



KfK 3100
Dezember 1981

Hülltemperaturmessung mit Thermoelementen an vorbestrahlten LWR-Brennstab-Prüflingen

W. Leiling
Hauptabteilung Ingenieurtechnik
Projekt Nukleare Sicherheit

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

HAUPTABTEILUNG INGENIEURTECHNIK

PROJEKT NUKLEARE SICHERHEIT

KfK 3100

Hülltemperaturmessung mit Thermoelementen an
vorbestrahlten LWR-Brennstab-Prüflingen

W. Leiling

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH., Karlsruhe

**Als Manuskript vervielfältigt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor**

**Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
ISSN 0303-4003**

Zusammenfassung

Dieser Bericht beschreibt die Temperaturmessung an Brennstabprüflingen bei den In-pile-Versuchen zum Brennstabversagen im Dampf-Kontaminations-Loop des FR2. Es wurden NiCr/Ni-Thermoelemente mit Edelstahl- bzw. Inconelmantel von 1 mm Durchmesser im Bereich der Meßspitze mittels Widerstandspunktschweißung außen auf der Brennstabhülle befestigt. Bei den vorbestrahlten Prüflingen mußte die Schweißung unter Heiße-Zellen-Bedingungen, d.h. fernbedient erfolgen. Um die Bildung von Eutektika zwischen Zirkon und den Elementen des TE-Mantels bei höheren Temperaturen zu vermeiden, wurden die TE im Bereich der Meßspitze mit einer aufgehämmerten Platinhülse von 1,4 mm Außendurchmesser überzogen. Dieses TE-Prinzip hat sich bei den In-pile-Versuchen, die unter Dampfatmosphäre durchgeführt wurden, bewährt. Es gab selbst in der Aufheizphase, in der Hülltemperaturen bis 1050 °C erreicht wurden, nur wenige Ausfälle, nicht zuletzt dank sorgfältiger Kontrollen und intensiver Prüfungen der Thermoelemente.

Cladding Temperature Measurement by Thermocouples at Pre-irradiated LWR Fuel Rod Samples

Abstract:

This report describes the technique to measure cladding temperatures of test fuel rod samples, applied during the in-pile tests on fuel rod failure in the steam loop of the FR2 reactor. NiCr/Ni thermocouples with stainless steel and Inconel sheaths, respectively, of 1 mm diameter were resistance spot weld to the outside of the fuel rod cladding. For the pre-irradiated test specimens, welding had to be done under hot-cell conditions, i.e. under remote handling. In order to prevent the formation of eutectics between zirconium and the chemical elements of the thermocouple sheath at elevated temperatures, the thermocouples were covered with a platinum jacket of 1,4 mm outside diameter swaged onto the sheath in the area of the measuring junction. This thermocouple design has worked satisfactorily in the in-pile experiments performed in a steam atmosphere. Even in the heatup phase, in which cladding temperatures up to 1050 °C were reached, only very few failures occurred. This good performance is to a great part due to a careful control and a thorough inspection of the thermocouples.

<u>Inhaltsverzeichnis</u>	<u>Seite</u>
1. Einleitung	1
2. Anforderungen an das Temperatur-Meßsystem	2
2.1 Betriebsbedingungen	2
2.2 Anforderungen an die Thermoelemente	3
2.3 Anforderungen an die TE-Befestigung	3
3. TE-Konzept	4
4. TE-Befestigungskonzept	6
5. Werkstoffe	8
5.1 TE-Adern	8
5.2 TE-Mantel	9
5.3 Trennschicht-Materialien	12
5.4 TE-Isolation	14
6. Verbindung von Trennschicht und TE	15
7. Gewählte TE-Ausführungsformen	15
8. TE-Herstellung und Prüfungen	16
8.1 Lieferspezifikation, Lebenslaufkarte	16
8.2 Methoden der Dichtheitsprüfung bei langen TE	19
8.3 Schwierigkeiten bei der TE-Herstellung	20
8.4 Kalibrieren der TE	23
8.5 Ergebnisse der Prüfungen	23
9. TE-Verlegung am Prüfling und an der Prüflings- aufhängung	25
10. TE-Verhalten bei den In-pile-Versuchen	26

	<u>Seite</u>
11. Temperatur-Meßfehler	29
11.1 Meßfehler hervorgerufen durch die TE selbst	29
11.2 Meßfehler hervorgerufen durch die Temperatur-Meßkette	29
11.3 Meßfehler hervorgerufen durch die TE-Anbringung	30
12. Technik der TE-Anschweißung	31
12.1 Daten der Schweißmaschine	31
12.2 Erste Schweißversuche	32
12.3 Beschaffung geeigneter Meßgeräte	33
12.4 Geometrie und Werkstoff der Elektroden	37
12.5 Versuche mit oxidierten Zry-Proben	38
12.6 Kopplungs- und Schweiß-Vorrichtung für fernbedientes Arbeiten in der Heißen Zelle	39
12.7 Schweiß-Einstelldaten	41
12.8 Zusammenfassung der Schweißergebnisse	42

Verzeichnis der Abbildungen

	<u>Seite</u>
Abb. 1	Nuklear-Prüfling (vereinfacht) 51
Abb. 2	Versuchsablauf, Schema 52
Abb. 3	Schema der TE-Versionen 53
Abb. 4	Thermoelement am Brennstab-Prüfling A 1.1 54
Abb. 5	Querschliff eines TE-Kabels mit aufgehämmerter Pt-Hülse (Versuch A 1.1) 55
Abb. 6	Querschliff eines TE-Kabels (ohne Platinhülse) 56
Abb. 7	Bestückungsplan für Brennstabprüflinge 57
Abb. 8	Formblatt zur Vermessung 58
Abb. 9	Oxidation von Hüllrohr und TE-Mantel in stagnierendem Heißdampf (1000 °C, 15 min) 59
Abb. 10	Oxidation von Hüllrohr und TE-Mantel in strömendem Heißdampf (1200 °C, 15 min) 60
Abb. 11	Typischer transienter Temperaturverlauf 61
Abb. 12	Temperaturdifferenzen zwischen in die Hüllrohrwand eingebetteten bzw. auf der Hüllrohr-oberfläche angeschweißten TE der Version A und B in Abhängigkeit von der Stabileistung. 62
Abb. 13	Schweißmaschine in Tischausführung 63
Abb. 14	Erste Schweißversuche mit Pt-10Rh/Zry 4 (TE-Version A) 64
Abb. 15	Punktschweißung Ti/Zry 4 nach dem Schweißen in Wasserdampf bei 950 °C und 15 min oxidiert (TE-Version A) 65
Abb. 16	Schema: Elektroden der Kopplungs- und Schweißvorrichtung (KuS) 66
Abb. 17	Schema: KuS in Schweißposition 67
Abb. 18	Schema: KuS beim Verschraubungsvorgang 68
Abb. 19	KuS in der Heißen Zelle beim Schweißen 69

	<u>Seite</u>	
Abb. 20	Schweißkopf der KuS	70
Abb. 21	KuS in der Heißen Zelle (Sicht von der seitlichen Tür)	71
Abb. 22	Situation vor der Heißen Zelle	72
Abb. 23	Schweißstelle TE-Version A, Übersichten	73
Abb. 24	Schweißstelle TE-Version A, eutektische Schmelze, Gefüge	74
Abb. 25	Schweißstelle TE-Version B, Übersichten	75
Abb. 26	Schweißstelle TE-Version B, eutektische Schmelze, Gefüge.	76

Verzeichnis der Tabellen

	<u>Seite</u>
1. TE-Materialien und deren Verträglichkeit mit Zr und H ₂ O-Dampf	10
2. Trennschicht-Werkstoffe zur Schweißverbindung mit Zry	13
3. Lebenslaufkarte für Thermoelemente	17
4. Ergebnisse der Prüfungen an TE mit aufgehämmerten Pt-Hülsen	24
5. Meßprotokoll für TE	27
6. Einflußgrößen auf die Kraft- und Temperaturverteilung beim Widerstandsschweißen	34
7. Änderung der Temperatur am Schweißlinsenrand	35
8. Meßergebnisse bei TE-Schweißungen	43

1. Einleitung

Bei den In-pile-Versuchen zum LWR-Brennstabversagen, die im Rahmen des Projektes Nukleare Sicherheit (PNS) im Kernforschungszentrum Karlsruhe durchgeführt wurden, stellte die Temperatur der Brennstabhülle neben dem Stabinnendruck die wesentliche Meßgröße dar. Während der transienten Versuchsphase waren beide Meßgrößen kontinuierlich zu erfassen, wobei die Hülltemperatur zusätzlich eine Steuerfunktion (Abschalten des Reaktors bei Erreichen einer Grenztemperatur) zu erfüllen hatte. Die Versuche, deren Zielsetzung u.a. in /1/ und /2/ beschrieben ist, wurden im Dampf-Kontaminations-Loop des FR2-Reaktors unter Dampfatmosphäre durchgeführt. Wesentlicher Parameter des Versuchsprogramms war der Abbrand, der in mehreren Stufen bis zu max. 35.000 MWd/t_U variiert wurde. Nach der Vorbestrahlung der Prüflinge mußten diese an die sog. Prüflingsaufhängung montiert und danach instrumentiert werden. Dies geschah in einer Abschirmzelle. Das hierzu nötige technische Verfahren und die erforderlichen fernbedienbaren Einrichtungen mußten entwickelt werden.

Die Montage und Instrumentierung der nicht vorbestrahlten Prüflinge wie auch die der Brennstabsimulatoren war im Ablauf dem der vorbestrahlten Prüflinge ähnlich, nur fand sie nicht in der Abschirmzelle, d.h. unter wesentlich erleichterten Bedingungen statt. Abb. 1 zeigt, vereinfacht dargestellt, einen nuklearen Brennstabprüfling.

In diesem Bericht wird die Instrumentierung der Prüflinge mit Thermoelementen zur Hülltemperaturmessung beschrieben. Dabei wird über den Lösungsweg des Temperatur-Meßproblems und das Anschweißen der Thermoelemente (TE) an die Brennstabhülle, vor allem unter Heiße-Zelle -Bedingungen, berichtet. Da das Anschweißen der TE mit der Montage der Prüflinge gekoppelt ist, wird auch an einigen Stellen des Berichts auf diesen Zusammenhang eingegangen.

2. Anforderungen an das Temperatur-Meßsystem

Das Temperatur-Meßsystem mußte innerhalb des Versuchseinsatzes im Reaktor zur Anwendung kommen. Die von dem Meßsystem geforderte Zuverlässigkeit, Genauigkeit und Handhabbarkeit sowie die geometrischen Verhältnisse im Versuchseinsatz, schlossen eine Reihe von Meßverfahren aus (z.B. Pyrometrie, Rauschthermometrie, akustische Thermometrie).

Wir entschieden uns für die Temperaturmessung mit Thermoelementen.

2.1 Betriebsbedingungen

Die Betriebsbedingungen für die TE ergeben sich aus der Versuchsführung (siehe Schema Abb. 2). Die Brennstab-Prüflinge und damit die TE sind im Dampf-Kreislauf eingesetzt, der im stationären Betrieb mit folgenden Daten betrieben wird:

Massenstrom:	100 - 140 kg/h
Druck:	60 bar
Dampf Temperatur am Eintritt zur Teststrecke:	280 - 340 °C

Im einzelnen müssen die TE-Kabel folgenden Betriebsbedingungen standhalten:

- Stationärbetrieb: 24 h in strömendem, überhitztem Wasserdampf von ≈ 300 °C, Strömungsgeschwindigkeit des Dampfes $\approx 8,5$ m/s.
- Transiente Aufheizung (in der Heizzone des Brennstabes) mit 5 - 30 K/s bis zur Maximaltemperatur (ca. 1100 °C), danach Abkühlung bis ≈ 740 °C und anschließendes Abschrecken auf ca. 300 °C beim Wiedereinschalten des Dampfes.

2.2 Anforderungen an die Thermoelemente

Die TEs müssen folgenden Kriterien genügen:

- Möglichst genaue Messung der Wandtemperatur während des transienten Versuchsablaufs bei Temp. bis max. 1100°C.
- Geringste Ausfallraten bei Versuchen, da diese weder mit dem gleichen Brennstab, noch mit gleichen Parametern wiederholt werden können.
- Verträglichkeit des TE-Materials mit dem Hüllmaterial Zry-4 (Vermeidung von Eutektika) bei den erhöhten Versuchstemperaturen.
- Beständigkeit des TE-Materials in Wasserdampf (Vermeidung starker Oxidation bzw. Versprödung bei den Versuchstemperaturen).
- Der größte Durchmesser des TE-Kabels darf 1 mm nicht überschreiten.
- Herstellungslängen von > 6 m müssen möglich sein (bedingt durch die Länge des Reaktoreinsatzes).
- Gute mechanische Stabilität bei der Montage zur Gewährleistung der Funktion nach der Montage bzw. beim Versuch.
- Die Befestigung der TE am Hüllrohr muß möglich sein.
- Das TE-Material muß für die (kurzzeitige) Anwendung im Neutronenfluß des Reaktors ($\phi_{\text{thermisch}} \approx 5 \times 10^{13} \text{ 1/cm}^2 \text{ s}$) geeignet sein.

2.3 Anforderungen an die TE-Befestigung

Die Anforderungen in Bezug auf die Befestigung der TE mit der Brennstabhülle lassen sich wie folgt darstellen:

- Das mechanische Verhalten der Brennstabhülle (Deformation während der Aufheizung) soll möglichst wenig beeinträchtigt werden.

- Das Anbringen an vorbestrahlte Stabhüllen (leicht oxidiert) muß möglich sein.
- Die infragekommende Befestigungsart muß in einer Abschirmzelle (Heiße Zelle) fernbedient durchführbar sein.

Für Anschweißverfahren gilt insbesondere:

- Es darf keine Schwächung der Brennstabhülle durch einen Einbrand auftreten.
- Der Durchhang und die wärmebeeinflusste Zone an der Schweißstelle sollen möglichst klein sein.
- Das TE selbst darf beim Anschweißen keine Schädigung erleiden.
- Die thermoelektrischen Eigenschaften des TE müssen unverändert erhalten bleiben.
- Die Schweißverbindung muß evtl. auftretende Kräfte bei Montage und Versuch aufnehmen und darüberhinaus eine gute Wärmebrücke vom Zry-Hüllrohr zum TE-Mantel darstellen.

3. TE-Konzept

Aus Gründen einer exakten Temperaturmessung wäre wünschenswert, TE-Adern in die Hüllrohrwand einzubetten. Dies hätte jedoch u.a. zur Folge, daß das Hüllrohr an diesen Stellen geschwächt und damit in seinem Beulverhalten verändert würde.

Auch gegen die Befestigung von TE-Adern auf der Hüllenoberfläche sprechen triftige Gründe

- die mechanische Empfindlichkeit der Adern
- die Handhabung in Abschirmzellen ist außerordentlich schwierig
- durch unterschiedliche Massepotentiale der nahegelegenen Bauteile können die Meßwerte verfälscht werden.

Auf die Verlegung von TE-Adern wurde aus den genannten Gründen verzichtet und gemantelte Thermoelemente mit isolierter Meßstelle gewählt. Eine isolierte Meßspitze wurde bevorzugt, da

- die Ansprechzeit der 1 mm-TE ausreichend ist,
- die Störsignale von der Reaktorseite her besser beherrscht werden,
- die Prüfung der TE über den Isolationswiderstand (siehe Kap. 8.2) möglich ist.

4. TE-Befestigungs-Konzept

Da die Wandtemperatur der Brennstabhülle gemessen werden sollte, war ein guter Wärmeübergang von der Wand zur TE-Meßstelle anzustreben. Hierzu wurde eine Anzahl von Konzepten zur mechanischen Befestigung von TE entwickelt, die jedoch alle eine oder mehrere der folgenden Anforderungen nicht erfüllten:

- Montierbarkeit mit Manipulatoren in Abschirmzellen (= Heiße Zellen (HZ))
- Reproduzierbarkeit des Wärmekontaktes Hülle / TE
- Geringstmögliche Störung des Beulverhaltens der Stabhülle
- Funktionssicherheit bei instationären Temperaturen
- Geringer Platzbedarf.

Die mechanischen Befestigungsverfahren wurden ausnahmslos verworfen,

In Betracht kamen letztlich nur noch Schweißverfahren, nämlich:

- Elektronenstrahl-Schweißen,
- Plasma-Schweißverfahren
- WIG-Punktschweißen
- Spezielle Lichtbogenschweißverfahren
- Laser-Schweißung
- Reibschweißen
- Kondensator-Entladungsschweißung
- Elektrische Widerstandsschweißung.

Davon wurde ohne experimentelle Untersuchungen die Elektronenstrahlschweißung ausgeschieden, weil die Erzeugung des erforderlichen Hochvakuums und die Handhabung der Schweißeinrichtung in der Abschirmzelle nur mit sehr großem Aufwand realisierbar gewesen wäre.

Beim Plasma-, WIG- und Lichtbogenschweißen ergaben sich nicht reproduzierbare Schweißergebnisse und in aller Regel zu tiefe Einbrände in der Hüllrohrwand, die wegen der Beeinflussung der Festigkeitseigenschaften und damit des Beulverhaltens des Hüllrohrs nicht tragbar waren. Für das WIG-Verfahren stellt die notwendige Inertgas-Atmosphäre unter HZ-Bedingungen eine weitere Erschwernis dar.

Laser-Schweißungen ergaben zwar nur eine geringe Ausbildung der wärmebeeinflussten Zone, sie konnten jedoch nur unter mikroskopischer Beobachtung präzise ausgeführt werden. In einer HZ ist die Anwendung dieses Schweißverfahrens nicht oder nur mit sehr großem Aufwand möglich.

Die Durchführbarkeit der Reibschweißung hängt von den zu verschweißenden Werkstoffen insofern ab, als deren Härten nicht sehr unterschiedlich sein dürfen. Mit dem Hüllrohrwerkstoff Zry 4 ließ sich Titan gut, Platin dagegen nicht verbinden.

Die Ergebnisse von Probeschweißungen nach dem Kondensatorentladungsverfahren waren - mit der bei uns vorhandenen Anlage - nicht zufriedenstellend. Prinzipiell erschien das Verfahren jedoch zur Lösung des anstehenden Schweißproblems geeignet. Bezüglich der Kondensatorentladungs-Schweißung läßt sich folgendes feststellen:

- Spannungsschwankungen des Stromnetzes haben keinen bzw. geringen Einfluß auf die Qualität der Schweißungen.
- Die extrem kurzen Schweißzeiten haben eine geringe Beeinflussung des Gefüges zur Folge.

Bei der Widerstands-Punktschweißung ergaben sich folgende Fakten:

- Die Ergebnisse der ersten Schweißversuche zeigten, daß das Schweißverfahren erfolgversprechend war.

- Durch Lichtbogenbildung beim Schweißen besteht die Gefahr eines Einbrandes am Hüllrohr. Die Wahrscheinlichkeit hierfür steigt mit der maximal auftretenden Stromstärke. Diese ist bei der Widerstands-Punktschweißung geringer als bei der Kondensatorentladungsschweißung.
- Die vorhandene funktionsfähige Punktschweißmaschine erlaubte die sofortige Inangriffnahme eines Versuchsprogramms.

Vorstehende Gesichtspunkte führten zu der Entscheidung, mittels Widerstands-Punktschweißung die TE an der Brennstabhülle zu befestigen.

Die Technik der TE-Anschweißung ist in Kapitel 12 ausführlich dargestellt.

5. Werkstoffe

Die TE-Materialien werden üblicherweise in folgende Gruppen unterteilt:

- TE-Adern
- TE-Mantel
- TE-Isolation

In unserem Falle ist eine Ergänzung um die später noch zu erläuternde "Trennschicht" erforderlich.

5.1 TE-Adern

Für die anstehende Meßaufgabe (Temperaturbereich ca. 0 °C bis 1100 °C) eignen sich NiCr/Ni-Adern, deren Verwendung auch die kostengünstigste Lösung darstellt.

5.2 TE-Mantel

An den Mantelwerkstoff mußten folgende Forderungen gestellt werden:

- Gute Verschweißbarkeit mit dem Hüllrohr (Zry-4)
- Eutektikumbildung erst bei Temperaturen $> 1100^{\circ}\text{C}$
- Ausreichende Dampfbeständigkeit
- Eignung zur Verarbeitung als TE-Mantel
- Kostengünstige Herstellung

Naheliegender waren zunächst Bemühungen um TE mit einem Zry-Mantel. Solche Mäntel waren jedoch zum Zeitpunkt der Recherchen bei einem Durchmesser von ≤ 2 mm nicht dicht herstellbar und außerdem sehr spröde.

Daraufhin wurden die in Tabelle 1 aufgeführten TE-Materialien einer Literatur-Recherche bezüglich ihrer Verträglichkeit mit Zirkon bzw. Wasserdampf unterzogen /3/, /4/, /5/.

Für die Wahl des TE-Mantelwerkstoffs ergab sich daraus, daß die mit Zr gut verträglichen Metalle wie Tantal, Molybdän, Wolfram, Titan (Eutektikumbildung erst oberhalb von 1500°C bzw. 1600°C gute Verschweißbarkeit mit Zr) alle nicht gut in H_2O -Dampf beständig sind. Diese Metalle verspröden stark bei Temperaturen um 1000°C schon bei kurzen Haltezeiten. Bei Metallen mit guter oder ausreichender H_2O -Dampfbeständigkeit (Inconel, Stahl 1.4541/71) bildet sich in Verbindung mit Zr ein Eutektikum, das vermieden werden muß.

Platin und Pt-Legierungen erfüllen sehr gut die vorstehenden Forderungen mit Ausnahme der Kosten. Bei Vorversuchen wurden Mantel-TE eingesetzt mit 1 mm ϕ und Pt 6% Rh als Mantelwerkstoff.

Tabelle 1

TE-Materialien und deren Verträglichkeit mit Zr und H₂O-Dampf

<u>I. TE-Mantel</u>	Reaktionen mit Zr bis T = 1200 °C (unoxidiert)	Verträglichkeit mit H ₂ O-Dampf
Pt 10 % Rh	Pt-Zr: 64 w/o Zr bei 1185 °C Eutektikum	} sehr gut
Pt	Rh-Zr: keine	
Ta	Ta-Zr: keine	} schlecht
Mo	Mo-Zr: keine (Eutektikum b. 1520 °C)	
Mo 50 % Re	Re-Zr: keine (Eutektikum b. 1600 °C)	
W	W-Zr: keine (Eutektikum b. 1650 °C)	
Ti	Ti-Zr: keine (Eutektikum b. 1580 °C)	
Inconel 600	Fe-Zr: 4,2 % w/o Fe bei 947 °C Eutektikum Ni-Zr: bei 960 °C Eutektikum	gut
<u>II. TE-Adern</u>		
Pt 10 % Rh-Pt	} Pt-Zr: 64 w/o Zr bei 1185 °C Eutektikum	} sehr gut
Pt 13 % Rh-Pt		
Pt 30 % Rh-Pt	} Rh-Zr: keine	
Ir 60 Rh-Ir	Ir-Zr: keine	sehr gut
NiCr-Ni	Fe-Zr: 4,2 w/o Fe bei 947 °C Eutektikum Ni-Zr: bei 960 °C Eutektikum	gut
<u>III. TE-Isolation</u>		
MgO	} wegen der Stabilität der Oxide keine Reaktion	} unter Einfluß von H ₂ O-Dampf geht die Isolationswirkung verloren.
BeO		
Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ -Zr: starke Reaktion	
ThO ₂	Th-Zr: keine	

Um die Kosten für diese TE in Grenzen zu halten, mußte der Pt 6% Rh-Mantel in der Länge auf den Brennstabprüfling beschränkt werden. Oberhalb des Prüflings wurde mittels einer Muffe der Hochtemperaturteil übergeleitet in eine Ausgleichsleitung. Diese bestand aus einem Inconel-Mantel. Trotzdem kostete ein TE dieser Ausführung ca. DM 1.700,-. Bei der benötigten Gesamtstückzahl von über 400 TE war dies ein nicht tragbarer Preis.

Da also kein Werkstoff alle an ihn gestellte Forderungen erfüllte, mußte eine Funktionstrennung durchgeführt werden. Ein dampfbeständiger Mantelwerkstoff (Stahl 1.4541 bzw. Inconel 600) wurde im Bereich der TE-Spitze - und damit der Anschweißstelle am Zry-Hüllrohr - mit einer Trennschicht ausgestattet. Die Trennschicht ihrerseits mußte sowohl mit Zry als auch mit H₂O-Dampf verträglich sein, die gute Schweißbarkeit mit Zry war die weitere wesentliche Forderung.

5.3 Trennschicht-Materialien

Die Frage nach dem Werkstoff der Trennschicht (an der Schweißstelle TE/Zry-Hüllrohr) wurde zunächst anhand der Zweistoffsysteme des Zirkons untersucht /3/, /4/, /5/. Als "gut schweißbar" wurden Metalle betrachtet, die mit Zirkon durchgehende Mischkristallreihen bilden. Sie versprechen eine gute Haftbarkeit und Duktilität im Bereich der Durchmischung beider Komponenten. Mit Vorsicht sind Metallkombinationen zu betrachten, bei denen intermetallische Phasen auftreten, da diese oft sehr spröde sind. Außerdem treten die schon erwähnten starken Schmelzpunktniedrigungen auf durch eutektische Reaktionen der möglichen Trennschichtwerkstoffe mit dem Zry der Hülle einerseits und dem Mantel des TE andererseits. Besonders tief liegende Eutektika in diesen Systemen sind: Ti-Fe 1085 °C, Zr-Fe 947 °C, Ti-Co 1125 °C, Zr-Co 981 °C, Ti-Ni 942 °C, Zr-Ni 960 °C, Zr-Ru 1240 °C, Zr-Pd 1030 °C, Zr-Pt 1185 °C, Zr-Ti 1580 °C.

Bei Systemen aus drei oder noch mehr Elementen sinken die Temperaturen der Eutektika in der Regel zu noch tieferen Temperaturen ab. Vorstehende Betrachtungen gelten für Schmelzschweißungen, für Verfahren also, bei denen die zu verschweißenden Metalle in der Schmelzzone intensiv erhitzt und durchmischt werden. Bereits günstigere Bedingungen sind beispielsweise beim Punktschweißen gegeben. Die Aufheizdauer ist extrem kurz, es schmilzt nur sehr wenig Metall auf.

Auf die Probleme und Randbedingungen bei speziellen Schweißverfahren, wie Reibschweißen, Diffusionsschweißen, Explosions-Schweißen, Widerstands-Schweißen, Elektronenstrahlschweißen soll hier nicht eingegangen werden, u.a. wird darüber in /6/ bis /9/ berichtet.

Die näher betrachteten bzw. untersuchten Trennschicht-Werkstoffe und deren wichtigste Eigenschaften sind in Tabelle 2 aufgeführt. Tantal, Molybdän und Wolfram wurden aufgrund der bereits als unzureichend bekannten H₂O-Dampfbeständigkeit nicht nochmals untersucht.

Tabelle 2: Trennschicht - Werkstoffe zur Schweißverbindung mit Zry

Werkstoff	Schweißbar m. Zry 4 (a)	H ₂ O-Dampfver- träglichkeit (b)	Eutektikum m. Zr °C	Schmelz- punkt °C	$\sigma_{\text{abs.}}$ barn (d)	Verarbeit- barkeit	Bemerkungen
Pt	gut	gut	1185	1769	9	gut	in Draht- u. Hülsenform erhältlich, hohe Duktilität
Ti	sehr gut	schlecht	1580	1668	6,1	gut	nicht in Hülsenform erhältlich
Nb	gut	ausreichend	kein	2468	1,15	schlecht	nur als Draht erhältlich
Pd	ausreichend	gut	1030	1550	8	gut	nur als Draht erhältlich
Rh	(c)	sehr gut	kein	1960	150	schlecht	nur als Draht erhältlich korrosionsfester als Pt
Re	(c)	gut	1600	3180	86	sehr schlecht	nur als Draht erhältlich ungenügende Duktilität
Ir	(c)	gut	kein	2443	440	sehr schlecht	nur als Draht erhältlich ungenügende Duktilität
Pt10Rh	gut	gut	(e)	(e)	(e)	mäßig	in Hülsenform nur mit langer Lieferzeit und hohem Preis
Pt1Ir	gut	gut	(e)	(e)	(e)	mäßig	in Hülsenform nur mit langer Lieferzeit und hohem Preis

(a) mittels Widerstands-Punkt-Schweißung

(b) bezogen auf Versuchsbedingungen

(c) keine Schweißversuche durchgeführt, da Probenherstellung zu aufwendig

(d) Adsorptionsquerschnitt für thermische Neutronen

(e) siehe die einzelnen Elemente

Nimmt man als Auswahlparameter außer der Verträglichkeit die Verfügbarkeit und die Bearbeitbarkeit der Trennschicht-Werkstoffe auf, so zeigt sich, daß noch Ti und Pt in engerer Auswahl stehen.

Titan läßt sich sehr gut mit Zr punktschweißen, da sich durchgehende Mischkristallreihen bilden /3/. Die Eutektikumtemperatur von Ti-Zr liegt hoch (1580 °C), jedoch niedrig bei Ti-Ni (942°C) und Ti-Fe (1085 °C). Die Dampfverträglichkeit von Titan ist im Vergleich zu Pt schlecht. Vorstehende Eigenschaften führten dazu, daß Ti als Alternativ-Werkstoff zu Pt und dessen Legierungen angesehen wurde.

Rein-Pt und die Legierungen Pt10Rh und Pt1Ir waren die am geeignetsten erscheinenden Werkstoffe, wobei Rein-Pt aufgrund seiner hohen Duktilität seiner Verarbeitbarkeit und Verfügbarkeit als Trennschicht-Werkstoff gewählt wurde.

5.4 TE-Isolation

Von den denkbaren Isolationsmaterialien sind Aluminiumoxid und Magnesiumoxid näher betrachtet worden. Beide sind bezüglich der Isolationseigenschaften für den vorliegenden Temperaturbereich geeignet.

Aluminiumoxid ist hygroskopisch, erfährt jedoch bei der Aufnahme von Feuchtigkeit keine Volumenvergrößerung. Nachteilig ist die außerordentliche Härte des Kornes. Es ist deshalb schwierig eine gute Fülldichte zu erreichen, ohne daß die dünnen TE-Adern beschädigt werden.

Magnesiumoxid ist hygroskopisch und zeigt eine Volumenvergrößerung bei Feuchtigkeitsaufnahme. Aufgrund der guten Verarbeitbarkeit und der erreichbaren Reinheit ist Magnesiumoxid das heute überwiegend bei Mantelthermoelementen verwendete Isolationsmaterial, für das auch wir uns entschieden.

6. Verbindung von Trennschicht und TE

Von den möglichen Verfahren zum An- bzw. Aufbringen einer Trennschicht auf einen TE-Mantel wurde das maschinelle Aufhämmern einer Hülse mit einer Rundhämmermaschine als günstig angesehen. Bei diesem Verfahren ist eine temperaturbedingte Beeinflussung des Thermopaars und des TE-Mantels nicht gegeben. Erste Versuche zeigten die Realisierbarkeit des Aufhämmerns von Pt-Hülsen. Die daraufhin bei den einschlägigen TE-Herstellern durchgeführten Anfragen ergaben, daß drei Firmen bereit waren, TE mit aufgehämmerten Pt-Hülsen anzubieten.

7. Gewählte TE-Ausführungsformen

Die zunächst gewählte Ausführung, Version A, ist schematisch in Abb. 3 dargestellt, während Abb. 4 ein TE am Brennstabprüfling A 1.1 (nach dem Bersten des Stabes) zeigt.

Das besondere Merkmal dieser Ausführung ist in dem ca. 4 mm langen Pt-Lappen zu sehen, welcher mittels eines Preßwerkzeuges - ausgehend von der Hülsengeometrie - erzeugt wird. Der Pt-Lappen wird durch Punktschweißung mit dem Zry-Hüllrohr verbunden, ohne dabei das Thermoelement thermisch zu belasten. Diesem Vorteil steht als Nachteil die relativ große Wärmeleitstrecke von der Anschweißstelle zur TE-Meßstelle gegenüber. Des weiteren ist die erwünschte Linienberührung zwischen Pt-Hülse und Hüllrohr nicht immer zu verwirklichen. Beide Effekte zusammen (große Wärmeleitstrecke und vom Hüllrohr abstehende Pt-Hülse) führten zu einem großen Korrekturfaktor (siehe Kap. 11).

Um den Absolutwert der Korrektur und das Streuband zu reduzieren, wurde bei Version B (in Abb. 3) die bündig mit der TE-Spitze abschließende Pt-Hülse auf einer Länge von ca. 4 mm mit dem Zry-Hüllrohr verschweißt. Der im Versuch ermittelte Meßfehler (siehe Kap. 11) war kleiner als bei der TE-Version A. Durch Kalibrierung der TE vor und nach dem Anschweißen derselben wurde nachgewiesen, daß eine meßbare Beeinflussung der EMK durch das Schweißen auch bei TE-Version B nicht gegeben ist. Die Prüflingseinsätze ab einschließlich G 1.5 wurden in dieser TE-Ausführung bestückt.

8. TE-Herstellung und Prüfungen

Ausgehend von einer hohen Ausfallquote der TE bei einigen Vorversuchen wurden mit verschiedenen Herstellern Gespräche über die möglichen Ursachen, deren Vermeidung und die sinnvoll erscheinenden Prüfungen geführt. Die Ergebnisse der Diskussionen fanden ihren Niederschlag in der Lieferspezifikation bzw. den Lebenslaufkarten zur TE-Lieferung.

8.1 Lieferspezifikation, Lebenslaufkarte

In der Lieferspezifikation sind neben den Betriebsbedingungen und der Ausführung der TE vor allem die durchzuführenden Prüfungen aufgelistet. Das Ergebnis der Prüfungen wird in der Lebenslaufkarte (Tabelle 3) jedem TE einzeln zugeordnet.

Es werden folgende Prüfungen durchgeführt:

- Vor der Konfektionierung der TE wird am TE-Kabel die Mantelwandstärke (15 % vom Kabeldurchmesser) sowie die Tiefe von Ziehriefen, Poren oder Haarrissen überprüft. Letztere dürfen 10 % der Wandstärke nicht überschreiten. Geometrie und Maße der TE-Adern sind ebenfalls zu überprüfen.
- Es sind je Meßstelle 2 Röntgenaufnahmen (um 90° versetzt) anzufertigen. Anhand dieser ist zu prüfen:
 - . die Lage der Schweißperle (Abstand von der Schweißkappe ca. 1 mm)
 - . die Wandstärke der Verschweißung an der TE-Spitze
- Dichtheitsprüfung jedes TEs an der Meßstelle (wie vom Hersteller vorgesehen).
- Bei allen TE ist der EMK-Verlauf unter transienten Bedingungen (ca. 10 K/s) bis zu einer Temperatur von ca. 700°C mit einem Linienschreiber aufzunehmen.

Tabelle 3: Lebenslaufkarte für TE

Gegenstand:	Mantel-Thermoelement	Element-Nr.: 782
Elementart:	NiCr-Ni Mantelwerkstoff: Inconel	Auftrags-Nr.:
Isolation:	MgO - isoliert verschweißt	001/C6/442 417
Abmessungen:	Länge in mm 6500 \varnothing 1,0 mm	Komm.-Nr.:
Meßspitze:	mit aufgehämmerter Pt-Hülse	09/1681 (120)

1. Röntgenprüfung: o.B.
2. Dichtheitsprüfung - Meßspitze: o.B.
3. Messung des EMK-Verlaufes: o.B.
4. Kalibrierung: 200°C u. 1000°C Prüfelement Nr. 556/77
400°C u. 700°C Prüfelement Nr. A 2706 240-9 9502/1

Temperatur der Meßstelle °C	Thermokraft des stromlosen Elementes mV	Isolations- widerstand M Ω
200	8,122	> 2000
400	16,334	> 2000
700	29,071	21
1000	41,181	0,3


Temperatur der Vergleichsstelle 0°C Meßfehler \leq 0,3%

5. Aufhämmern der Pt-Hülse o.B.
6. Messung des Isolationswiderstandes bei 100 Volt Gleichspannung o.B.
7. Messung des Schleifenwiderstandes: 31,08 Ω /m (202)
8. Druckprüfung bei 100 bar o.B.

Bemerkungen zu Punkt 1-8: Gemäß Spezifikation TLA-Nr. 86/76

Eichung nach
Grundwertreihe
Ein 45710, Ausgabe
September 1977

Kather



Datum: 17.5.1979/Te **Prüfer:** Herr Kather

- Mit jedem TE sind Vergleichsmessungen gegen ein PtRh-Standard-TE (von PTB ^[a] kalibriert) bei 200 °C, 400 °C, 700 °C und 1000 °C durchzuführen.

Zulässige Meßfehler bei diesen vier Temperaturen $\leq 0,3 \%$ (Fehler der Meßanordnung plus Fehler aus der Kalibrierung des Standard-TE). Bei den vorgenannten Temperaturen ist auch der Isolationswiderstand zu messen und zu protokollieren.

Die Kalibrierung muß von "hohen" zu "niederen" Temperaturen durchgeführt werden.

- Der Schleifen- und Isolationswiderstand (letzterer bei 100 V Prüfspannung $\geq 2000 \text{ M}\Omega$) muß nachgewiesen werden.
- Jedes TE wird einer Dichtheitsprüfung in H_2O bei 100 bar über mindestens 12 h unterzogen. Es darf kein Abfall des Isolationswiderstandes meßbar sein ($\text{ISO} \geq 2000 \text{ M}\Omega$).
- Für jede TE-Kabel- bzw. Pt-Hülsen-Charge ist die Haftfähigkeit der aufgehämmerten Pt-Hülse auf dem TE-Kabel durch Zugversuche an Proben nachzuweisen. Dabei muß die Pt-Hülse in sich zerreißen, ohne daß sich zuvor deren Lage relativ zum Kabel ändert.
- Mit jeder Pt-Hülsen-Charge werden vom Besteller Neutronenaktivierungsanalysen durchgeführt, um den Anteil der Verunreinigungen festzustellen.
- Mit Hilfe von Proben ist die Güte der erzielbaren Schweiß-Verbindung zwischen Pt-Hülse und Zry-Hüllrohr unter Berücksichtigung der möglichen Einflußparameter wie Verunreinigungen im Platin, Wärmebehandlung der Pt-Hülsen, Aufhämmervorgang etc. zu ermitteln.

[a] Physikalisch-technische Bundesanstalt, Braunschweig

Des Weiteren sind dem Besteller folgende Begleitpapiere auszuhandigen:

- Es ist zu bescheinigen, daß die Adern der zu liefernden TE aus derselben Charge stammen und daß dieselben der Grundwertreihe der Thermospannungen nach DIN 43710 genügen.
- Ein Werkszeugnis nach DIN 50049/2 ist bezüglich der chemischen Zusammensetzung der verwendeten Materialien beizustellen.

Die TE werden - um das Eindringen von Luftfeuchtigkeit während der Lagerzeit zu vermeiden - am freien Ende mit Araldit verschlossen. Diese Verschlusstechnik hat sich sehr bewährt.

8.2 Methoden der Dichtheitsprüfung bei langen TE

Da die TE, wie in Kap. 2.1 beschrieben, im Stationärbetrieb überhitztem Wasserdampf von ca. 300 °C und ca. 60 bar ausgesetzt sind, ist die Dichtheit des TE-Mantels unabdingbare Voraussetzung für die Gewährleistung der Funktion. In unserem Falle wurden drei Prüf-Methoden einer näheren Betrachtung unterzogen.

- 1) Die TE wurden in einem Druckbehälter längere Zeit hohem He-Druck ausgesetzt, danach mit Aceton die Mantel-Oberfläche gesäubert und die TE in einen Rezipienten eingebracht. Beim Abpumpen des Rezipienten mit dem He-Massenspektrometer strömt Helium über ein evtl. Leck aus dem TE aus und erbringt eine Anzeige.

Zunächst mußte bei dieser Prüfmethode der Einfluß des "Oberflächen-Effektes" - d.h. der Einfluß der trotz des Abwischens am TE-Mantel haftenden He-Atome auf die Anzeige - geklärt werden. Dazu wurden TE-Proben mit Original-Abmessungen 2 h mit 100 bar He beaufschlagt, gesäubert und beim Abpumpen die He-Anzeige über ca. 90 min aufgezeichnet. Die Ergebnisse lassen den Schluß zu, daß der Einfluß des "Oberflächen-Effektes" eine Leckrate von $< 1 \times 10^{-8}$ bar . cm³/sec vortäuscht. Damit scheint die Methode als solche durchaus anwendbar.

Die tatsächliche Nachweisgrenze der Methode ist jedoch wegen des Aufwands (Herstellung von TE-Lecks $L \leq 1 \times 10^{-4}$ bar cm^3/sec) nicht ermittelt worden.

- 2) Eine weitere Prüfmethode besteht darin, am offenen TE-Ende ein He-Massenspektrometer anzuschließen und das TE in einem Behälter hohem He-Druck auszusetzen.

Aufgrund bereits vorhandener Erfahrung konnte diese Methode wegen des immensen Zeitaufwandes als unpraktikabel ausgeschieden werden.

- 3) Letztlich bleibt noch die Möglichkeit, die TE in Dampf-atmosphäre oder in Flüssigkeit unter hohem Druck in der Weise zu prüfen, daß die evtl. Veränderung des Isolationswiderstandes über eine vorgegebene Zeit als Maß für die Dichtheit angenommen wird.

Da schon sehr geringe Feuchtigkeitsmengen (Luftfeuchtigkeit) ausreichen, um den Isolationswiderstand stark zu reduzieren, ist die Methode als solche sehr empfindlich.

Unsere TE wurden - um den Prüfaufwand in Grenzen zu halten - mittels eines Druckbehälters einem Wasserdruck von 100 bar über 12 h ausgesetzt (Methode 3).

Die Ergebnisse dieser Prüfungen und die geringe Ausfallrate bei den Versuchen bestätigen, daß die Prüfmethode die an sie gestellten Forderungen voll erfüllt hat.

8.3 Schwierigkeiten bei der TE-Herstellung

Bei der metallografischen Untersuchung der ersten gelieferten TE-Kabel waren erhebliche Schwankungen in der Mantelwandstärke festzustellen. Auch Form und Abmessung der Adern entsprachen nicht den Erwartungen (siehe Abb. 5).

In Zusammenarbeit mit dem Kabel-Hersteller wurde die Qualität der TE-Kabel soweit verbessert, bis sie den gestellten Forderungen entsprach (Abb. 6). Des weiteren wurde vom TE-Lieferanten eine Kabelsortierung vorgenommen und nur Kabel entsprechend der 1/2-DIN-Klasse [a] für unsere Zwecke verwendet.

Die zunächst beanstandete Oberflächenrauigkeit des TE-Mantels konnte schnell behoben werden.

Beim Aufhämmern der Pt-Hülsen mußten Erfahrungen insofern gesammelt werden, als der Einfluß der verschiedenen Parameter nicht ausreichend bekannt war. Hierzu zählte z.B. die Ermittlung der "optimalen" Schlagzahl. Hierunter wird die Schlagzahl verstanden, bei der die geforderte Mindesthaftfestigkeit der Pt-Hülse auf dem TE-Mantel (10 kp bei Zugbelastung) garantiert und andererseits die Pt-Struktur nicht zu stark beeinträchtigt ist. Bei zu großer Schlagzahl wurde die Pt-Hülse rissig und es lösten sich Partikel aus der Oberfläche.

Weitere Einflußgrößen waren die Verunreinigungen des Platins, der Verformungsgrad der Pt-Hülse vor der letzten Wärmebehandlung, die Wärmebehandlung selbst, das Isolationsmaterial (MgO) und dessen Verdichtung, der Mantelwerkstoff 1.4541 oder Inconel 600, die Wandstärke des TE-Mantels und die letzte Wärmebehandlung der TE (Durchlaufglühung). Bei konstanter Schlagzahl der Hämmemaschine und bei Verwendung von Pt-Hülsen mit annähernd gleicher chemischer Zusammensetzung und gleicher Wärmebehandlung konnte gezeigt werden, daß die dominierende Einflußgröße für das Haften der Pt-Hülse auf dem TE-Mantel die Mantelwandstärke ist. Als optimal wurden Wandstärken von 13 - 15 % des Manteldurchmessers ($\hat{=}$ 0,13 - 0,15 mm) ermittelt,

[a] In DIN 43710 sind die Thermospannungen und die zulässigen Abweichungen für verschiedene Thermopaare festgelegt. TE, die dem halbierten Toleranzbereich genügen, bezeichnet man als TE der 1/2-DIN-Klasse.

während schon bei 20 % ($\approx 0,2$ mm) ein ausreichendes Haften der Pt-Hülse nicht gegeben war. Offenbar spielte das elastische Verhalten der Mantelwand eine entscheidende Rolle.

Um nicht auf eine rein kraftschlüssige Verbindung angewiesen zu sein, wurde ein neues Hämmerwerkzeug so modifiziert, daß die Pt-Hülse am TE-seitigen Ende auf eine Länge von etwa 10 - 15 mm um ca. 1/10 mm im Durchmesser verjüngt und dadurch Formschluß erreicht wurde (Abb. 3, Version B). Zugversuche mit in dieser Weise gefertigten TE haben ergeben, daß die Pt-Hülse immer "in sich selbst" zerreißt (bei 12 - 20 kp) und nicht vom TE abgezogen wird.

Das ursprünglich vorgesehene Röntgen der TE-Spitze nach dem Aufhämmern der Pt-Hülse brachte infolge der hohen Absorption der Röntgen-Strahlung im Pt keine verwertbaren Ergebnisse. Es wurde deshalb nach ersten Versuchen nicht wieder durchgeführt.

Bei einigen TE ist bei transienter Beanspruchung in der Nähe der TE-Spitze ein "Schalter-Effekt" derartig aufgetreten, daß die EMK sprunghaft den Wert Null und ebenso sprunghaft einen endlichen Wert annahm und zwar mehrfach und in zeitlich unregelmäßigen Abständen. Es muß hieraus der Schluß gezogen werden, daß die im Bereich der TE-Spitze gebrochenen TE-Adern sich wahrscheinlich aufgrund thermisch-mechanischer Beanspruchung an der Bruchstelle mehr oder minder gut berührten bzw. voneinander entfernten.

Als Folge aus diesen Vorkommnissen wurde vereinbart, unter transienten Bedingungen (ca. 10 - 15 K/s) von Raumtemperatur bis 700 °C den EMK-Verlauf per Linienschreiber aufzunehmen, um defekte TE anhand von Unstetigkeiten aussortieren zu können.

8.4 Kalibrieren der TE

Um zu einer ausreichenden Meßgenauigkeit zu kommen, wurden mit jedem TE in einem Eichofen Vergleichsmessungen gegen ein von PTB kalibriertes PtRh-Standard-TE durchgeführt. Als Vergleichstemperaturen wurden 200 °C, 400 °C, 700 °C und 1000 °C gewählt.

Der zulässige Meßfehler (Fehler der Kalibrieranordnung plus Fehler aus der Kalibrierung des Standard-TE) bei diesen vier Meßpunkten mußte $\leq 0,3 \%$ sein. Der Absolutwert der Abweichung zu den Thermospannungswerten nach JPTS 68 [a] wurde berücksichtigt durch Eingabe von Korrekturwerten bei der projekt-internen Datenverarbeitung. Nachdem die TE aus Kabel der 1/2-DIN-Klasse gefertigt wurden, war der Absolutwert der Abweichung bei der Kalibrierung so gering (≤ 1 K), daß auf eine Korrektur verzichtet werden konnte.

8.5 Ergebnisse der Prüfungen

Der Fertigungskontrolle des KfK oblag die Aufgabe, die Einhaltung der in der Spezifikation festgelegten Auflagen bzw. Prüfungen zu überwachen. Für die nachfolgende Darstellung in Tabelle 4 gelten die folgenden Randbedingungen:

- Die Angaben beziehen sich nur auf die Pt-gehülsten TE und nur auf den Teil der Prüfungen, bei denen KfK wirklich Fehler festgestellt hat. Die zeitlich später aufgetretenen Mängel bei der Handhabung der TE bzw. bei den Versuchen werden gesondert unter Kap.10 behandelt.
- Die Angaben beziehen sich nicht auf die zahlreichen Proben vor Beginn der eigentlichen TE-Fertigung und -Lieferung für KfK.

[a] Internationale praktische Temperaturskala 1968

Tabelle 4: Ergebnisse der Prüfungen an TE mit aufgehämmerten Pt-Hülsen

Lieferung 1 = 30 TE (BA 381 150 vom 28.5.1975)
 Lieferung 2 = 8 TE }
 Lieferung 3 = 92 TE } (BA 384 279 vom 20.2.1976)
 Lieferung 4 = 30 TE (BA 383 476 vom 29.6.1977)
 Lieferung 5 = 150 TE (BA 383 867 vom 28.11.1977)
 Lieferung 6 = 120 TE (BA 442 417 vom 26.2.1979)

Art der Prüfung	Summe der Beanstandungen (in %) bezogen auf die Gesamtstückzahl bei Lieferung Nr.						Ursachen (Pkt. 1-4) der Beanstandungen (in %) bei Lieferung Nr.					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
1. Röntgen der Schweißkuppe							73,4	100	18	100	74	100
2. Isolationswiderstand (Fertigungsprüfung)	63,3	12,5	23,9	3,3	2,7	3,3	-	-	5	-	-	-
3. Isolationswiderstand (100 bar-Abnahmeprüfung)							-	-	-	-	26	-
4. Zugvergleich (Pt-Hülse nicht fest genug auf TE)							26,6	-	77	-	-	-

Aus dem prozentualen Rückgang der Summe der Beanstandungen (je Lieferung) kann auf eine nunmehr ausgefeilte Fertigungs- und Prüftechnik geschlossen werden.

- Die vom TE-Hersteller nach eigener Sachkenntnis vor Prüfung durch KfK evtl. aussortierten fehlerhaften TE sind in der Aufstellung nicht erfaßt.
- Ab Lieferung 4 (BA 383 476) wurde das Röntgen der TE vom Hersteller selbst durchgeführt und KfK die Röntgenaufnahmen zur Begutachtung überlassen.

9. TE-Verlegung am Prüfling und an der Prüflingsaufhängung

Die Anordnung der TE an der Brennstabhülle ist aus dem Schema Abb. 7 ersichtlich. Sechs TE (T 131 bis T 136) waren gleichmäßig am Brennstabumfang und in Höhenabständen von je 50 mm angeordnet. Der Abstand von Unterkante Brennstab zu Unterkante T 131 betrug ca. 300 mm. Die azimutale Lage der TE war gegeben durch einen Fixpunkt an der Brennstab-Aufhängung. Bis auf wenige Sonderfälle waren alle nuklear- und elektrisch beheizten Prüflinge in der vorgenannten Weise mit TE bestückt. Bei allen vorbestrahlten Brennstäben hat eine Nachvermessung der angeschweißten TE stattgefunden, deren Ergebnis in Formblättern entsprechend Abb. 8 protokolliert wurde.

Die TE sind im Bereich des Brennstabes oberhalb ihrer Anschweißstelle nicht befestigt, sie hängen lose im Ringspalt zwischen Prüfling und umgebendem Dampf führungsrohr. Es stellte sich die Frage, ob an den Berührungspunkten von Hüllrohr und TE eine Eutektikumsbildung stattfindet und/oder wie stark beide Materialien in Dampf atmosphere oxidieren. Zu diesem Zweck wurden TE-Stücke (Mantelwerkstoff 1.4571) mittels Edelstahldraht an Zry-Hüllrohrproben angebunden und in einer Heißdampf-Apparatur 15 Minuten bei 1000 °C bzw. 1200 °C in stagnierendem bzw. strömendem Dampf oxidiert. Es zeigte sich, daß sich das Zirkonoxid so schnell bildet, daß in keinem der untersuchten Fälle Eutektikumsbildung auftrat (Abb. 9). Bei strömendem Dampf ist der TE-Mantel gut erkennbar oxidiert (Abb. 10).

Oberhalb des Brennstabes müssen die sechs TE an der sogenannten Prüflingsaufhängung entlang geführt werden (ca. 4 m) bis zum Aufhängungskopf. Dieser dichtet den dampfdurchströmten Raum des Reaktoreinsatzes nach außen ab. Der radioaktive Prüfling mit der angeschraubten Aufhängung muß fernbedient in das innere Dampfführungsrohr bei engem Spalt ($s = 3 \text{ mm}$) konzentrisch eingeführt werden. Um das Einführen zu erleichtern bzw. die Beschädigung von TEs zu vermeiden, werden diese an der Prüflingsaufhängung im Abstand von ca. 300 mm in "Los-Laschen" geführt. Diese "Los-Laschen" erlauben axiale Bewegungen der TE. Zum Ausgleich der unterschiedlichen thermischen Dehnungen der Bauteile sowie der evtl. Längung des Brennstabes im Versuch selbst, sind die TE mit einer Überlänge von ca. 10 mm verlegt. Am Aufhängungskopf werden die TE in Durchführungen hart eingelötet. Vor und nach wichtigen Arbeitsschritten (wie Montagebeginn, Einlöten der TE im Kopf, Montieren der TE-Stecker usw.) werden der Isolations- und Schleifenwiderstand eines jeden TE gemessen und protokolliert (Tabelle 5).

10. TE-Verhalten bei den In-pile-Versuchen

Bei den ersten In-pile-Versuchen (Nuklear- und BSS^(a)-Versuche) ist mehrfach während der Transiente TE-Adernbruch eingetreten. Alle nachfolgend verwendeten TE wurden deshalb vom Hersteller oder von uns selbst einem Test unterzogen und auf Unstetigkeiten im EMK-Verlauf untersucht. Adernbruch ist im Anschluß an diese Prüfung nur noch bei einem TE aufgetreten.

Einen typischen transienten Temperaturverlauf zeigt Abb. 11.

Bei ca. 450 TE, die bisher bei In-pile-Versuchen eingesetzt wurden, ergab sich folgendes Verhalten:

2,2 % der TE ($\cong 10$ Stück) zeigten Mängel vor dem Versuch
(bei 8 TE war der ISO $< 2000 \text{ M}\Omega$)

(a) Brennstabsimulator

Tabelle 5

Meßprotokoll für TE's am Einsatz-Nr.: G' 2

I. vor Montage II. nach Stecker-Montage mit Fisprüfung (in Techn.-Halle)

III. nach Montage des iDFR IV. vor- V. nach Versuchsdurchführung (im FR 2)

Meßstelle	Fühler-Nr.	Bezeichnung	Isol. bei 100V MΩ	Schleife Ω	Bezugstemp. 0°C mV 22°C'
T 116	674	T 116	> 2000	297	
T 136	590	TX6	> 2000	295	
T 135	589	TX5	> 2000	300	
T 134	588	TX4	> 2000	296	
T 133	587	TX3	> 2000	298	
T 132	586	TX2	> 2000	295	
T 131	585	TX1	> 2000	295	
T 115	673	T 115	> 2000	293	

Datum: 9.11.73
Name: Stork

T 116	674	T 116	> 2000	219	0,82
T 136	590	TX6	> 2000	244	0,82
T 135	589	TX5	> 2000	247	0,83
T 134	588	TX4	> 2000	249	0,83
T 133	587	TX3	> 2000	251	0,83
T 132	586	TX2	> 2000	253	0,83
T 131	585	TX1	> 2000	256	0,83
T 115	673	T 115	> 2000	293	

Datum: 20.12
Name: Stork

1) TE 115 vor dem Löten 2.) nach dem Löten, iDFR 3.) nach dem Löten, Kopfteil

1) T 115	673	T 115	> 2000	287	
2) T 115	673	T 115	> 2000	287	
3) T 115	673	T 115	> 2000	287	

27.3.75
Hespeley

T 116	674	T 116	> 2000	219	
T 136	590	TX6	> 2000	244	
T 135	589	TX5	> 2000	247	
T 134	588	TX4	> 2000	249	
T 133	587	TX3	> 2000	251	
T 132	586	TX2	> 2000	253	
T 131	585	TX1	> 2000	256	
T 115	673	T 115	> 2000	265	

Datum: 27.3.75
Name: Hespeley

T 116	674	T 116	> 2000	220	
T 136	590	TX6	> 2000	244	
T 135	589	TX5	> 2000	247	
T 134	588	TX4	> 2000	250	
T 133	587	TX3	> 2000	253	
T 132	586	TX2	> 2000	254	
T 131	585	TX1	> 2000	257	
T 115	673	T 115	> 2000	264	

Datum: 25.4.75
Name: Hespeley

T 116	674	T 116	> 2000	223	
T 136	590	TX6	> 2000	247	
T 135	589	TX5	> 2000	252	
T 134	588	TX4	> 2000	254	
T 133	587	TX3	> 2000	255	
T 132	586	TX2	> 2000	257	
T 131	585	TX1	> 2000	260	
T 115	673	T 115	> 2000	270	

Datum: 27.4.75
Name: Hespeley

1,8 % der TE (\cong 8 TE) zeigten Mängel während des jeweiligen Versuchs.

(In 4 Fällen war der ISO nach dem Versuch \leq 2000 M Ω , bei den restlichen 4 TE lag der eingangs beschriebene Aderbruch vor.)

Läßt man die ersten Versuche (A 1.1, BSS 1 bis 3) - bei denen die TE unter transienten Bedingungen erprobt werden mußten - außer Betracht, dann ergibt sich eine Versagensquote der TE während der Versuche von ca. 0,2 % (\cong 1 TE von 418).

Konzentriert man die Betrachtung auf die In-pile-Versuche mit vorbestrahlten Prüflingen, so ergibt sich nach 25 Versuchen folgendes Bild:

4,5 % der eingesetzten TE zeigten vor den Versuchen Mängel (an 7 TE war der ISO \leq 2000 M Ω , 2 TE wurden bei der Montage der Prüflinge im Versuchsloop beschädigt).

0 %, d.h. nicht ein einziges TE (von 200) ist während der Versuche ausgefallen.

Die vor Versuchsbeginn aufgetretenen Mängel sind ausschließlich auf die Handhabung der TE zurückzuführen. Diese ist unter den gegebenen Randbedingungen allerdings auch schwierig. Die möglichen Schadensursachen reichen von einer denkbaren Überhitzung des TE-Mantels beim Einlöten an der Kopfdurchführung bis zum nicht einwandfreien Vergießen der TE-Stecker. Selbst beim Aufstecken der TE vor dem eigentlichen Versuch kann aufgrund der schwierigen räumlichen Verhältnisse leicht ein TE beschädigt werden.

TE-Versagen während des Versuchs wäre dagegen vor allem auf Fertigungsfehler zurückzuführen.

Der hohe Fertigungs- und Prüfstandard bei der TE-Herstellung wird aus vorstehendem ersichtlich.

11. Temperatur-Meßfehler

11.1 Meßfehler hervorgerufen durch das TE selbst

Über die Probleme bei der Temperaturmessung mit Thermoelementen bzw. die Parameter die in die Meßgenauigkeit eingehen, ist in der gängigen Fachliteratur ausführlich berichtet. Zu darüber hinausgehenden speziellen Problemen wie "Inhomogenitäten der TE-Adern", "Einfluß des Isolationswiderstandes auf die Meßgenauigkeit" und "Reversible Änderungen infolge innerer Vorgänge im NiCr-Schenkel" (auch "K-Zustand" oder "Nahordnungsänderung" genannt) wird auf die umfangreiche Literatur /10/ bis /21/ verwiesen. (Nach /10/ ist durch Nahordnungsänderung bei Abkühlung eines NiCr/Ni-TE von 700 °C an Luft bereits mit einer EMK-Änderung entsprechend 1 K zu rechnen. Nach /21/ sind abhängig von der Wärmebehandlung und der Abkühlgeschwindigkeit Fehlmessungen bis zu 1,7 % möglich.)

Der vom Meßfühler selbst zu erwartende Fehler wird zu $< 1/2$ DIN-Toleranz angenommen (d.h. bis 400 °C $< \pm 1,5$ Grad, über 400 °C $< \pm 0,375$ % der Meßtemperatur). Vorstehende Fehleraussage gilt für unseren Anwendungsfall mit in der Regel einmaliger transienter Beanspruchung der TE bis ca. 1000 °C und bei Einhaltung der Lieferspezifikation sowie bei Beachtung der Anweisungen zur TE-Verlegung. Der Fehler des Meßfühlers selbst ist wesentlich kleiner als der Fehler, der sich aus der Anbringungsart ergibt (siehe dazu Kap. 11.3).

11.2 Meßfehler hervorgerufen durch die Temperatur-Meßkette

Die Meßketten wurden vor und nach den Versuchen geprüft. Dazu wurde vor Ort ein Eichofen installiert. Ein sehr genaues Pt-Widerstandsthermometer als Eichthermometer (Fehler ca. 0,01 K) und ein kalibriertes 1 mm Ø-TE wurden dicht benachbart in den Eichofen eingebracht. Das Thermoelement wurde dann nacheinander auf alle Meßketten aufgesteckt und das Signal zur Datenerfassungs- und -verarbeitungsanlage CALAS überspielt.

Die so ermittelten Meßfehler der Meßketten waren allesamt < 1 K.

11.3 Meßfehler hervorgerufen durch die TE-Anbringung

Jedes Anbringen eines Meßfühlers mit endlichen Abmessungen an einer Oberfläche stört das Temperaturfeld und den Wärmestrom und bedingt damit einen Meßfehler. In der vorliegenden Aufgabenstellung soll zwar die Wandtemperatur ermittelt werden, jedoch ist die Anbringung eines Meßfühlers aus den unter Kap. 2.3 erläuterten Gründen nur an der Wand-Oberfläche möglich. Es muß folglich in Referenzversuchen ein Korrekturwert ermittelt werden, der es erlaubt, von der gemessenen Temperatur auf die Wandtemperatur zu schließen. Zu diesem Zweck wurden mit elektrisch beheizten Simulatoren Versuche durchgeführt, bei denen zur Ermittlung der "wahren" Wandtemperatur TE mit $0,5 \text{ mm } \varnothing$ in die Rohrwand eingebettet waren. In Transienten konnten die Temperaturunterschiede zwischen den in die Wand eingebetteten TE und den auf der Hüllrohrwand angeschweißten TE ermittelt werden. Es zeigte sich, daß die Temperaturdifferenzen abhängig von der Stableistung waren (Abb. 12).

Für die beiden TE-Versionen ergaben sich bei einer Stableistung von $50 \text{ W/cm}^{[a]}$ folgende Korrekturwerte bzw. Streubandbreiten:

TE-Version A: $75 \text{ K } \pm 35 \text{ K}$
TE-Version B: $10 \text{ K } \pm 10 \text{ K}$.

Diese Angaben gehen von der Annahme aus, daß die Anzeigen der in die Wand eingebetteten TE ($0,5 \text{ mm } \varnothing$) mit ausreichender Genauigkeit der "wahren" Wandtemperatur entsprechen.

[a] 50 W/cm beim Brennstabsimulator (BSS) entsprechen ca. 40 W/cm Stableistung beim Nuklearstab

12. Technik der TE-Anschweißung

Die prinzipiellen Anforderungen an die TE-Anschweißung sind in Kap. 4 bereits beschrieben. Die eingesetzte Schweißanlage, die damit durchgeführten Versuche sowie die sich aus den Versuchen ergebenden Maßnahmen, sollen im folgenden dargestellt werden.

12.1 Daten der Schweißmaschine

Die bereits vorhandene Schweißmaschine bestand aus einem Zweiimpuls-Steuergerät sowie Schweißkopf und Trafo in "Tischausführung" (Abb. 13).

Technische Daten:

Max. Kurzschlußleistung:	20 kVA
Max. Sekundär-Kurzschlußstrom:	5,5 kA
Nennleistung:	1,9 kVA
Anschlußleistung:	8 kVA
Netzspannung:	380 V
Elektrodenkraft:	0,5 bis 10 kp
Armausladung:	80 mm
Elektrodenhub:	20 mm

Das Steuergerät mit Wechselstrom-Anschluß und geräteinternem Siliziumgleichrichter erlaubt die Schweißzeit bzw. Schweißpause im Bereich von 1 bis 30 bzw. 1 bis 60 Perioden zu variieren. Die Feineinstellung des Schweißstromes geschieht stufenlos über Potentiometer, während die Sekundärspannung in vier Stufen (von 1 bis 4 Volt) an die Belastung angepaßt werden kann. Es kann wahlweise mit einem oder zwei Stromimpulsen - deren Intensität und Dauer unabhängig voneinander einstellbar sind - geschweißt werden. Die Elektrodenkraft ist variabel zwischen 0,5 und 10 kp.

Mit diesem Gerät wurden die ersten Schweißversuche zur Ermittlung von Einstelldaten, der Geometrie der Elektroden usw. durchgeführt.

Die später beschaffte neue Schweißmaschine mit gleicher Leistung war vor allen Dingen steuerungstechnisch verbessert. Sie wurde für das Anschweißen der TE an die vorbestrahlten Brennstäbe in der Heißen Zelle des Reaktors FR2 verwendet.

Die Schweißmaschine ist beschrieben in /25/, /26/, /27/ und /28/.

12.2 Erste Schweißversuche

Diese sollten den Nachweis erbringen, daß die gewählte TE-Befestigungsart die an sie gestellten Anforderungen prinzipiell erfüllen kann. Es wurden vorhandene Materialien wie PtRh, Pt überzogenes Inconel, Ti und Reinzirkon in Draht- oder Hülseform von ca. 1 mm \emptyset mit dem Hüllmaterial Zry 4 (an Luft oxidiert) verschweißt. Dabei ist die Leistungseinstellung (Stromstärke) an der Maschine, die Periodenzahl, die Sekundärspannung und die Anpreßkraft variiert und die Schweißgüte zunächst optisch beurteilt und dann durch Abreißversuche quantifiziert worden.

Das Schweißen durch zwei - mit wählbarer Abstandszeit - aufeinanderfolgende Stromstöße hat sich dabei als günstig erwiesen. Es werden beim ersten Stromstoß die Oberflächenwiderstände und der Einfluß evtl. unterschiedlicher Übergangswiderstände (z.B. durch einseitiges Anliegen der zu verbindenden Teile) reduziert, während beim zweiten Stromstoß die eigentliche "feste" Verbindung zustande kommt.

Bald zeigte sich, daß die Reproduzierbarkeit der Schweißgüte der Proben (bei unveränderter Maschineneinstellung) problematisch war. Abb. 14 zeigt z.B. eine Probeschweißung (Pt10Rh/Zry4) mit starken Aufschmelzungen an den Rändern des TE-Lappens (TE-Version A). Die Aufschmelzungen enthalten Lunker, die wärmebeeinflusste Zone reicht über die gesamte Wand. Der Anschweißlappen (hervorgegangen aus dem PtRh-Röhrchen durch Quetschung) zeigt Spalte, wodurch der Stromfluß beim Schweißen gestört ist. Als Konsequenz wurde ein Preßwerkzeug gebaut, welches in Verbindung mit der vorhandenen Hebel-Pressen zu einwandfreien Anschweißlappen führte.

In Abb. 15 wird dagegen eine gute Probeschweißung (Ti/Zry 4) gezeigt, bei welcher die vorgenannten Mängel nicht gegeben sind. (Diese Probe wurde nach dem Schweißen 15 min. bei 950 °C in Wasserdampf oxidiert und es ist sehr deutlich erkennbar, daß das Ti-Röhrchen einen starken oxidativen Angriff erfahren hat.)

Der Einfluß der Oxidschicht des Zry (an Luft oxidiert) auf die Schweißgüte wurde dadurch eliminiert, daß das Oxid mechanisch (durch Schmirgeln, Feilen, Schleifen) oder chemisch (durch Beizen mittels Flußsäure und Bleinitrat) vor dem Schweißen entfernt wurde. Die erhoffte Verbesserung der Reproduzierbarkeit der Schweißgüte konnte aber ebensowenig erzielt werden, wie bei der Anwendung von Schutzgas während des Schweißens.

Als weitere Maßnahme mußten nun die Einflußgrößen bei Schweißungen und deren Reproduzierbarkeit genauer betrachtet werden. Diesem Zweck dienen die in Kap. 12.3 bis 12.5 beschriebenen Maßnahmen.

12.3 Beschaffung geeigneter Meßgeräte

Die Untersuchungen zu den zahlreichen Schweißeinflußgrößen und deren gegenseitiger Abhängigkeit sind in /22/, /23/, /24/ ausführlich dargestellt. Die Tabellen 6 und 7 (aus /22/) zeigen wichtige Zusammenhänge. Es wurden folgende Maßnahmen getroffen:

- Widerstands-Messung

Es wurde ein Meßgerät beschafft, mit dessen Hilfe der Werkstückwiderstand nach dem Aufsetzen der Elektroden und unter Wirkung der Elektrodenkraft unmittelbar vor und nach dem Schweißen gemessen werden kann. Der Meßwert wird durch an den Elektroden angebrachten Klemmen aufgenommen. Der so ermittelte Widerstandswert setzt sich aus dem Stoffwiderstand der zu verbindenden Teile aus dem Kontaktwiderstand zwischen denselben und dem Kontaktwiderstand zu den beiden Elektroden sowie dem Elektrodenwiderstand zusammen. Wegen des vergleichs-

Tabelle 6: Einflußgrößen auf die Kraft- und Temperaturverteilung beim Widerstandsschweißen

Versorgung	Schweißeinrichtung			Werkstück
	Maschinen-Bauart	Steuerung	Elektrode	
<u>Stromversorgung</u> Primärspannungskonstanz Verfügbare Anschlußleistung <u>Druckluft- bzw. Druckölversorgung</u> Druckkonstanz <u>Kühlmittel</u> Kühlwassertemperatur und -druck <u>Umgebungsverhältnisse</u> Lufttemperatur und -feuchtigkeit, erschütterungsarme Maschinenaufstellung usw.	<u>Elektrische Kennlinie</u> insbesondere Sekundär-impedanz - Änderungen durch unterschiedliche Fensteröffnung oder ferromagnetische Teile im Fenster <u>Zentrischer Elektrodenkraftangriff</u> Steifigkeit des Gestells und der Ausleger, Führungsgenauigkeit des beweglichen Elektrodensystems <u>Dynamisches Verhalten</u> Reibung und Trägheit der Elektrodenbewegung	<u>Steuerteil</u> Genauigkeit der Zeitbestimmung für Stromzeit, Vorhalte- und Nachhaltezeit. Einfluß von Störimpulsen, Spannungsschwankungen und Temperaturwechsel auf die Zeiteinstellung (und evtl. Phasenanschnitt) <u>Leistungsteil</u> Alterung der Schaltelemente (Kontaktverschleiß beim Schütz, Zündverzug beim Ignitron, keine merkliche Alterung beim Thyristor)	<u>Elektrodenwerkstoff</u> Elektrische und thermische Leitfähigkeit, Härte und Festigkeit bei erhöhter Temperatur, Anlaßbeständigkeit <u>Elektrodenform</u> Form, Größe und Oberfläche der Elektroden spitze. <u>Elektrodenkühlung</u> Durchflußquerschnitt Abstand zwischen Kühlkanal und Elektrodenarbeitsfläche.	<u>Werkstoffart</u> Zusammensetzung Gefüge, Homogenität <u>Werkstückform</u> Blechdicke Überlappung Punkt- und Randabstand <u>Werkstückoberfläche</u> Planheit Rauigkeit Verunreinigungsgrad und Oxidschichten, Deckschichten <u>Anpassung der Werkstückteile</u> sattes Auflegen bzw. Luftspalt der Bleche an der Schweißstelle etc.

Tabelle 7: Änderung der Temperatur (T) am Schweißlinsenrand bei Erhöhung der Schweißeinflußgrößen um jeweils 10 %

+ 10 % Einflußgrößenveränderung		Änderung von T (in %)
Schweißstrom	I	+ 21,0
Elektrodenfläche	A	- 17,4
Schweißzeit	t	+ 8,3
Blechdicke	s	+ 1,5
Elektrische Leitfähigkeit	σ	- 9,4
Wärmeleitfähigkeit	λ	- 9,4
Dichte	ρ	- 7,9
Spezifische Wärme	c	- 7,9
Wärmeübergang	α	- 0,4
Leitfähigkeit der Elektrode	λ	- 0,8
Elektrodenmaß	l	+ 0,9

weise geringen Anteils des Stoffwiderstandes stellt die Widerstandsüberwachung vor dem Schweißen praktisch eine Kontrolle des Kontaktwiderstandes dar. Sie eignet sich dazu, veränderte Schweißbedingungen, wie z.B. verschmutzte Werkstückoberflächen oder Elektroden, Formänderungen, gegenseitig versetzte bzw. geneigte Anordnung der Elektrodenachsen, Schwankungen der Elektrodenkraft usw. aufzuzeigen, um dadurch evtl. Fehlschweißungen zu vermeiden. Nach dem Schweißen ist die Widerstands-Messung Teil der Schweißgüte-Kontrolle.

In einer Vielzahl von Probeschweißungen sind für unsere speziellen Anwendungsfälle Grenzwerte erarbeitet worden, innerhalb derer die Widerstandsmeßwerte bei guten Schweißungen normalerweise liegen. Liegen die Meßwerte außerhalb der Grenzwerte, so muß nach den Ursachen geforscht werden.

- Energie- bzw. Leistungs-Messung

Als wirksamste Verfahrenskontrolle ist die Messung des Schweißstromes bzw. der Schweißenergie anzusehen. Diese Messungen führen zur Kontrolle der die Qualität bestimmenden Schweißbedingungen unabhängig davon, ob sie der Schweißanlage oder den zu verschweißenden Teilen zuzuordnen sind. Mit dem von uns beschafften Gerät kann wahlweise die Stromstärke $I(A)$, die Schweißleistung $P(W)$ und die Schweißenergie $W (Ws)$ gemessen werden. Das Gerät ist in /22/ beschrieben.

Die Versuchsergebnisse zeigten, daß die bestmögliche Überwachung beim Punktschweißen in der Kombination der Widerstandsmessung vor dem Schweißen mit der Energiemessung während des Schweißens besteht. Dies gilt, obwohl nicht alle Änderungen von Einflußparametern mit Hilfe der Messungen gleich gut abgedeckt werden können.

12.4 Geometrie und Werkstoff der Elektroden

- Minuselektrode

Bei der zunächst als Halbschale geformten (dem Hüllrohr entsprechenden) 10 mm langen Cu-Minus-Elektrode, machten sich beim Schweißen kleine Verkantungen von Proben aus der idealen Achse sehr stark durch Spritzerbildung und einseitiges Aufschmelzen bemerkbar. Die beim Schweißvorgang an der Hüllrohroberfläche anliegende Minuselektrode zeichnete sich deutlich ab.

Die daraufhin erprobte 50 mm lange, prismatische Elektrode (ebenfalls aus Cu) zeigte diesbezüglich wesentlich günstigeres Verhalten.

- Pluselektrode

Bei der Geometrie der Plus-Elektrode muß zwischen den TE-Versionen A und B unterschieden werden. Für TE-Version A hat sich eine plane Plus-Elektrode als am günstigsten erwiesen. Bei TE-Version B war die prismatische Form am besten geeignet. Abb. 16 zeigt schematisch die Elektroden (TE-Version B).

Während sich als Werkstoff für die Minus-Elektrode Kupfer von Anfang an bestens bewährt hat, stand bei der Plus-Elektrode lange Zeit sowohl Wolfram, als auch Molybdän (gesintert, als Stift in Cu eingebettet) zur Diskussion. Wolfram bietet dabei den Vorteil der besseren Standzeit, Molybdän dagegen verklebt sich weniger als Wolfram beim Schweißen mit dem Pt der TE-Hülse. Letztlich haben wir uns für Wolfram entschieden. Mit zunehmender Zahl der Schweißversuche wurde - um eine möglichst geringe thermische Beeinflussung des Hüllrohres zu erreichen - mit geringerer Schweißenergie bei noch ausreichender Festigkeit der Schweißverbindung gearbeitet. Das anfängliche Kleben der Plus-Elektrode an der Platin-Hülse trat dann nicht mehr auf.

12.5 Versuche mit oxidierten Zry-Proben

Besonders in Bezug auf die Brennstäbe mit hohem Abbrand (35 GWd/t) stellte sich die Frage nach der Beschaffenheit der Hüllrohrtoxidschicht und deren Einfluß auf die Schweißbarkeit. Für die Randbedingungen wie sie bei der Vorbestrahlung unserer Brennstäbe vorlagen, konnten aus der Literatur Hinweise gefunden werden, die auf eine ZrO-Schichtdicke von $\leq 1 \mu\text{m}$ schließen ließen. Wir wollten zur Sicherheit jedoch auch mit Schichtdicken von 1 - 3 μm experimentieren. Es wurden deshalb Hüllrohrproben bei 300 °C und bei 700 °C in strömendem Wasserdampf oxidiert. Die Schichtdicken reichten von 0,05 μm bis 3 μm . Die Versuchsergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die bei 300 °C über eine Zeit von 4 h oxidierten Zry-Proben (Schichtdicke ca. 0,05 μm) ließen sich mit den "üblichen" Einstellwerten (für luftoxidierte Proben) gut schweißen (R_{vor} bis ca. 30 m Ω).
- Bei 700 °C oxidierte Proben waren - unabhängig von der Schichtdicke des Oxids - ohne Vorbehandlung nicht schweißbar. Die Oxidschicht ist chemisch sehr stabil, sie wird von den üblichen Beizmitteln ohne Zerstörung des Grundwerkstoffs nicht angegriffen ($R_{\text{vor}} \gg 80 \text{ m}\Omega$).
- Schweißbar wurden die vorgenannten Proben durch "Aufreißen" - also keineswegs abtragen - der Oxidschicht mittels Schmirgelleinen. Die Versuche haben gezeigt, daß bei Übergangswiderständen (nach dem "Aufreißen") von $\leq 70 \text{ m}\Omega$ mit etwas höherer Schweißleistung (ca. 5 - 10 %) gute Schweißungen erzielt werden konnten.

Damit war die Technik gefunden, die auch bei evtl. starken Oxidschichten ($\geq 1 \mu\text{m}$) an den vorbestrahlten Brennstäben das Schweißen prinzipiell ermöglichte.

- Die gesamte Hüllrohroberfläche mußte nach dem "Aufreißen" der Oxidschicht sorgfältig gesäubert werden (durch Abwaschen mit einem Lösungsmittel), da kleinste Rückstände beim Schweißen zu Einbränden an der Hüllrohroberfläche führten.

12.6 Kopplungs- und Schweißvorrichtung (KuS) für fernbedientes Arbeiten in der Heißen Zelle (HZ)

Um die vorbestrahlten Brennstäbe in der Heißen Zelle (HZ) handhaben bzw. montieren zu können, mußte eine spezielle Einrichtung entwickelt und gebaut werden. Die sogenannte Kopplungs- und Schweißvorrichtung (KuS) besteht primär aus der Schweißeinrichtung, die ebenso wie die Verschraubungseinrichtung schwenkbar auf einer Grundplatte angeordnet ist (Abb. 17 und Abb. 18). Je nach Montageschritt kann die eine oder andere Einrichtung in die "Arbeitsebene" gebracht werden.

Im Rahmen dieses Berichtes wollen wir uns beschränken auf einige Bemerkungen zur Schweißeinrichtung.

Der Schweißkopf mit Trafo (entsprechend Kapitel 12.1) ist integriert in die KuS, während das Steuergerät (zum Einstellen und Auslösen der Schweißimpulse) und die Meßgeräte vor der HZ aufgebaut sind, um deren Kontamination zu vermeiden. Mit Hilfe der KuS war es möglich, TE in vorbestimmten axialen und azimutalen Lagen am Hüllrohr anzuschweißen. Dazu sind Abstandslehren (axiale Lagebestimmung) und ein Greifer mit Winkelskala (azimutale Lage) als geeignete Hilfsmittel geschaffen worden. Mittels eines Theodoliten wurde die Positionierung der TE vom HZ-Fenster aus optisch überwacht. Nach dem Schweißen wurde sowohl die axiale wie auch die azimutale Lage der TE vermessen und protokolliert.

Abb. 19 zeigt die KuS in der HZ beim Anschweißen des ersten (von sechs) TE an einen vorbestrahlten Brennstab (gemessene Dosisleistung ≥ 1000 rem/h in 1 m Abstand vom Prüfling). Mit Hilfe des im Bild ersichtlichen Spiegels ist die Lage des TE etwa senkrecht zur Blickrichtung (durch das HZ-Fenster) zu kontrollieren. In Abb. 20 ist sehr gut ein Teil des Schweißkopfes mit der stiftförmigen Pluselektrode zu erkennen, welche auf den Anschweißlappen des TE (TE-Version A) gepreßt wird. Die Minuselektrode ist verdeckt durch den Maßstab, welcher der TE-Positionierung dient. Deutlich erkennbar ist der Plexiglas-Trichter, durch den das TE von oben her eingeführt und an den Brennstab angelegt wird. Über den Spannbügel wird das TE in seiner Lage fixiert. Abb. 21 zeigt bei offener HZ-Tür (90° zum HZ-Fenster) die aufgebaute KuS, während Abb. 22 die Situation vor der HZ wiedergibt.

Die sichere Handhabung der vorbestrahlten Brennstäbe wie auch der empfindlichen TE bei der Montage in der HZ erforderte sehr viel Geschick und Übung. Es wurden deshalb in einer Mock-up-Zelle an Brennstab-Attrappen sowohl die einzelnen Arbeitsschritte als auch der Gesamtablauf (soweit möglich) geübt.

Die Montage der vorbestrahlten Brennstäbe (einschließlich des TE-Anschweißens) in der HZ wird in einem besonderen Bericht dargestellt.

12.7 Schweiß-Einstelldaten

Um zu einer optimalen Maschineneinstellung zu kommen, mußte zunächst die "optimale Schweißung" definiert werden. Für unseren Fall sollte eine Schweißung

- ausreichende Zugfestigkeit aufweisen, d.h. in Achsrichtung des TE bei Raumtemperatur ≥ 5 kp (bei 12 bis 20 kp reißt die Pt- Hülse in sich)
- eine möglichst geringe thermische/mechanische Beeinflussung des Hüllrohrwerkstoffes zur Folge haben
- einen möglichst geringen "Durchhang" des Hüllrohres nach "innen" zeigen ($\leq 0,03$ mm).

Mit zunehmender Zahl der Schweißversuche hat sich gezeigt, wie schwer diese Forderungen zu erfüllen waren und wie sehr Änderungen an der Schweißanlage (z.B. Einbau des Schweißkopfes in die KuS, Änderung der Länge der Versorgungskabel für die Schweißungen in der HZ) und die Änderung der TE-Ausführung (Version A und B) die Schweißergebnisse beeinflussten. Auch die Netzspannungsschwankungen - die nach Angaben des Schweißanlagenherstellers durch das Steuergerät selbst kompensiert werden sollten - hatten so großen Einfluß auf das Schweißergebnis, daß ein Spannungskonstanthalter zwischengeschaltet und dessen Ausgangsspannung von einem Linienschreiber kontinuierlich aufgezeichnet wurde. Ein nachgeschalteter Trafo stellte die Arbeitsspannung 380 V her.

Ausgehend von den empirisch ermittelten Einstelldaten die optisch gute Schweißungen sowie die gewünschten Werte für die Zugfestigkeit und den Durchhang erbrachten, konnten in der folgenden fortgeschrittenen Versuchsstufe die entscheidenden Schweiß-Parameter nochmals variiert werden:

- Leistungseinstellung am Potentiometer (Stromstärke)
- Periodenzahl
- Sekundärspannung
- Anpreßkraft.

Bei jeder gewählten Einstellung wurden die Schweißungen visuell (Lupe, Mikroskop) beurteilt und die Zugfestigkeit sowie der Durchgang geprüft. Einige der als "optimal" empfundenen Schweißungen wurden zur weitergehenden Auswertung metallografisch untersucht. Als Beispiel zeigen die Abb. 23 bis 26 metallografische Schliffe von Schweißstellen der TE-Versionen A bzw. B. In beiden Fällen ergaben sich eutektische Schichtdicken von 1 - 3 μm , wobei aus Abb. 25 ersichtlich ist, daß sich Reste der eutektischen Schmelze seitlich außerhalb der Schweißverbindung angelagert haben. Durch die Schweißung findet im Hüllmaterial eine Kornvergrößerung statt. Das Kornwachstum breitet sich in Form einer Kugelkalotte unterhalb der eigentlichen Verbindungsstelle aus. In Form und Größe ist das Kornwachstum für beide TE-Anschweißarten identisch. Bei TE-Version B bildet sich beim Schweißen eine kleine Mulde.

Die letztlich gewählten Einstellwerte für die Schweißanlage sowie die erzielten Meßergebnisse sind für vorbestrahlte Brennstäbe wie auch für Brennstabsimulatoren zusammengefaßt in den Schweißdatenprotokollen im Anhang.

Über Probleme, die beim Widerstands-Punktschweißen auftreten, wird berichtet in /29/ bis /37/.

12.8 Zusammenfassung der Schweißergebnisse

Um eine Übersicht über die wichtigsten Meßergebnisse bei den vorgenannten Schweißungen zu erhalten, ist in Tabelle 8 für jeden Brennstab die Bandbreite der bei den jeweils 6 Schweißungen erhaltenen Meßwerte einschließlich sogenannter Ausreißer aufgelistet. Erfasst sind in der Reihenfolge der Montage alle vorbestrahlten Brennstäbe sowie einige Brennstabsimulatoren.

Tabelle 8: Meßergebnisse bei TE-Schweißungen

Versuch	Stab Nr.	Abbrand	TE-Aus- führg.	R _{vor}	R _{nach}	J	Bemer- kungen
		Gwd/t		m Ω	mΩ	Ws	
F 1	37	20	A	34 - 68	1,1 - 1,7	55,9-60,1	
F 2	38	20	A	35 - 70	1,2 - 1,5	60,2-63,2	
F 3	39	20	A	28 - 65	1,0 - 1,3	60,0-61,2	
F 4	40	20	A	32 - 67	1,2 - 1,4	59,6-61,1	
F 5	43	20	A	47 - 66	1,0 - 1,3	58,6-61,8	
G 1.1	3	35	A	57 - 68	1,6 - 2,6	52,1-54,8	
G 1.2	4	35	A	45 - 70	2,0 - 3,1	57,3-59,6	
G 1.3	5	35	A	28 - 70	1,8 - 2,5	57,7-59,5	
G 1.4	7	35	A	45 - 60	1,6 - 2,3	57,4-59,9	
G 1.5	9	35	B	44 - 66	1,4 - 2,0	35,5-37,4	
G 2.1	35	35	B	36 - 68	1,3 - 1,5	41,7-43,3	
G 2.2	36	35	B	45 - 72	1,2 - 1,5	38,6-41,3	
G 3.1	12	35	B	54 - 68	1,2 - 1,4	41,2-41,9	
G 3.2	11	35	B	46 - 76	1,3 - 2,5	40,3-41,5	
G 3.3	10	35	B	46 - 72	1,2 - 1,5	39,8-41,2	
C 1	56	2,5	B	15 - 34	0,8 - 1,3	36,5-44,6	
C 2	57	2,5	B	12 - 59	1,0 - 1,4	42,8-44,3	
C 3	59	2,5	B	27 - 43	1,0 - 1,4	42,2-43,8	
C 4	60	2,5	B	29 - 48	1,1 - 1,3	41,9-43,2	
C 5	63	2,5	B	35 - 64	1,1 - 1,4	41,6-42,9	
E 1	44	8	B	42 - 62	1,4 - 1,5	41,0-42,4	
E 2	45	8	B	60 - 79	1,2 - 1,6	42,2-42,7	
E 3	46	8	B	58 - 67	1,3 - 1,4	42,0-43,6	
E 4	47	8	B	52 - 68	1,4 - 1,6	42,2-43,5	
E 5	48	8	B	60 - 70	1,3 - 1,7	41,6-44,0	
BSS 21	-	-	B	4,8-15	1,4 - 2,0	38,3-39,9	} nicht vor- bestrahlt
BSS 22	-	-	B	5 - 9	1,4 - 1,5	38,2-41,5	
BSS 23	-	-	B	3,4-6,6	1,3 - 1,5	39,1-41,4	
BSS 24	-	-	B	3,1-6,8	1,3 - 1,5	37,9-38,9	
BSS 25	-	-	B	2,7-12,5	1,3 - 1,5	38,2-39,3	
BSS 26	-	-	B	8,5-15	1,5 - 1,6	36,9-40,9	
BSS 28	-	-	B	4,0-14	1,4 - 1,6	36,9-40,2	

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- TE der Version B (Abb. 3) können - unter sonst gleichen Voraussetzungen - mit um ca. 30 % geringerer Energie geschweißt werden, als die TE der Version A.
- Bei Schweißungen an vorbestrahlten Prüflingen mußte mit etwas höherer Energie (ca. 5 - 10 %) gearbeitet werden, als bei nicht vorbestrahlten Prüflingen (Tabelle 8:BSS).
- Die bei der Vorbestrahlung der Brennstäbe gebildete Oxidschicht erlaubte das Schweißen, ohne das in Kapitel 12.5 beschriebene "Aufreißen" dieser Schicht.

Es hat sich jedoch als günstig erwiesen, bei angelegten Schweißelektroden durch eine Drehbewegung des Prüflings von ca. 2° bis 5° ein "Scheuern" zwischen Prüfling und den anliegenden Teilen herbeizuführen, was in der überwiegenden Anzahl aller Fälle zu einer wesentlichen Reduzierung des Übergangswiderstandes führte (siehe Anhang). Dies wiederum wirkt sich positiv auf die Reproduzierbarkeit der Schweißungen aus.

- Das Streuband der gemessenen Schweißenergie bezogen auf die jeweils sechs TE an einem Prüfling liegt - von wenigen Ausreißern abgesehen - in der Größenordnung von 5 % des jeweiligen Maximalwertes.
- Das Streuband der gemessenen Schweißenergie (unterteilt nach TE-Version A und B) über alle vorbestrahlten Prüflinge (180 Schweißungen) liegt bei ca. 10 %, von ebenfalls wenigen Ausreißern abgesehen.
- Von ca. 240 Schweißungen, die an Brennstäben durchgeführt wurden, führte eine (bei der ersten Montage in der Serie der nicht vorbestrahlten Nuklearstäbe) zu einem Einbrand am Hüllrohr.

Literatur:

- /1/ Karb, E.; Sepold, L.:
In-pile-Experimente zur Untersuchung des Brennstabver-
sagens. KfK 2101 (1974), S. 94 - 112

- /2/ Karb, E.:
Ergebnisse von In-pile-Experimenten im FR2 zum Brenn-
stabverhalten bei Kühlmittelverluststörfällen
KfK 2570 (Dez. 1977), S. 195 - 203

- /3/ M. Hansen, K. Anderko: Constitution of Binary Alloys.
Mc. Graw-Hill Book Company, New York (1958)

- /4/ R.P. Elliot: Constitution of Bin. Alloys, First Supple-
ment. Mc Graw-Hill Book Company, New York (1965)

- /5/ F.A. Shunk: Constitution of Binary Alloys, Second
Supplement. Mc. Graw-Hill Book Company, New York (1969)

- /6/ W. Scheibe: Untersuchung über die Beeinflussung des Auf-
tretens spröder Phasen an Schweißverbindungen zwischen
verschiedenartigen Werkstoffen nach dem Elektronen-
strahlschweißverfahren. KfK-Bericht 736 (1968)

- /7/ W. Scheibe: Das Verschweißen unterschiedlicher Werkstoffe,
bei denen nach den Zustandsdiagrammen intermetallische
Phasen auftreten. DVS-Berichte 4 (1968)

- /8/ W. Scheibe: Die Beeinflussung intermetallischer Phasen
beim Elektronenstrahlschweißen von dickeren Blechen und
runden Querschnitten aus verschiedenartigen Werkstoffen
sowie deren Einsatz bei höheren Temperaturen,
DVS-Berichte 5 (1969)

- /9/ Welding Handbook, 6th Edition, Section 4:
"Metals and their Weldability"
American Welding Society (1972)

- /10/ VDI-Handbuch "Technische Temperaturmessung", Nov. 1975

- /11/ VDI-Bericht Nr. 198, "Technische Temperaturmessung", 1973

- /12/ Profos: Handbuch der industriellen Meßtechnik,
Vulkan-Verlag, Essen

- /13/ W.F. Roeser, A.I. Dahl: Reference Tables for Iron-
Constantan and Copper-Constantan Thermocouples.
NBS Res.Pap. 1080 (1938) 337 - 355.

- /14/ A.I. Dahl: Stability of Base-Metal Thermocouples in Air
from 800⁰ to 2,200⁰F.
NBS Res.Pap. 1278 (1940) 205 - 224

- /15/ E. Samal: Genauigkeit betriebsmäßiger Temperaturmessungen
mit Thermoelementen. ETZ-B 8 (1956) 197 - 202

- /16/ H.Thomas: Widerstandsanomalien im Legierungssystem
Nickel-Chrom-Eisen. Metall 10 (1956) 95 - 98.

- /17/ H. Thomas: Gesichtspunkte bei der Auswahl und Verwendung
elektrischer Temperaturfühler.
Härtertechnik und Wärmebehandlung 2 (1957)

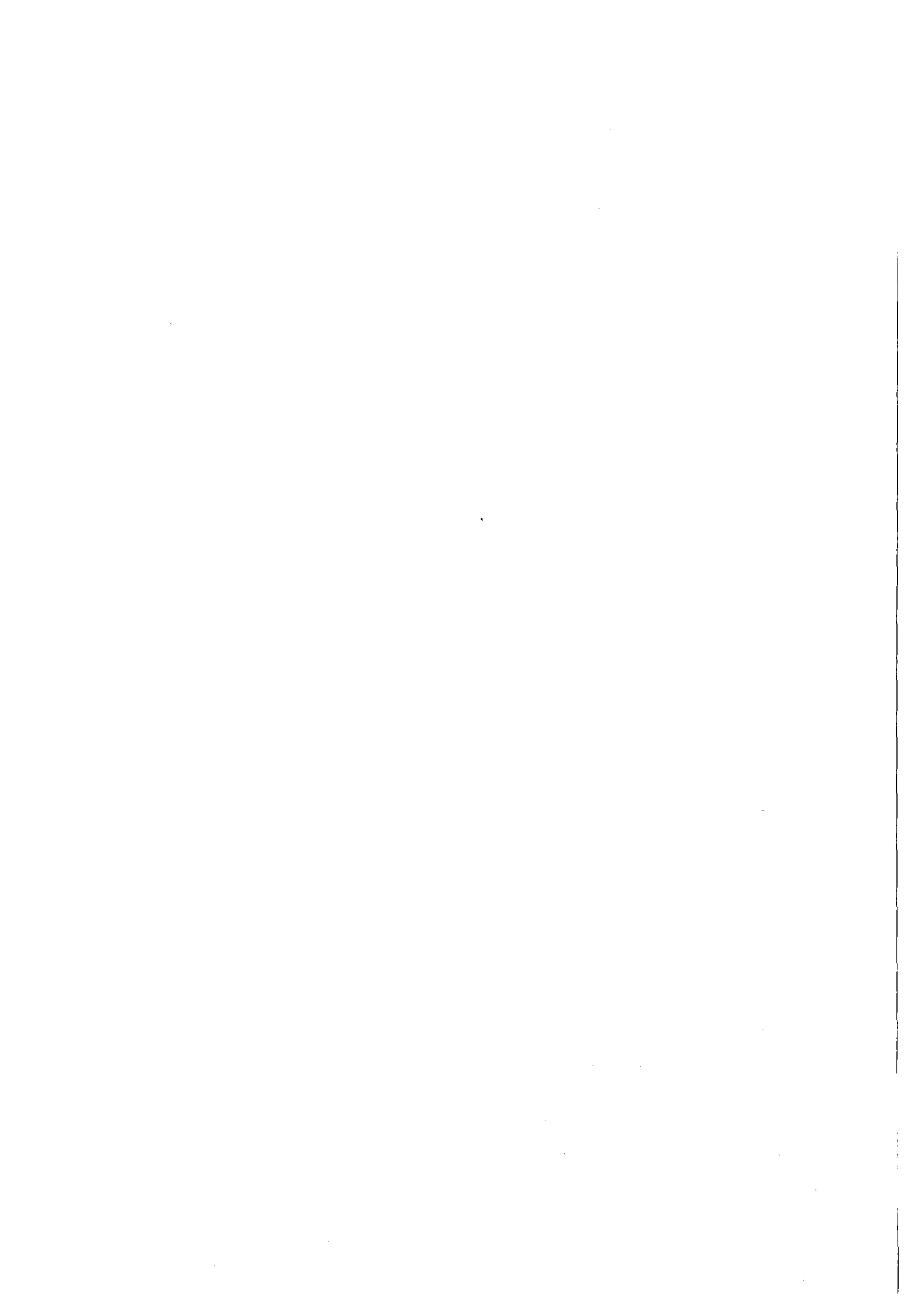
- /18/ H. Thomas: Über die elektrischen Eigenschaften technischer
Nickel-Chrom-Legierungen.
Z.Metallkunde 52 (1961) 813 - 816

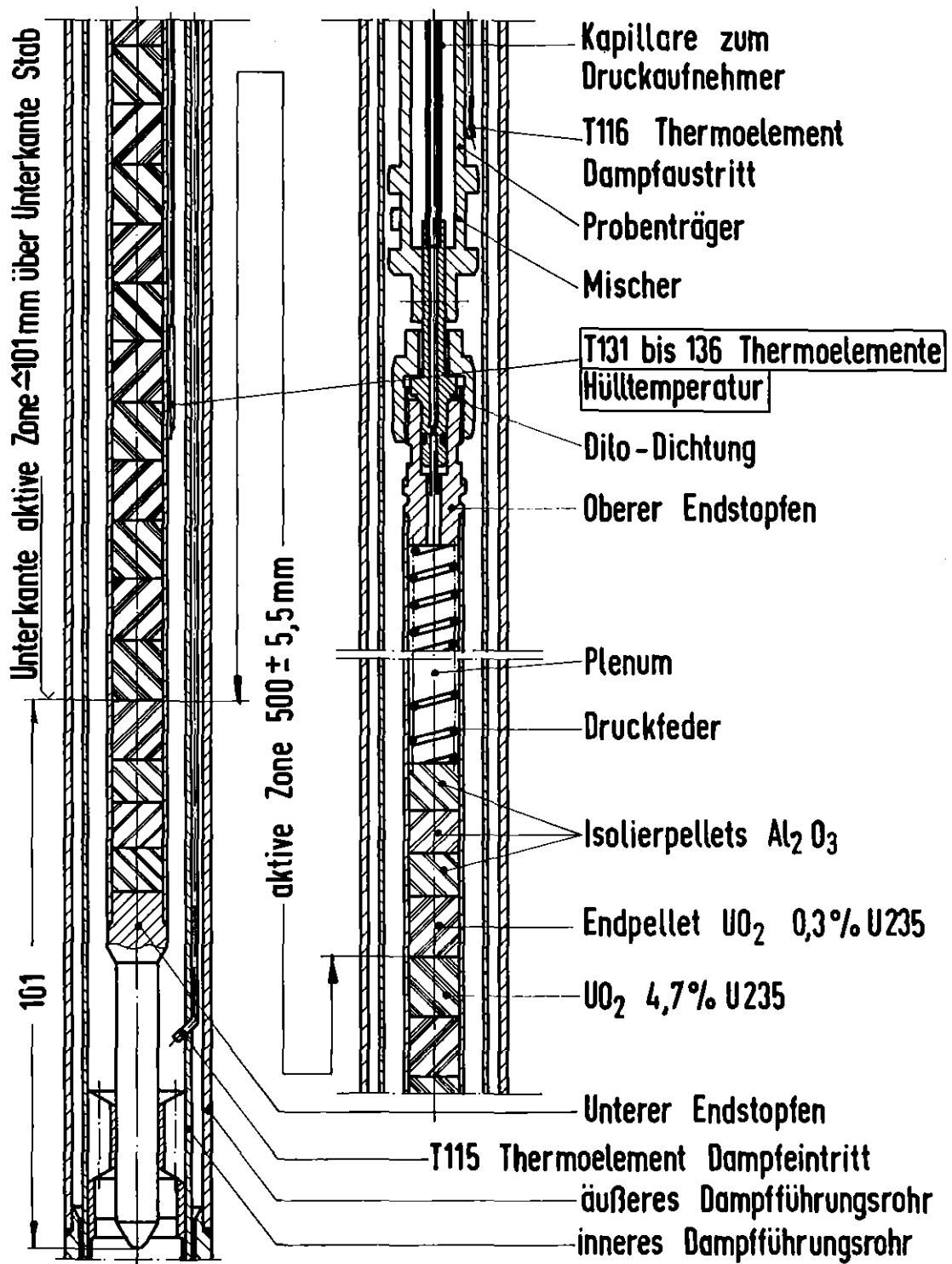
- /19/ N.A. Burley, R.G. Ackland: The Stability of the Thermo-
E.M.F./Temperature Characteristics of Nickel-Base-
Thermocouples. J.Austral.Inst.Met. 12 (1967) 23 - 31.

- /20/ K. Schweyher: Temperaturmessung und -verteilung.
Härterei-Techn.Mitt. 23 (1968) 40 - 45.
- /21/ T.G. Kollie, J.L. Horton, K.R. Carr, M.B. Herskovitz,
C.A. Mossman: Temperature Measurement Errors with Type K
(Chromel vs Alumel) Thermocouples due to Short-Ranged
Ordering in Chromel. Oak Ridge National Laboratory,
ORNL-TM-4862.
- /22/ L. Dorn, K. Lindner: Widerstands-, Strom- und Leistungs-
messung als Mittel zur Gütesicherung, Sonderdruck der
Messer Griesheim GmbH, Abt. Peco, 12/73
- /23/ Dorn, L.: Betrachtungen zur Güteüberwachung während des
Widerstandsschweißens Schw. Schn. 25, (1973), H. 1,
S. 17/20
- /24/ Becken, O.: Neuere Erkenntnisse über den Einfluß von
Schweißstrom, Elektrodenkraft und Elektrodendurchmesser
auf die Eigenschaften von Schweißpunkten unter Berück-
sichtigung von Gütegruppen. Bd. 35 der Fachbuchreihe
Schweißtechnik, S. 73/78. Deutscher Verlag für Schweiß-
technik GmbH, Düsseldorf (1962)
- /25/ Messer Griesheim GmbH (Abt. Peco):
"Steuerungen und Transformatoren für die Widerstands-
schweißtechnik"; Druckschrift 54.1001
- /26/ Messer Griesheim GmbH (Abt. Peco):
"Mikro-Schweißtechnik", Druckschrift 50.0050/1
- /27/ Messer Griesheim GmbH (Abt. Peco):
"Betriebsanweisung für Peco-Thyristor-Schweißbakter
Typ 1M/35", Druckschrift 2908.

- /28/ Messer Griesheim GmbH (Abt. Peco):
"Untersuchungen zur Schweißstrom-Steuerung und -Regelung
beim Mikroschweißen"; Sonderdruck 13/73 aus "Widerstands-
schweißen und Mikrofügeverfahren", DVS-Verlag Düsseldorf
- /29/ Pfeifer, L.: Stand und Entwicklungstendenzen des Wider-
stands-Preßschweißens, Schw. Schn. 24 (1972), H. 9,
S. 343/46
- /30/ Krause, H.J.: Messen beim Widerstandsschweißen, Bd. 58
der Fachbuchreihe Schweißtechnik S. 92-122, Deutscher
Verlag für Schweißtechnik GmbH Düsseldorf (1970)
- /31/ Steffens, H.D. und Kayser, U.: Gütekontrolle beim Wider-
standsschweißen durch Prozeßanalysen. Schw. Schn. 24
(1972) H. 7, S. 249-51
- /32/ Brunst, W.: Das elektrische Widerstandsschweißen,
Springer-Verlag Berlin/Göttingen/Heidelberg (1952), S. 59
- /33/ Krause, H.J.: Ermittlung von Einstellwerten für das
Widerstands-Punktschweißen 0,5 bis 3 mm dicker Bleche
Schw. Schn. 23 (1971) H. 7, S. 266/71
- /34/ Greenwood, J.A.: Temperatures in spot welding. Brit.
Wdg. J. 8 (1961), H. 6, S. 316/22
- /35/ Glage, W.: Hypothesen und Fakten beim Punkt- und Buckel-
schweißen verzinkter Stähle, Bd. 58 der Fachbuchreihe
Schweißtechnik, S. 52/68. Deutscher Verlag für Schweiß-
technik GmbH Düsseldorf (1970).
- /36/ Gengenbach, O.: Der Sekundärkreis von Widerstands-Schweiß-
maschinen. Bd. 35 der Fachbuchreihe Schweißtechnik,
S. 35/61. Deutscher Verlag für Schweißtechnik GmbH,
Düsseldorf (1962)

/37/ Griffiths, W.S. and Sawyer H.F.: Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen an elektrischen Bauteilen. Bd. 58 der Fachbuchreihe Schweißtechnik, S. 256/76. Deutscher Verlag für Schweißtechnik GmbH, Düsseldorf (1970).

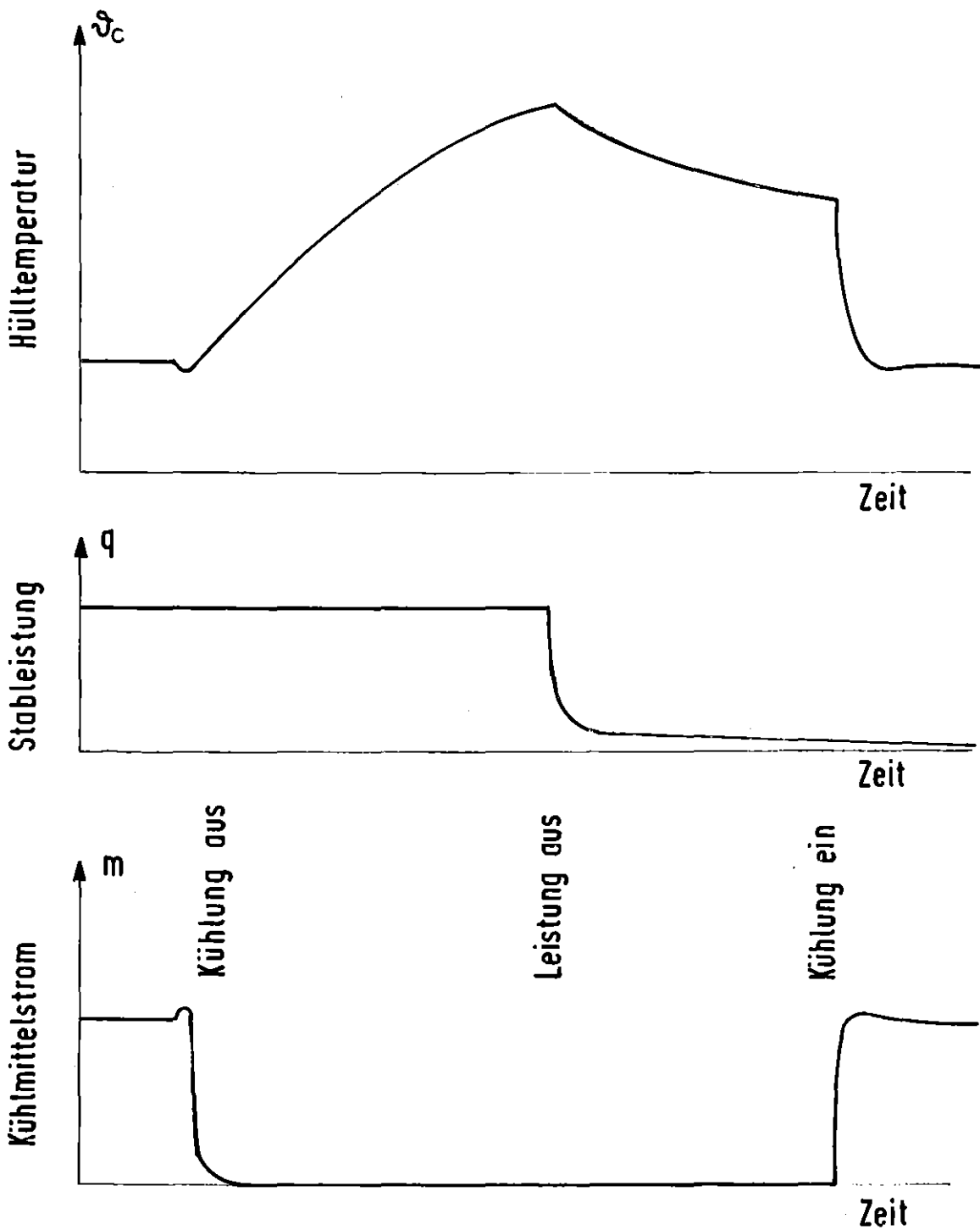




AKK RBT/IT-1977
PNS 4237-88

Nuklear-Prüfling vereinfacht

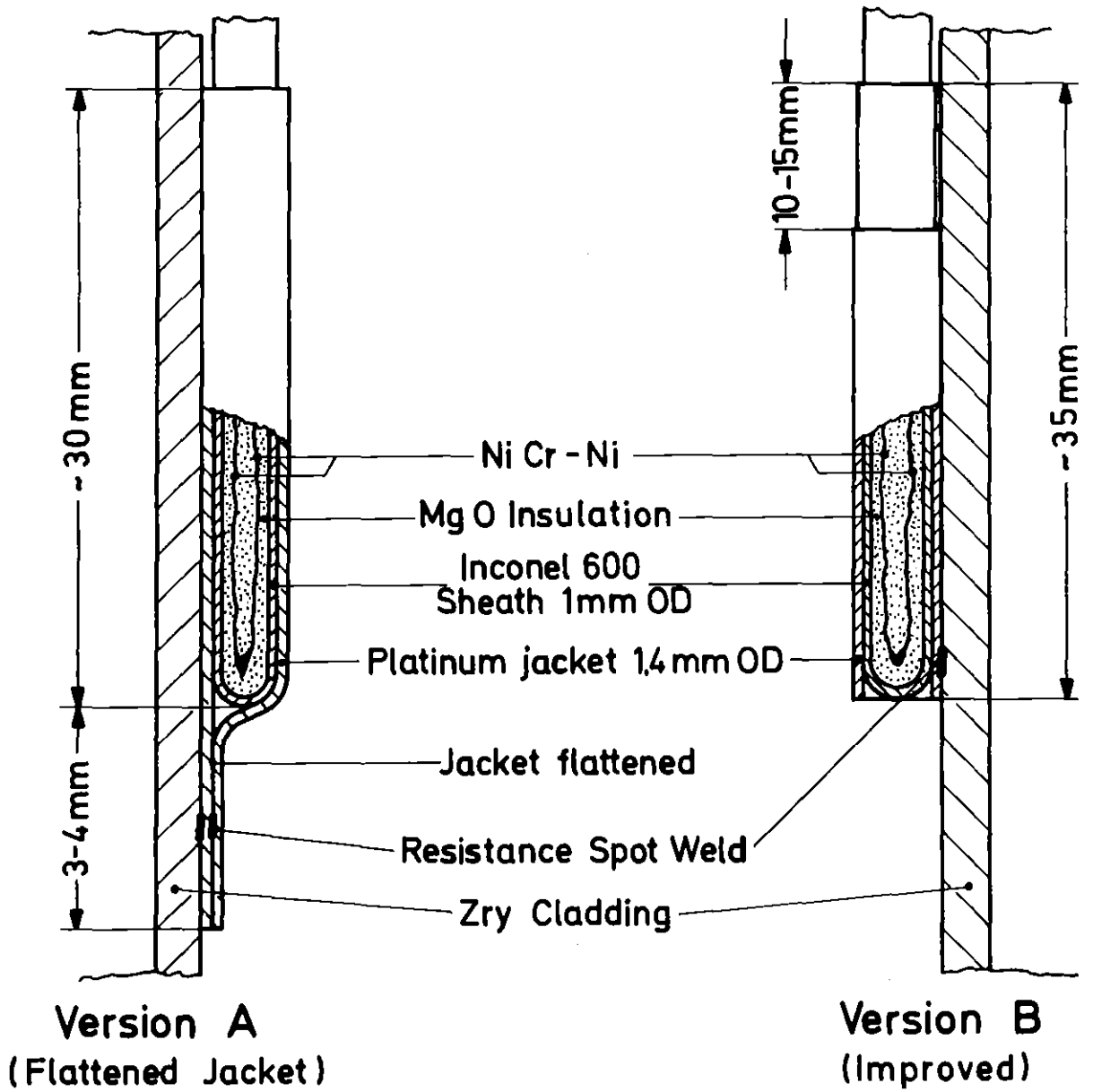
Abb.: 1



RBT/IT-1977
PNS 4237-59.1

Versuchsablauf, Schema

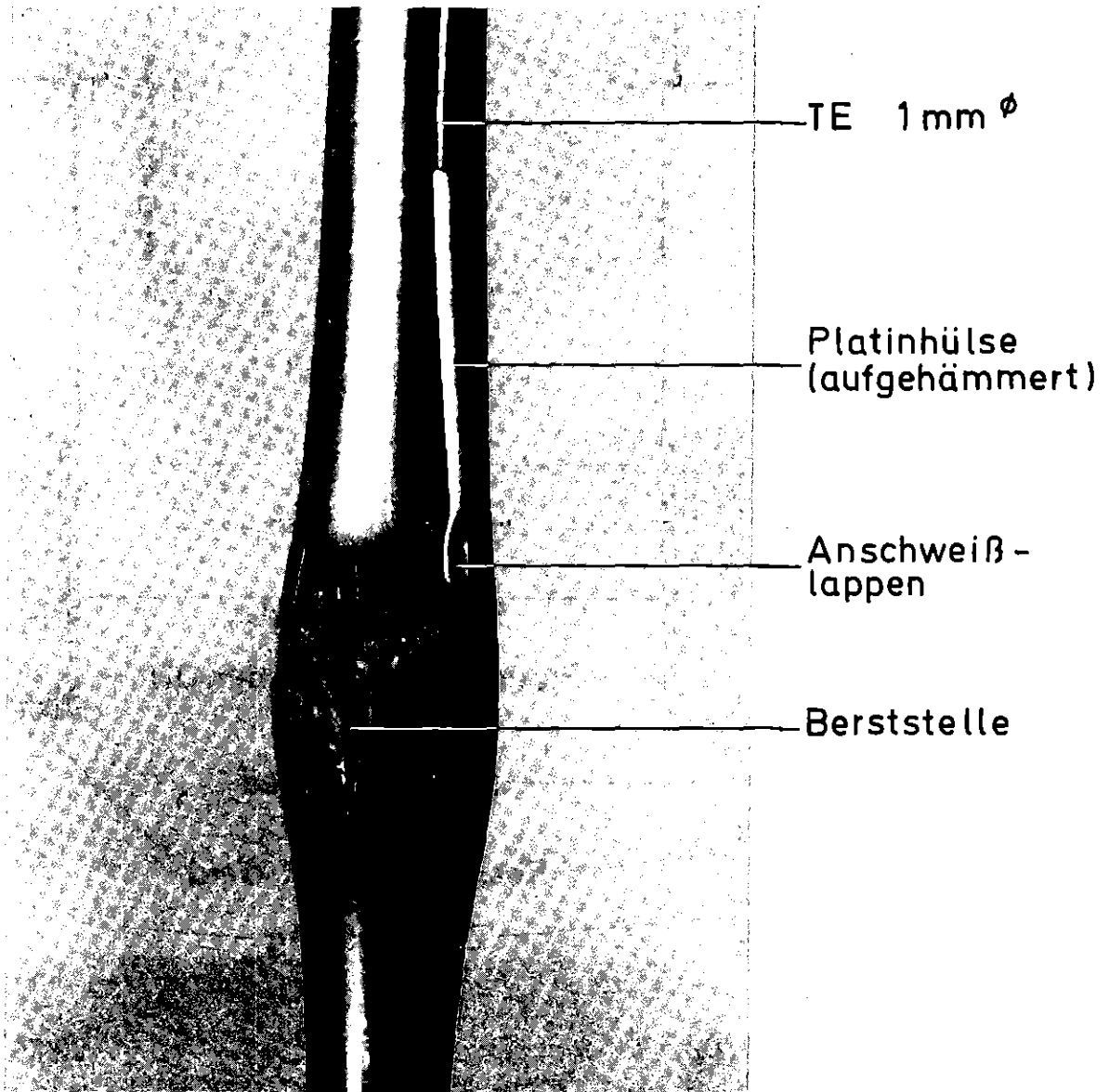
Abb.: 2



KIK
IT-80
PNS4237-300 a

FR2 In-Pile Tests:
Cladding Thermocouple (Schematic)

Abb.: 3



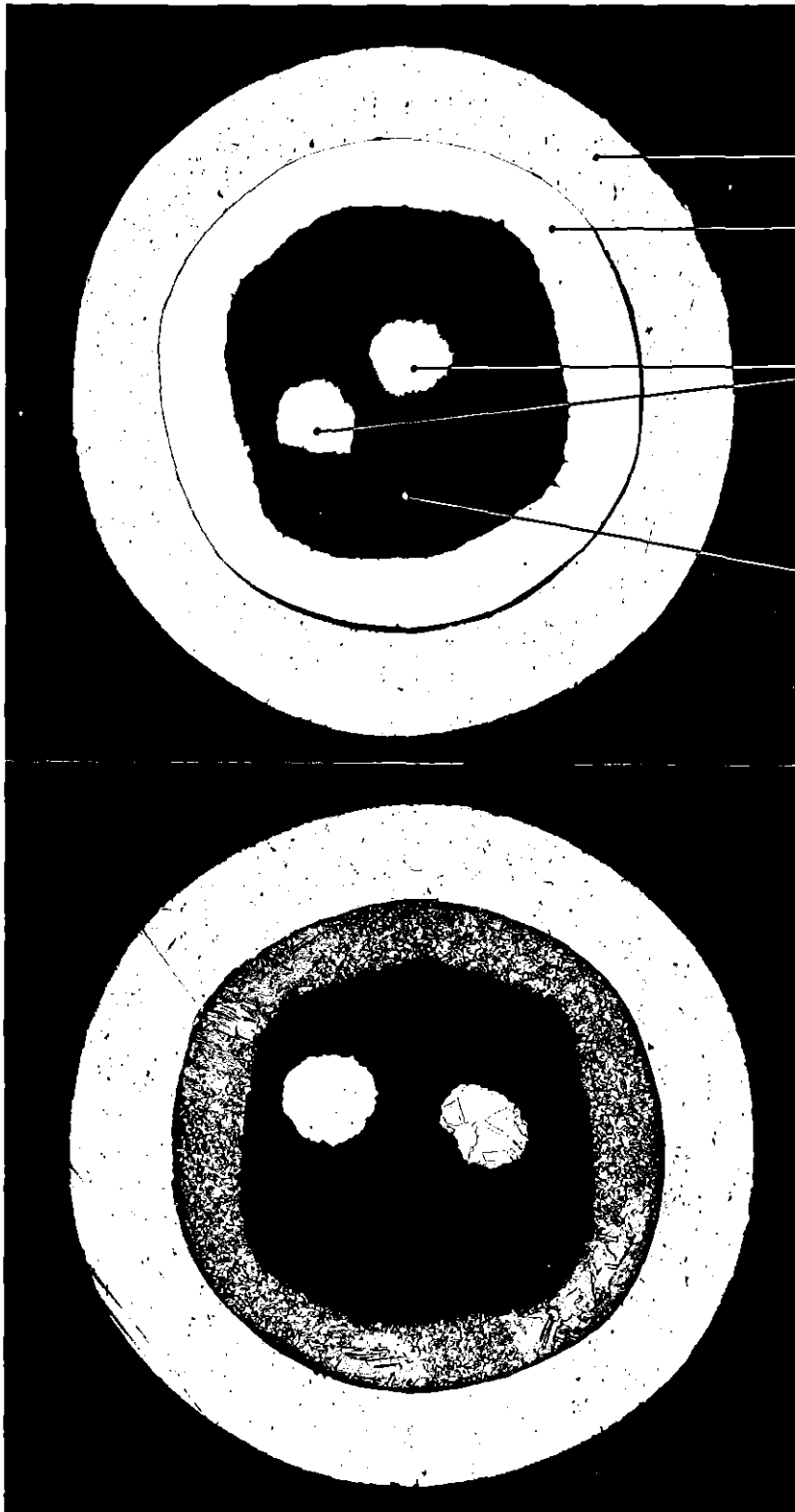
Thermoelement am Brennstab-Prüfling A 1.1

(TE - Version A)

KfK

IT 1981
PNS 4237-530

Abb.: 4



ungeätzt

Pt - Hülse

TE - Mantel
(W-Nr. 1.4571)

TE - Adern

Isolation
(MgO)

v = 75 x

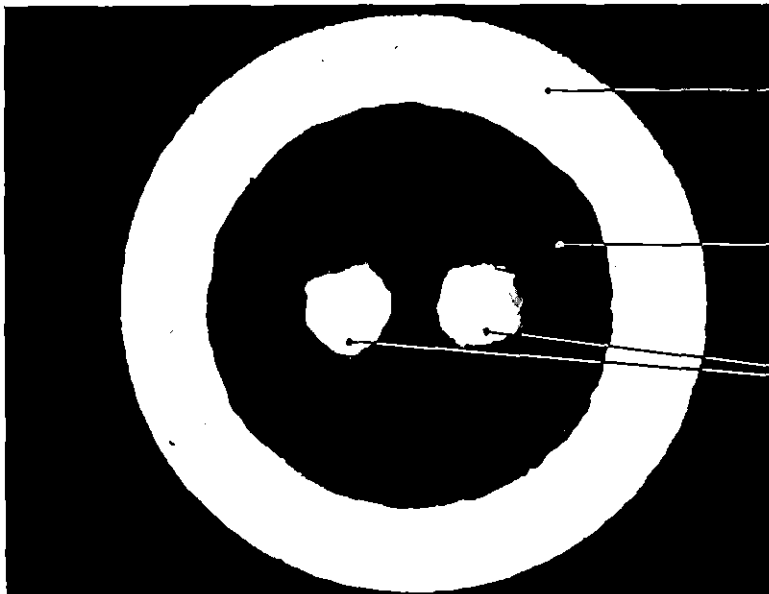
geätzt

Querschliff eines TE-Kabels
(gewalzt u. gezogen)
mit Pt - Hülse (Versuch A 1.1)

kfk

IT 1981
PNS 4237 - 531

Abb.: 5



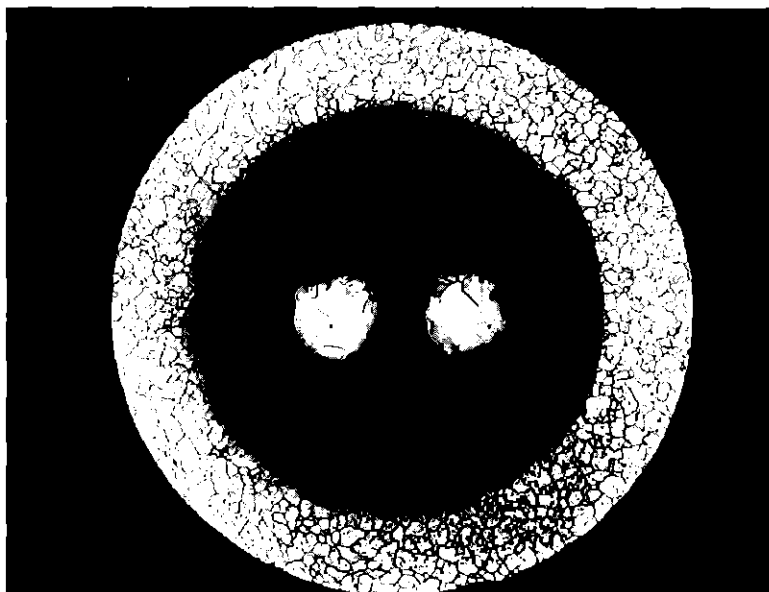
ungeätzt

TE-Mantel
(Inconel 600)

Isolation
(MgO)

TE-Adern

v = 80 x



geätzt

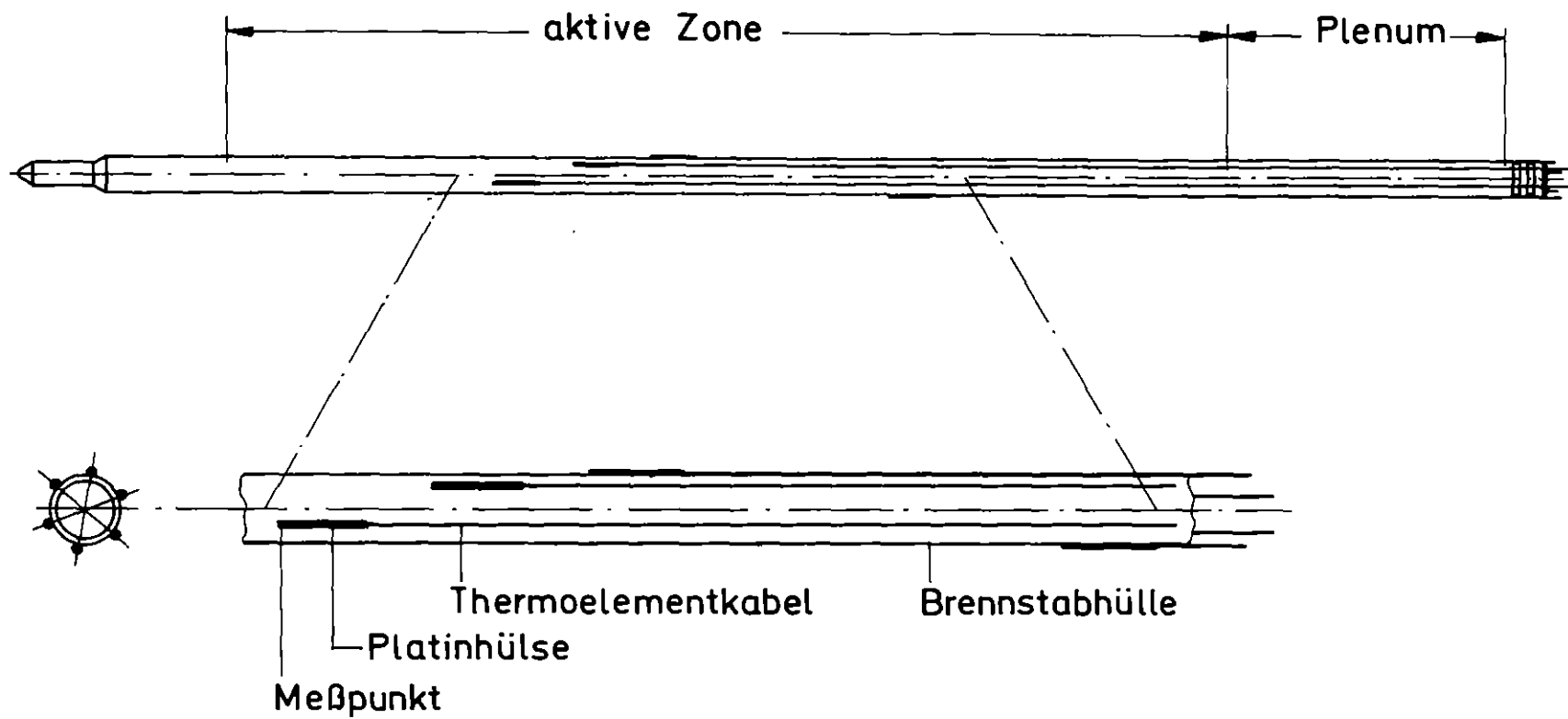
Querschliff eines TE-Kabels
(nur gezogen, ohne Pt-Hülse)

kfk

IT 1981

PNS 4237-532

Abb.: 6



Anordnung der Thermoelemente am Brennstab

Abb. 7

LANGEN- UND WINKELMESSUNG

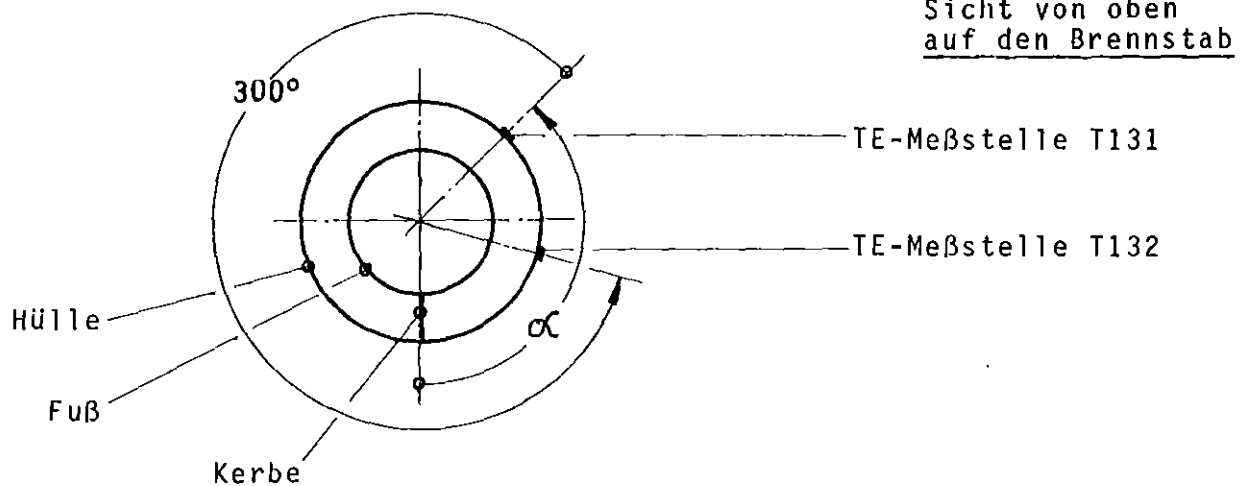
1. Stablänge über Alles

(nach Abschneiden der Schutzkappe) 973,0 mm

2. TE-Vermessung

Meßstelle	T131	T132	T133	T134	T135	T136
2.1 Maß UK Prüfl.-Fuß bis UK Platin-Lappen (mm)	299,4	349,6	399,5	449,6	499,8	550,4
2.2 Winkel α von Kerbe bis T.... (von Kerbe aus gegen Uhrzeigersinn bei Ansicht von oben)	206°	146°	86°	26°	326°	266°
2.3 Winkel von T131 bis T.... (gegen Uhrzeigersinn von T131 aus, bei Ansicht von oben)	/	300°	240°	180°	120°	60°

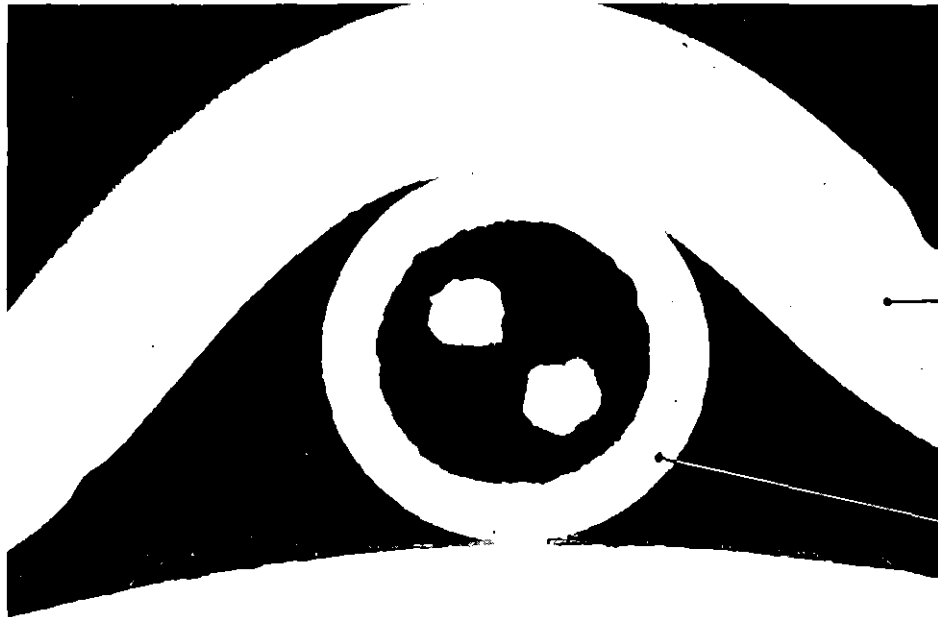
Skizze zu 2.2 und 2.3



IT 1981
PNS 4237-533

Formblatt zur Vermessung

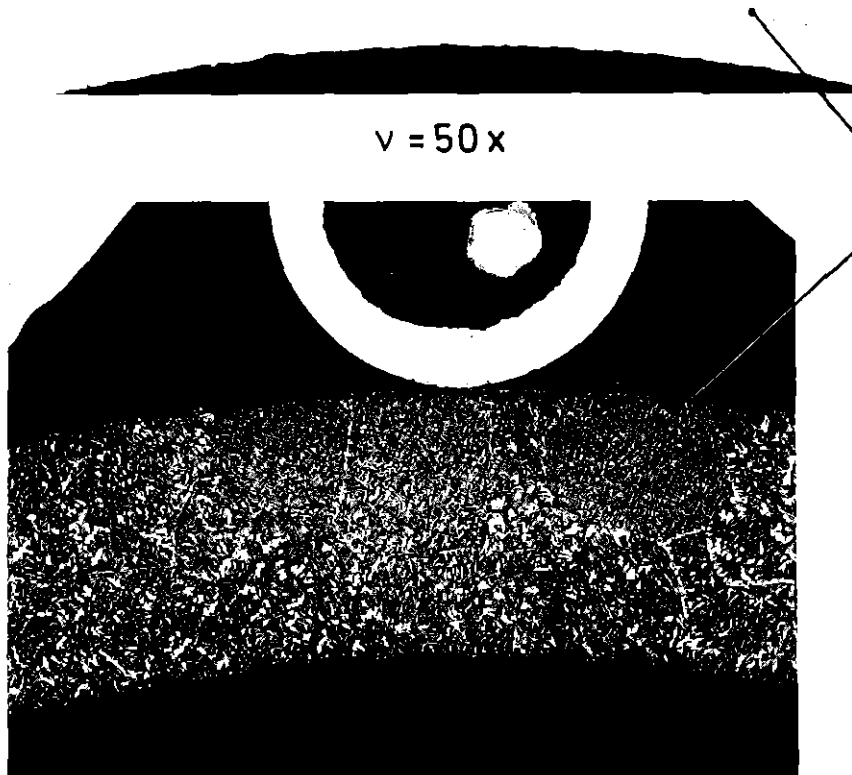
Abb.: 8



ungeätzt

Draht
(W-Nr. 1.4571)

TE-Mantel
(W-Nr. 1.4571)



v = 50 x

Zry-Hüllrohr

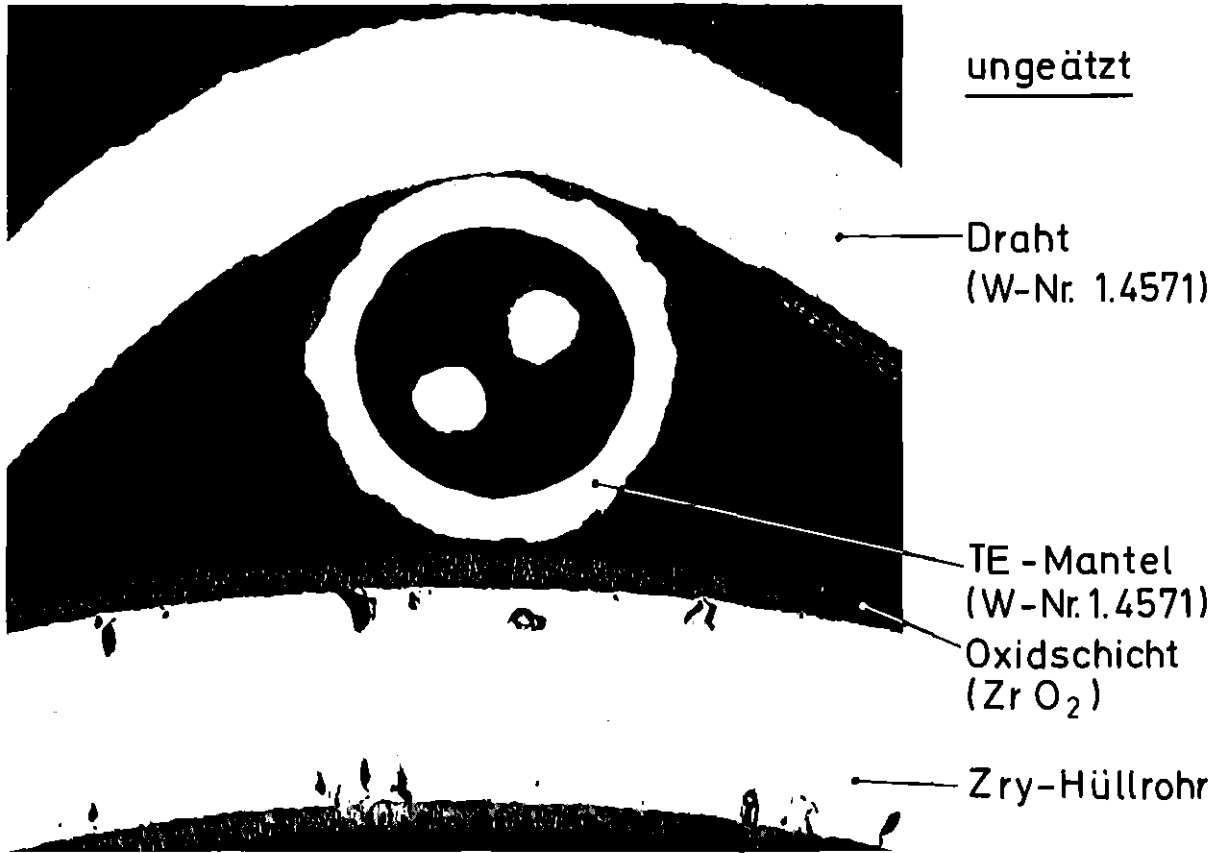
geätzt

Oxidation von Hüllrohr und
TE-Mantel in stagnierendem
Heißdampf (1000 °C, 15 min)



IT 1981
PNS 4237-534

Abb.: 9



v = 50x



Oxidation von Hüllrohr und
TE-Mantel in strömendem
Heißdampf (1200°C, 15 min)

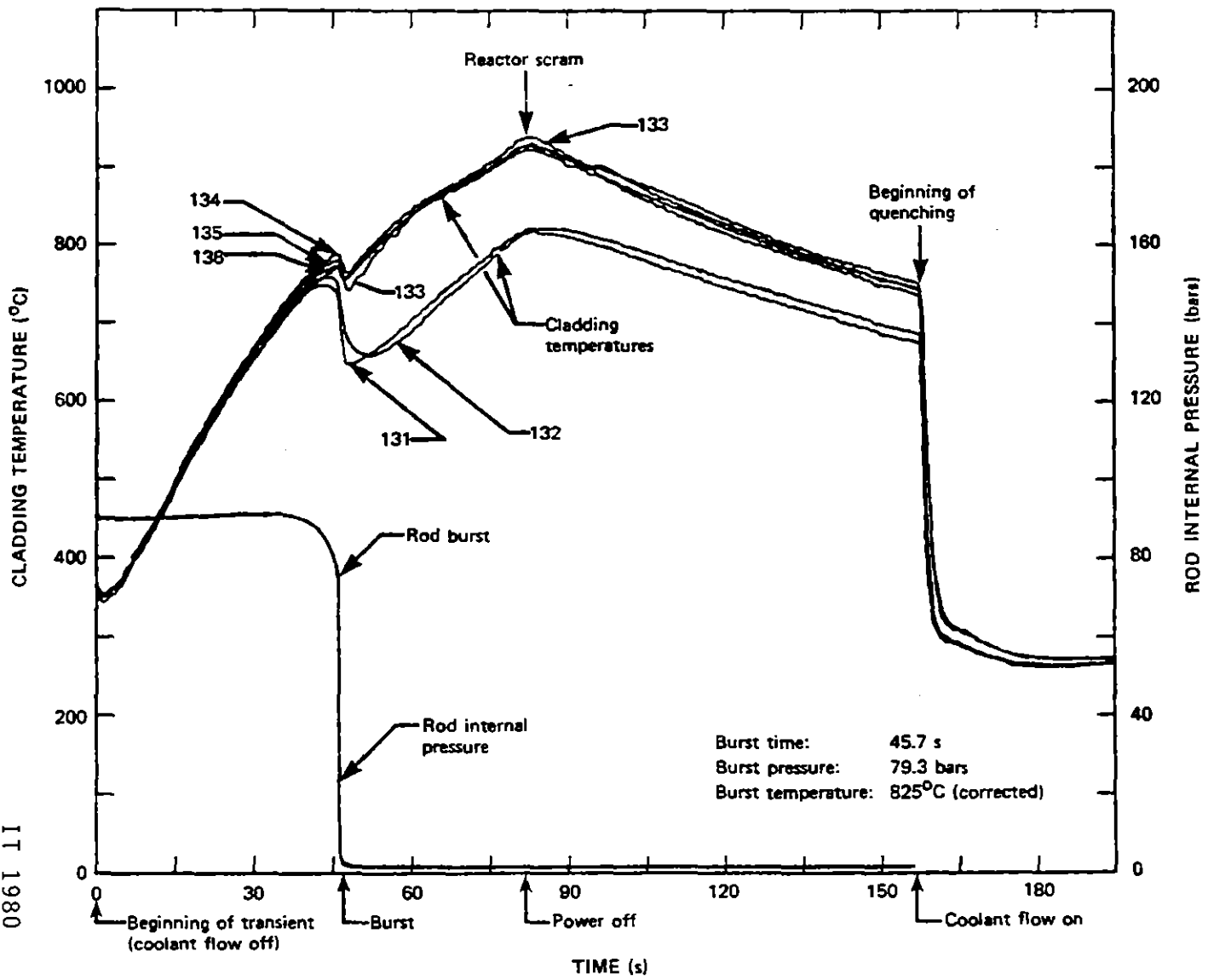
KfK

IT 1981
PNS 4237-535

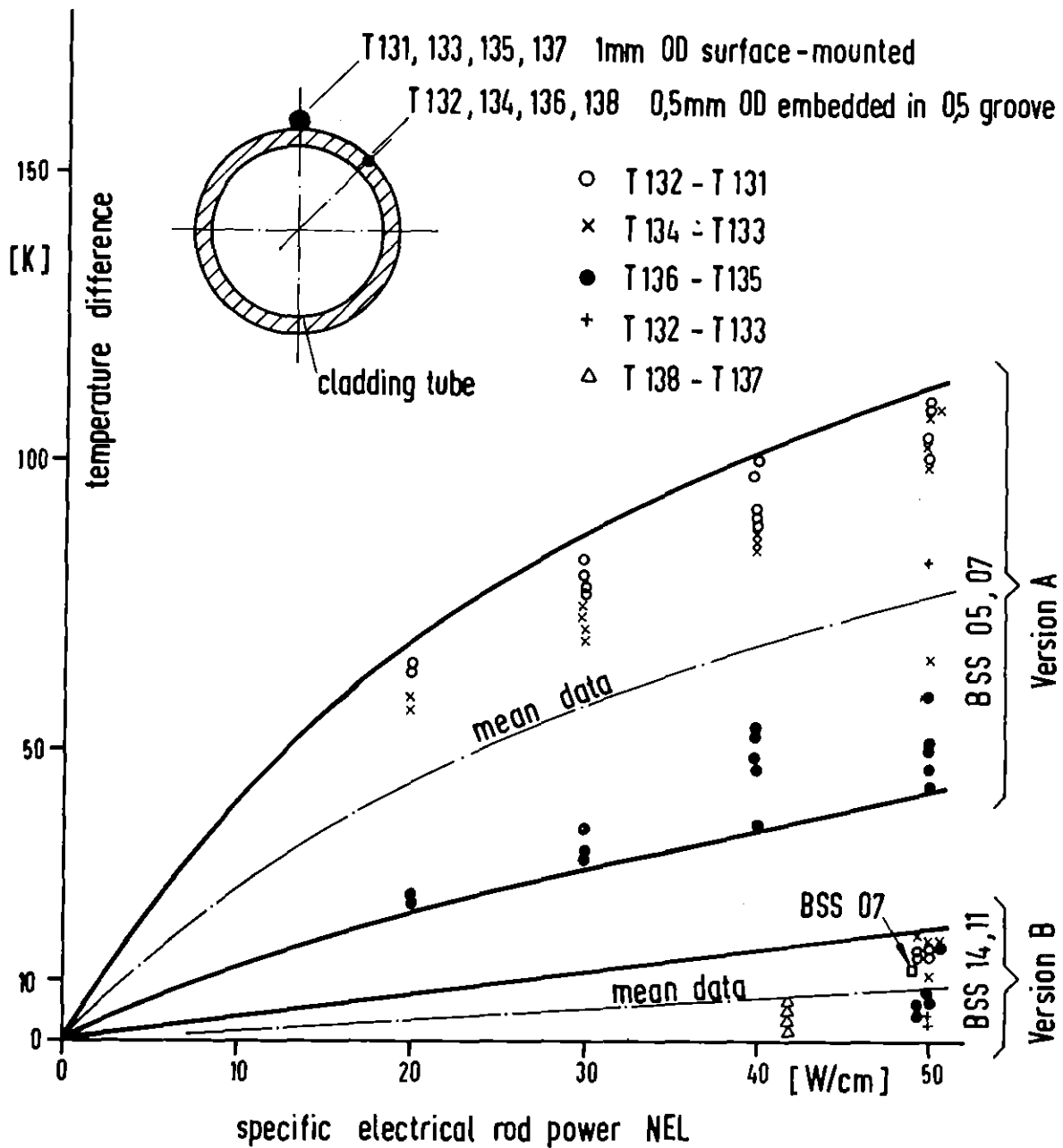
Abb. 10

Abb.: 11

IT 1980
PNS 4237-304



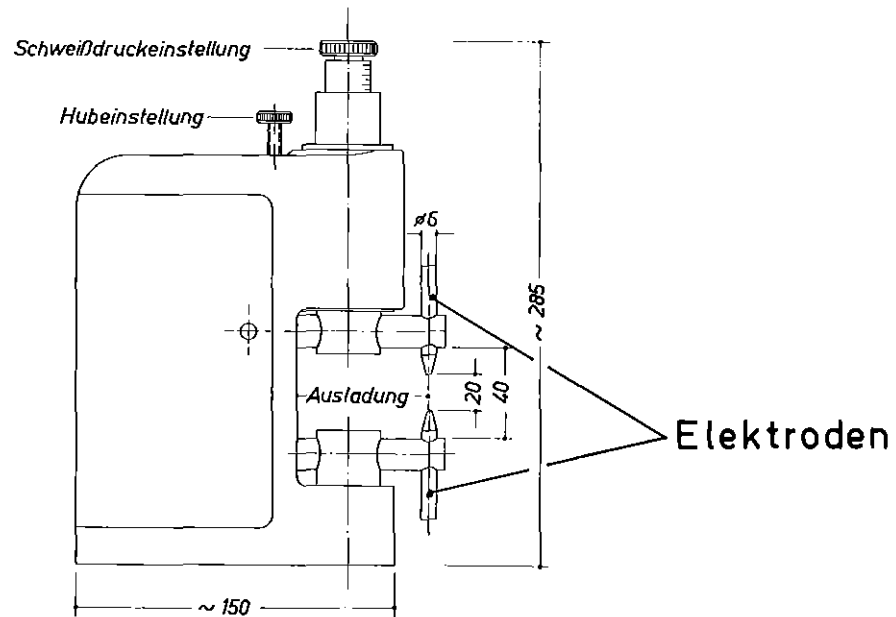
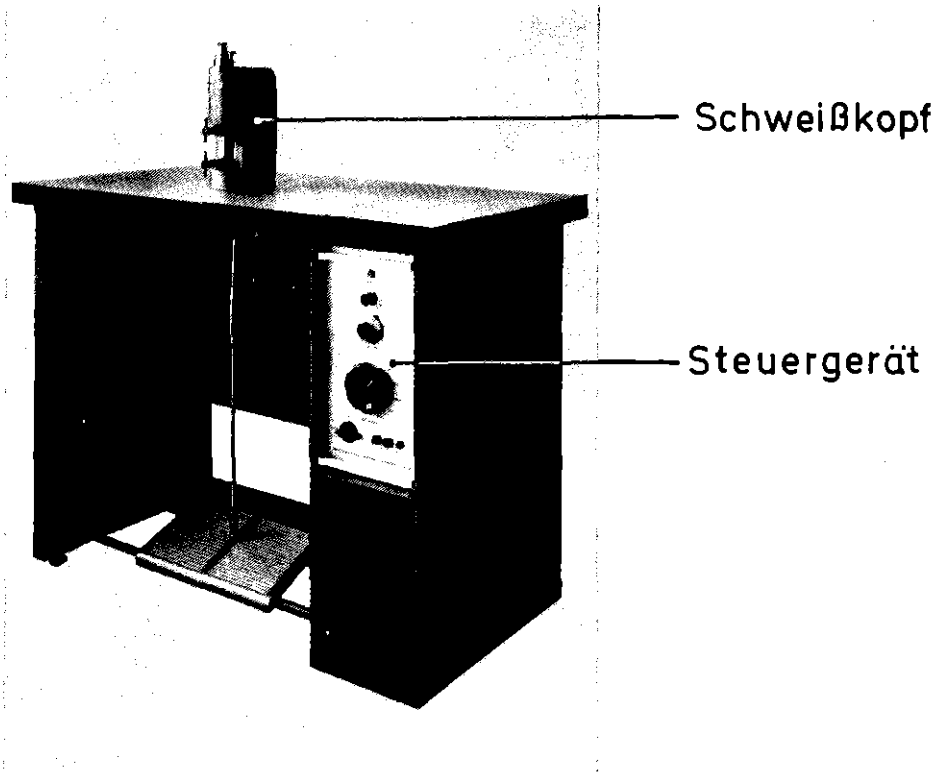
FR2 in-pile test. Typical temperature and pressure histories; measured data of test B3.1.



FR2 In-Pile Tests.

Temperature differences between embedded and surface-mounted TCs vs. rod power during the transient test

Abb: 12

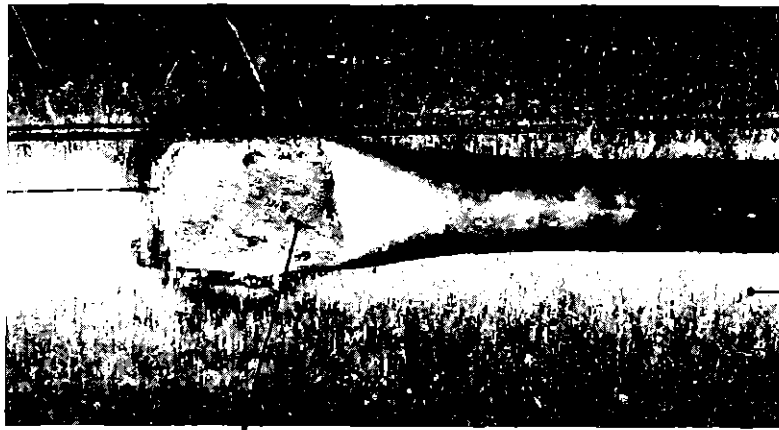


Schweißmaschine in Tischausführung



IT 1981
PNS 4237-536

Abb.: 13



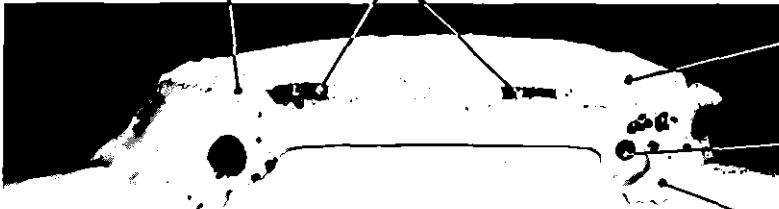
Pt 10Rh-
Röhrchen

Hüllrohr (Zry 4)

$v = 13 \times$

Schweiß-
lappen

Spalte



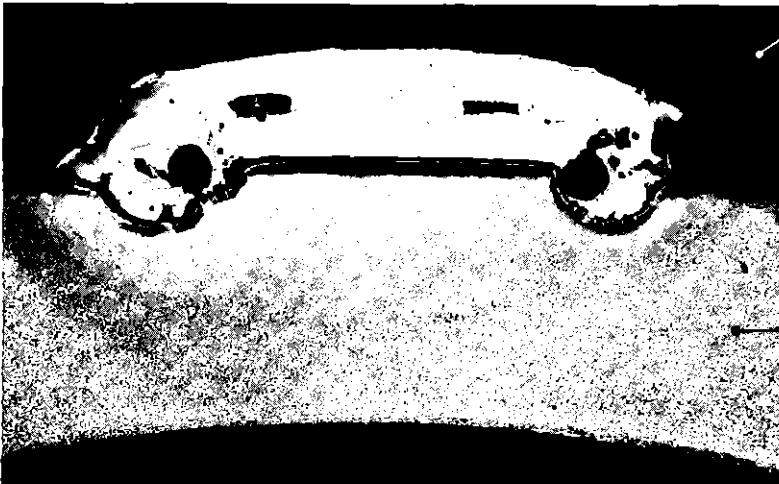
Pt 10 Rh -
Lappen

Lunker

Aufschmelzung

Hüllrohr
(Zry 4, ungeätzt)

$v = 50 \times$



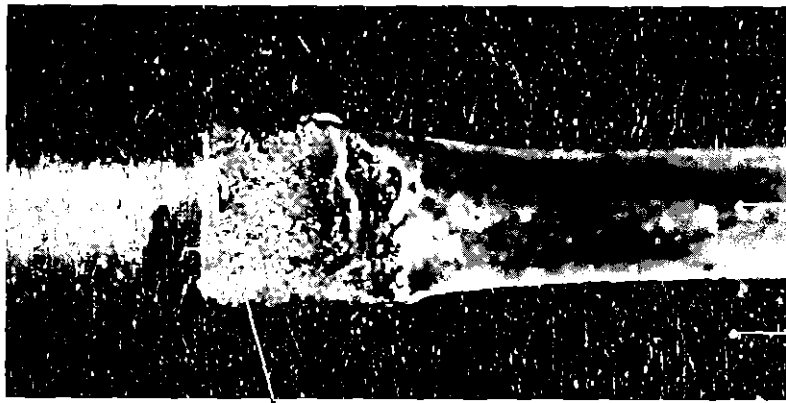
Hüllrohr
(Zry 4, geätzt)

KIK

IT 1981
PNS 4237 - 537

Erste Schweißversuche
mit Pt 10 Rh / Zry 4
(TE - Version A)

Abb.: 14

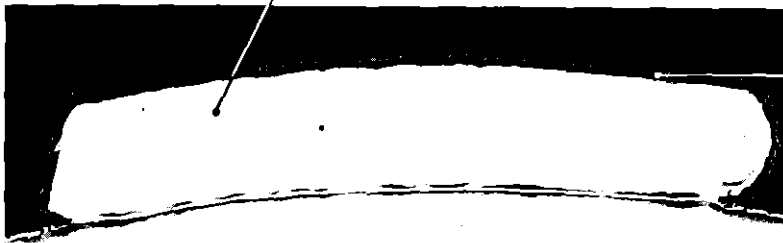


v = 13 x

Ti-Röhrchen

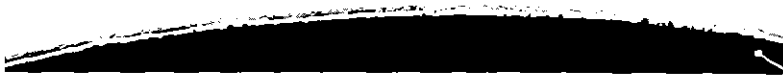
Hüllrohr (Zry 4)

Ti-Lappen

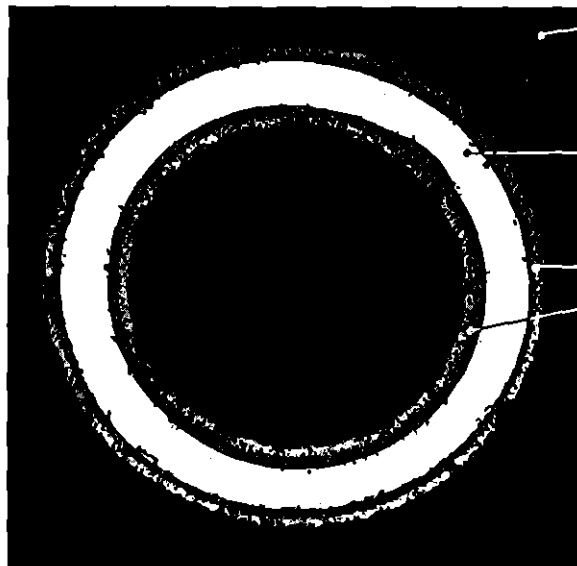


Oxidschicht

Hüllrohr
(Zry 4, ungeätzt)



v = 50 x



Ti-Röhrchen

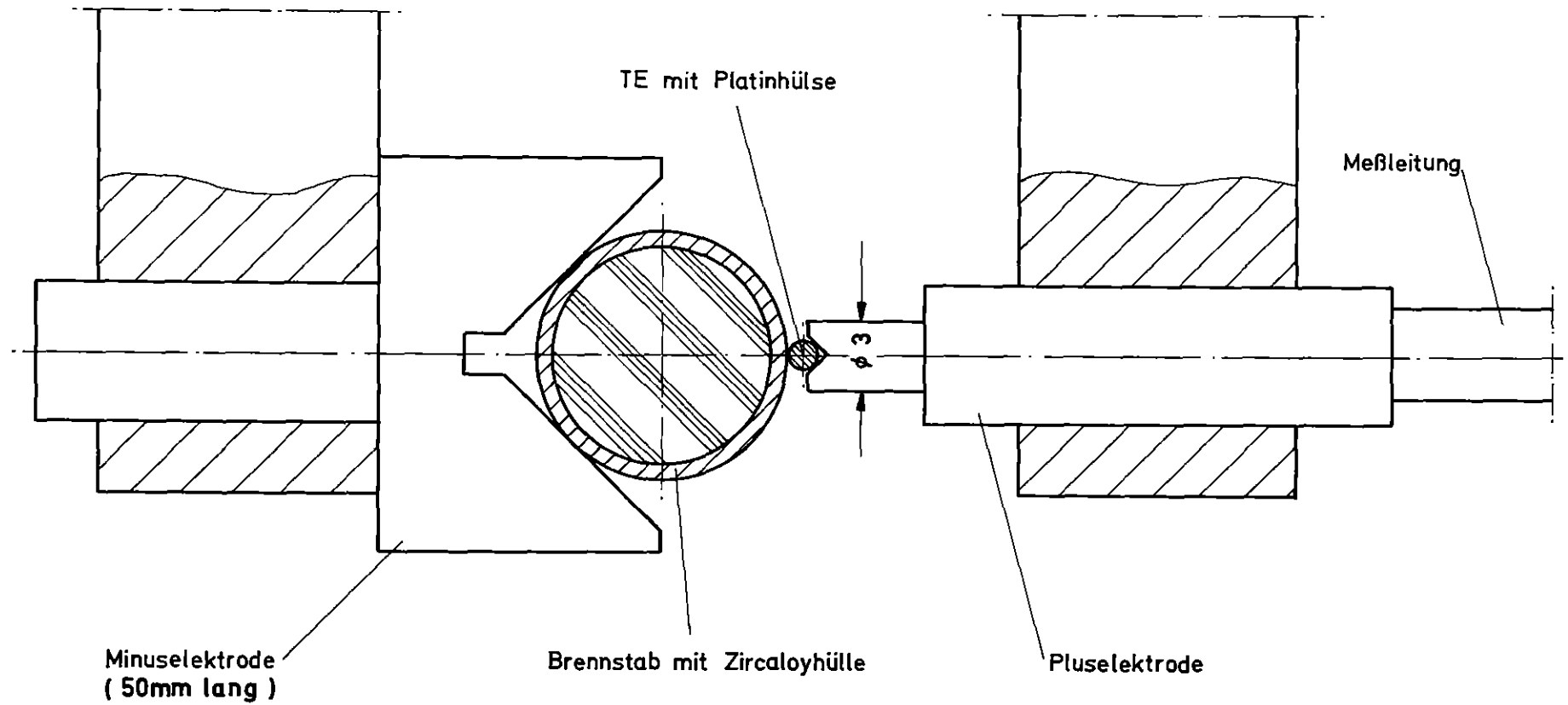
Oxidschichten

Punktschweißung Ti/Zry 4,
oxidiert in Wasserdampf
bei 950° C und 15 min.
(TE - Version A)

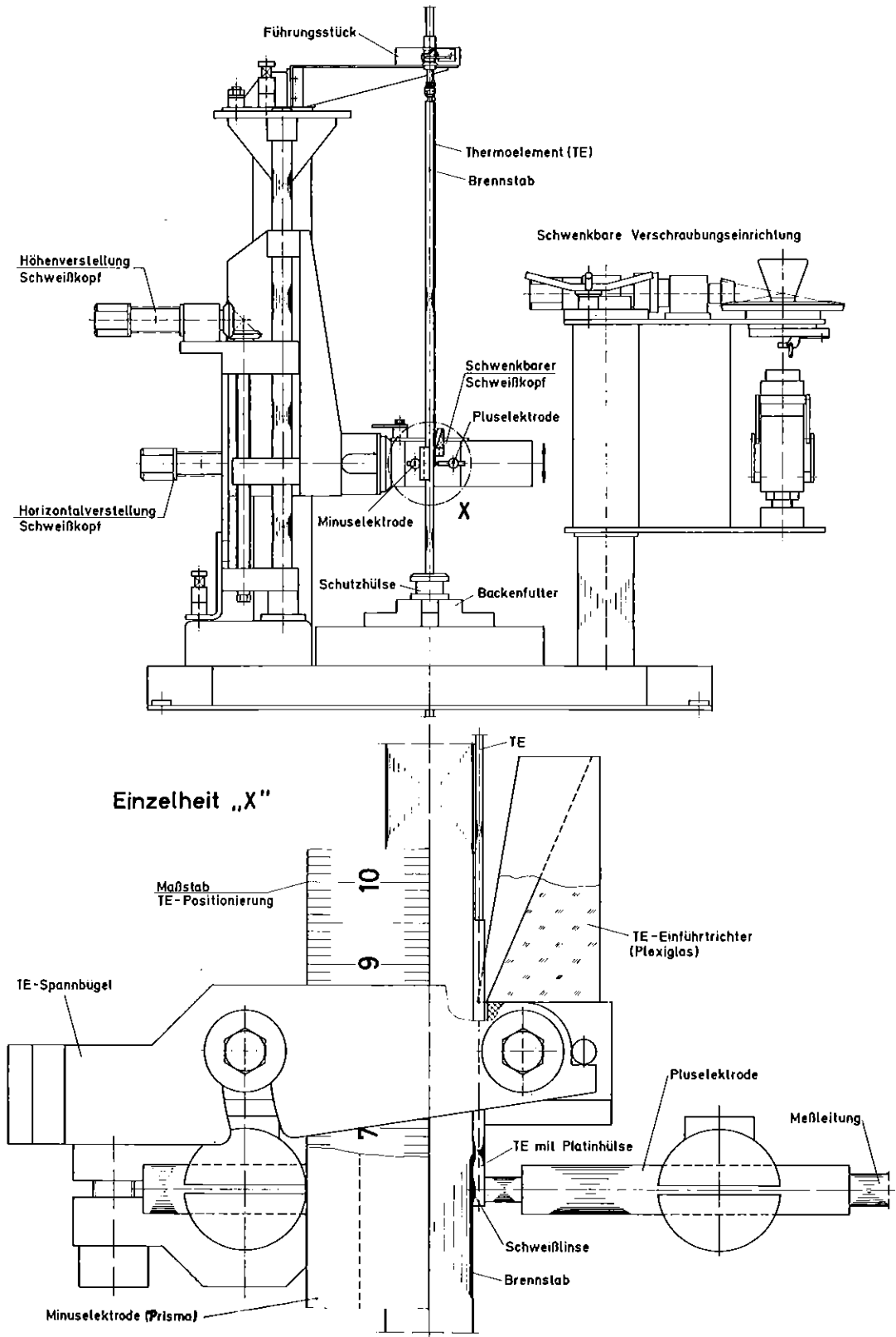
KfK

IT 1981
PNS 4237-538

Abb. : 15



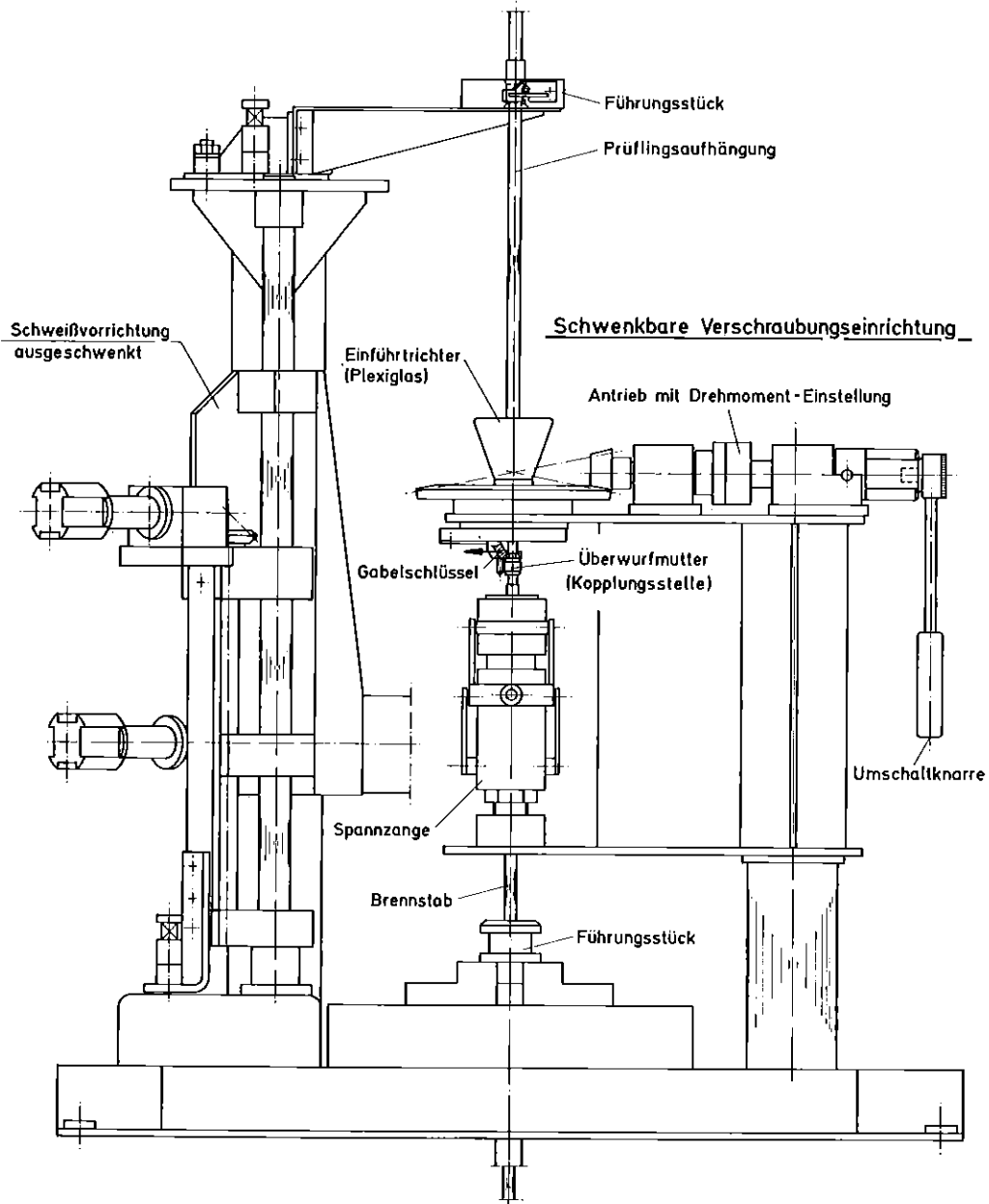
Schema: Elektroden der KuS



IT 1981
PNS 4237 - 539

Schema :
KuS in Schweißposition

Abb.: 17

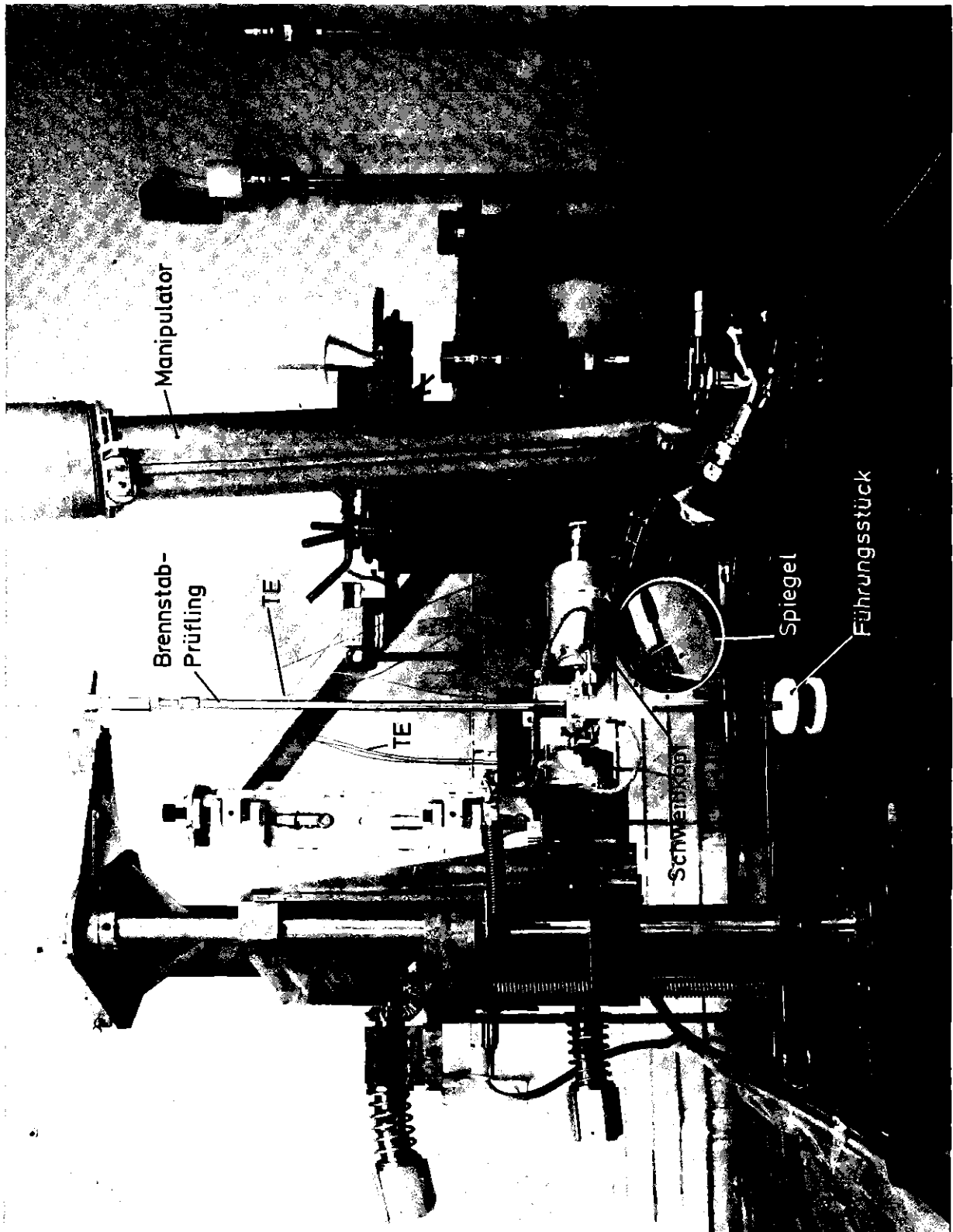


Schema :
KuS beim Verschraubungs-
vorgang



IT 1981
PNS 4237 - 540

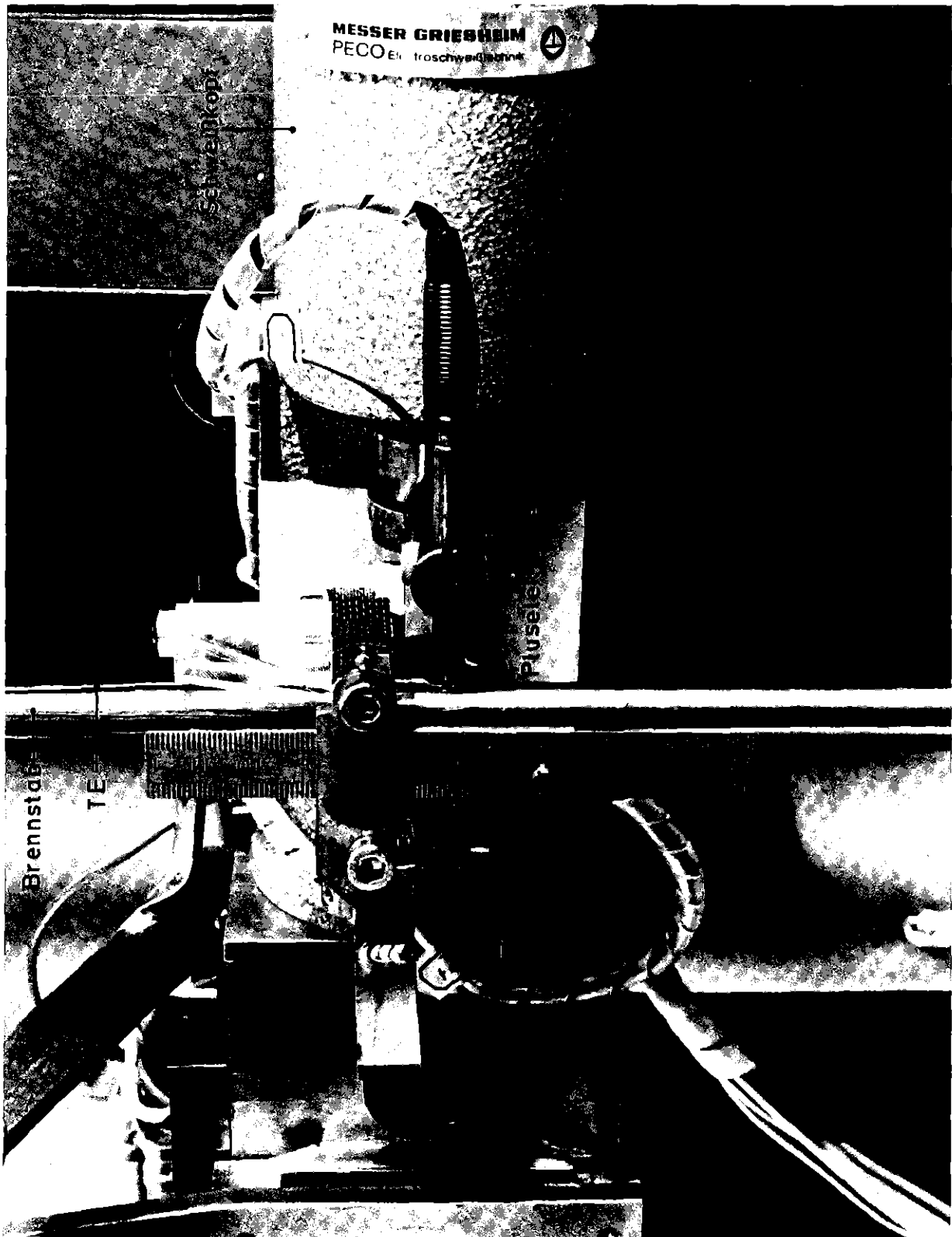
Abb.: 18



KfK IT 1981
PNS 4237-541

KuS in der Heißen Zelle
beim Schweißen

Abb. 19

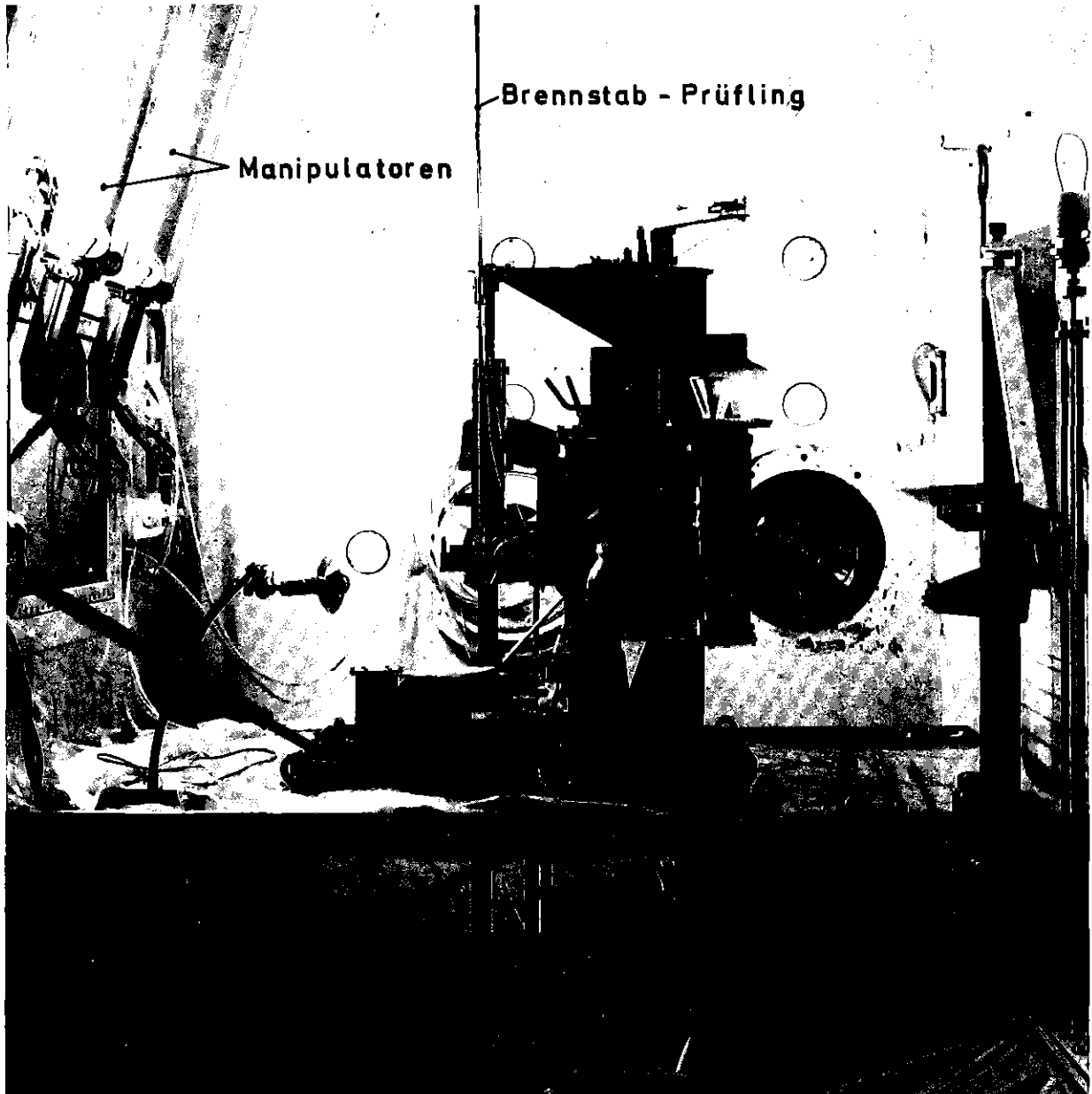


kfk

IT 1981
PNS 4237-542

Schweißkopf der KuS

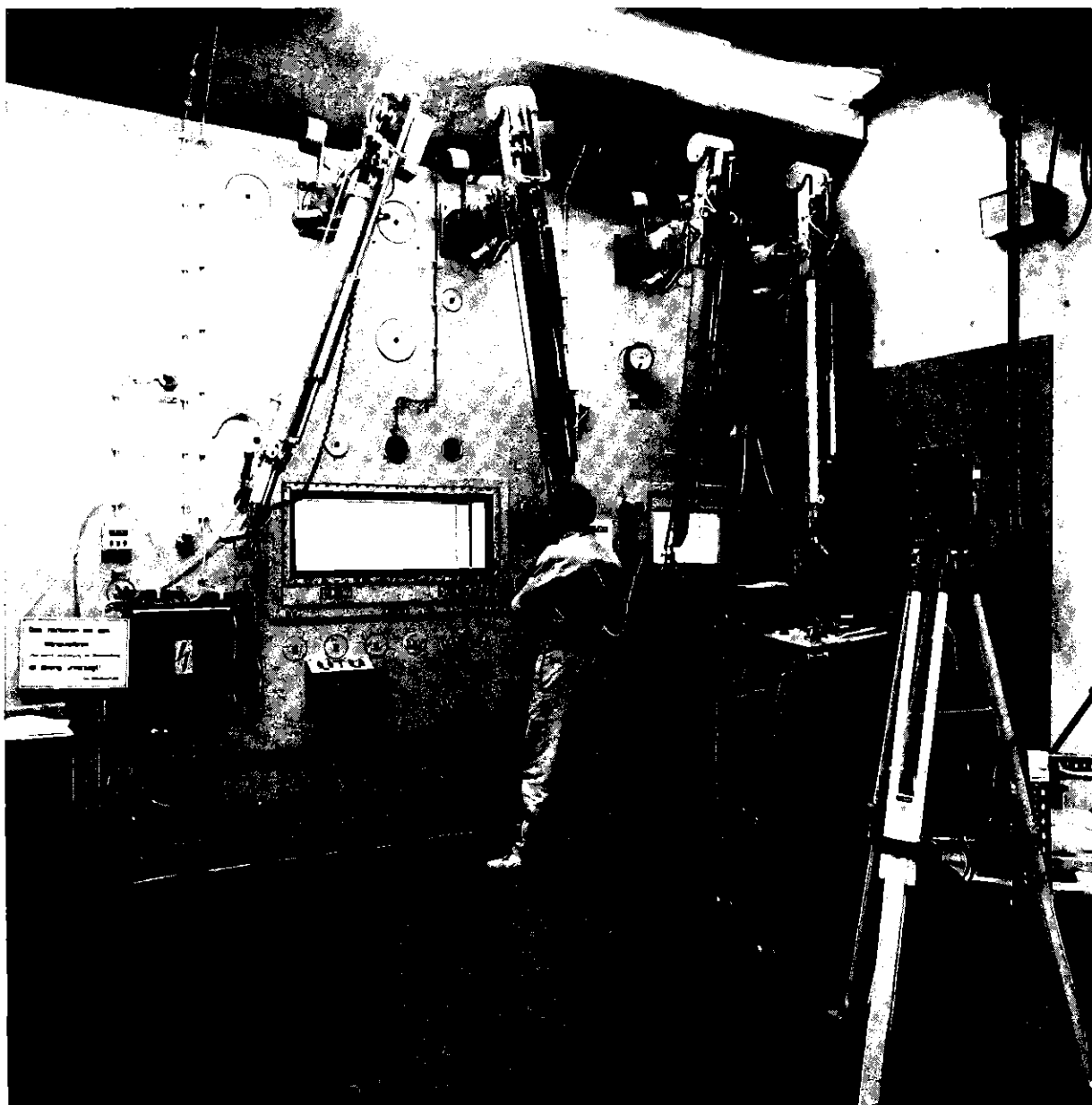
Abb.: 20



kfk IT 1981
PNS 4237 - 543

KuS in der Heißen Zelle
(Sicht von der seitl. Tür)

Abb.: 21

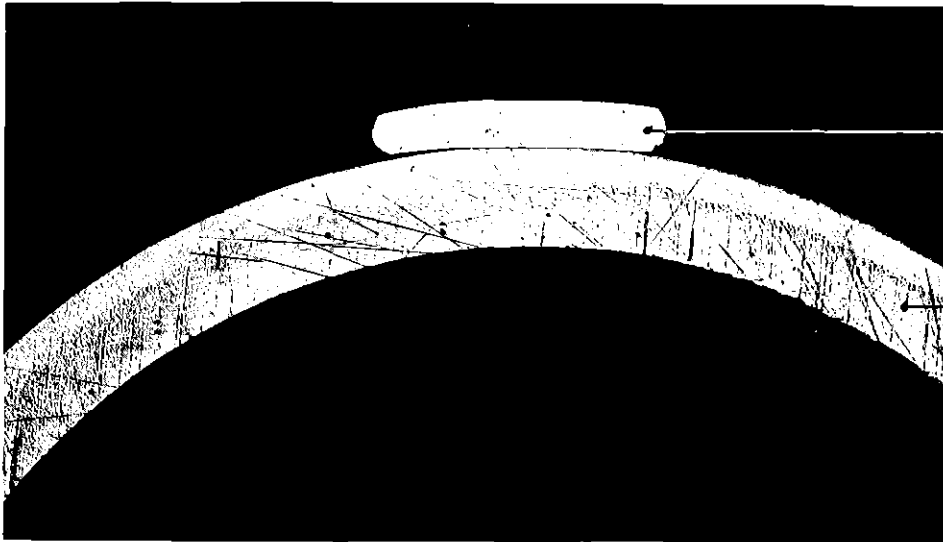


Situation vor der Heißen Zelle

KfK

IT 1981
PNS 4237 - 544

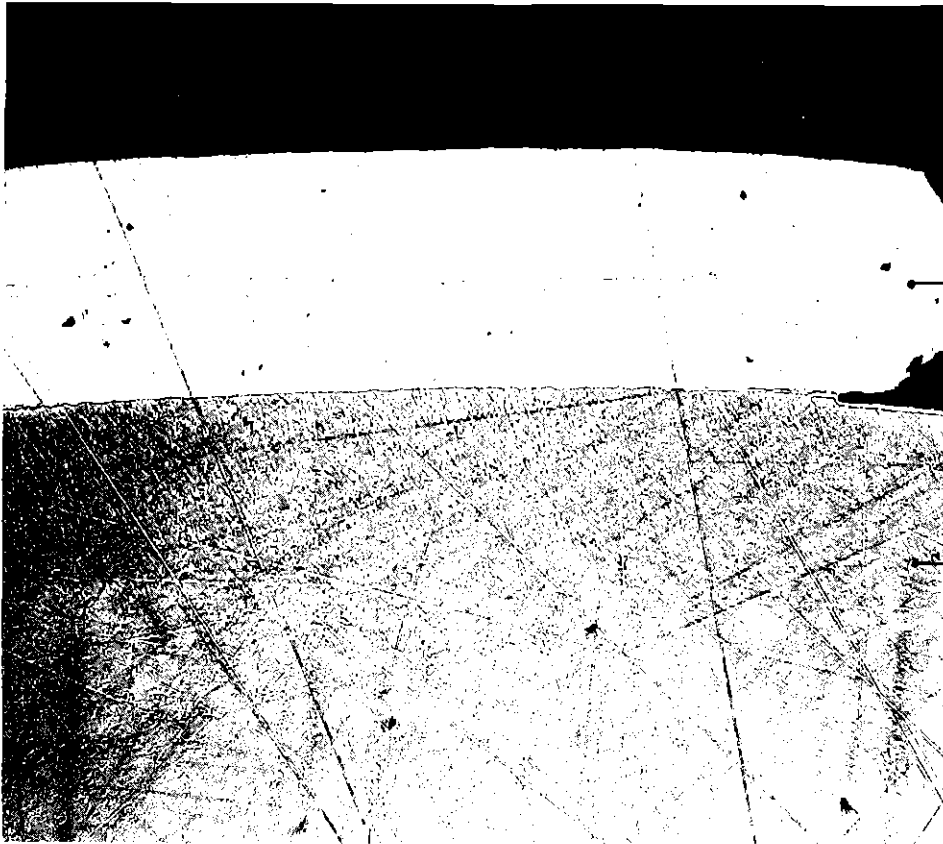
Abb.: 22



Pt-Lappen

Hüllrohr
(Zry 4)

v = 20 x



Pt-Lappen

Hüllrohr

v = 100 x, ungeätzt

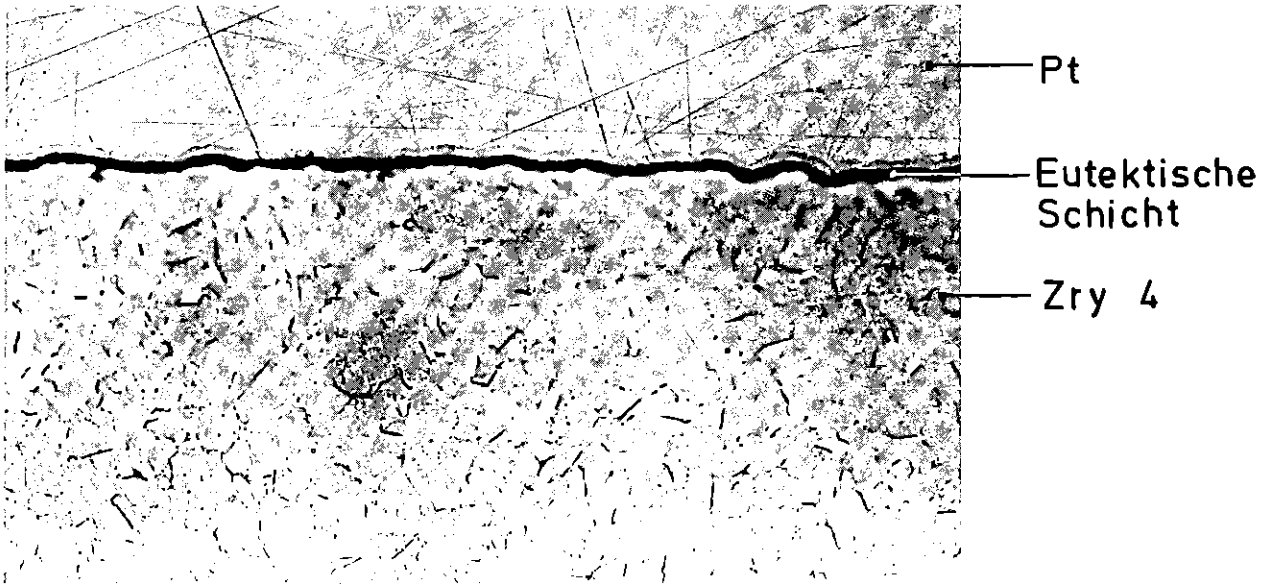


IT 1981
PNS 4237-545

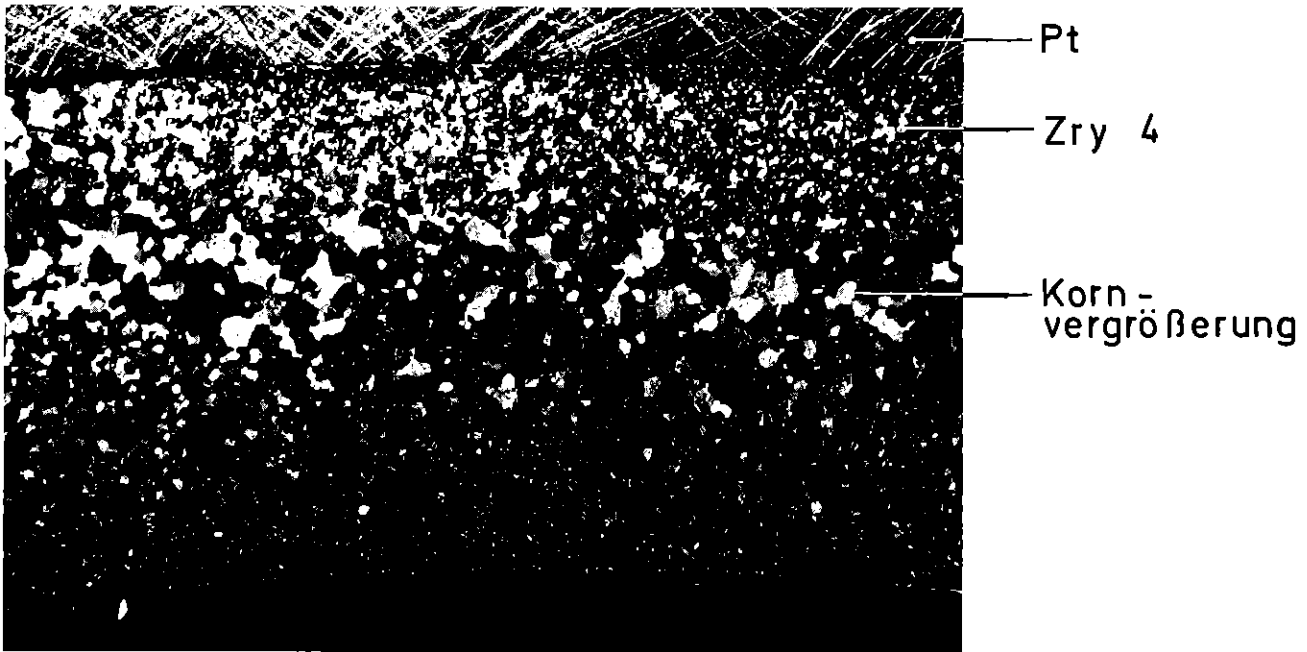
Schweißstelle TE-Version A

(Übersichten)

Abb.: 23



v = 500 x, geätzt



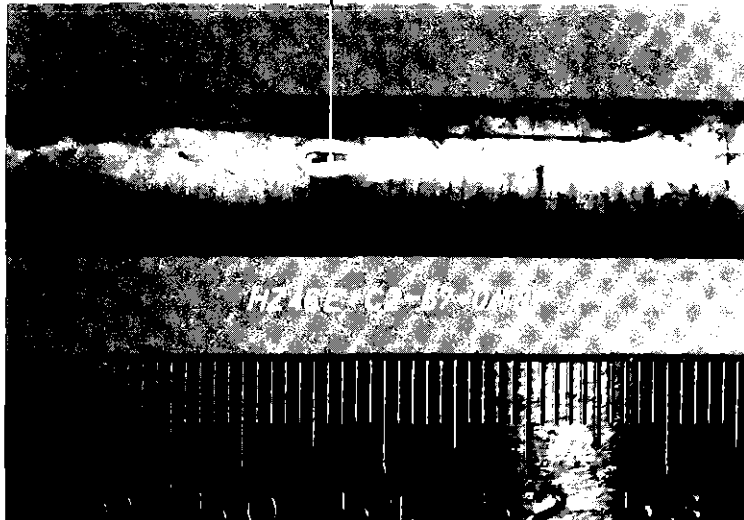
v = 100 x, geätzt, polarisiertes Licht

Schweißstelle
TE-Version A
(Eutektische Schmelze, Gefüge)

KfK IT 1981
PNS 4237-546

Abb.: 24

Schweißstelle

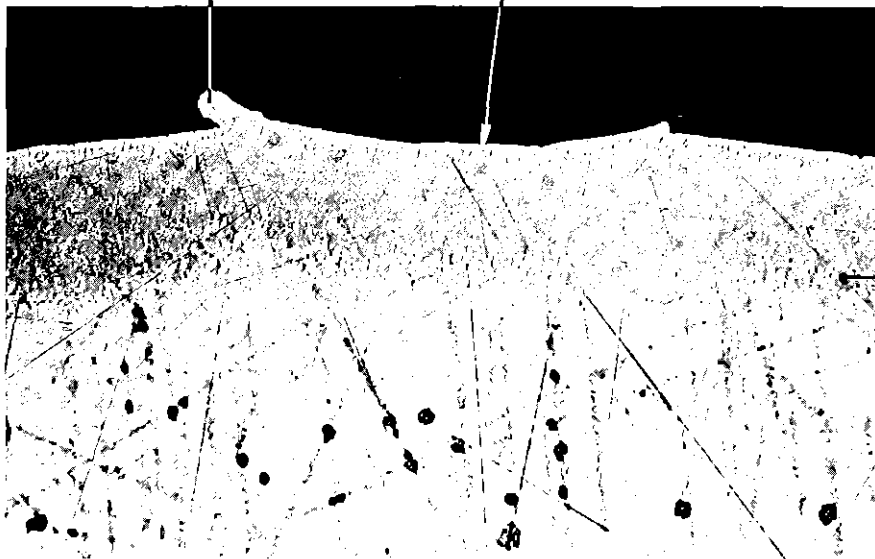


Hüllrohr
(Zry 4)

v = 2 x

Rest der eutektischen Schmelze

Schweißstelle



Hüllrohr

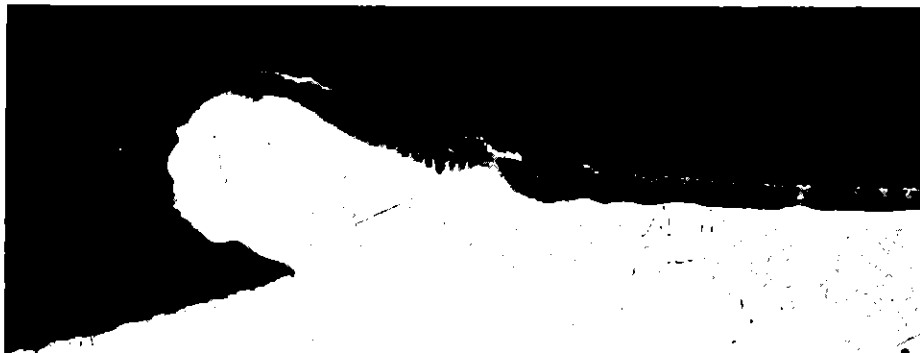
v = 100 x, ungeätzt

KfK

IT 1981
PNS 4237-547

Schweißstelle TE-Version B
(Übersichten)

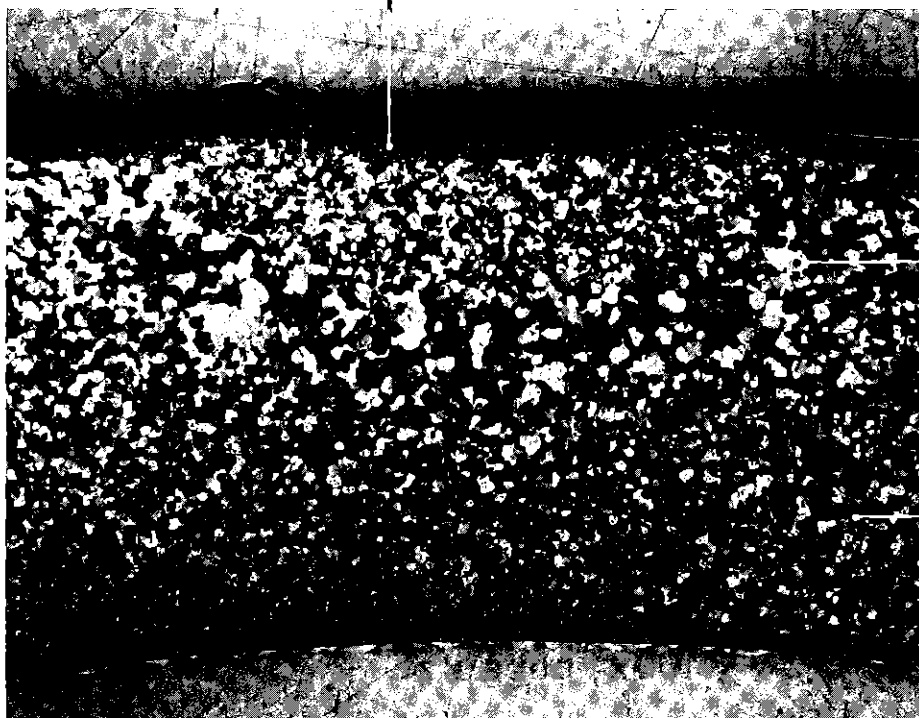
Abb.: 25



v = 500 x

Hüllrohr

eutektische Schmelze



v = 100 x
geätzt
pol. Licht

Kornver-
größerung

Hüllrohr

Schweißstelle TE-Version B

(Eutektische Schmelze, Gefüge)

KfK

IT 1981
PNS 4237-548

Abb.: 26

A n h a n g

Schweißdaten

(Auszug aus den Montageprotokollen)

SCHWEISSDATEN

Meßergebnisse	T131	T132	T133	T134	T135	T136	
R _{vor} (mΩ)	1)	42	34	72	58	48	38
	2)	18	15,5	16	31	31	- *)
R _{nach} (mΩ)	1,5	1,2	1,1	1,25	1,55	1,7	
J _{eff} (kA)							
J (Ws)	56,2	60,1	57,1	57,2	57,1	55,9	
Netzspannung (V)	228	230	229	227	228	228	

Einstelldaten	T131	T132	T133	T134	T135	T136
Leistung 1 (Skt)	85	85	85	85	85	85
Leistung 2 (Skt)	95	95	95	95	95	95
Stromzeit 1 (in Perioden)	1					
Stromzeit 2 (in Perioden)	1					
Sekundärspannung (V)	4					
Druck (kp)	6					
LM 13 D	2 kA, 5 V, 10 ms					

Bemerkungen:

Zu 1) Übergangswiderstand nach dem Anlegen der Elektroden.

Zu 2) Übergangswiderstand nach einer Drehbewegung der Prüflingsaufhängung von ~ 2° bei angelegten Elektroden.

*) keine Drehbewegung durchgeführt.

KFK-IT	HZ-MONTAGE SCHWEISSDATEN	PE - F1
HZ 4		PNS 4237

SCHWEISSDATEN

Meßergebnisse	T131	T132	T133	T134	T135	T136	
R _{vor} (mΩ)	1)	62	70	50	63	60	35
	2)	14,5	16,5	12,5	17	12,5	19
R _{nach} (mΩ)	1,16	1,4	1,3	1,5	1,5	1,3	
J _{eff} (kA)							
J (Ws)	63,2	62,7	62,4	60,2	61,0	61,8	
Netzspannung (V)	231	230,5	230,5	230	230	229	

Einstelldaten	T131	T132	T133	T134	T135	T136
Leistung 1 (Skt)	85	85	85	85	85	85
Leistung 2 (Skt)	95	95	95	95	95	95
Stromzeit 1 (in Perioden)	1					
Stromzeit 2 (in Perioden)	1					
Sekundärspannung (V)	4					
Druck (kp)	6					
LM 13 D	2 kA, 5 V, 10 ms					

Bemerkungen:

- Zu 1) Übergangswiderstand nach dem Anlegen der Elektroden.
 Zu 2) Übergangswiderstand nach einer Drehbewegung der Prüflingsaufhängung von ~ 2° bei angelegten Elektroden.

KFK-IT	HZ-MONTAGE SCHWEISSDATEN	PE - F2
HZ 4		PNS 4237

SCHWEISSDATEN

Meßergebnisse	T131	T132	T133	T134	T135	T136	
R_{vor} (m Ω)	1)	65	60	28	42	56	62
	2)	26	22	12	21	21	20
R_{nach} (m Ω)	1,3	1,2	1,05	1,0	1,0	1,1	
J_{eff} (kA)							
J (Ws)	60	60,6	61,1	61,2	61,2	60,2	
Netzspannung (V)	228	230	229,5	229,5	230	229	

Einstelldaten	T131	T132	T133	T134	T135	T136
Leistung 1 (Skt)	85	85	85	85	85	85
Leistung 2 (Skt)	95	95	95	95	95	95
Stromzeit 1 (in Perioden)	1					
Stromzeit 2 (in Perioden)	1					
Sekundärspannung (V)	4					
Druck (kp)	6					
LM 13 D	2 kA, 5 V, 10 ms					

Bemerkungen:

- Zu 1) Übergangswiderstand nach dem Anlegen der Elektroden.
 Zu 2) Übergangswiderstand nach einer Drehbewegung der Prüflingsaufhängung von $\sim 2^\circ$ bei angelegten Elektroden.

KFK-IT	HZ-MONTAGE SCHWEISSDATEN	PE - F3
HZ 4		PNS 4237

SCHWEISSDATEN

Meßergebnisse	T131	T132	T133	T134	T135	T136	
R _{Vor} (mΩ)	1)	32	62	67	54	47	50
	2)	15	13,5	18,5	11	17,5	15
R _{nach} (mΩ)	1,35	1,35	1,15	1,25	1,3	1,15	
J _{eff} (kA)							
J (Ws)	59,6	60,1	60,2	60,4	61,1	60,8	
Netzspannung (V)	225	226,5	227	228	228	228	

Einstelldaten	T131	T132	T133	T134	T135	T136
Leistung 1 (Skt)	85	85	85	85	85	85
Leistung 2 (Skt)	95	95	95	95	95	95
Stromzeit 1 (in Perioden)	1					
Stromzeit 2 (in Perioden)	1					
Sekundärspannung (V)	4					
Druck (kp)	6					
LM 13 D	2 kA, 5 V, 10 ms					

Bemerkungen:

- Zu 1) Übergangswiderstand nach dem Anlegen der Elektroden.
 Zu 2) Übergangswiderstand nach einer Drehbewegung der Prüflingsaufhängung von ~ 2° bei angelegten Elektroden.

KFK-IT	HZ-MONTAGE SCHWEISSDATEN	PE - F4
HZ 4		PNS 4237

SCHWEISSDATEN

Meßergebnisse	T131	T132	T133	T134	T135	T136	
R _{vor} (mΩ)	1)	50	60	62	66	47	65
	2)	17	12,5	13	14,5	8	17
R _{nach} (mΩ)	1,15	0,95	1,1	1,25	1,05	1,1	
J _{eff} (kA)							
J (Ws)	58,6	60,7	61,8	60,3	60,9	61,5	
Netzspannung (V)	227	229	230	229	229	229	

Einstelldaten	T131	T132	T133	T134	T135	T136
Leistung 1 (Skt)	85	85	85	85	85	85
Leistung 2 (Skt)	95	95	95	95	95	95
Stromzeit 1 (in Perioden)	1					
Stromzeit 2 (in Perioden)	1					
Sekundärspannung (V)	4					
Druck (kp)	6					
LM 13 D	2 kA, 5 V, 10 ms					

Bemerkungen:

Zu 1) Übergangswiderstand nach dem Anlegen der Elektroden.

Zu 2) Übergangswiderstand nach einer Drehbewegung der Prüflingsaufhängung von ~ 2° bei angelegten Elektroden.

KFK-IT	HZ-MONTAGE SCHWEISSDATEN	PE - F5
HZ 4		PNS 4237

SCHWEISSDATEN

Meßergebnisse	T131	T132	T133	T134	T135	T136
R _{vor} (mΩ)	1)	57	66	64	66	68
	2)	--	--	64	--	55 ^{*)}
R _{nach} (mΩ)	2,6	2,1	2,4	1,75	1,52	1,6
J _{eff} (kA)						
J (Ws)	54,8	54,6	52,3	54,1	54,5	52,1
Netzspannung (V)	228	228	227	227	227	227

*) nach Schmirgeln am Hüllrohr im Bereich der Anlage der Plus-Elektrode.

Einstelldaten	T131	T132	T133	T134	T135	T136
Leistung 1 (Skt)	89	89	88	88	87	85
Leistung 2 (Skt)	99	99	98	98	97	95
Stromzeit 1 (in Perioden)	1					
Stromzeit 2 (in Perioden)	1					
Sekundärspannung (V)	4					
Druck (kp)	6					
LM 13 D	2 kA, 5 V, 10 ms					

Bemerkungen:

Zu 1) Übergangswiderstand nach dem Anlegen der Elektroden.

Zu 2) Übergangswiderstand nach einer Drehbewegung der Prüflingsaufhängung von ~ 2° bei angelegten Elektroden.

KFK-IT	HZ-MONTAGE SCHWEISSDATEN	PE - G1.1
HZ 4		PNS 4237

SCHWEISSDATEN

Meßergebnisse	T131	T132	T133	T134	T135	T136	
R _{vor} (mΩ)	1)	45	70	58	70	67	70
	2)						
R _{nach} (mΩ)	3,1	2,6	2,0	2,2	2,2	2,6	
J _{eff} (kA)							
J (Ws)	57,7	58,1	58,0	59,6	58,3	57,3	
Netzspannung (V)	225,5	225,5	226	227	226	225,5	

Einstelldaten	T131	T132	T133	T134	T135	T136
Leistung 1 (Skt)	88	90	89	90	90	90
Leistung 2 (Skt)	99	99	99	99	99	99
Stromzeit 1 (in Perioden)	1					
Stromzeit 2 (in Perioden)	1					
Sekundärspannung (V)	4					
Druck (kp)	6					
LM 13 D	2 kA, 5 V, 10 ms					

Bemerkungen:

- Zu 1) Übergangswiderstand nach dem Anlegen der Elektroden.
 Zu 2) Übergangswiderstand nach einer Drehbewegung der Prüflingsaufhängung von ~ 2° bei angelegten Elektroden.

KFK-IT	HZ-MONTAGE SCHWEISSDATEN	PE - G1.2
HZ 4		PNS 4237

SCHWEISSDATEN

Meßergebnisse	T131	T132	T133	T134	T135	T136
R_{vor} (m Ω)	28	54	41	61	70	64
R_{nach} (m Ω)	1,8	1,9	1,9	1,9	2,0	2,5
J_{eff} (kA)						
J (Ws)	57,7	59,1	59,5	57,9	58,4	58,7
Netzspannung (V)	223	225	226	226	224	225

Einstelldaten	T131	T132	T133	T134	T135	T136
Leistung 1 (Skt)	85	88	88	89	90	90
Leistung 2 (Skt)	97	99	99	99	99	99
Stromzeit 1 (in Perioden)	1					
Stromzeit 2 (in Perioden)	1					
Sekundärspannung (V)	4					
Druck (kp)	6					
LM 13 D	2 kA, 5 V, 10 ms					

Bemerkungen:

- Zu 1) Übergangswiderstand nach dem Anlegen der Elektroden.
 Zu 2) Übergangswiderstand nach einer Drehbewegung der Prüflingsaufhängung von $\sim 2^\circ$ bei angelegten Elektroden.

KFK-IT	HZ-MONTAGE SCHWEISSDATEN	PE - G1.3
HZ 4		PNS 4237

SCHWEISSDATEN

Meßergebnisse	T131	T132	T133	T134	T135	T136
R_{vor} (m Ω)	48	40	60	58	45	46
R_{nach} (m Ω)	2,0	2,3	2,3	1,7	2,1	1,6
J_{eff} (kA)						
J (Ws)	58,2	57,7	57,4	59,5	59,9	59,9
Netzspannung (V)	225,5	225,5	225	225,5	226	225,5

Einstelldaten	T131	T132	T133	T134	T135	T136
Leistung 1 (Skt)	87	87	88	88	88	88
Leistung 2 (Skt)	97	97	97	98	98	99
Stromzeit 1 (in Perioden)	1					
Stromzeit 2 (in Perioden)	1					
Sekundärspannung (V)	4					
Druck (kp)	6					
LM 13 D	2 kA, 5 V, 10 ms					

Bemerkungen:

- Zu 1) Übergangswiderstand nach dem Anlegen der Elektroden.
 Zu 2) Übergangswiderstand nach einer Drehbewegung der Prüflingsaufhängung von $\sim 2^\circ$ bei angelegten Elektroden.

KFK-IT	HZ-MONTAGE SCHWEISSDATEN	PE - G1.4
HZ 4		PNS 4237

SCHWEISSDATEN (TE OHNE PT-LAPPEN)

Meßergebnisse	T131	T132	T133	T134	T135	T136	
R _{Vor} (mΩ)	1)	60	60	66	54	44	50
	2)	18	33	47	24	32	12,5
R _{nach} (mΩ)	1,65	1,5	1,33	1,65	1,95	1,35	
J _{eff} (kA)							
J (Ws)	36,3	36,9	35,5	36,5	36,6	37,4	
Netzspannung (V)	225,5	226	225	225,5	226	227	

Einstelldaten	T131	T132	T133	T134	T135	T136
Leistung 1 (Skt)	65	65	65	65	65	65
Leistung 2 (Skt)	75	75	75	75	75	75
Stromzeit 1 (in Perioden)	1					
Stromzeit 2 (in Perioden)	1					
Sekundärspannung (V)	4					
Druck (kp)	6					
LM 13 D	2 kA, 5 V, 10 ms					

Bemerkungen:

- Zu 1) Übergangswiderstand nach dem Anlegen der Elektroden.
 Zu 2) Übergangswiderstand nach einer Drehbewegung der Prüflingsaufhängung von ~ 2° bei angelegten Elektroden.

KFK-IT	HZ-MONTAGE SCHWEISSDATEN	PE - G1.5
HZ 4		PNS 4237

SCHWEISSDATEN

Meßergebnisse	T131	T132	T133	T134	T135	T136	
R _{vor} (mΩ)	1)	66	36	60	63	66	68
	2)	24	18	22	27	36	47
R _{nach} (mΩ)	1,25	1,3	1,45	1,4	1,4	1,27	
J _{eff} (kA)							
J (Ws)	42,4	42	41,9	41,7	42,4	43,3	
Netzspannung (V)	226	226	226	226	226	226	

Einstelldaten	T131	T132	T133	T134	T135	T136
Leistung 1 (Skt)	86	86	86	86	86	87
Leistung 2 (Skt)	96	96	96	96	96	97
Stromzeit 1 (in Perioden)	1					
Stromzeit 2 (in Perioden)	1					
Sekundärspannung (V)	4					
Druck (kp)	6					
LM 13 D	2 kA, 5 V, 10 ms					

Bemerkungen:

- Zu 1) Übergangswiderstand nach dem Anlegen der Elektroden.
 Zu 2) Übergangswiderstand nach einer Drehbewegung der Prüflingsaufhängung von ~ 2° bei angelegten Elektroden.

KFK-IT	HZ-MONTAGE SCHWEISSDATEN	PE - G 2,1
HZ 4		PNS 4237

SCHWEISSDATEN

Meßergebnisse	T131	T132	T133	T134	T135	T136	
R _{Vor} (mΩ)	1)	45	64	70	72	66	72
	2)	18	25	28	14,5	14	46
R _{nach} (mΩ)	1,3	1,22	1,3	1,3	1,45	1,5	
J _{eff} (kA)							
J (Ws)	41,1	41,3	41,1	40,9	38,9	38,6	
Netzspannung (V)	226,5	226,5	226,5	226,5	226,5	226,5	

Einstelldaten	T131	T132	T133	T134	T135	T136
Leistung 1 (Skt)	86	86	86	85	83	83
Leistung 2 (Skt)	96	96	96	95	93	93
Stromzeit 1 (in Perioden)	1					
Stromzeit 2 (in Perioden)	1					
Sekundärspannung (V)	4					
Druck (kp)	6					
LM 13 D	2 kA, 5 V, 10 ms					

Bemerkungen:

- Zu 1) Übergangswiderstand nach dem Anlegen der Elektroden.
 Zu 2) Übergangswiderstand nach einer Drehbewegung der Prüflingsaufhängung von ~ 2° bei angelegten Elektroden.

KFK-IT	HZ-MONTAGE SCHWEISSDATEN	PE - G 2.2
HZ 4		PNS 4237

SCHWEISSDATEN

Meßergebnisse	T131	T132	T133	T134	T135	T136	
R _{vor} (mΩ)	1)	68	54	60	56	70	58
	2)	17	22	13	14	58	24
R _{nach} (mΩ)	1,4	1,35	1,4	1,35	1,2	1,3	
J _{eff} (kA)							
J (Ws)	41,9	41,9	41,6	41,2	41,8	41,8	
Netzspannung (V)	226	226	226	226	226	226	

Einstelldaten	T131	T132	T133	T134	T135	T136
Leistung 1 (Skt)	87	87	87	87	87	87
Leistung 2 (Skt)	97	97	97	97	97	97
Stromzeit 1 (in Perioden)	1					
Stromzeit 2 (in Perioden)	1					
Sekundärspannung (V)	4					
Druck (kp)	6					
LM 13 D	2 kA, 5 V, 10 ms					

Bemerkungen:

- Zu 1) Übergangswiderstand nach dem Anlegen der Elektroden.
 Zu 2) Übergangswiderstand nach einer Drehbewegung der Prüflingsaufhängung von ~ 2° bei angelegten Elektroden.

KFK-IT	HZ-MONTAGE SCHWEISSDATEN	PE - G 3.1
HZ 4		PNS 4237

SCHWEISSDATEN

Meßergebnisse	T131	T132	T133	T134	T135	T136	
R _{Vor} (mΩ)	1)	72	72	46	70	70	76
	2)	10,5	17,5	32	33	64	60
R _{nach} (mΩ)	1,5	1,4	1,35	1,3	2,5	1,75	
J _{eff} (kA)							
J (Ws)	40,9	41,2	41,5	41,1	40,3	41	
Netzspannung (V)	226	226	226	226	226	226	

Einstelldaten	T131	T132	T133	T134	T135	T136
Leistung 1 (Skt)	87	87	87	87	86	86
Leistung 2 (Skt)	97	97	97	97	96	96
Stromzeit 1 (in Perioden)	1					
Stromzeit 2 (in Perioden)	1					
Sekundärspannung (V)	4					
Druck (kp)	6					
LM 13 D	2 kA, 5 V, 10 ms					

Bemerkungen:

- Zu 1) Übergangswiderstand nach dem Anlegen der Elektroden.
 Zu 2) Übergangswiderstand nach einer Drehbewegung der Prüflingsaufhängung von ~ 2° bei angelegten Elektroden.

KFK-IT	HZ-MONTAGE SCHWEISSDATEN	PE - G 3,2
HZ 4		PNS 4237

SCHWEISSDATEN

Meßergebnisse	T131	T132*	T133	T134	T135	T136	T132**	
R _{vor} (mΩ)	1)	62	60	67	72	72	46	2,9
	2)	46	18,5	14	57	40	12	
R _{nach} (mΩ)		1,5	1,3	1,2	1,3	1,35	1,25	1,4
J _{eff} (kA)								
J (Ws)		41,2	40,9	41	39,8	39,9	40,2	37,5
Netzspannung (V)		226	226	226	226	226	226	226

*) 1. Schweißung (hat nicht gehalten)

**) 2. Schweißung (Zugversuch mit 1 bis 2 kp)

Einstelldaten	T131	T132	T133	T134	T135	T136	T132
Leistung 1 (Skt)	83	82	82	83	82	82	80
Leistung 2 (Skt)	93	92	92	93	92	92	90
Stromzeit 1 (in Perioden)	1						
Stromzeit 2 (in Perioden)	1						
Sekundärspannung (V)	4						
Druck (kp)	6						
LM 13 D	2 kA, 5 V, 10 ms						

Bemerkungen:

Zu 1) Übergangswiderstand nach dem Anlegen der Elektroden.

Zu 2) Übergangswiderstand nach einer Drehbewegung der Prüflingsaufhängung von ~ 2° bei angelegten Elektroden.

KFK-IT	HZ-MONTAGE SCHWEISSDATEN	PE - G 3,3
HZ 4		PNS 4237

SCHWEISSDATEN

Meßergebnisse	T131	T132	T133	T134	T135	T136	
R _{vor} (mΩ)	1)	23,0	15,5	27,0	24,0	28,0	34,0
	2)	5,4	-	9,2	9,5	11,0	17,0
R _{nach} (mΩ)	0,83	1,25	1,07	0,86	0,81	0,82	
J _{eff} (kA)							
J (Ws)	37,1*)	40,1	36,6*)	40,3	44,6	36,5*)	
Netzspannung (V)	226	226	226	226	226	226	

*) Durch Zugprobe ca. 2 kp auf Festigkeit geprüft

Einstelldaten	T131	T132	T133	T134	T135	T136
Leistung 1 (Skt)	85	85	84	84	85	83
Leistung 2 (Skt)	95	95	94	94	95	93
Stromzeit 1 (in Perioden)	1					
Stromzeit 2 (in Perioden)	1					
Sekundärspannung (V)	4					
Druck (kp)	6					
LM 13 D	2 kA, 5 V, 10 ms					

Bemerkungen:

- Zu 1) Übergangswiderstand nach dem Anlegen der Elektroden.
 Zu 2) Übergangswiderstand nach einer Drehbewegung der Prüflingsaufhängung von ~ 2° bei angelegten Elektroden.

KFK-IT	HZ-MONTAGE SCHWEISSDATEN	PE - C 1
HZ 4		PNS 4237

SCHWEISSDATEN

Meßergebnisse	T131	T132	T133	T134	T135	T136	
R _{vor} (mΩ)	1)	12,0	18,5	34,0	41,0	59,0	29,0
	2)	-	-	12,3	11,6	22,5	-
R _{nach} (mΩ)	1,35	1,22	1,0	1,12	1,05	1,4	
J _{eff} (kA)							
J (Ws)	42,8	43,1	43,4	43,3	44,3	43,7	
Netzspannung (V)	226	226	226	226	226	226	

Einstelldaten	T131	T132	T133	T134	T135	T136
Leistung 1 (Skt)	84	84	84	84	85	85
Leistung 2 (Skt)	94	94	94	94	95	95
Stromzeit 1 (in Perioden)	1					
Stromzeit 2 (in Perioden)	1					
Sekundärspannung (V)	4					
Druck (kp)	6					
LM 13 D	2 kA, 5 V, 10 ms					

Bemerkungen:

- Zu 1) Übergangswiderstand nach dem Anlegen der Elektroden.
 Zu 2) Übergangswiderstand nach einer Drehbewegung der Prüflingsaufhängung von ~ 2° bei angelegten Elektroden.

KFK-IT	HZ-MONTAGE SCHWEISSDATEN	PE - C 2
HZ 4		PNS 4237

SCHWEISSDATEN

Meßergebnisse	T131	T132	T133	T134	T135	T136	
R _{vor} (mΩ)	1)	27,5	32,0	33,0	45,0	43,0	43,0
	2)	7,2	7,5	12,0	21,5	29,0	42,0 ^{*)}
R _{nach} (mΩ)		1,1	1,05	1,0	1,0	1,15	1,35
J _{eff} (kA)							
J (Ws)		42,6	42,6	43,7	42,2	43,1	43,8
Netzspannung (V)		226	226	226	226	226	226

Einstelldaten	T131	T132	T133	T134	T135	T136
Leistung 1 (Skt)	83	83	84	84	84	85
Leistung 2 (Skt)	93	93	94	94	94	95
Stromzeit 1 (in Perioden)	1					
Stromzeit 2 (in Perioden)	1					
Sekundärspannung (V)	4					
Druck (kp)	6					
LM 13 D	2 kA, 5 V, 10 ms					

Bemerkungen:

Zu 1) Übergangswiderstand nach dem Anlegen der Elektroden.

Zu 2) Übergangswiderstand nach einer Drehbewegung der Prüflingsaufhängung von ~ 2° bei angelegten Elektroden.

*) trotz mehrfacher Drehbewegung keine Reduzierung von R_{vor}

KFK-IT	HZ-MONTAGE SCHWEISSDATEN	PE - C 3
HZ 4		PNS 4237

SCHWEISSDATEN

Meßergebnisse	T131	T132	T133	T134	T135	T136	
R _{vor} (mΩ)	1)	30	29	32	26	48	40
	2)	12	14	19	21	22	13
R _{nach} (mΩ)	1,15	1,05	1,25	1,3	1,1	1,05	
J _{eff} (kA)							
J (Ws)	42,5	42,7	42,7	42,4	43,2	41,9	
Netzspannung (V)	226	226	226	226	226	226	

Einstelldaten	T131	T132	T133	T134	T135	T136
Leistung 1 (Skt)	83	83	83	83	83	83
Leistung 2 (Skt)	93	93	93	93	93	93
Stromzeit 1 (in Perioden)	1					
Stromzeit 2 (in Perioden)	1					
Sekundärspannung (V)	4					
Druck (kp)	6					
LM 13 D	2 kA, 5 V, 10 ms					

Bemerkungen:

- Zu 1) Übergangswiderstand nach dem Anlegen der Elektroden.
 Zu 2) Übergangswiderstand nach einer Drehbewegung der Prüflingsaufhängung von ~ 2° bei angelegten Elektroden.

KFK-IT	HZ-MONTAGE SCHWEISSDATEN	PE - C 4
HZ 4		PNS 4237

SCHWEISSDATEN

Meßergebnisse		*) 1. Schweißg.						*) 2. Schweißg.	
		T131	T132	T133	T134	T135	T136	T133	T133
R _{vor} (mΩ)	1)	40	35,5	43	64	56	62	58	2,3
	2)	15	14	25	14	29	27	22	-
R _{nach} (mΩ)		1,2	1,25	1,15	1,15	1,15	1,05	1,15	1,4
J _{eff} (kA)									
J (Ws)		41,6	41,8	42,5	42,4	42,8	42,9	42,5	42,1
Netzspannung (V)		226	226	226	226	226	226	226	226

*) Nach der 1. und 2. Schweißung hielt das TE nicht. Einzelheiten sind dem Montageprotokoll zu entnehmen.
Beachte! Die azimutale Lage von T133 entspricht nicht der Regel. (siehe hierzu den TE-Bestückungsplan).

Einstelldaten	T131	T132	T133	T134	T135	T136	T133	T133
Leistung 1 (Skt)	83	83	83	83	83	83	83	83
Leistung 2 (Skt)	93	93	93	93	93	93	93	93
Stromzeit 1 (in Perioden)	1							
Stromzeit 2 (in Perioden)	1							
Sekundärspannung (V)	4							
Druck (kp)	6							
LM 13 D	2 kA, 5 V, 10 ms							

Bemerkungen:

- Zu 1) Übergangswiderstand nach dem Anlegen der Elektroden.
 Zu 2) Übergangswiderstand nach einer Drehbewegung der Prüflingsaufhängung von ~ 2° bei angelegten Elektroden.

KFK-IT	HZ-MONTAGE SCHWEISSDATEN	PE - C 5
HZ 4		PNS 4237

SCHWEISSDATEN

Meßergebnisse	T131	T132	T133	T134	T135	T136	
R _{vor} (mΩ)	1)	54	60	50	62	54	42
	2)	23	26	30	32	30	17
R _{nach} (mΩ)	1,40	1,45	1,48	1,4	1,35	1,45	
J _{eff} (kA)	42,0	42,0	42,2	42,4	42,2	41	
J (Ws)	230,5	231	230,5	230,5	230,5	230,5	
Netzspannung (V)							

Einstelldaten	T131	T132	T133	T134	T135	T136
Leistung 1 (Skt)	85	85	85	85	85	84
Leistung 2 (Skt)	95	95	95	95	95	94
Stromzeit 1 (in Perioden)	1					
Stromzeit 2 (in Perioden)	1					
Sekundärspannung (V)	4					
Druck (kp)	6					
LM 13 D	2 kA, 5 V, 10 ms					

Bemerkungen:

- Zu 1) Übergangswiderstand nach dem Anlegen der Elektroden.
 Zu 2) Übergangswiderstand nach einer Drehbewegung der Prüflingsaufhängung von ~ 2° bei angelegten Elektroden.

KFK-IT	HZ-MONTAGE SCHWEISSDATEN	PE - E 1
HZ 4		PNS 4237

SCHWEISSDATEN

Meßergebnisse	T131	T132	T133	T134	T135	T136	
R _{Vor} (mΩ)	1)	60	64	66	70	62	79
	2)	33	33	15	28	17	19
R _{nach} (mΩ)	1,15	1,4	1,25	1,6	1,6	1,3	
J _{eff} (kA)							
J (Ws)	42,7	42,5	42,7	42,2	42,3	42,5	
Netzspannung (V)	230,3	230,3	230,3	230,3	230,3	230,5	

Einstelldaten	T131	T132	T133	T134	T135	T136
Leistung 1 (Skt)	85	85	85	85	85	85
Leistung 2 (Skt)	95	95	95	95	95	95
Stromzeit 1 (in Perioden)	1					
Stromzeit 2 (in Perioden)	1					
Sekundärspannung (V)	4					
Druck (kp)	6					
LM 13 D	2 kA, 5 V, 10 ms					

Bemerkungen:

- Zu 1) Übergangswiderstand nach dem Anlegen der Elektroden.
 Zu 2) Übergangswiderstand nach einer Drehbewegung der Prüflingsaufhängung von ~ 2° bei angelegten Elektroden.

KFK-IT	HZ-MONTAGE SCHWEISSDATEN	PE - E 2
HZ 4		PNS 4237

SCHWEISSDATEN

Meßergebnisse	T131	T133	T135	T137	T138	T139	
R _{Vor} (mΩ)	1)	64	67	66	62	66	58
	2)	32	29	36	25	26	26
R _{nach} (mΩ)	1,25	1,3	1,4	1,4	1,35	1,35	
J _{eff} (kA)							
J (Ws)	42,5	42,8	43,6	42,2	42,0	42,0	
Netzspannung (V)	230,3	230,3	230,3	230,3	230,3	230,3	

Einstelldaten	T131	T133	T135	T137	T138	T139
Leistung 1 (Skt)	85	85	85	85	85	85
Leistung 2 (Skt)	95	95	95	95	95	95
Stromzeit 1 (in Perioden)	1					
Stromzeit 2 (in Perioden)	1					
Sekundärspannung (V)	4					
Druck (kp)	6					
LM 13 D	2 kA, 5 V, 10 ms					

Bemerkungen:

- Zu 1) Übergangswiderstand nach dem Anlegen der Elektroden.
 Zu 2) Übergangswiderstand nach einer Drehbewegung der Prüflingsaufhängung von ~ 2° bei angelegten Elektroden.

KFK-IT	HZ-MONTAGE SCHWEISSDATEN	PE - E 3
HZ 4		PNS 4237

SCHWEISSDATEN

Meßergebnisse	T131	T133 ^x	T135 ^x	T137 ^x	T138 ^x	T139 ^x	
R _{Vor} (mΩ)	1)	62	68	68	60	56	52
	2)	25	11,5	13	10,5	7	28
R _{nach} (mΩ)	1,45	1,4	1,6	1,5	1,6	1,4	
J _{eff} (kA)							
J (Ws)	43,1	43,0	43,5	43,2	43,3	42,4	
Netzspannung (V)	230,3	230,3	230,3	230,3	230,3	230,3	

Einstelldaten	T131	T133	T135	T137	T138	T139
Leistung 1 (Skt)	85	85	85	85	85	85
Leistung 2 (Skt)	95	95	95	95	95	95
Stromzeit 1 (in Perioden)	1					
Stromzeit 2 (in Perioden)	1					
Sekundärspannung (V)	4					
Druck (kp)	6					
LM 13 D	2 kA, 5 V, 10 ms					

Bemerkungen:

- Zu 1) Übergangswiderstand nach dem Anlegen der Elektroden.
 Zu 2) Übergangswiderstand nach einer Drehbewegung der Prüflingsaufhängung von ~ 2° bei angelegten Elektroden.

KFK-IT	HZ-MONTAGE SCHWEISSDATEN	PE - E 4
HZ 4		PNS 4237

* Bei diesen TE konnte durch Drehbewegungen keine wesentliche Änderung von R_{Vor} erreicht werden. Es mußte deshalb mit Schmirgelleine die Oxidschicht des Brennstabes etwas "aufgerissen" werden.

SCHWEISSDATEN

Meßergebnisse		*) 2. Schweißg.						
		T131	T132	T132	T133	T134	T135	T136
R _{vor} (mΩ)	1)	70	60	2,8	70	68	68	68
	2)	30	42	-	43	50	35	33
R _{nach} (mΩ)		1,35	1,5	1,7	1,3	1,5	1,35	1,25
J _{eff} (kA)								
J (Ws)		43	44	43,4	42,2	43,3	43,0	41,6
Netzspannung (V)		230,5	230,5	230,5	230,5	230,5	230,5	230,5

(*) Achtung: Pt-Hülse war nicht gekürzt. Nachschweißung im Bereich der TE-Adern erforderlich. Abstand UK-Pt-Hülse bis TE-Adern ca. 7 mm (statt üblich ca. 1,5 mm).

Einstelldaten	T131	T132	T132	T133	T134	T135	T136
Leistung 1 (Skt)	85	85	85	85	85	85	85
Leistung 2 (Skt)	95	95	95	95	95	95	95
Stromzeit 1 (in Perioden)	1						
Stromzeit 2 (in Perioden)	1						
Sekundärspannung (V)	4						
Druck (kp)	6						
LM 13 D	2 kA, 5 V, 10 ms						

Bemerkungen:

- Zu 1) Übergangswiderstand nach dem Anlegen der Elektroden.
 Zu 2) Übergangswiderstand nach mehreren Drehbewegungen der Prüflingsaufhängung von ~ 5° bei angelegten Elektroden.

KFK-IT	HZ-MONTAGE SCHWEISSDATEN	PE - E 5
HZ 4		PNS 4237

SCHWEISSDATEN

Meßergebnisse	T131	T132	T133	T134	T135	T136
R _{vor} (mΩ) 1)	15,0	4,8	6,0	11,5	7,2	10,0
2)						
R _{nach} (mΩ)	1,6	1,5	1,5	1,55	1,4	2,0
J _{eff} (kA)						
J (Ws)	38,3	39,8	39,4	39,3	39,1	39,6
Netzspannung (V)	230	230	230	230	230	230

Einstelldaten	T131	T132	T133	T134	T135	T136
Leistung 1 (Skt)	81	81	81	81	81	81
Leistung 2 (Skt)	91	91	91	91	91	91
Stromzeit 1 (in Perioden)	1					
Stromzeit 2 (in Perioden)	1					
Sekundärspannung (V)	4					
Druck (kp)	6					
LM 13 D	2 kA, 5 V, 10 ms					

Bemerkungen:

- Zu 1) Übergangswiderstand nach dem Anlegen der Elektroden.
 Zu 2) Übergangswiderstand nach einer Drehbewegung der Prüflingsaufhängung von ~ 2° bei angelegten Elektroden.

KFK-IT	SCHWEISSDATEN	PE-BSS 21
		PNS 4237

SCHWEISSDATEN

Meßergebnisse	T131	T132	T133	T134	T135	T136	
R _{Vor} (mΩ)	1)	6,8	8,0	9,0	6,3	5,0	8,6
	2)						
R _{nach} (mΩ)	1,35	1,5	1,4	1,4	1,35	1,5	
J _{eff} (kA)							
J (Ws)	39,2	39,3	41,5	39,2	38,2	38,5	
Netzspannung (V)	230	230	230	230	230	230	

Einstelldaten	T131	T132	T133	T134	T135	T136
Leistung 1 (Skt)	81	81	81	81	81	81
Leistung 2 (Skt)	91	91	91	91	91	91
Stromzeit 1 (in Perioden)	1					
Stromzeit 2 (in Perioden)	1					
Sekundärspannung (V)	4					
Druck (kp)	6					
LM 13 D	2 kA, 5 V, 10 ms					

Bemerkungen:

Zu 1) Übergangswiderstand nach dem Anlegen der Elektroden.

Zu 2) Übergangswiderstand nach einer Drehbewegung der Prüflingsaufhängung von ~ 2° bei angelegten Elektroden.

KFK-IT	SCHWEISSDATEN	PE-BSS 22
		PNS 4237

SCHWEISSDATEN

Meßergebnisse	T131	T132	T133	T134	T135	T136	
R _{vor} (mΩ)	1)	4,3	3,7	6,6	4,5	3,4	3,5
	2)						
R _{nach} (mΩ)	1,5	1,45	1,35	1,3	1,4	1,4	
J _{eff} (kA)							
J (Ws)	39,1	39,3	39,2	39,3	39,3	41,4	
Netzspannung (V)	230	230	230	230	230	230	

Einstelldaten	T131	T132	T133	T134	T135	T136
Leistung 1 (Skt)	81	81	81	81	81	81
Leistung 2 (Skt)	91	91	91	91	91	91
Stromzeit 1 (in Perioden)	1					
Stromzeit 2 (in Perioden)	1					
Sekundärspannung (V)	4					
Druck (kp)	6					
LM 13 D	2 kA, 5 V, 10 ms					

Bemerkungen:

Zu 1) Übergangswiderstand nach dem Anlegen der Elektroden.

Zu 2) Übergangswiderstand nach einer Drehbewegung der Prüflingsaufhängung von ~ 2° bei angelegten Elektroden.

KFK-IT	SCHWEISSDATEN	PE-BSS 23
		PNS 4237

SCHWEISSDATEN

Meßergebnisse	T131	T132	T133	T134	T135	T136	
R _{vor} (mΩ)	1)	4,5	3,1	6,8	6,0	5,0	6,6
	2)						
R _{nach} (mΩ)	1,35	1,3	1,5	1,35	1,5	1,5	
J _{eff} (kA)							
J (Ws)	38,1	38,1	38,1	37,9	38,6	38,9	
Netzspannung (V)	230	230	230	230	230	230	

Einstelldaten	T131	T132	T133	T134	T135	T136
Leistung 1 (Skt)	81	81	81	81	81	81
Leistung 2 (Skt)	91	91	91	91	91	91
Stromzeit 1 (in Perioden)	1					
Stromzeit 2 (in Perioden)	1					
Sekundärspannung (V)	4					
Druck (kp)	6					
LM 13 D	2 kA, 5 V, 10 ms					

Bemerkungen:

- Zu 1) Übergangswiderstand nach dem Anlegen der Elektroden.
 Zu 2) Übergangswiderstand nach einer Drehbewegung der Prüflingsaufhängung von ~ 2° bei angelegten Elektroden.

KFK-IT	SCHWEISSDATEN	PE-BSS 24
		PNS 4237

SCHWEISSDATEN

Meßergebnisse	T131	T132	T133	T134	T135	T136
R _{vor} (mΩ) 1)	4,0	8,0	12,5	7,4	2,7	6,8
2)						
R _{nach} (mΩ)	1,3	1,35	1,4	1,4	1,4	1,5
J _{eff} (kA)						
J (Ws)	39,1	39,3	38,8	39,3	38,8	38,2
Netzspannung (V)	230	230	230	230	230	230

Einstelldaten	T131	T132	T133	T134	T135	T136
Leistung 1 (Skt)	81	81	81	81	81	81
Leistung 2 (Skt)	91	91	91	91	91	91
Stromzeit 1 (in Perioden)	1					
Stromzeit 2 (in Perioden)	1					
Sekundärspannung (V)	4					
Druck (kp)	6					
LM 13 D	2 kA, 5 V, 10 ms					

Bemerkungen:

- Zu 1) Übergangswiderstand nach dem Anlegen der Elektroden.
 Zu 2) Übergangswiderstand nach einer Drehbewegung der Prüflingsaufhängung von ~ 2° bei angelegten Elektroden.

KFK-IT	SCHWEISSDATEN	PE-BSS 25
		PNS 4237

SCHWEISSDATEN

Meßergebnisse	T131	T132	T133	T134	T135	T136
R_{vor} (m Ω)	15,0	8,5	14,0	9,0	10,0	15,0
	1)					
	2)					
R_{nach} (m Ω)	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5
J_{eff} (kA)						
J (Ws)	39,0	38,5	38,9	36,9	40,9	38,6
Netzspannung (V)	230	230	230	230	230	230

Einstelldaten	T131	T132	T133	T134	T135	T136
Leistung 1 (Skt)	81	81	81	81	81	81
Leistung 2 (Skt)	91	91	91	91	91	91
Stromzeit 1 (in Perioden)	1					
Stromzeit 2 (in Perioden)	1					
Sekundärspannung (V)	4					
Druck (kp)	6					
LM 13 D	2 kA, 5 V, 10 ms					

Bemerkungen:

- Zu 1) Übergangswiderstand nach dem Anlegen der Elektroden.
 Zu 2) Übergangswiderstand nach einer Drehbewegung der Prüflingsaufhängung von $\sim 2^\circ$ bei angelegten Elektroden.

KFK-IT	SCHWEISSDATEN	PE-BSS 26
		PNS 4237

SCHWEISSDATEN

Meßergebnisse	T131	T132	T133	T134	T135	T136
R_{vor} (m Ω)	10,5	13,5	6,5	5,0	14,0	4,0
R_{nach} (m Ω)	1,6	1,6	1,5	1,4	1,6	1,5
J_{eff} (kA)						
J (Ws)	37,6	37,3	37,9	40,2	37,9	36,9
Netzspannung (V)	230	230	230	230	230	230

Einstelldaten	T131	T132	T133	T134	T135	T136
Leistung 1 (Skt)	81	81	81	81	81	81
Leistung 2 (Skt)	91	91	91	91	91	91
Stromzeit 1 (in Perioden)	1					
Stromzeit 2 (in Perioden)	1					
Sekundärspannung (V)	4					
Druck (kp)	6					
LM 13 D	2 kA, 5 V, 10 ms					

Bemerkungen:

- Zu 1) Übergangswiderstand nach dem Anlegen der Elektroden.
 Zu 2) Übergangswiderstand nach einer Drehbewegung der Prüflingsaufhängung von $\sim 2^\circ$ bei angelegten Elektroden.

KFK-IT	SCHWEISSDATEN	PE - BSS 28
		PNS 4237

Danksagung

Allen an der Lösung des Temperatur-Meßproblems Beteiligten sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Besonderer Dank gilt den Herren E.H. Karb, L. Sepold und B. Räßle für die Anregung zu diesem Bericht sowie die Hinweise und Diskussionen bei dessen Erstellung. Herrn Dr. Romer sei herzlich gedankt für die Literaturrecherchen zur Schweißbarkeit von Zirkon, ebenso Herrn Schlager für die Durchführung der Prüfungen beim TE-Hersteller und Herrn Jochim für die vielfältigen Kalibrier-Arbeiten. Besonderen Dank schulde ich Herrn Junker für die konstruktive Arbeit zur Kopplungs- und Schweißvorrichtung, Herrn Albinus für den persönlichen Einsatz bei der Durchführung der vielen Schweißversuche und den Herren E. Mößner und B. Roth für die gute Zusammenarbeit bei den Montagearbeiten in der Abschirmzelle des FR2.