzstücke, die durchbohrt sind und von einer beiderseits durch kurze U-Eisen-Stücke geführten Schranke gehalten werden. Gelangt ein solches Distanzstück in die Nähe der Schweißstelle, so wird die Schraube gelöst und das Distanzstück herausgenommen. Sollte es infolge der Nahtschumpfung in der Fuge klemmen, so wird das Distanzstück mittels eines Brenners mittig durchgeschnitten; die beiden Teile fallen dann von selbst heraus.
10. Die äusseren U-Eisen-Stücke, welche die Distanzstücke halten, dienen gleichzeitig als Distanzklammern zum Zusammenhalten der beiden Werkstückteile. Zu diesem Zweck haben die U-Eisen-Stücke auf jeder Seite einen 25 mm breiten Schlitz. Die beiden Schlitz greifen je über ein 10 mm hohes Stück Flacheisen, das auf die Werkstückteile hilfsweise aufgeschweißt ist.
11. Die innere Formbacke ebenso wie der Auslauftrichter am äusseren Gleitschuh sollten etwa 5° konisch sein, um sie nach dem Schweißen leicht abnehmen zu können.
12. Am Ende des Auslauftrichters bildet sich eine Einbrandkerbe, wenn nicht folgende Maßnahmen getroffen werden :
 - a) Vor dem Einlaufen der Aufgangskante *m* in die Endstellung wird ein ca. 12 mm dickes Flacheisenstück aussen am Umfang über den Anfang der bereits geschweißten Naht geheftet; die an sich nicht vermeidbare Einbrandkerbe läßt sich in dieses Flacheisenstück verlegen.
 - b) Das Füllen des Auslauftrichters wird mit dem vollen Schweißstrom und der vollen Schweißspannung begonnen, wobei die Elektrode etwa 10 mm von den Flacheisenstück entfernt in das Schlackenbad eintaucht.

- c) Die Elektrode wird langsam in kleinen Schritten von max. 5 mm vom Flacheisenstück radial nach außen entfernt.
 - d) Gleichzeitig wird die Schweißspannung zunächst im Abstand von 2 min um je 2 V erhöht, nach 5 min um 2 V, nach weiteren 2 min erneut um 6 V herabgesetzt.
 - e) Das Schweißen wird beendet, wenn die Elektrode etwa 40 mm vom Flacheisen entfernt worden ist. Der ganze Auslaufvorgang dauert etwa 15 min.
13. Für den Fall, daß wider Erwarten Schlacke ausläuft, sollte Linit griffbereit stehen, das mit langem Spachtel auf die Auslaufstelle gedrückt wird. Wasserhaltige Dichtungsmittel, wie z.B. Lehm, sind zu vermeiden.
14. Es ist zweckmäßig, die Antriebsrollen der Drehvorrichtung zu rändeln, damit das Drehmoment für die Überwindung der Reibkraft zwischen Werkstück und Gleitschuhen sicher übertragen werden kann.

Details der Einrichtung sind im technischen Vierteljahresbericht Nr. 13 mit den notwendigen Maßen enthalten.

2.4 — Vergleich der neuen Technologie mit bekannten Methoden

2.4.1 — Methode von Paton

Schon Paton beschreibt das Schweißen von Rundnähten in seinem Buch « Die Elektroschlackeschweißung », Moskau 1955. Danach wird auf einem in die Fuge eingehafteten Hilfstück begonnen, das nebst dem schlechten Anlaufstück während des Schweißens herausgebrannt werden muß. Die Schwierigkeit und Unsicherheit beim Herausbrennen wurden bereits früher beschrieben. Sie entfallen bei der neuen Technologie.

2.4.2 — Methode von Burden und Ellis.

Burden und Ellis beschrieben in « Welding and Metal Fabrication, Mai 1964, eingehend das Rundnahtschweißen. Im Gegensatz zu Paton schlagen sie vor, das Schweißen auf einem herausnehmbaren schrägen Kupferstück zu beginnen, das zwischen den Flanken der Fuge angebracht ist. Aber auch hierbei muß das Anfangsstück herausgebrannt werden. In diesem Punkt gilt deshalb dasselbe wie für die Methode von Paton.

2.4.3 — Methode von Thrän und Maushake

Thrän und Maushake berichten in « Schweißtechnik », Berlin 15(1965), H. 1, S. 14-19, über das ES-Schweißen der Rundnaht eines Schusses von 1300 mm Durchmesser und 150 mm Wanddicke. Dabei wurden die inneren 33 mm von Hand vorgeschweißt, und nur die äusseren 117 mm nach dem ES-Verfahren. Das Zünden geschah auf einem in die Fuge gehefteten 20 mm dicken Stahlblech, und das Schließen der Naht in einem Auslauftrichter. Das schlechte Anfangsstück wurde nach Fertigstellen der Naht mittels des Oxyarc-Verfahrens herausgearbeitet und von Hand nachgeschweißt.

Diese Methode ist mit der neuen Technologie der SLV Duisburg kaum vergleichbar, da 23 % der Blechdicke von Hand geschweißt und das fehlerbehaftete Anfangsstück ebenfalls von Hand nachgeschweißt werden muß.

TABELLE I. — Benutzte Grundwerkstoffe (Stähle) für Verbindungsschweißungen

Versuchs- Bezeichn.	Stahl	Chemische Zusammensetzung, Ist-Werte in % ⁽¹⁾										Streck- grenze (kp/mm ²)	Zug- festigkeit (kp/mm ²)	Bruch- dehnung $l_0 = 5 \cdot d_0$ (%)	Kerbschlag- zähigkeit (mkp/cm ²) Anlieferungs- zustand; + 20° C
		C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Mo	Ni	sonstige				
G 1	St 37-2 n. DIN 17100 50 mm dick	0,12	0,17	0,50	0,023	0,027	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	25,2	42,6	27,1	9-11 (DVM-Proben)
G 2	St 37-2 in Sondergüte 50 mm dick	0,13	0,19	0,47	0,08	0,07	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	10-14 (DVM-Proben)
G 3	ASTM 302 Grad B n. DIN 50049 50 mm dick	0,20	0,41	1,31	0,016	0,017	0,014	n.b.	0,45	n.b.	n.b.	39,9-40,4	53,7-54,4	28,7-30,0	10-15 (DVM-Proben)
G 4	13 CrMo 44 n. DIN 17155 50 und 100 mm dick	0,15	0,29	0,69	0,019	0,020	n.b.	0,86	0,42	n.b.	n.b.	33,4-34,0	51,0-51,8	28-30	6-7 (DVM-Proben)
G 5	Wel-Monix MnNiMoV- egierter Sonder- stahl 50 u. 100 mm dick	0,10- 0,16	0,44- 0,49	1,27- 1,30	0,015- 0,026	0,017- 0,025	n.b.	n.b.	0,28- 0,29	1,35- 1,50	V : 0,13 Cu : 0,18	47,3	76,9	18,8	6-9 (DVM-Proben)

⁽¹⁾ n.b. = nicht bestimmt

TABELLE II. — Benutzte Schweißzusatzwerkstoffe (Drahtelektroden) für Kokillen- und Verbindungsschweißungen

Versuchs- Bezeich- nung	Sonstige oder Handelsbe- zeichnung	Chemische Zusammensetzung des Massivdrahtes, Ist-Werte in % ⁽¹⁾											Bemerkungen	
		C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Mo	Ni	Al	Ti		V
SW 1	VO 7539	0,10	0,63	1,30	0,019	0,025	n.b.	0,12	—	0,20	0,47	0,30	—	Hauptsächlich eingesetzt für Verbindungsschweißungen an Stahl St 37-2 zur Über- prüfung der Wirkung von Keimbildnern
SW 2	Dur 200	0,13	0,28	1,50	0,010	0,005	n.b.	0,03	—	—	0,12	0,28	—	
SW 3	Dur 200	0,15	0,30	1,40	0,013	0,007	n.b.	0,05	—	—	0,08	0,25	—	
SW 4	EM 5	0,17	0,34	1,12	0,011	0,004	n.b.	0,05	—	—	0,10	0,23	—	
SW 5	BW XX	0,18	0,35	1,03	0,011	0,005	n.b.	0,03	—	0,80	—	<0,03	—	
SW 6	BW XXV	0,11	0,27	0,38	0,009	0,009	n.b.	0,04	0,11	1,97	—	—	—	
SW 7	S 1 (B) 3173	0,08	0,03	0,56	0,014	0,018	n.b.	—	—	—	—	—	—	
SW 8	S 3 (F)	0,105	0,17	1,68	0,009	0,014	n.b.	—	—	—	<0,03	<0,03	—	Hauptsächlich eingesetzt für Kokillenschweißungen und Verbindungsschweißungen an Stahl St 37-2 nach DIN 17 100 und an Stahl St 37-2 in Sondergüte
SW 9	S 3/Mo (B) 2973	0,13	0,10	1,48	0,017	0,013	n.b.	0,06	0,49	—	—	—	—	
SW 10	S 3/Mo (B) 20516	0,08	0,13	1,49	0,007	0,007	n.b.	0,04	0,58	—	—	—	—	
SW 11	S 3/Mo (B) 9598	0,06	0,09	1,68	0,015	0,011	n.b.	—	0,69	—	—	—	—	
SW 12	S 3/Mo + Al 9599	0,06	0,10	1,70	0,012	0,010	n.b.	—	0,67	—	0,08	—	—	Hauptsächlich eingesetzt für Kokillenschweißungen und Verbindungsschweißungen an den Stählen ASTM 302 Grad B und Wel-Monix
SW 13	S 3/Mo + 1,0 Ni9600	0,07	0,07	1,62	0,012	0,008	n.b.	—	0,67	0,7	—	—	—	
SW 14	S 3/Mo + 2,5 Ni9601	0,06	0,09	1,76	0,012	0,009	n.b.	—	0,68	2,67	—	—	—	
SW 15	S 3/Mo + 1,0 Ni + Al 9701	0,075	0,18	1,98	0,012	0,010	n.b.	—	0,67	0,99	0,09	—	—	
SW 16	S 3/Mo + 2,0 Ni + Al 9602	0,08	0,13	1,92	0,012	0,010	n.b.	—	0,68	2,15	0,08	—	—	
SW 17	S 3/Mo + 2,5 Ni + wenig Mn 5459	0,09	0,06	0,64	0,017	0,014	0,009	0,09	0,69	2,46	—	—	—	
SW 18	S 3/Mo + 1,0 Ni + wenig Mn 6596	0,06	0,14	0,93	0,015	0,010	0,008	0,15	0,34	1,10	—	—	—	
SW 19	S 3/Mo + 1,0 Ni + wenig Mn 38022	0,055	0,15	0,94	0,006	0,006	n.b.	0,004	0,33	1,10	—	—	—	

⁽¹⁾ n.b. = nicht bestimmt

TABELLE II (Verfolgung)

Versuchs- Bezeich- nung	Sonstige oder Handelsbe- zeichnung	Chemische Zusammensetzung des Massivdrahtes, Ist-Werte in % (1)												Bemerkungen
		C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Mo	Ni	Al	Ti	V	
SW 20	HF 1 (B) 3973	0,32	0,20	0,94	0,006	0,007	n.b.	—	—	0,53	—	—	0,18	Hauptsächlich eingesetzt für Kokillenschweißungen und Verbindungsschweißungen an Stahl 13 CrMo 44
SW 21	S 2/CrMo (B) 21916	0,11	0,13	0,45	0,010	0,010	n.b.	1,20	0,50	—	—	—	—	
SW 22	S 2/CrMo 5447	0,06	0,08	0,58	0,016	0,010	0,005	1,28	0,60	0,06	—	—	—	
SW 23	S 2/CrMo + 2,5 Ni 5448	0,06	0,15	0,60	0,017	0,010	0,008	1,26	0,58	2,49	—	—	—	
SW 24	S 2/CrMo + 1,0 Ni 6595	0,06	0,11	0,54	0,014	0,010	0,010	1,22	0,58	1,05	—	—	—	
SW 25	S 2/CrMo + 1,0 Ni 38021	0,05	0,16	0,61	n.b.	0,011	n.b.	1,11	0,56	1,04	—	—	—	
Versuchs- Bezeich- nung	Sonstige oder Handelsbe- zeichnung	Chemische Zusammensetzung des Falzdrahtes, Soll-Werte in %												Bemerkungen
		C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Mo	Ni	Al	Ti	V	
SW 26	S 3/Mo/1 y	0,05- 0,08	0,1- 0,2	1,6- 1,8	<0,010	<0,010	<0,010	—	0,6- 0,7	—	—	—	—	Eingesetzt für Kokillen- schweißungen und Verbin- dungsschweißungen an den Stählen St 37-2, ASTM 302 Grad B und 13 CrMo 44
SW 27	S 3/Mo + Al / 2 y	0,05- 0,08	0,1- 0,2	1,6- 1,8	<0,010	<0,010	<0,010	—	0,6- 0,7	—	0,08- 0,10	—	—	
SW 28	S 3/Mo + 1,0 Ni / 3 y	0,05- 0,0	0,1- 0,2	1,6- 1,8	<0,010	<0,010	<0,010	—	0,6- 0,7	0,8- 1,0	—	—	—	
SW 29	S 3/Mo + 2,5 Ni / 4 y	0,05- 0,08	0,1- 0,2	1,6- 1,8	<0,010	<0,010	<0,010	—	0,6- 0,7	2,5- 2,6	—	—	—	
SW 30	S 3/Mo + 1,0 Ni + Al / 5 y	0,05- 0,08	0,1- 0,2	1,6- 1,8	<0,010	<0,010	<0,010	—	0,6- 0,7	0,8- 1,0	0,08- 0,10	—	—	
SW 31	S 3/Mo + 2,0 Ni + Al / 6 y	0,05- 0,08	0,1- 0,2	1,6- 1,8	<0,010	<0,010	<0,010	—	0,6- 0,7	1,9- 2,1	0,08- 0,10	—	—	

TABELLE III — Benutzte Schweißpulver für Kokillen- und Verbindungsschweißungen

Schweißpulver										
Versuchs-Bezeichnung	SP 1	SP 2	SP 3	SP 4	SP 5	SP 6	SP 7	SP 8	SP 9	SP 10
Handels-Bezeichnung	UM 85	VUS	AN 8	AN 22 (normal)	5,5 Teile UM 90 + 1 Teil TiO ₂	Sonder- schmelze	7,5 Teile SP 2 12,5 Teile Na ₂ CO ₃ 12,5 Teile CaF ₂	50 Teile SP 2 25 Teile Na ₂ CO ₃ 25 Teile CaF ₂	AN 22 (rein)	85 Teile SP 9 + 15 Teile BaO
Bestimmte Gehalte (Werte in Gew.-%)										
FeO	3,14	2,44	—	—	1,7	1,05	1,83	1,22	—	—
Fe ₂ O ₃	—	—	0,95	2,34	—	—	—	—	1,63	1,38
CaO	17,98	8,34	16,95	—	8,5	18,10	6,25	4,17	—	—
CaF ₂	—	—	—	42,70	—	—	12,5	25,0	41,48	35,2
Al ₂ O ₃	4,40	5,32	12,0	15,70	18,5	14,32	3,99	2,66	20,10	17,1
MnO	9,05	34,80	25,15	8,90	25,5	7,15	26,1	17,4	8,41	7,15
MgO	0,006	3,50	6,50	11,90	1,0	16,56	2,62	1,75	7,69	6,53
K ₂ O	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Na ₂ O	—	4,92	4,80	—	—	—	3,69	2,46	4,86	4,13
Cr ₂ O ₃	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
SiO ₂	39,05	43,93	33,28	23,14	28,0	41,7	32,95	21,95	15,15	12,9
TiO ₂	18,7	0,20	—	0,90	16,0	—	0,15	0,10	—	—
H ₂ O	0,10	0,10	—	—	—	—	0,075	0,05	—	—
P	—	—	—	—	—	0,017	—	—	0,018	0,015
S	—	—	—	0,037	—	0,053	—	—	0,036	0,0306
Na ₂ CO ₃	—	—	—	—	—	—	12,5	25,0	—	—
C	—	—	—	0,03	—	—	—	—	0,04	0,034
BaO	—	—	—	—	—	—	—	—	—	15,0
Basizitätsgrad Zahl	0,468	1,12	1,605	2,65	0,835	1,37	1,795	2,92	—	—
(Gew. %) Charakterisierung	sauer	neutral	basisch	stark basisch	sauer	basisch	basisch	stark basisch	stark basisch	stark basisch
Basizitätsgrad Zahl	0,506	1,105	1,62	2,34	0,86	1,57	1,33	2,89	—	—
(Mol %) Charakterisierung	sauer	neutral	basisch	stark basisch	sauer	basisch	schwach basisch	stark basisch	stark basisch	stark basisch
Basizitätsgrad Zahl	0,652	1,32	2,12	3,5	1,66	2,24	1,495	2,73	—	—
nach Beyersdorfer (Mol %) Charakterisierung	sauer	neutral	schwach basisch	stark basisch	neutral	basisch	schwach sauer	basisch	stark basisch	stark basisch
Beurteilung des Einbrandes	stark	mittelstark	mittelstark	gering	mittelstark	gering bis mittelstark	mittelstark bis gering	konnte nicht festgest. werden	gering	mittel bis gering
Schweißverhalten	gut	gut	gut	mittel bis gut	mittel	mittel	mittel bis schlecht	schlecht	mittel bis schlecht	schlecht

TABELLE IV — Benutzte Sonderzusätze für Kokillen- und Verbindungsschweißungen

Versuchs- Bezeichnung	Art des Sonderzusatzes	Besondere Angaben	Chemische Zusammensetzung in %
—	Stahlrohre für Füllstäbe	Abmessung 8 × 2 mm	C : 0,09; Si : 0,12; Mn : 0,29; P : 0,029; S : 0,023
SZ 1	Reinaluminium Al 99,9	Draht mit 4 mm ∅	
SZ 2	Reinnickel	Draht mit 4 mm ∅	C : 0,04; Si : Spuren; Mn : 0,50; Fe : 0,71; Ni : 98,62
SZ 3	Ferrotitan	Pulver	C : 0,07; Si : 0,15; Mn : 0,50; S : 0,005; Cu : 0,03; Al : 0,22; Ti : 69,61; Fe : Rest
SZ 4	Aluminiumnitrid	Pulver	chemisch rein; Zusammensetzung nicht bestimmt
SZ 5	Ferrobör	Pulver	C : 0,02; Si : 0,40; Mn : 0,09; B : 17,30; Fe : Rest
SZ 6	Ferromolybdän	Pulver	C : 0,015; Si : 0,13; Mn : 0,04; S : 0,064; Mo : 69,88; Fe : Rest
SZ 7	Ferrozirkon	Pulver	C : 0,04; Si : 49,62; Mn : 0,36; Al : 0,44; Ti : 0,61; Zr : 37,92; Fe : Rest
SZ 8	Ferrovandän	Pulver	C : 0,06; Si : 0,52; Mn : 0,30; Cu : 0,03; Co : 0,06; V : 75,54; Fe : Rest
SZ 9	ZrNiSiAl-Legierung	Pulver	Soll : Zr : 26-32; Ni : 38-40; Si : 10-12; Al : 12-15; Ti : 0,5-1; C _{max} : 0,10; Fe : Rest
SZ 10	GFE-Legierung	Pulver	Soll : Al : 13; Ti : 20; Zr : 4; Mn : 8; Si : 0,5 B : 0,5; Fe : Rest
SZ 11	Ferroniob	Pulver	Nb : 67,08; Ta : 0,26

TABELLE V — Wirkung von Keimbildnern und Legierungselementen auf Gefügestruktur und Kerbschlagzähigkeitswerte

Grundwerkstoff : St 37-2 (G 1) für Pos. 1 bis 22; ASTM 302 Grad B (G3) für Pos. 23 bis 27

Pos.	Schweißdraht	Schweißpulver	Stromart und Polung der Drahtelektrode	Spannung (V)	Strom (A)	Sonderzusatz	Schweißgutanalyse (%) (Schweißnahtmitte)										Makrogefüge	Mikrogefüge	Kerbschlagzähigkeit (mkp/cm ²) DVM-Proben; 20° C Kerb im Schweißgut	
							C	Si	Mn	P	S	N	Al	Ni	Ti	sonst.			ungealtert	künstlich gealtert
							1 13 2 31	VO 7539 (SW 1) Dur 200 (Sw 2)	AN 22 (SP 4) AN 22 (SP 4)	Wechselstrom Wechselstrom	47 41	570 620	— —	0,115 0,13	0,56 0,29	1,16 1,18			0,023 0,025	0,023 0,014
3 7 4 10	EMO 5 (SW 4) BW XX (SW 5)	AN 22 (SP 4) AN 22 (SP 4)	Wechselstrom Wechselstrom	40 47	500 600	— —	0,165 0,11	0,32 0,18	1,30 1,16	0,012 0,018	0,013 0,016	— —	0,04 —	— 0,72	— —	feinkörnig grobkörnig	— mittelfeinkörnig	(0,7-2,9)/1,6 8(10,5-15,5)/13,0	(0,7-0,8)/0,75 (0,9-1,2)/1,05	
5 51	BW XXV (SW 6)	VUS (SP 2)	Wechselstrom	43	630	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	grobkörnig	—	(8,6-9,9)/9,3	(2,2-3,9)/3,1	
6 20	S 3 (SW 8)	AN 22 (SP 4)	Wechselstrom	41	630	—	0,105	0,08	1,38	0,015	0,015	—	—	—	—	mittelfeinkörnig	grobkörnig	(11,0-14,2)/13,0	(1,6-3,5)/2,2	
7 32	S 3 (SW 8)	AN 22 (SP 4)	Wechselstrom	41	620	Al 99,5 (SZ 1) über Füllstab eingebracht	0,12	0,24	1,43	0,019	0,019	—	0,03	—	—	feinkörnig	feinkörnig	(5,8-10,5)/8,15	(0,8-1,8)/1,25	
8 34	S 3 (SW 8)	AN 22 (SP 4)	Wechselstrom	41	620	Al 99,5 (SZ 1) + Ni(SZ 2) über Füllstab eingebracht	0,11	0,22	1,46	0,018	0,016	—	0,03	1,0	—	grobkörnig	feinkörnig	(8,2-11,8)/9,7	—	
9 36	S 3 (SW 8)	AN 22 (SP 4)	Wechselstrom	40	600	FeTi (SZ 3) über Füllstab eingebracht	0,085	0,15	0,60	0,015	0,022	—	—	—	0,04	feinkörnig	mittelgrobkörnig	(0,5-7,0)/3,5	(0,3-0,9)/0,5	
10 35	S 3 (SW 8)	AN 22 (SP 4)	Wechselstrom	41	630	FeTi (SZ 3) auf Schweißkanten gestrichen	0,11	0,18	1,24	0,019	0,019	—	—	—	0,02	grobkörnig	—	(7,4-11,0)/9,0	(0,5-0,8)/0,65	

TABELLE V (Verfolgung)

Pos.	Schweißdraht	Schweißpulver	Stromart und Polung der Drahtelektrode	Spannung (V)	Strom (A)	Sonderzusatz	Schweißgutanalyse (%) (Schweißnahtmitte)										Makrogefüge	Mikrogefüge	Kerbschlagzähigkeit (mkp/cm ²) DVM-Proben; 20° C Kerb im Schweißgut	
							C	Si	Mn	P	S	N	Al	Ni	Ti	sonst.			ungealtert	künstlich gealtert
							11 39 12 40	S1 (SW 7) S 1 (SW 7)	VUS (SP 2) VUS (SP 2)	Wechselstrom Wechselstrom	41 41	620 620	— Al 99,5 (SZ 1) über Füllstab eingebracht	0,10 0,11	0,07 0,17	0,51 0,67			0,021 0,021	0,022 0,023
13 41	S 1 (SW 7)	VUS (SP 2)	Wechselstrom	41	620	Al 99,5 (SZ 1) + Ni (SZ 2) über Füllstab eingebracht	0,10	0,17	0,72	0,021	0,023	—	0,05	1,34	—	—	feinkörnig	mittelfeinkörnig	(4,1-11,7)/7,9	(2,4-4,9)/3,3
14 47	S 1 (SW 7)	VUS (SP 2)	Wechselstrom	41	620	AlN (SZ 4) über Füllstab eingebracht	0,11	0,08	0,62	0,020	0,022	0,021	0,01	—	—	—	feinkörnig	grobkörnig	(8,9-13,7)/11,7	(1,0-1,5)/1,1
15 45	S 1 (SW 7)	VUS (SP 2)	Wechselstrom	41	620	AlN (SZ 4) + Ni (SZ 2) über Füllstab eingebracht	0,10	0,09	0,59	0,021	0,022	0,017	0,02	1,89	—	—	feinkörnig	mittelfeinkörnig	(10,1-12,8)/11,5	(0,9-3,5)/1,8
16 48	S 1 (SW 7)	VUS (SP 2)	Wechselstrom	41	620	FeV (SZ 8) über Füllstab eingebracht	0,10	0,10	0,56	0,021	0,022	0,017	—	—	—	V : 0,37	feinkörnig	grobkörnig	(0,6-0,8)/0,7	(0,5-0,8)/0,65
17 54	S 1 (SW 7)	VUS (SP 2)	Wechselstrom	43	640	FeB (SZ 5) über Füllstab eingebracht	0,105	0,11	0,61	0,019	0,023	0,016	—	—	—	B : 0,0072	feinkörnig	grobkörnig	(6,2-11,4)/8,7	(0,6-1,2)/0,8
18 55	S 1 (SW 7)	VUS (SP 2)	Wechselstrom	43	600	FeZr (SZ 7) über Füllstab eingebracht	0,095	0,15	0,62	0,023	0,032	0,016	—	—	—	Zr : 0,0	feinkörnig	grobkörnig	(2,9-13,7)/8,8	(0,6-1,7)/1,2

TABELLE VI — Kerbschlagzähigkeitswerte abhängig vom Phosphor- und Schwefelgehalt des Grundwerkstoffes und des Schweißzusatzwerkstoffes

Pos.	Grundwerkstoff	Schweißzusatz- Werkstoff	Schweißpulver	Schweißgutzusammensetzung (%)							Kerbschlagzähigkeit (mkp/cm ²) DVM-Proben, + 20° C, Kerbe im Schweißgut			
				C	Si	Mn	P	S	N	sonstige	ungealtert		künstlich gealtert	
1	reines Schweißgut in wassergekühlter Kupferkille	S3/Mo (SW 9) P : 0,017 % S : 0,013 %	VUS (SP 2)	0,13	0,15	1,27	0,017	0,022	0,015	Mo : 0,51	(1,83-2,4)/2,2		(1,44-2,24)/1,7	
66 2	reines Schweißgut in wassergekühlter Kupferkille	S3/Mo (SW 10) P : 0,007 % S : 0,007 %	VUS (SP 2)	0,13	0,04	0,94	0,011	0,014	0,014	Mo : n.b.	(9,8-11,4)/10,58		(0,5-0,7)/0,6	
62											Kerbschlagzähigkeit (mkp/cm ²) Mittelwerte von 4DVM-Proben, + 20°C			
											ungealtert		künstlich gealtert	
											Schweiß- gutmitte	Über- gang Grund- werk- stoff	Schweiß- gutmitte	Über- gang Grund- werk- stoff
3	St 37-2 nach DIN 17100 (G1)	S3/Mo (SW 10) P : 0,007 % S : 0,007 %	AN 22 (SP 4)	0,10	0,11	1,26	0,015	0,013	—	Mo : 0,34	3,72	11,94	1,6	2,74
28 4	St 37-2 in Sonder- güte (G2)	S3/Mo (SW 10) P : 0,007 % S : 0,007 %	AN 22 (SP 4)	0,08	0,17	1,08	0,006	0,009	0,009	Mo : 0,30	12,4	17,2	5,75	6,7

Stromart und Polung der Drahtelektrode : Wechselstrom
Spannung : 41 bis 43 V
Strom : 600 bis 650 A

TABELLE VII — Einfluß von Schweißpulverzusammensetzung und -basizität auf Schweißgutzusammensetzung, Kerbschlagzähigkeitswerte und Schweißverhalten
Spannung : 40 bis 42 V; Wechselstrom : 580-620 A

Pos.	Grundwerkstoff	Schweißzusatzwerkstoff	Schweißpulver	Schweißgutzusammensetzung (%)							Kerbschlagzähigkeit (mkp/cm ²) DVM-Proben, + 20° C, Kerb im Schweißgut		Bemerkungen
				C	Si	Mn	P	S	N	sonst. sonst.	ungealtert	künstlich gealtert	
1 25	St 37-2 (G 1)	S3/Mo (SW 9)	UM 85 (SP 1)	0,135	0,24	0,79	0,019	0,016	—	Mo : 0,30 Al : 0,02	(7,0-10,5)/8,8	(0,5-2,5)/1,4	saures Pulvers; starker Einbrand saures Pulvers; mittelstarker Einbrand neutrales Pulver mittelstarker Einbrand stark basisches Pulver; geringer Einbrand
2 29	St 37-2 (G 1)	S3/Mo (SW 9)	UM 90 + TiO ₂ (SP 5)	0,135	0,12	0,94	0,023	0,017	—	Mo : 0,27	(2,4-11,2)/7,0	(0,4-4,0)/2,9	
3 23	St 37-2 (G 1)	S3/Mo (SW 9)	VUS (SP 2)	0,13	0,13	0,95	0,022	0,019	—	Mo : 0,29 Al : 0,03	(3,3-9,6)/4,5	(1,5-3,2)/2,5	
4 24	St 37-2 (G 1)	S3/Mo (SW 9)	AN 22 (SP 4)	0,14	0,10	1,27	0,019	0,018	—	Mo : 0,37 Al : 0,03	(3,2-9,0)/5,5	(1,6-3,4)/2,6	
5 26	St 37-2 (G 1)	S3/Mo (SW 10)	UM 85 (SP 1)	0,105	0,15	0,86	0,015	0,019	—	Mo : 0,33	(2,0-4,3)/2,9	(0,7-1,3)/0,9	saures Pulver; starker Einbrand saures Pulver; mittelstarker neutrales Pulver mittelstarker Einbrand schwachbasisches Pulver; mittel- starker Einbrand stark basisches Pulver; geringer Einbrand
6 30	St 37-2 (G 1)	S3/Mo (SW 10)	UM 90 + TiO ₂ (SP 5)	0,11	0,13	1,0	0,017	0,015	—	Mo : 0,30	(1,9-7,2)/3,3	(0,5-1,5)/0,9	
7 27	St 37-2 (G 1)	S3/Mo (SW 10)	VUS (SP 2)	0,105	0,15	1,04	0,016	0,015	—	Mo : 0,29	(1,8-3,2)/2,4	(0,9-3,2)/1,9	
8 65	St 37-2 (G 1)	S3 (SW 10)	AN 8 (SP 3)	0,095	0,13	1,07	0,013	0,013	0,017	Mo : 0,36	(3,48-10,58)/8,3	(2,32-3,44)/2,9	
9 28	St 37-2 (G 1)	S3/Mo (SW 10)	AN 22 (SP 4)	0,10	0,11	1,26	0,015	0,013	—	Mo : 0,34	(9,3-10,7)/10,3	(2,6-6,0)/4,0	
10 19	St 37-2 (G 1)	S3 (SW 8)	UM 85 (SP 1)	0,115	0,17	0,90	0,020	0,017	—	—	(11,0-15,0)/10,24	(0,9-1,1)/1,0	
11 15	St 37-2 (G 1)	S3 (SW 8)	UM 90 + TiO ₂ (SP 5)	0,13	0,18	1,02	0,017	0,012	—	—	(8,8-14,5)/11,7	(1,2-2,3)/1,5	
12 18	St 37-2 (G 1)	S3 (SW 8)	VUS (SP 2)	0,125	0,20	1,10	0,017	0,021	—	—	(10,2-13,8)/12,4	(1,0-2,5)/2,0	
13 20	St 37-2 (G 1)	S3 (SW 8)	AN 22 (SP 4)	0,105	0,08	1,38	0,015	0,015	—	—	(11,0-14,3)/12,8	(1,6-3,5)/2,2	

TABELLE VIII *Einfluß eines Schlackenwechsels während des Schweißens auf die Schweißgutzusammensetzung*
 Grundwerkstoff : St 37-2 G1); Spannung 41 V ; Wechselstrom : 620A; Schweißdraht : S3/Mo (SW 9);
 Schweißpulver : VUS (SP 2)

Entnahmestelle	Schweißgutzusammensetzung (%)							Bemerkungen
	C	Si	Mn		S	N	sonstige	
Nahtmitte vor Schlaekenwechsel	0,135	0,13	1,05	0,017	0,013	0,010	Mo : 0,35	—
Nahtmitte nach Schlaekenwechsel	0,35	0,17	1,05	0,018	0,012	0,019	Mo : 0,37	etwa 50 % Schlacken- volumen ersetzt
Nahtmitte nach Schlaekenwechsel	0,13	0,17	1,13	0,019	0,015	0,014	Mo : 0,44	etwa 50 % Schlacken- volumen ersetzt
Nahtmitte nach kontinuierlichem Schlackenabzug	0,135	0,15	1,13	0,019	0,016	0,014	Mo : 0,14	Schlackenvolumen laufend erneuert

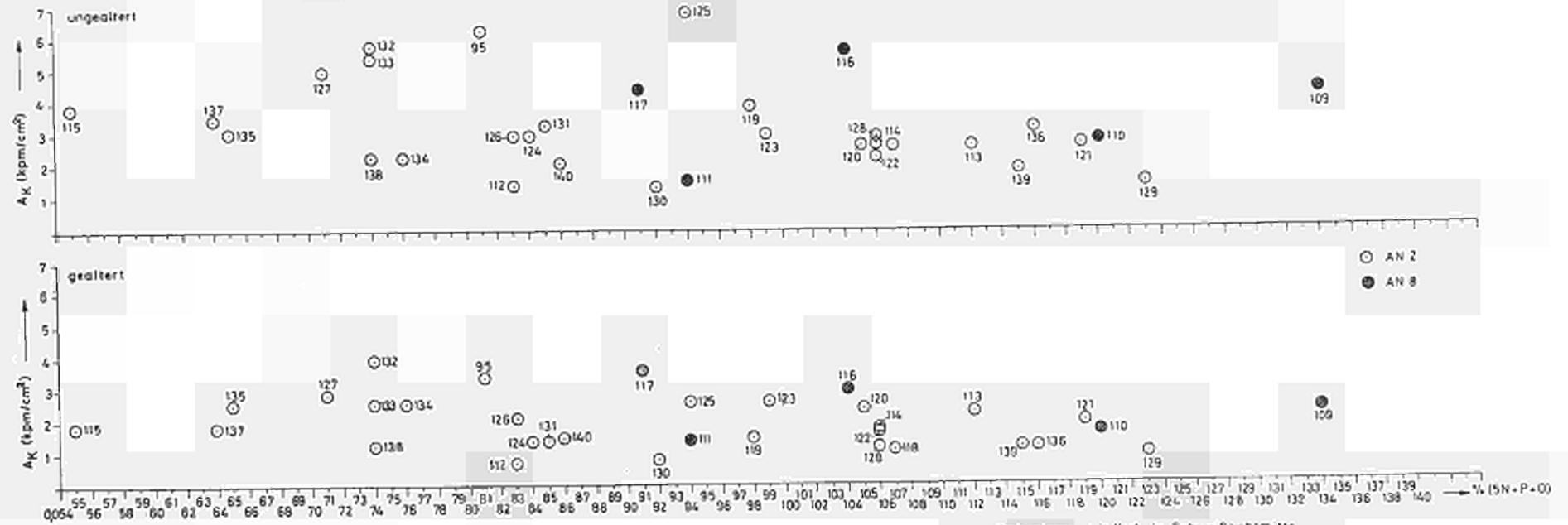
TABELLE — IX — Wirkung von Schweißpulverzusätzen auf die Schweißgutzusammensetzung
 Stromart und Polung der Drahtelektrode : Wechselstrom; Spannung : 40 bis 42 V; Strom : 600 bis 630 A

32

Pos.	Grundwerkstoff	Schweißdraht	Schweißpulver	Schweißgutzusammensetzung (%)							Bemerkungen
				C	Si	Mn	P	S	N	Sonst.	
1 23	St 37-2 (G 1)	S3/Mo (SW 9)	VUS (SP 2)	0,13	0,13	0,95	0,022	0,019	—	Al : 0,03 Mo : 0,29	neutrales Pulver, mittelstarker Einbrand
2 59	St 37-2 (G 1)	S3/Mo (SW 9)	Mischung SP 7	0,135	0,07	1,13	0,018	0,017	0,018	Mo : 0,34	schwach basisches Pulver; mittelstarker bis geringer Einbrand
3 66	St 37-2 (G 1)	S3/Mo (SW 9)	Mischung SP 8	0,14	0,03	1,74	0,018	0,009	0,061	Mo : 0,52	stark basisches Pulver; Einbrand konnte nicht festgestellt werden
4 72	reines Schweißgut in wassergekühlter Kupferkokille	S3/Mo (SW 10)	AN 22 (SP 4)	0,07	0,09	1,57	0,006	0,007	0,061	Mo : 0,53	A_k ungealtert (mkp/cm ²) : 11,5 (Mittelwert) A_k gealtert (mkp/cm ²) : 4,8 (Mittelwert)
5 71	reines Schweißgut in wassergekühlter Kupferkokille	S3/Mo (SW 10)	AN 22 (SP 9)	0,07	0,05	1,56	0,006	0,006	0,020	ÆMo : 0,52	A_k ungealtert (mkp/cm ²) : 2,76 (Mittelwerte) A_k gealtert (mkp/cm ²) : 1,6 (Mittelwert)
6 75	reines Schweißgut in wassergekühlter Kupferkokille	S3/Mo (SW 10)	Mischung SP 10	0,065	0,03	1,41	0,006	0,007	0,017	Mo : 0,52	A_k ungealtert (mkp/cm ²) : 1,91 (Mittelwert) A_k gealtert (mkp/cm ²) : 2,17 (Mittelwert)

TABELLE X.

Einfluß des Schweißpulvers auf die Kerbschlagzähigkeit abhängig vom (5N+O+P)-Gehalt des Schweißgutes



Probenlage: mit Kerb in Schweißnahtmitte
 Probenform: einheitlich Charpy-V-notch
 Prüftemperatur: +20 °C

TABELLE XI — *Einfluß der Legierungszusammensetzung des Schweißzusatzwerkstoffes auf die Kerbschlagzähigkeitswerte des Schweißgutes*

Schweißpulver : AN 22 ; Stromart und Polung der Drahtelektrode : Wechselstrom außer Pos. 1 und 3 : Gleichstrom/Pluspol

Spannung : 40 bis 42 V ; Strom : 600 bis 650 A

Pos.	Grundwerkstoff	Schweißzusatzwerkstoff	Schweißgutzusammensetzung									Kerbschlagzähigkeit (mkp/cm ²) Kerb im Schweißgut, + 20° C		
			C	Si	Mn	P	S	N	Mo	Ni	Sonst.	ungealtert	künstlich gealtert	Probenform
1 93	ASTM 302 Grad B	S3/Mo+Al (SW 12)	0,125	0,21	1,5	0,016	0,015	0,017	0,57	—	Al : 0,01	(4,2-10,0)/6,7	1,2(-2,4)/1,9	DVM
2 132	ASTM 302 Grad B	S3/Mo+1,0 Ni (SW 13)	0,105	0,13	1,35	0,019	0,012	0,004	0,50	0,57	—	(4,8-6,5)/5,6	(2,28-3,05)/2,68	Charpy-V-notch
3 95	ASTM 302 Grad B	S3/Mo+2,5 Ni (SW 14)	0,12	0,20	1,49	0,014	0,012	0,012	0,58	1,24	—	(1,1-1,7)/1,4	—	Charpy-V-notch
4 86	ASTM 302 Grad B	S3/Mo+1,0 Ni+Al (SW 15)	0,12	0,29	1,69	0,011	0,015	0,016	0,58	0,51	Al : 0,01	(2,3-3,5)/2,9	(1,3-2,8)/1,84	DVM
5 87	ASTM 302 Grad B	S3/Mo+2,0 Ni+Al (SW 16)	0,12	0,24	1,61	0,012	0,012	0,016	0,57	1,10	Al : 0,02	(2,1-4,1)/3,0	(1,6-2,9)/2,2	DVM
6 154	ASTM 302 Grad B	S3/Mo+1,0 Ni+wenig Mn(SW 18)	0,10	0,14	1,11	0,015	0,009	—	0,39	0,86	Cr : 0,12	(3,2-5,85)/4,9	(3,0-6,1)/3,9	Charpy-V-notch
7 140	13 CrMo 44	S2/CrMo (SW 22)	0,105	0,05	0,82	0,040	0,012	0,004	0,47	—	Cr : 1,04	(1,6-3,1)/2,0	(1,2-2,0)/1,4	Charpy-V-notch
8 155	13 CrMo 44	S2/CrMo+1,0 Ni (SW 24)	0,11	0,10	0,60	0,018	0,010	—	0,56	0,86	Cr : 1,10	(1,7-3,8)/3,08	(1,52-2,28)/1,80	Charpy-V-notch
9 137	13 CrMo 44	S2/CrMo+2,5 Ni (SW 23)	0,085	0,07	0,85	0,019	0,010	0,005	0,48	2,08	Cr : 1,10	(2,1-6,8)/3,4	(0,8-3,0)/1,8	Charpy-V-notch

TABELLE XII.

Kerbschlagzähigkeitswerte bestimmter Versuchsschweißungen in Abhängigkeit von der Schweißdrahtzusammensetzung

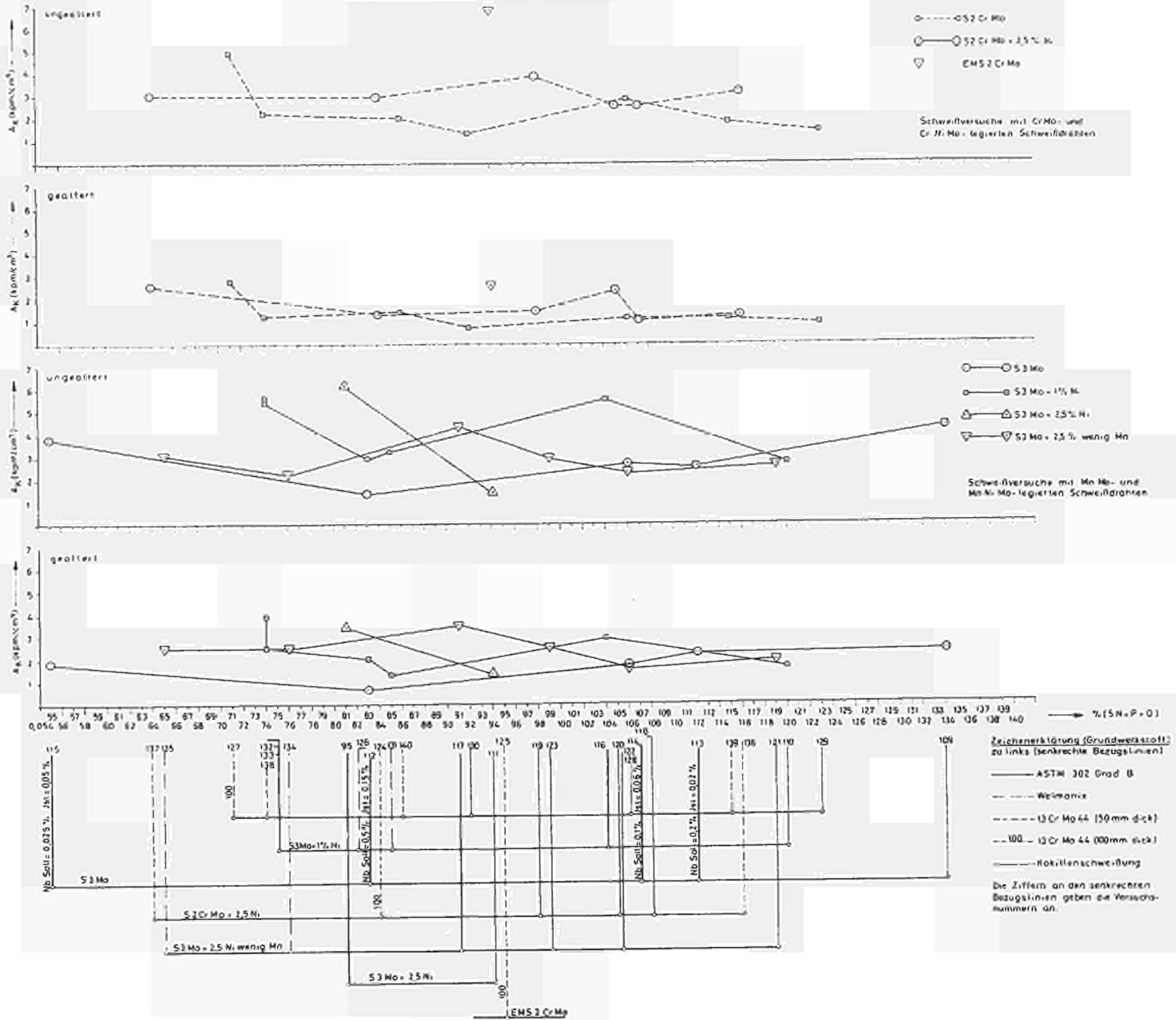


TABELLE XIII — Kerbschlagzähigkeit des Schweißgutes von Massivdraht- und Falzdrahtelektroden etwa gleicher Schweißgutzusammensetzung (reines Schweißgut in wassergekühlter Kupferkokille erschmolzen)
 Stromart und Polung der Drahtelektrode : Gleichstrom/Minuspol
 Spannung : 42 bis 44 V; Strom : 650 A

Pos.	Schweiß- zusatz- werkstoff	Schweiß- pulver	Schweißgutzusammensetzung (%)								Kerbschlagzähigkeit (mkp/cm ²) --- Probe; + 20° C	
			C	Si	Mn	P	S	N	Mo	sonst.	ungealtert	künstlich gealtert
1 96	S3/Mo 1 y (SW 26)	AN 22 (SP 4)	0,06	0,05	1,6	0,013	0,011	0,008	0,44	—	(2,1-8,1)/4,1	(1,4-4,3)/2,7
2 81	S3/Mo (SW 10)	AN 22 (SP 4)	0,07	0,05	1,43	0,010	0,012	0,016	0,49	—	(8,5-13,4)/11,9	(2,6-11,4)/6,03

TABELLE XIV — Einfluß von Stromart und Polung der Drahtelektrode auf die Kerbschlagzähigkeitswerte

Pos.	Grundwerkstoff	Schweißzusatzwerkstoff	Schweißpulver	Stromart und Polung der Drahtelektrode	Schweißgutzusammensetzung (%)									Kerbschlagzähigkeit (mkp/cm ²) Kerb im Schweißgut: + 20° C		
					C	Si	Mn	P	S	N	Mo	Ni	sonst.	Probenform	ungealtert	künstlich gealtert
1 106	reines Schweißgut in Kupferkokille erschmolzen	S3/Mo+2,5 Ni (SW 14)	AN 22 (SP 4)	Gleichstrom Pluspol	0,065	0,03	1,93	0,048	0,015	0,013	0,65	2,5	—	DVM	(2,0-7,5)/4,4	(1,2-4,8)/2,6
2 105	reines Schweißgut in Kupferkokille erschmolzen	S3/Mo+2,5 Ni (SW 14)	AN 22 (SP 4)	Gleichstrom Minuspol	0,095	0,14	1,48	0,048	0,017	0,013	0,66	2,5	—	DVM	(5,6-10,4)/8,5	(2,0-6,3)/4,3
3 107	reines Schweißgut in Kupferkokille erschmolzen	S3/Mo+2,5 Ni (SW 14)	AN 22 (SP 4)	Wechselstrom	0,07	0,04	1,66	0,029	0,013	0,015	0,67	2,57	—	DVM	(1,4-5,1)/2,2	(0,9-2,3)/1,3
4 91	ASTM 302 Grad B (G 3)	S3/Mo+2,5 Ni (SW 14)	AN 22 (SP 4)	Gleichstrom Pluspol	0,135	0,22	1,58	0,016	0,014	0,019	0,58	1,30	—	DVM	(9,5-14,7)/11,5	(2,3-6,3)/3,7
5 92	ASTM 302 Grad B (G 3)	S3/Mo+2,5 Ni (SW 14)	AN 22 (SP 4)	Gleichstrom Minuspol	0,12	0,20	1,56	0,016	0,014	0,015	0,58	1,46	—	DVM	2,1-9,7)/5,5	(1,5-7,3)/3,2
6 85	ASTM 302 Grad B (G 3)	S3/Mo+2,5 Ni (SW 14)	AN 22 (SP 4)	Wechselstrom	0,135	0,15	1,71	0,017	0,012	0,012	0,60	1,52	—	DVM	(10,9-13,7)/12,28	(6,3-8,6)/7,5
7 119	reines Schweißgut in Kupferkokille erschmolzen	S2/CrMo+2,5 Ni (SW 23)	AN 22 (SP 4)	Gleichstrom Pluspol	0,075	0,09	0,71	0,033	0,008	0,007	0,48	2,29	Cr : 1,12	Charpy-V-notch	(2,0-3,8)/2,5	(0,7-1,4)/1,0
8 118	reines Schweißgut in Kupferkokille erschmolzen	S2/CrMo+2,5 Ni (SW 23)	AN 22 (SP 4)	Gleichstrom Minuspol	0,08	0,03	0,78	0,030	0,007	0,010	0,50	2,34	Cr : 1,12	Charpy-V-notch	(2,9-4,5)/3,8	(1,1-1,6)/1,4
9 120	reines Schweißgut in Kupferkokille erschmolzen	S2/CrMo+2,5 Ni (SW 23)	AN 22 (SP 4)	Wechselstrom	0,085	0,03	0,89	0,042	0,007	0,008	0,48	2,27	Cr : 1,14	Charpy-V-notch	(1,5-4,3)/2,5	(1,5-2,9)/2,3

TABELLE XV.

Einfluß der Stromart und Polung der Drahtelektrode auf die Kerbschlagzähigkeit abhängig vom (5N+O+P)-Gehalt des Schweißgutes

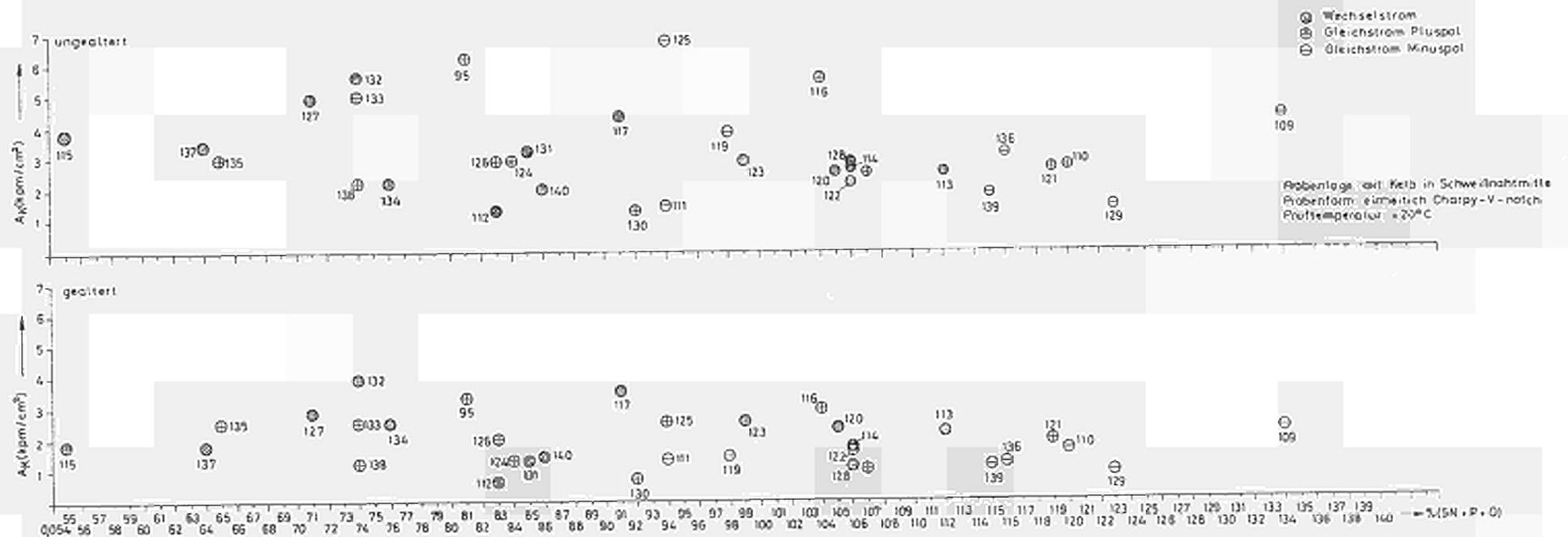


TABELLE XVI — Wirkung verschiedener Wärmebehandlungen auf die Gütewerte von Elektro-Schlacke-Schweißverbindungen

Grundwerkstoff : ASTM 302 Grad B, 50 mm dick Schweißpulver : AN 22
 Schweißzusatzwerkstoff : Pos. 1 bis 3 : S3/Mo + 1,0 Ni + wenig Mn (SW 18)Stromart : Wechselstrom
 : Pos. 4 bis 5 : S3/Mo + 2,5 Ni + wenig Mn (SW 17) Schweißdaten : nicht optimal abgestimmt,
 z. B. kein Pendeln der Drahtelektrode

Pos.	Spannung (V)	Strom (A)	Behandlungs- und Prüfzustand	Kerbschlagzähigkeit (mkp/cm ²); Charpy-V-notch-Proben; + 20° C					
				Übergang Grundwerkstoff		Schweißgut		Übergang Schweißgut	
				ungealtert	gealtert	ungealtert	gealtert	ungealtert	gealtert
1 154	41	550	Schweißzustand (unbehandelt)	(1,97-3,80)/2,84	(1,52-2,28)/1,92	(3,2-5,85)/4,9	(2,28-3,05)/2,68	(5,3-14,1)/9,3	(3,9-5,2)/4,5
			nach Spannungs- freiglühen : 650-680° C	(12,4-21,5)/18,1	(3,38-6,35)/4,7	(9,15-16,4)/11,5	(4,5-5,55)/4,89	(8,55-16,7)/12,9	(7,45-10,6)/9,0
			nach Normal- glühen : 930-950° C	(3,8-6,7)/5,66	(1,9-2,78)/2,48	(5,1-6,9)/5,76	(2,53-2,8)/2,68	(4,95-6,9)/5,95	(2,4-3,05)/2,72
2 141	43	700	Schweißzustand (unbehandelt)	(0,5-1,5)/1,2	(1,1-1,6)/1,3	(1,4-3,8)/2,3	(1,2-3,1)/1,8	(3,7-5,6)/4,5	(3,3-4,3)/3,6
			nach Glühen zum Entfernen von Wasserstoff : 250° C/10 Stunden	(2,0-5,7)/4,1	(1,1-2,3)/1,7	(1,7-6,2)/4,8	(0,8-3,7)/2,5	(2,6-7,5)/5,1	(3,0-4,4)/2,5
			nach Spannungs- freiglühen : 650-680° C	(4,4-6,3)/5,7	(2,3-4,4)/3,5	(1,1-9,2)/5,6	(2,8-3,7)/3,2	(3,3-14,8)/8,0	(1,2-4,4) 2,9

TABELLE XVII — Wirkung verschiedener Wärmebehandlungen auf die Gütewerte von Elektro-Schlacke-Schweißverbindungen

Grundwerkstoff : 13 CrMo 44
 Schweißzusatzwerkstoff : S2/CrMo + 1,0 Ni (SW 24/25)
 Schlackenbadhöhe : 60-70 mm

Schweißpulver : AN 22
 Stromart : Wechselstrom
 Schweißdaten : nicht optimal abgestimmt, z.B. kein Pendeln der Drahtelektrode

40

Pos.	Spannung (V)	Strom (A)	Behandlungs- und Prüfzustand	Kerbschlagzähigkeit (mkp/cm ²); Charpy-V-notch-Proben; + 20° C					
				Übergang Grundwerkstoff		Schweißgut		Übergang Schweißgut	
				ungealtert	gealtert	ungealtert	gealtert	ungealtert	gealtert
1 155	41	550	Schweißzustand (unbehandelt)	(1,95-4,8)/2,96	(1,4-2,8)/2,1	(1,7-3,8)/3,08	(1,52-2,28)/1,8	(1,81-6,2)/4,0	(1,65-3,92)/2,55
			nach Spannungsfreiglühen : 650-680° C	(3,45-8,0)/5,57	(1,65-2,66)/2,2	(5,85-16,7)/12,0	(1,52-2,15)/1,8	(5,85-16,7)/12,0	(2,53-13,0)/6,0
			nach Lufvergüten : 910-940° C Luft + Anlassen bei 650-720° C	(19,0-24,2)/22,2	(4,55-23,2)/14,5	(18,8-20,0)/19,1	(18,6-17,9)/18,0	(19,5-25,8)/22,1	(6,85-22,0)/15,2

TABELLE XVIII — Wirkung eines Wasserstofffreilühens des Grundwerkstoffes auf die Kerbschlagzähigkeitswerte

Grundwerkstoff : Stahl ASTM 302 Grad B, 50 mm dick
 Schweißzusatzwerkstoff : S3/Mo + 2,5 Ni + wenig Mn (SW 17/18)
 Schweißpulver : AN 22

Stromart und Polung der Drahtelektrode :
 Wechselstrom

Pos.	Behandlungszustand des Grundwerkstoffes	Behandlungszustand der Schweißverbindung	Kerbschlagzähigkeit (mkp /cm ²); Charpy-V-notch-Proben; + 20° C					
			ungealtert			künstlich gealtert		
			Übergang Grundwerkstoff	Schweißgut	Übergang Schweißgut	Übergang Grundwerkstoff	Schweißgut	Übergang Schweißgut
1 141	Bleche vor dem Schweißen <i>nicht</i> wasserstofffrei gegläht	Schweißzustand (unbehandelt)	(0,5-1,5)/1,2	(1,4-3,8)/2,3	(3,7-5,6)/4,5	(1,1-1,6)/1,3	(1,2-3,1)/1,8	(3,3-4,3)/3,6
		Nach Glühen zum Entfernen von Wasserstoff : 250° C/10 Stunden	(2,0-5,7)/4,1	(1,7-6,2)/4,8	(2,6-7,5)/5,1	(1,1-2,3)/1,7	(0,8-3,7)/2,5	(3,0-4,4)/2,5
2 147	Bleche vor dem Schweißen <i>wasserstofffrei</i> gegläht	Schweißzustand (unbehandelt)	(2,2-3,4)/2,7	(3,04-6,17)/4,71	(6,75-9,37)/7,26	(1,4-2,2)/1,7	(1,9-3,2)/2,45	(2,0-4,5)/3,62
		Nach Glühen zum Entfernen von Wasserstoff : 250° C/10 Stunden	(2,2-5,9)/4,3	(2,72-6,62)/4,64	(3,03-17,84)/10,09	(1,4-2,6)/1,9	(1,1-3,28)/2,18	(1,75-5,12)/3,65

TABELLE XIX — Wirkung einer Schutzgasabschirmung des Schweißbades auf die Kerbschlagzähigkeitswerte

Pos.	Grundwerkstoff	Schweißzusatzwerkstoff	Schweißpulver	Stromart und Polung der Drahtelektrode	Bemerkungen	Schweißgutzusammensetzung (%)								Kerbschlagzähigkeit (mkp/cm ²) Kerb im Schweißgut; + 20° C		
						C	Si	Mn	P	S	N	Mo	sonst.	Probenform	ungealtert	künstlich gealtert
1 73	reines Schweißgut in Kupferkokille erschmolzen	S3/Mo (SW 10)	AN 22 (SP 9)	Gleichstrom Pluspol	ohne Flamenschutz	0,07	0,04	1,31	0,006	0,006	0,017	0,55	—	DVM	(2,29-5,73)/3,4	(0,87-2,86)/1,4
2 76	reines Schweißgut in Kupferkokille erschmolzen	S3/Mo (SW 10)	AN 22 (SP 9)	Gleichstrom Pluspol	mit Flamenschutz durch C ₃ H ₈ - (Propan-) Flamme der Badoberfläche	0,08	0,15	1,58	0,006	0,006	0,016	0,51	—	DVM	(1,83-3,71)/2,5	(0,91-1,86)/1,4
3 148	ASTM 302 Grad B (G 3)	S3/Mo+1,0 Ni + wenig Mn e (SW 18)	AN 22 (SP 4)	Wechselstrom	Bleche vor dem Schweißen nicht wasserstofffrei geglüht ohne Argonschutz	0,11	0,17	1,07	0,016	0,012	0,014	0,42	Cr : 0,12 Ni : 0,66	—	(4,8-6,0)/5,8	(3,5-5,5)/4,3
4 149	ASTM 302 Grad B (G 3)	S3/Mo+1,0 Ni + wenig Mn (SW 18)	AN 22 (SP 4)	Wechselstrom	mit Argonschutz	0,11	0,20	1,13	0,016	0,013	0,013	0,42	Cr : 0,13 Ni : 0,63	—	(5,4-8,8)/6,7	(4,2-4,8)/4,4
5 150	ASTM 302 Grad B	S3/Mo+1,0 Ni + wenig Mn (SW 18)	AN 22 (SP 4)	Wechselstrom	Bleche vor dem Schweißen wasserstofffrei geglüht ohne Argonschutz	0,11	0,18	1,09	0,015	0,013	0,013	0,42	Cr : 0,12 Ni : 0,73	—	(5,5-9,4)/7,2	(3,7-4,0)/3,8
6 151	ASTM 302 Grad B (G 3)	S3/Mo+1,0 Ni + wenig Mn (SW 18)	AN 22 (SP 4)	Wechselstrom	mit Argonschutz	0,11	0,21	1,11	0,015	0,011	0,013	0,42	Cr : 0,15 Ni : 0,63	—	(4,9-6,7)/5,4	(3,6-4,6)/4,0
7 152	13 CrMo 44 (G 4)	S2/CrMo+1,0 Ni (SW 25)	AN 22 (SP 4)	Wechselstrom	ohne Argonschutz	0,10	0,11	0,68	0,014	0,021	0,013	0,54	Cr : 1,07 Ni : 0,59	—	(2,3-4,1)/2,9	(1,1-2,7)/1,7
8 153	13 CrMo 44 (G 4)	S2/CrMo+1,0 Ni (SW 25)	AN 22 (SP 4)	Wechselstrom	mit Argonschutz	0,10	0,07	0,64	0,016	0,021	0,015	0,55	Cr : 1,07 Ni : 0,67	—	(2,1-3,7)/3,1	(1,7-2,4)/1,9

TABELLE XX — *Einfluß geänderter Schweißparameter auf die Gütewerte (Kerbschlagzähigkeitswerte)*
 Grundwerkstoff : Stahl ASTM 302 Grad B, 50 mm dick
 Schweißpulver : AN 22
 Schweißzusatzwerkstoff : S3/Mo + 1,0 Ni + wenig Mn (SW 18)
 Schlackenbadhöhe : 65-70 mm
 Stromart : Wechselstrom
 Anzahl der Drahtelektroden : eine

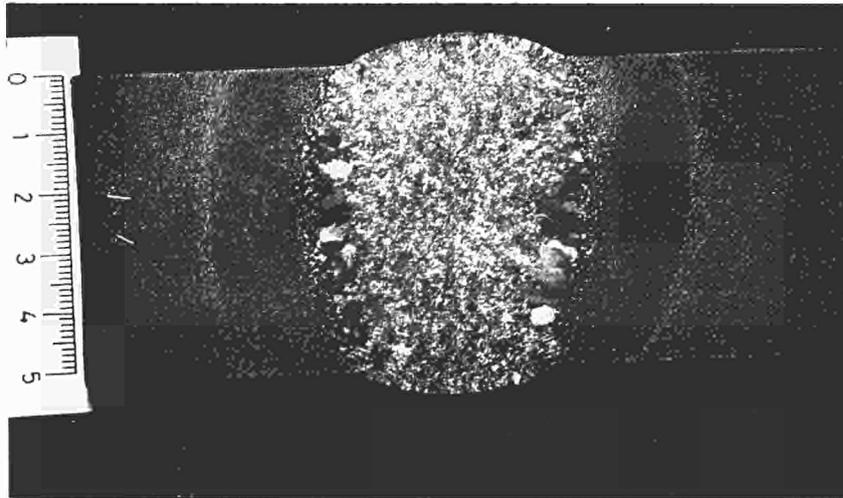
Pos.	Spannung (V)	Strom (A)	Drahtvor- schub- geschwin- digkeit (m/h)	Pendel- geschwin- digkeit (cm/min)	Pendel- weg (mm)	Wasser- kühlung der Kupfer- gleit- schuhe	Kerbschlagzähigkeit (mkp/cm ²); Charpy-V-notch-Probe; + 20 °C					
							Übergang Grundwerkstoff		Schweißgut		Übergang Schweißgut	
							ungealtert	gealtert	ungealtert	gealtert	ungealtert	gealtert
1 159	38	530	270	0	0	stark	(2,5-6,12)/3,40	(1,4-2,4)/1,9	(4,25-7,0)/4,93	(1,1-2,6)/2,0	(8,0-9,25)/8,43	(1,7-5,4)/2,7
2 160	38	650	425	0	0	stark	(2,75-4,75)/3,82	(1,2-2,1)/1,7	(6,75-10,0)/7,8	(2,0-2,9)/2,4	(3,25-13,28)/7,9	(2,5-5,5)/4,4
3 161	44	650	430	0	0	stark	(2,1-3,33)/2,76	(1,73-2,87)/2,2	(8,54-13,58)/11,1	(3,0-6,3)/4,2	(4,88-18,78)/13,68	(2,59-19,15)/10,0
4 162	46	650	430	0	0	stark	(1,61-2,53)/1,98	(2,02-2,12)/2,04	(8,17-12,93)/10,5	(3,38-4,69)/3,91	(7,8-17,39)/13,0	(1,65-9,87)/5,58
5 163	48	650	430	0	0	stark	(1,98-2,59)/2,23	(1,38-1,98)/1,59	(7,07-10,58)/9,26	(3,5-4,0)/3,75	(8,29-15,85)/13,7	(3,62-8,15)/5,6
6 164	44	650	430	44,5	25	stark	(2,6-4,65)/3,42	(1,65-2,0)/1,91	(11,0-18,3)/14,72	(3,5-5,75)/4,62	(15,0-22,0)/19,0	(3,0-10,1)/6,21
7 165	44	650	430	29	25	stark	(2,1-2,85)/2,42	(1,77-2,4)/2,1	(13,5-20,8)/16,54	(5,4-6,4)/5,92	(7,15-22,6)/16,8	(4,8-17,8)/8,42
8 166	44	650	430	22	25	stark	(2,47-4,1)/3,2	(1,65-5,5)/2,79	(7,5-13,2)/11,16	(4,05-5,1)/4,49	(6,8-13,8)/9,5	(1,65-6,45)/4,47
9 173	44	650	430	22	25	schwach	(1,97-3,6)/2,85	(2,25-4,4)/3,19	(8,6-19,1)/13,86	(3,9-6,9)/4,91	(3,5-20,25)/11,37	(3,0-13,0)/5,65

TABELLE XXI — *Einfluß geänderter Schweißparameter auf die Gütewerte (Kerbschlagzähigkeitswerte)*

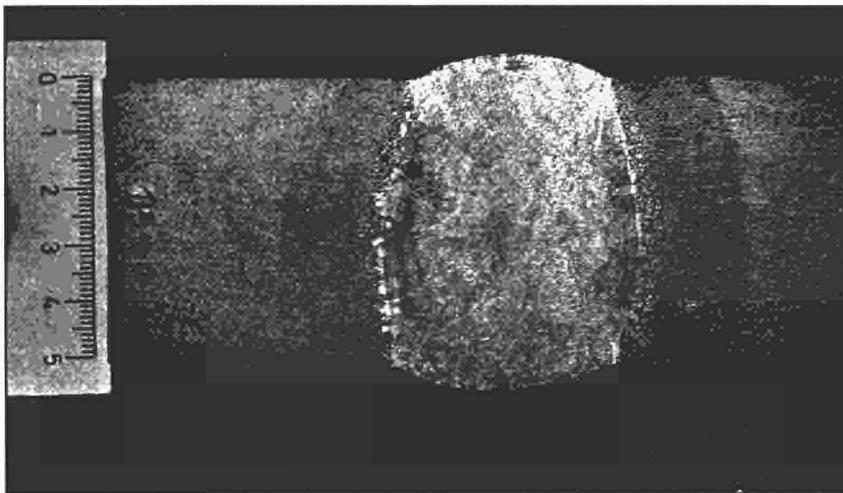
Grundwerkstoff : Stahl 13 CrMo 44, 100 mm dick
 Schweißzusatzwerkstoff : S2/CrMo + 1,0 Ni (SW 24/25)
 Stromart : Wechselstrom

Schweißpulver : AN 22
 Schlackenhöhe : 65-70 mm
 Anzahl der Drahtelektroden : zwei

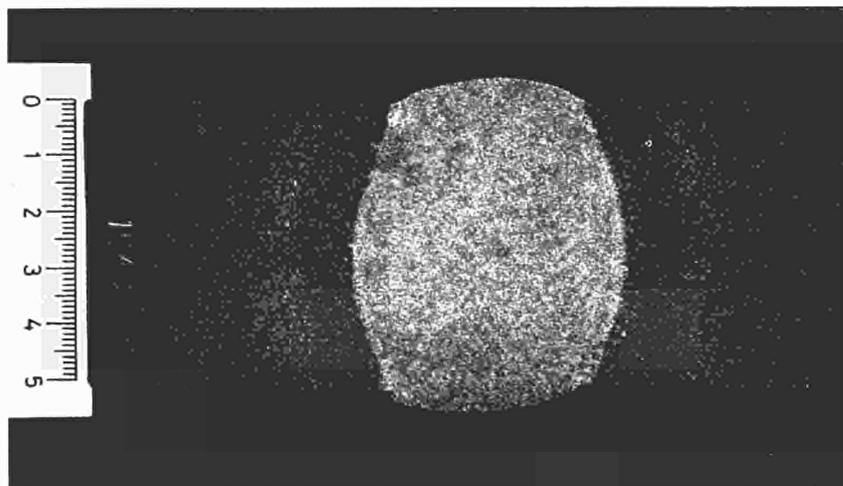
Pos.	Spannung (V)	Strom (A)	Drahtvor- schub- geschwin- digkeit (m/h)	Pendel- geschwin- digkeit (cm/min)	Pendel- weg (mm)	Wasser- kühlung der Kupfer- schuhe	Kerbschlagzähigkeit (mkp/cm ²); Charpy-V-notch-Proben: + 20° C					
							Übergang Grundwerkstoff		Schweißgut		Übergang Schweißgut	
							ungealtert	gealtert	ungealtert	gealtert	ungealtert	gealtert
1 168	40	1060	330	0	0	stark	(3,13-7,83)/5,83	(0,74-0,99)/0,89	(1,22-6,35)/3,12	(0,62-1,62)/1,09	(6,1-9,88)/8,5	(0,74-1,25)/0,97
2 169	40	1300	430	0	0	stark	(2,93-4,32)/3,4	(0,63-1,0)/0,8	(3,42-7,8)/5,05	(0,87-1,5)/1,1	(2,32-15,2)/7,77	(0,63-0,99)/0,83
3 170	42	1100	370	0	0	stark	(2,6-3,95)/3,21	(1,26-1,54)/1,45	(1,85-13,1)/6,7	(1,14-3,8)/1,85	(2,6-6,55)/4,89	(1,26-1,77)/1,48
4 171	44	1100	370	0	0	stark	(3,45-6,9)/4,96	(1,26-1,54)/1,42	(2,35-11,1)/7,67	(1,14-1,65)/1,42	(4,1-20,8)/11,14	(1,4-3,16)/1,88
5 172	46	1100	370	0	0	stark	(4,15-8,75)/5,49	(1,38-1,65)/1,46	(6,4-8,4)/7,3	(1,14-3,55)/2,5	(2,35-10,25)/5,16	(1,26-3,55)/2,58
6 178	44	1100	370	25	40	stark	(2,6-4,8)/3,41	(0,87-1,75)/1,2	(3,6-5,9)/4,8	(0,87-4,0)/1,94	(3,6-5,9)/4,15	(0,87-1,12)/0,97
7 179	44	1100	370	48	40	stark	(2,75-6,0)/4,28	(0,89-1,78)/1,21	(3,97-5,4)/4,72	(1,5-3,1)/1,87	(7,6-14,9)/11,32	(1,5-4,2)/2,82
8 180	43	1060	355	24	40	schwach	(3,25-6,4)/4,41	1,0-1,25)/1,15	(2,25-4,0)/3,05	(1,12-1,6)/3,15	(3,5-9,6)/6,42	(0,63-3,55)/1,33
9 181	43	1060	355	46	40	schwach	(3,1-9,4)/5,5	(0,87-1,25)/1,12	(2,5-3,5)/3,14	(0,63-1,12)/0,94	(2,1-11,9)/6,16	(1,12-3,7)/2,03



Versuch Nr. 154
Schweißzustand

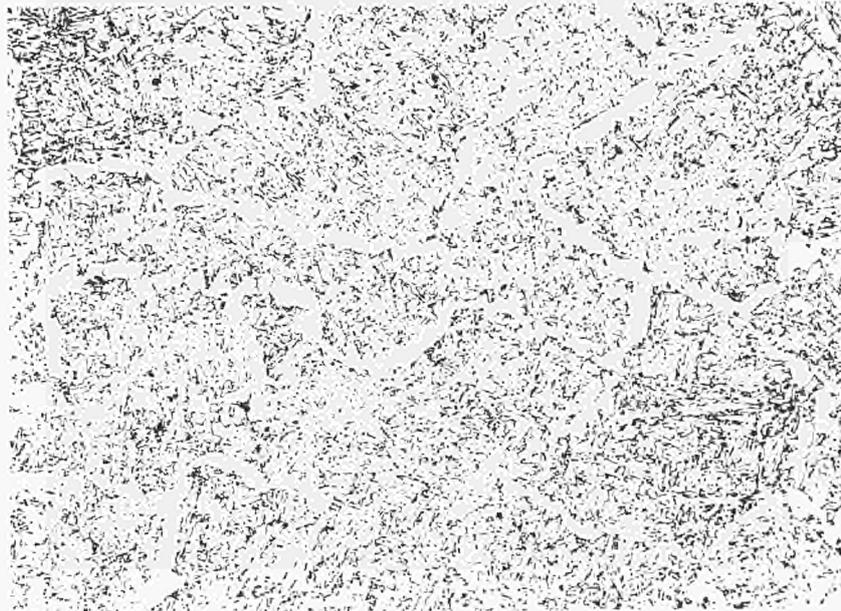


Versuch Nr. 154
spannungsfrei gegläht



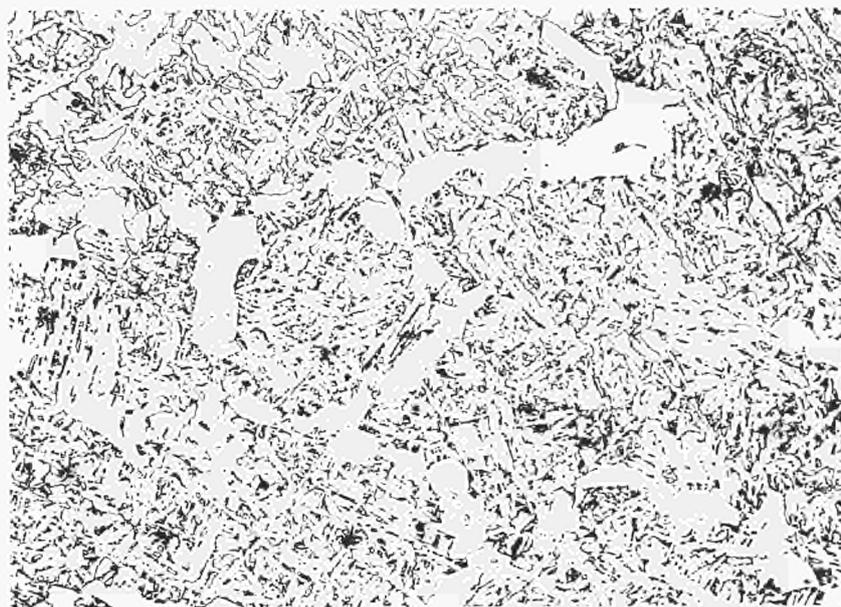
Versuch Nr. 154
normalgeglüht

Abbildung 1



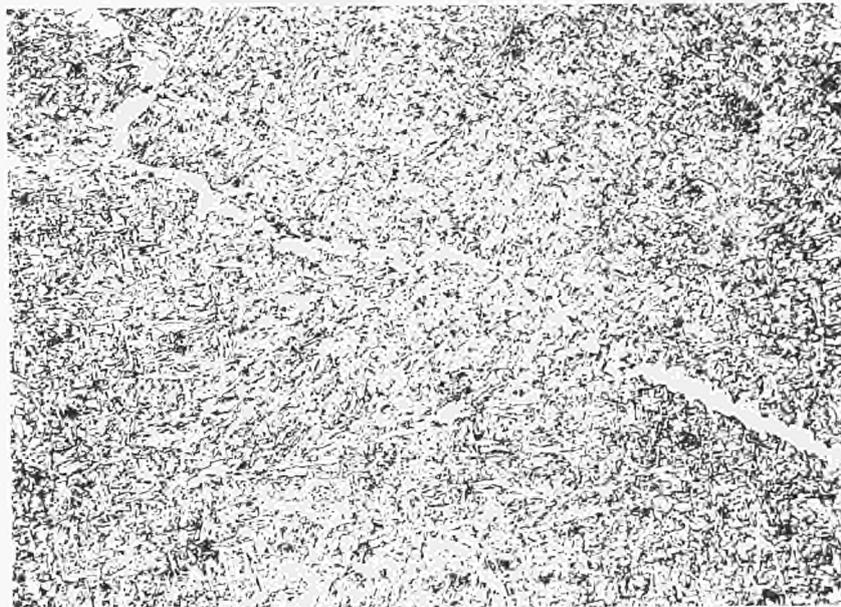
V = 100 : 1

Versuch Nr. 154
(unbehandelt)
Schweißnahtmitte



V = 200 : 1

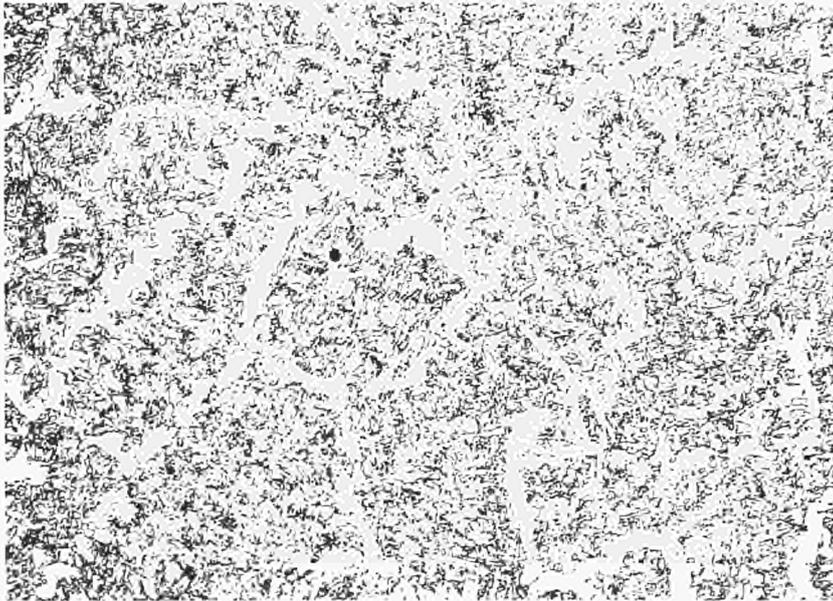
Schweißnahtmitte



V = 100 : 1

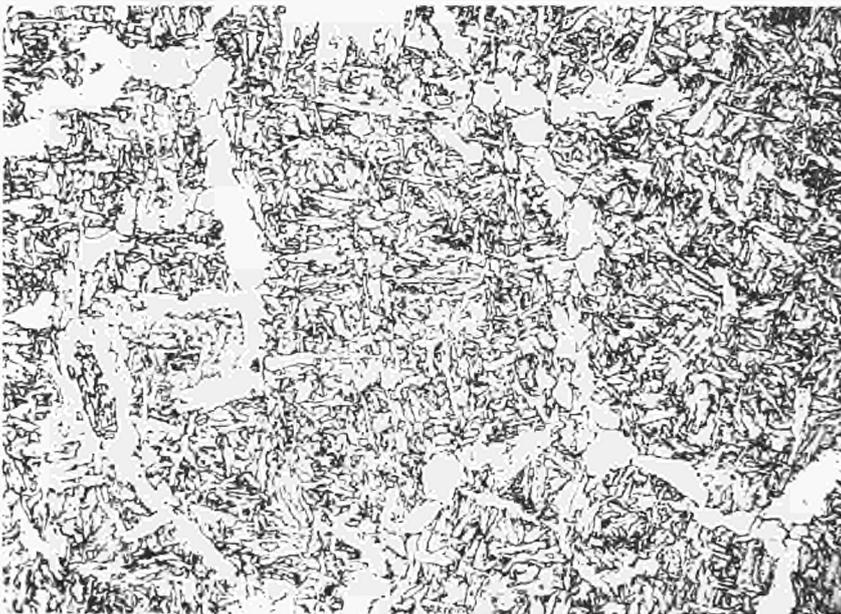
Übergang
(schweißgutseitig)

Abbildung 2



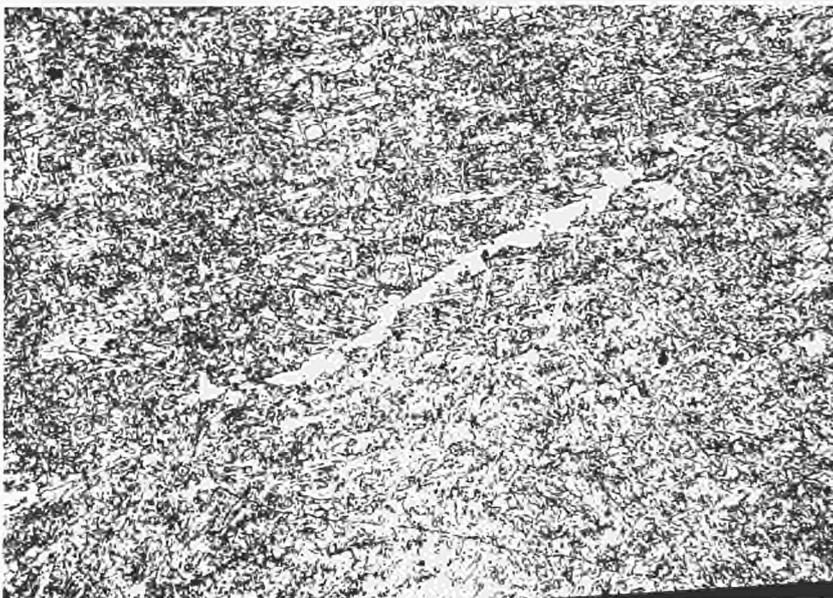
V = 100 : 1

Versuch Nr. 154
(spannungsfreigelegt)
Schweißnahtmitte



V = 200 : 1

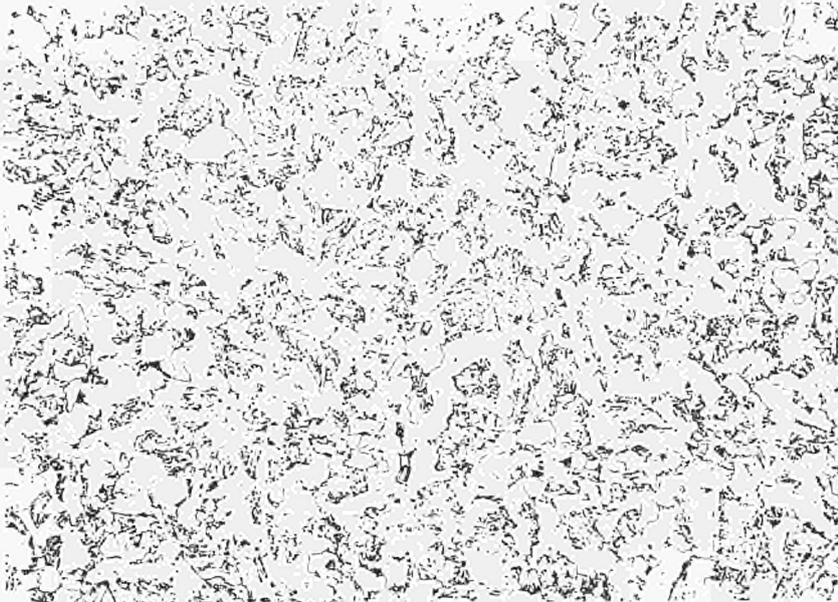
Schweißnahtmitte



V = 100 : 1

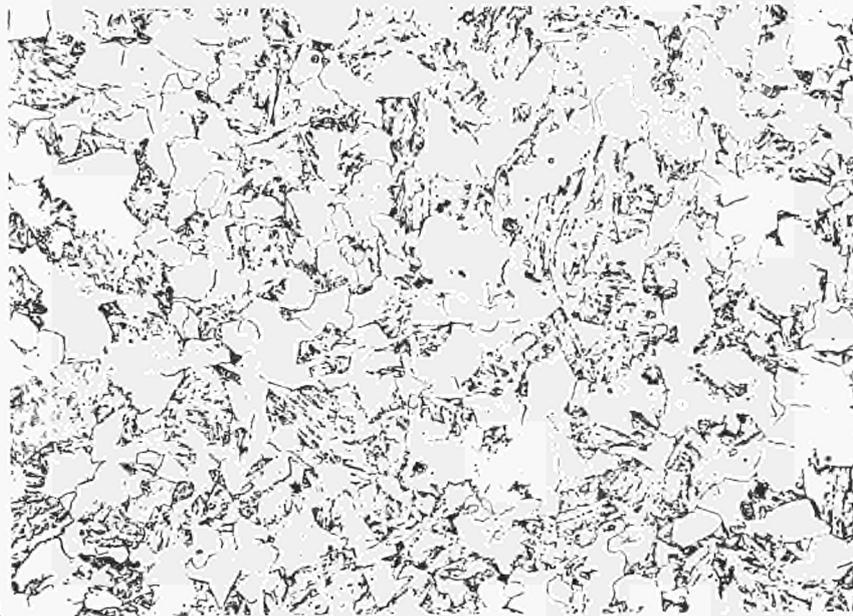
Übergang
(schweißgutseitig)

Abbildung 3



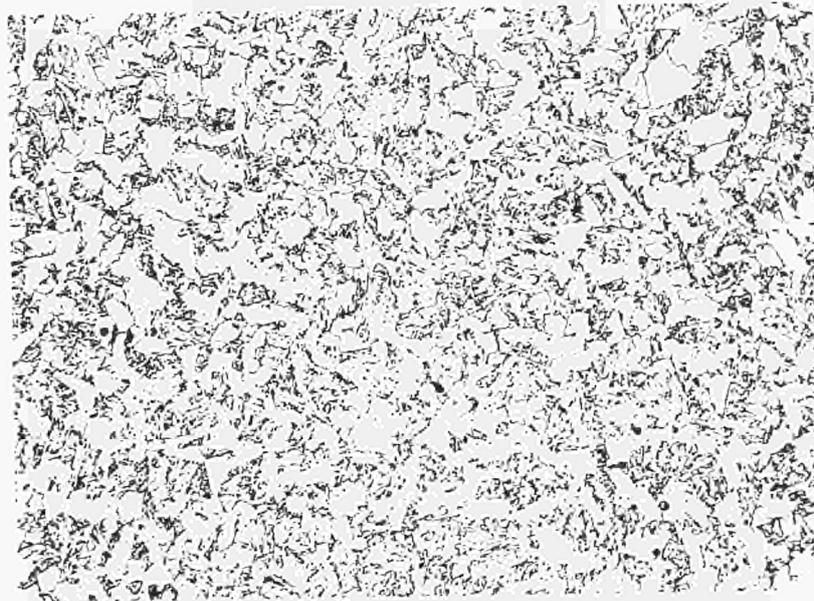
V = 100 : 1

Versuch Nr. 154
normalgeglüht
Schweißnahtmitte



V = 200 : 1

Schweißnahtmitte



V = 100 : 1

Übergang
(schweißgutseitig)

Abbildung 4

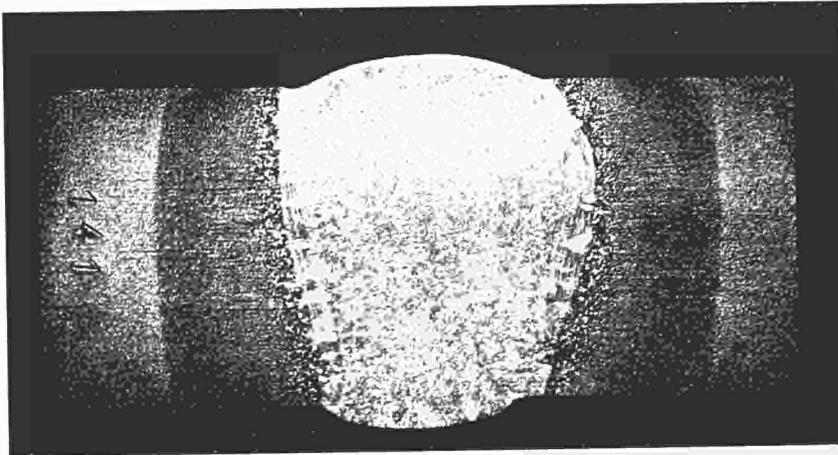


Abbildung 5
Versuch Nr. 141
Schweißzustand

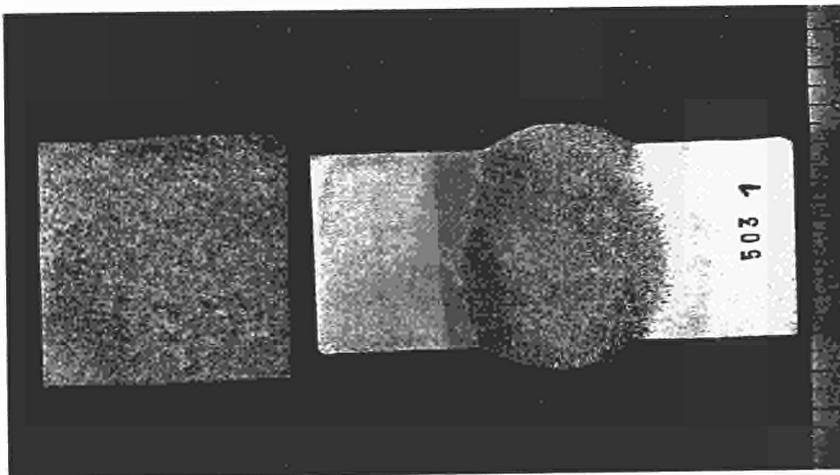


Abbildung 11
Versuch Nr. 22
Schweißzustand
(unbehandelt)

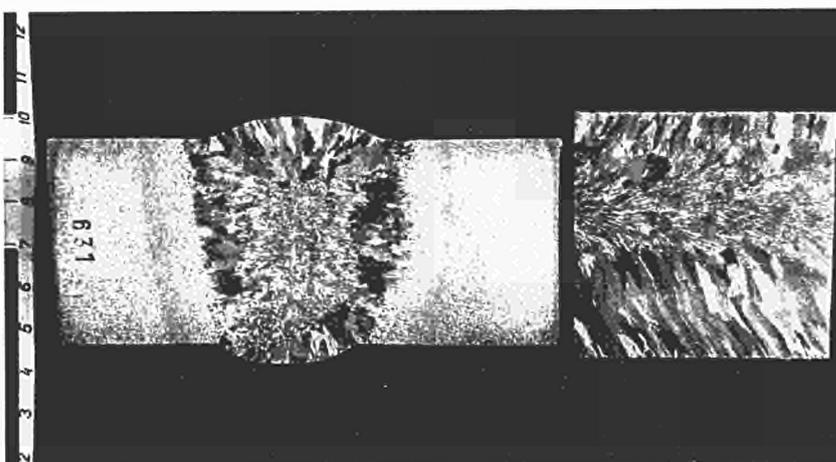
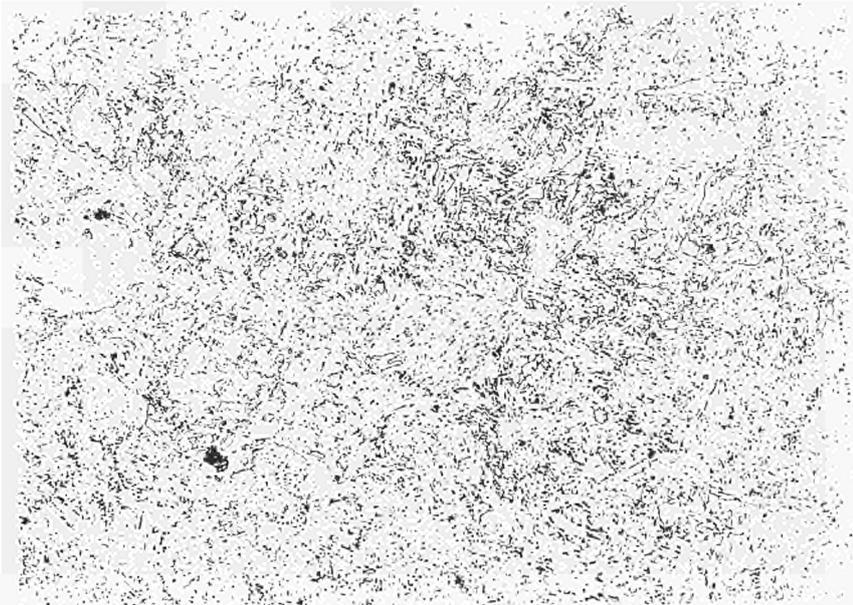


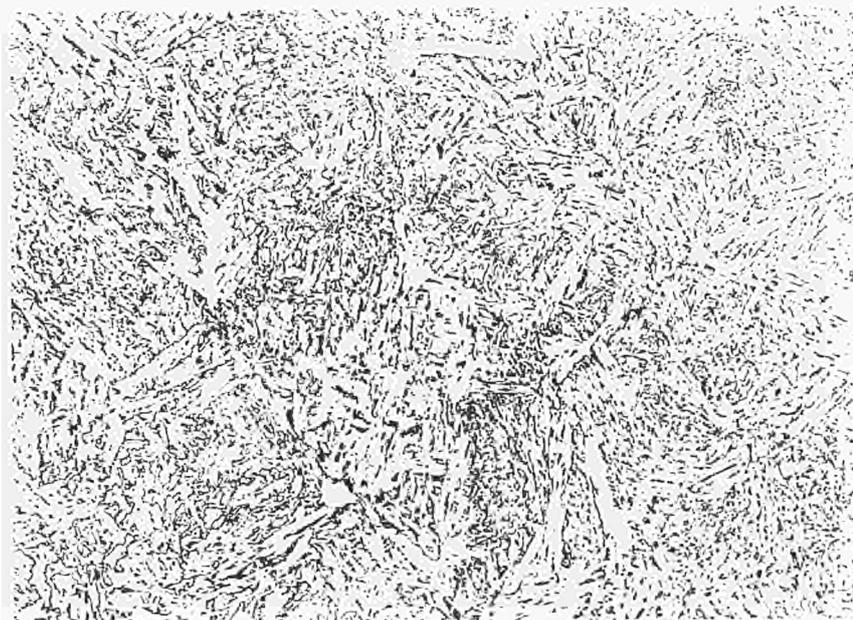
Abbildung 13
Versuch Nr. 52
Schweißzustand
(unbehandelt)



V = 100 : 1

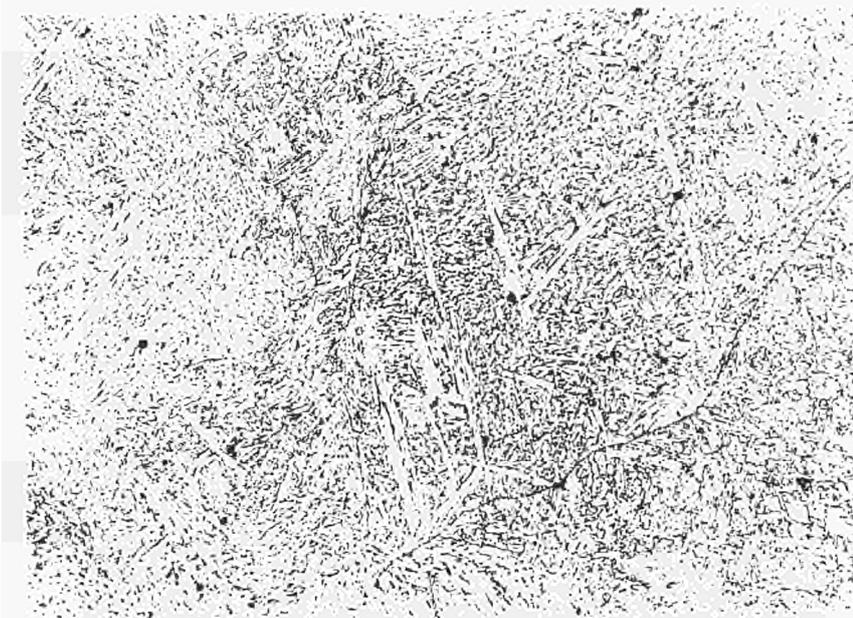
Versuch Nr. 141
Schweißzustand
(unbehandelt)

Schweißnahtmitte



V = 200 : 1

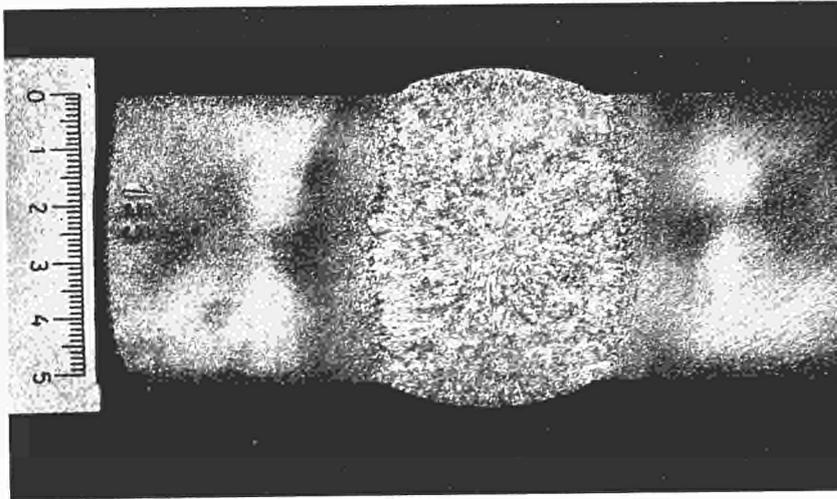
Schweißnahtmitte



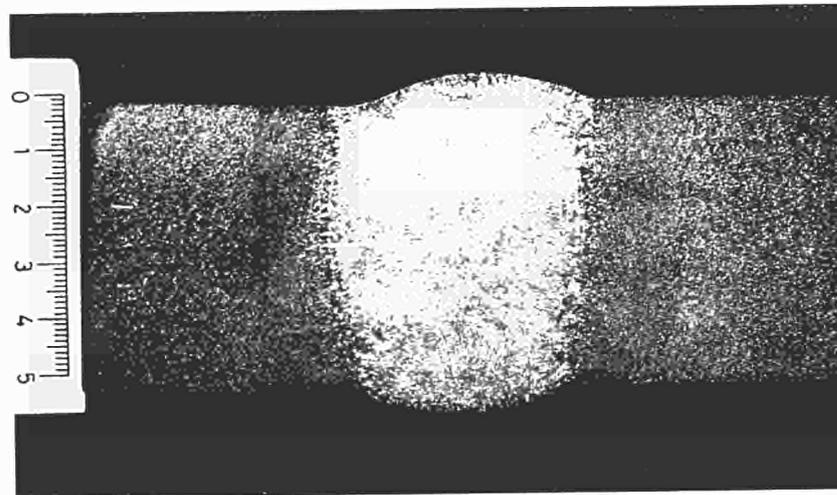
V = 100 : 1

Übergang
(schweißgutseitig)

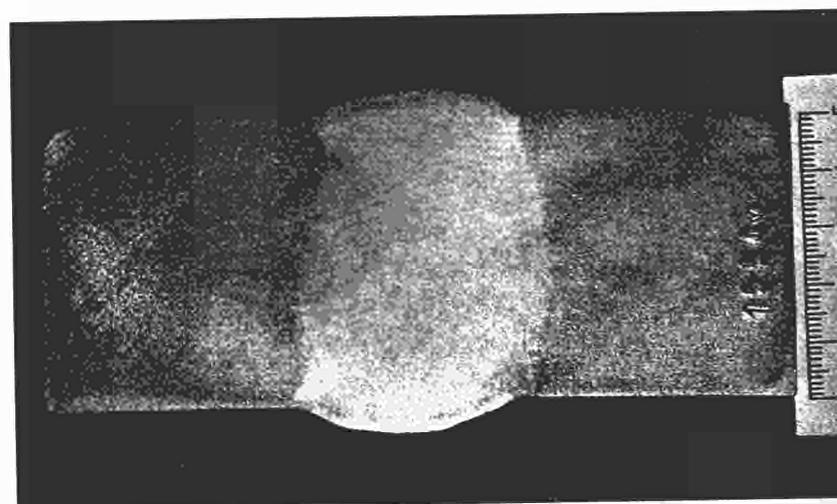
Abbildung 6



Versuch Nr. 155
Schweißzustand

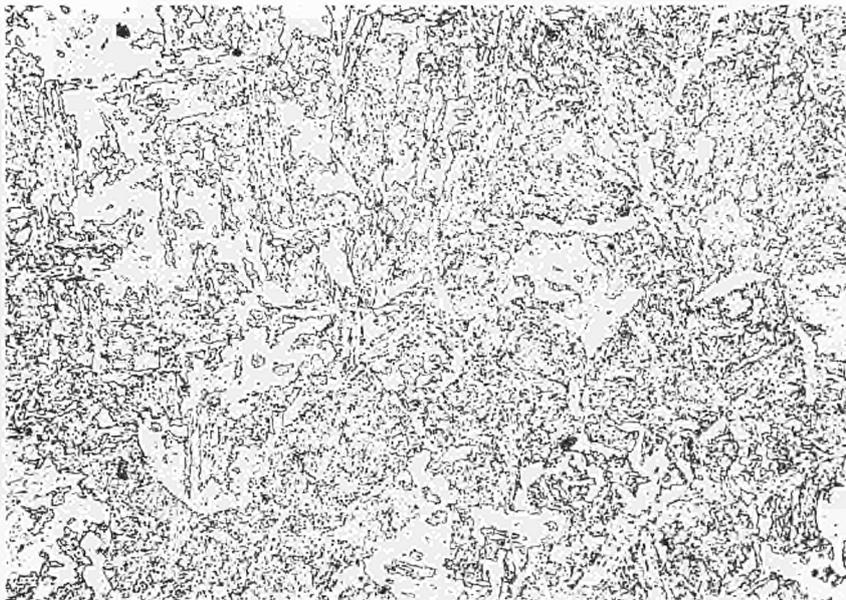


Versuch Nr. 155
spannungsfreigegeglüht



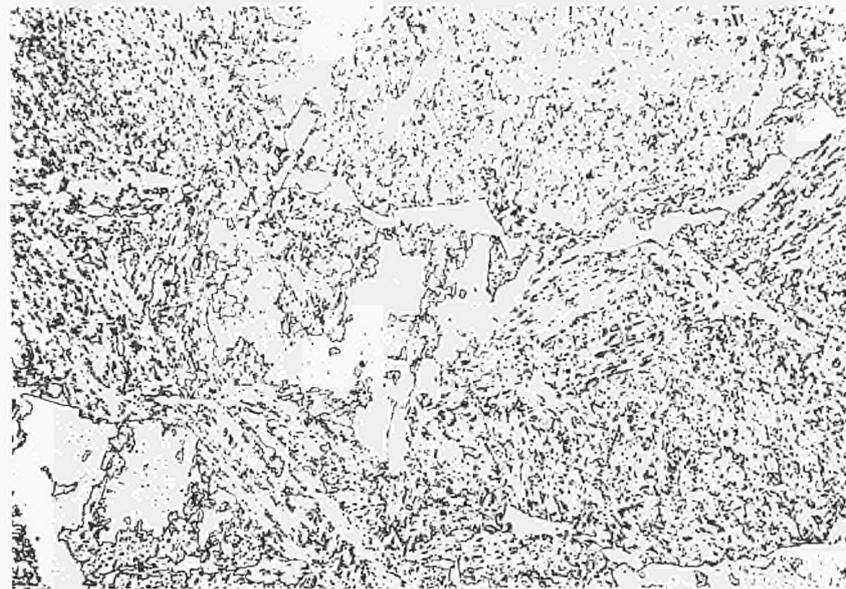
Versuch Nr. 155
luftvergütet

Abbildung 7



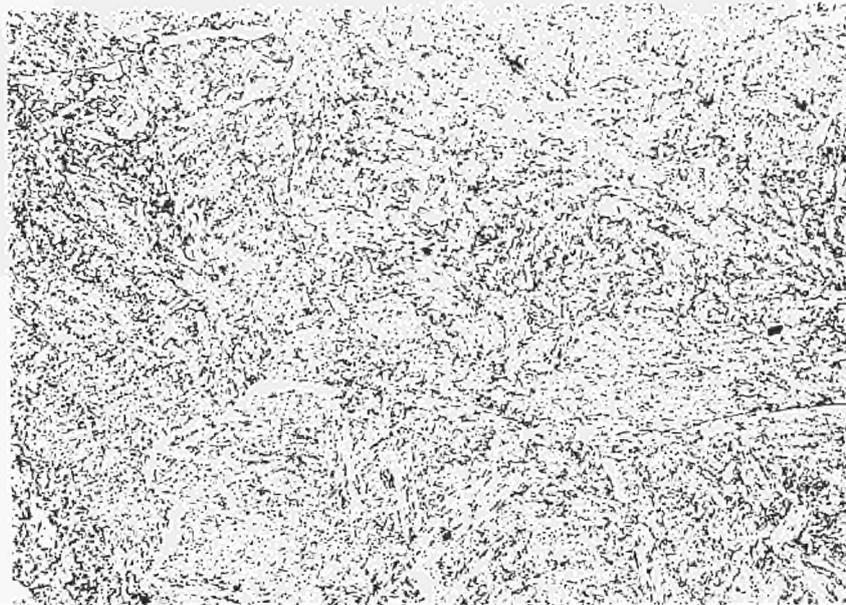
V = 100 : 1

Versuch Nr. 155
Schweißzustand
(unbehandelt)
Schweißnahtmitte



V = 200 : 1

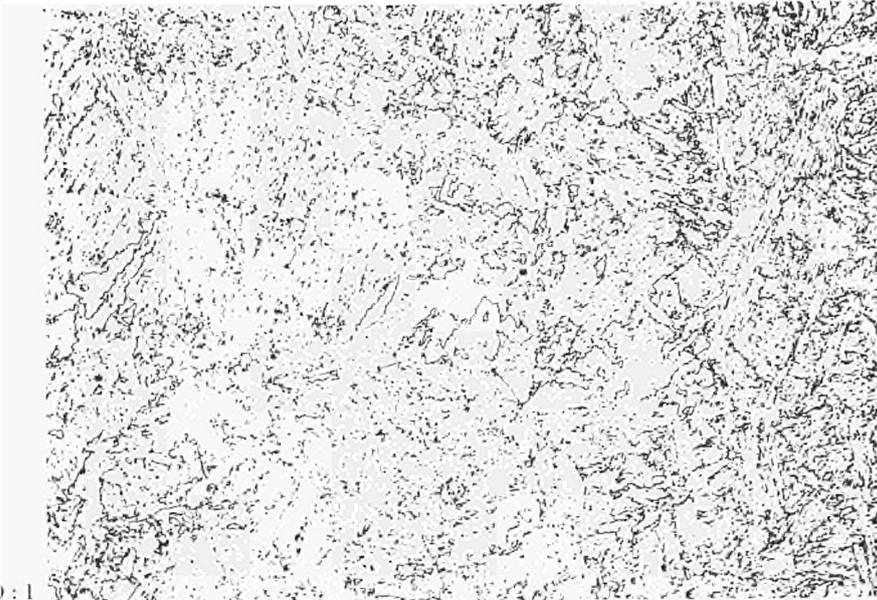
Schweißnahtmitte



V = 100 : 1

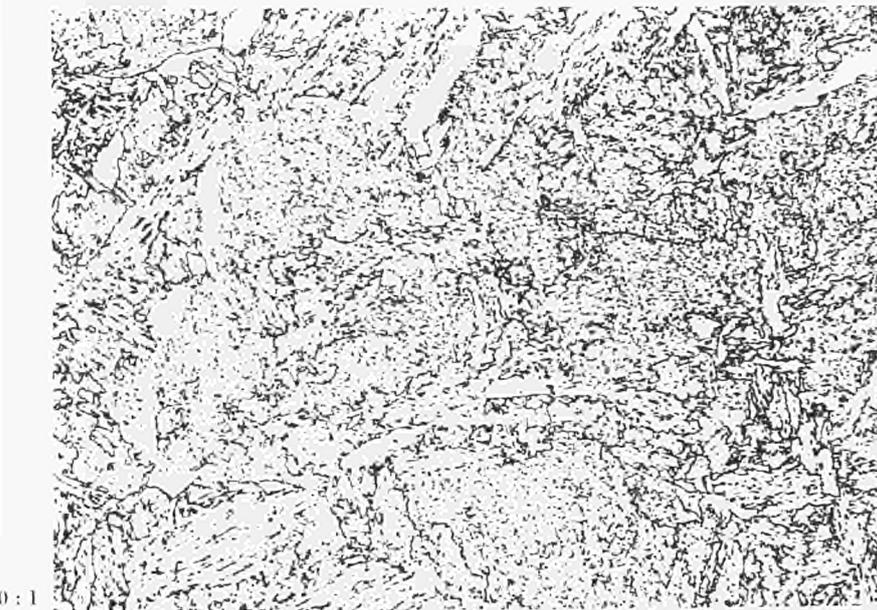
Übergang
(schweißgutseitig)

Abbildung 8



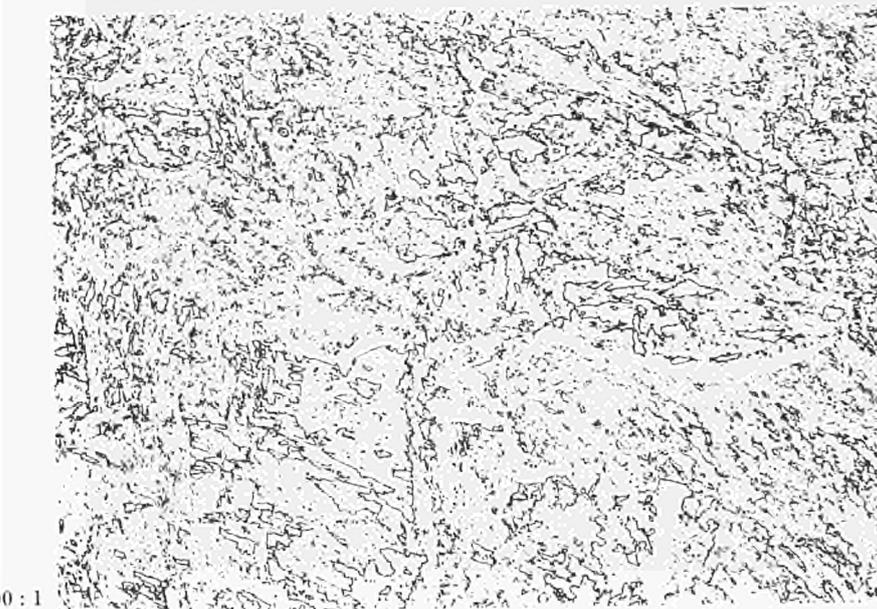
V = 100 : 1

Versuch Nr. 155
(spannungsfreigelegt)
Schweißnahtmitte



V = 200 : 1

Schweißnahtmitte



V = 200 : 1

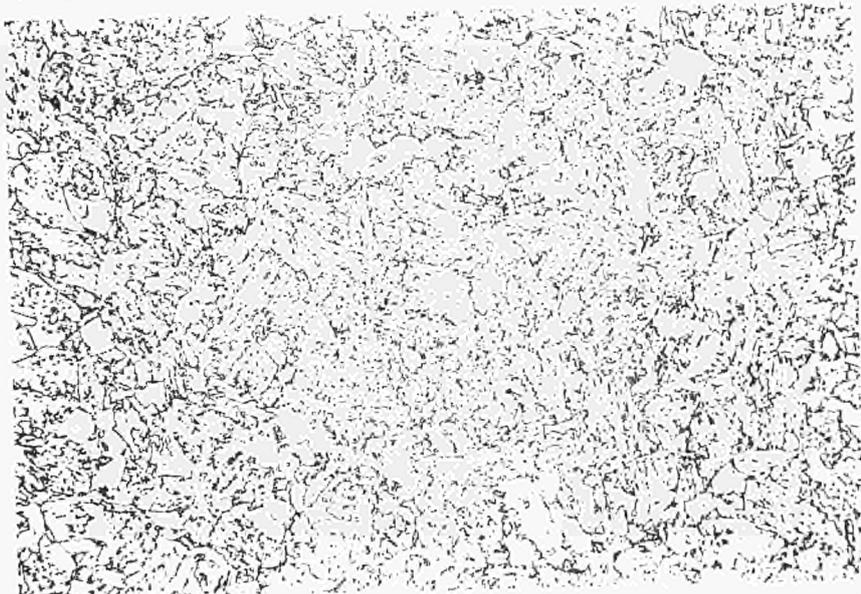
Übergang
(schweißgutseitig)

Abbildung 9



V = 100 : 1

Versuch Nr. 155
(luftvergütet)
Schweißnahtmitte



V = 200 : 1

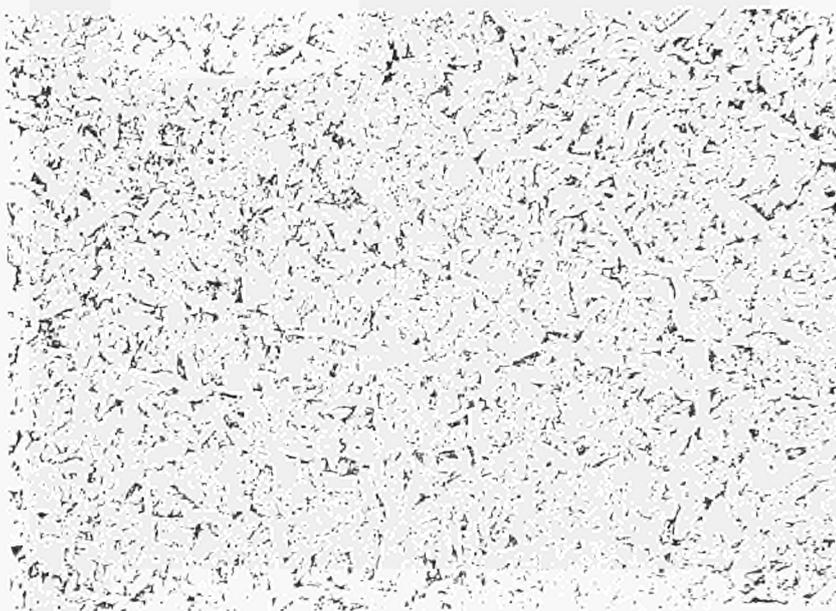
Schweißnahtmitte



V = 100 : 1

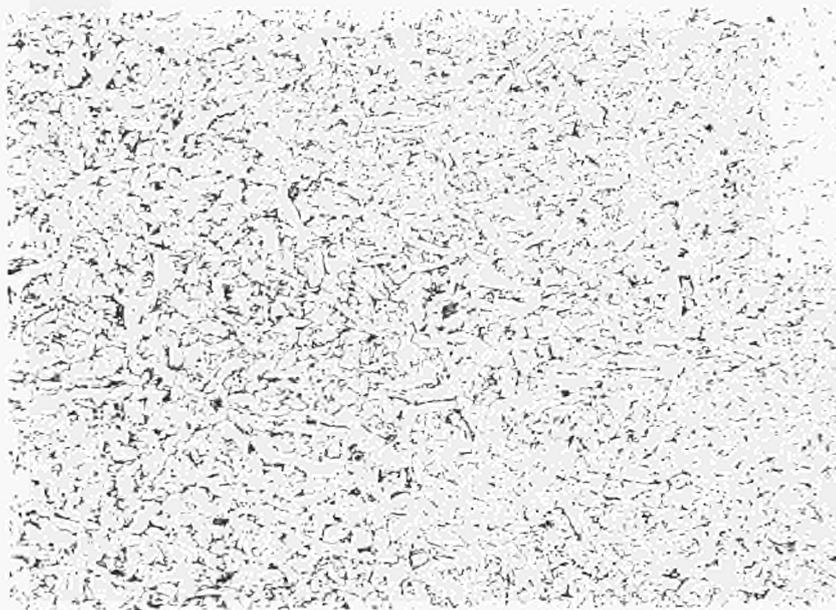
Übergang
(schweißgutseitig)

Abbildung 10



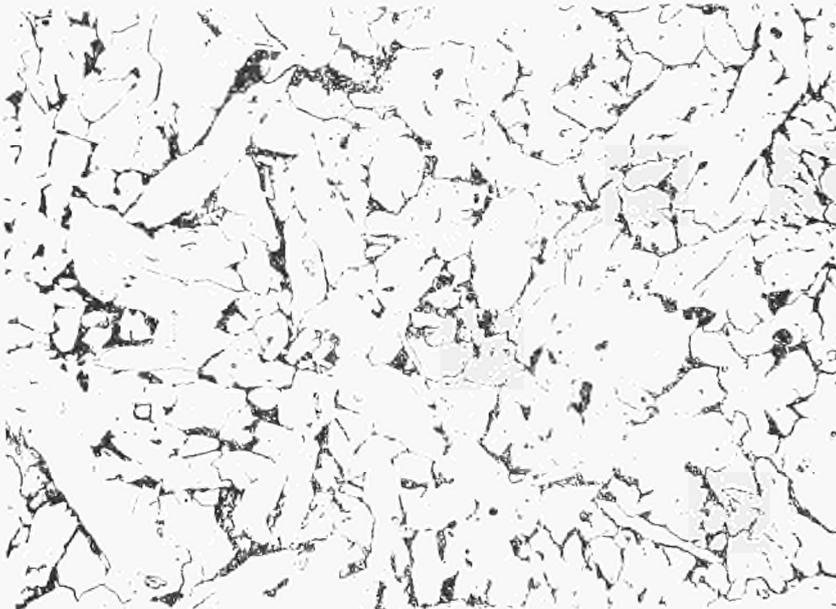
V = 50 : 1

Versuch Nr. 22
Schweißzustand
(unbehandelt)
Schweißnahtmitte



V = 50 : 1

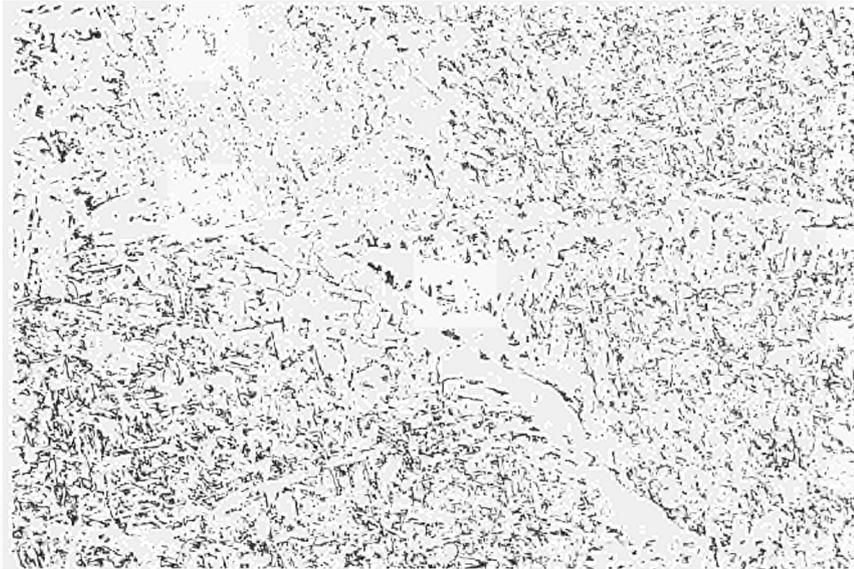
Übergang
schweißgutseitig



V = 200 : 1

Schweißnahtmitte

Abbildung 12



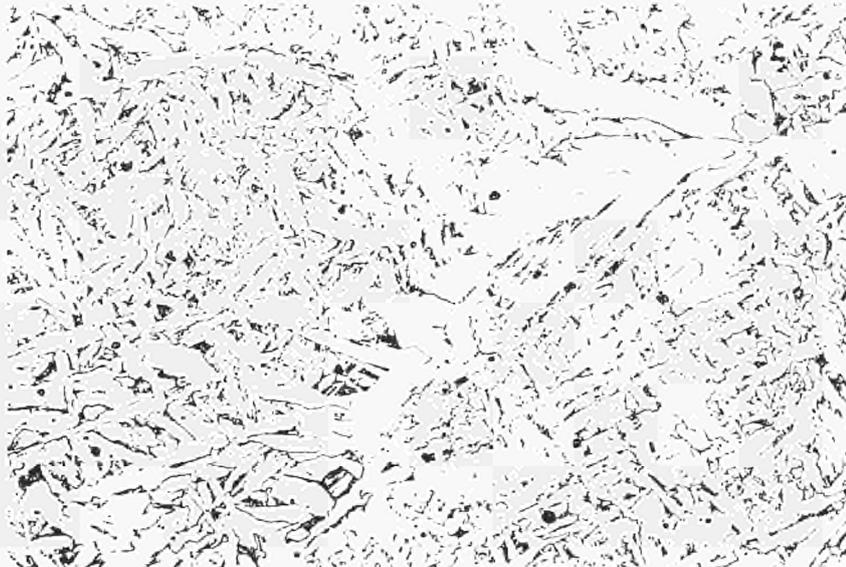
V = 50 : 1

Versuch Nr. 52
Schweißzustand
(unbehandelt)
Schweißnahtmitte



V = 50 : 1

Übergang
schweißgutseitig



V = 200 : 1

Schweißnahtmitte

Abbildung 14

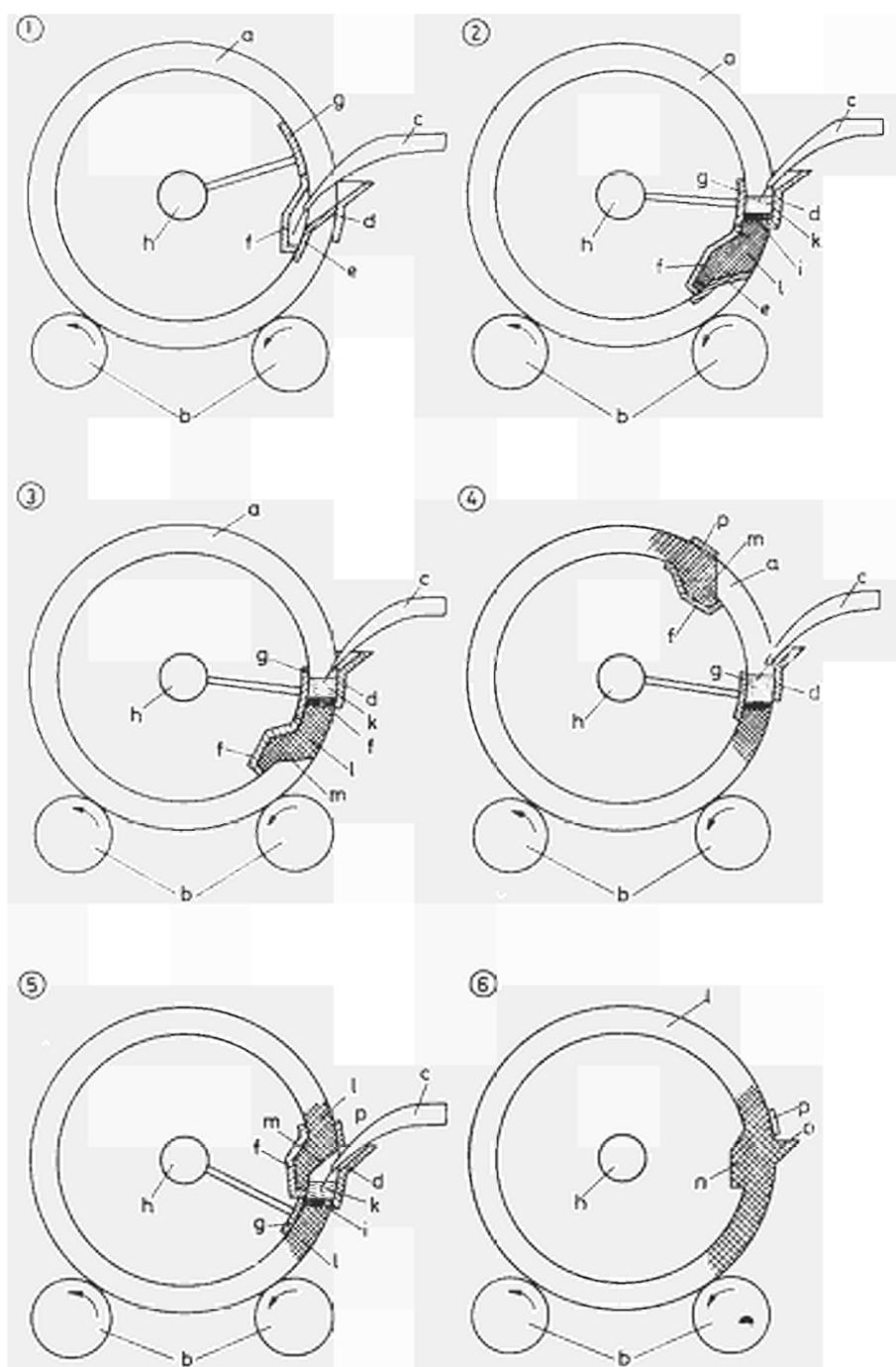


Abbildung 15. — Technologie der SLV Duisburg zum ES-Schweißen von Rundnähten

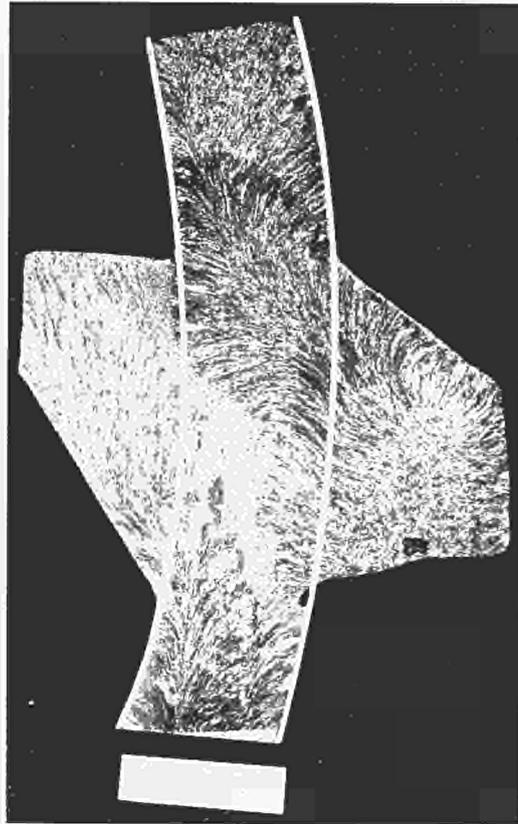
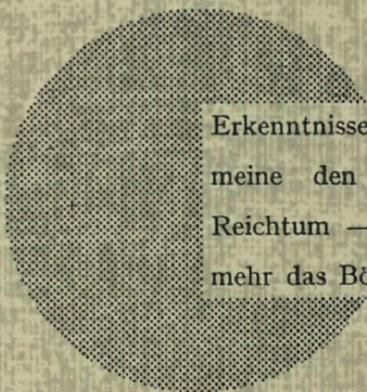


Abbildung 16. — Längsschliff durch An- und Auslaufstück einer Rundnaht



Erkenntnisse verbreiten ist soviel wie Wohlstand verbreiten — ich meine den allgemeinen Wohlstand, nicht den individuellen Reichtum — denn mit dem Wohlstand verschwindet mehr und mehr das Böse, das uns aus dunkler Zeit vererbt ist.

Alfred Nobel

VERTRIEBSSTELLEN

Alle Euratom-Berichte sind bei folgenden Stellen zu den auf der Rückseite des Umschlags angegebenen Preisen erhältlich (bei schriftlicher Bestellung bitte die EUR-Nummer und den Titel, die beide auf dem Umschlag jedes Berichts stehen, deutlich angeben).

PRESSES ACADEMIQUES EUROPEENNES

98, Chaussée de Charleroi, Bruxelles 6

Banque de la Société Générale - Bruxelles
compte N° 964.558,
Banque Belgo - Congolaise - Bruxelles
Compte chèque postal - Bruxelles - N° 167.37,
Belgian American Bank and Trust Company - New York
compte No 22.186,
Lloyds Bank (Europe) Ltd. - 10 Moorgate, London E.C.2,
Postcheckkonto - Köln Nr. 160.861.

OFFICE CENTRAL DE VENTE DES PUBLICATIONS DES COMMUNAUTES EUROPEENNES

2, place de Metz, Luxembourg (Compte chèque postal N° 191-90)

BELGIQUE — BELGIE

MONITEUR BELGE
40-42, rue de Louvain - Bruxelles
BELGISCH STAATSBAD
Leuvenseweg 40-42 - Brussel

DEUTSCHLAND

BUNDESANZEIGER
Postfach - Köln 1

FRANCE

SERVICE DE VENTE EN FRANCE
DES PUBLICATIONS DES
COMMUNAUTES EUROPEENNES
26, rue Desaix - Paris 15^e

GRAND-DUCHE DE LUXEMBOURG

OFFICE CENTRAL DE VENTE
DES PUBLICATIONS DES
COMMUNAUTES EUROPEENNES
9, rue Goethe - Luxembourg

ITALIA

LIBRERIA DELLO STATO
Piazza G. Verdi, 10 - Roma

NEDERLAND

STAATSDRUKKERIJ
Christoffel Plantijnstraat - Den Haag

EURATOM — C.I.D.
51-53, rue Belliard
Bruxelles (Belgique)

CDNA02367DEC