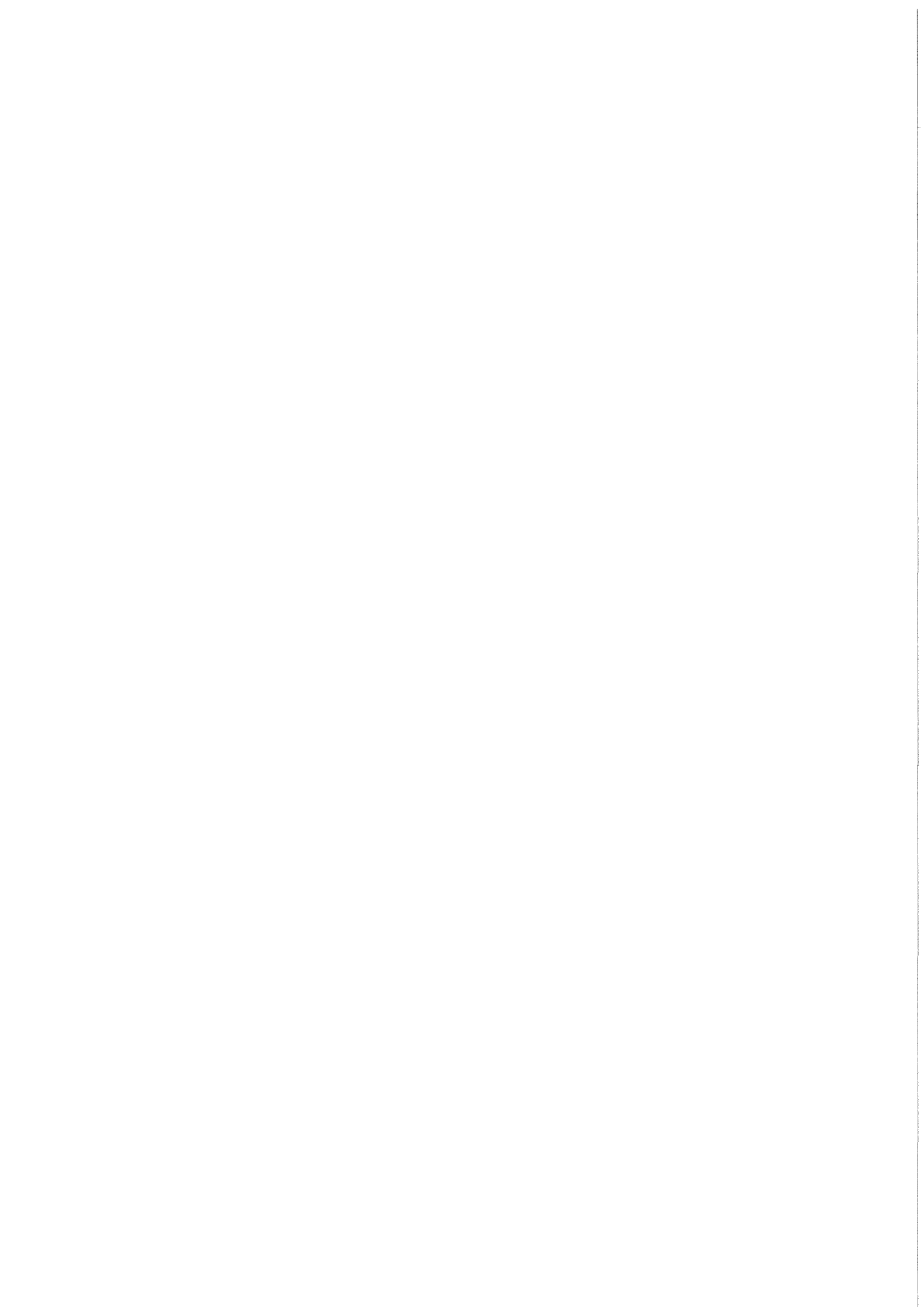


KfK 3918  
Oktober 1985

**Parameterstudie zum  
Korrosionsverhalten von  
Schweißverbindungen  
verschiedener austenitischer  
CrNi-Stähle in siedender 65%-iger  
Salpetersäure (Huey-Test)**

M. Schneider, R. Kraft  
Institut für Material- und Festkörperforschung  
Projekt Wiederaufarbeitung und Abfallbehandlung

**Kernforschungszentrum Karlsruhe**



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE  
Institut für Material- und Festkörperforschung  
Projekt Wiederaufarbeitung und Abfallbehandlung

KfK 3918  
PWA 34/85

Parameterstudie zum Korrosionsverhalten  
von Schweißverbindungen verschiedener  
austenitischer CrNi-Stähle in siedender  
65 %-iger Salpetersäure (Huey-Test)

M. Schneider, R. Kraft

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

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

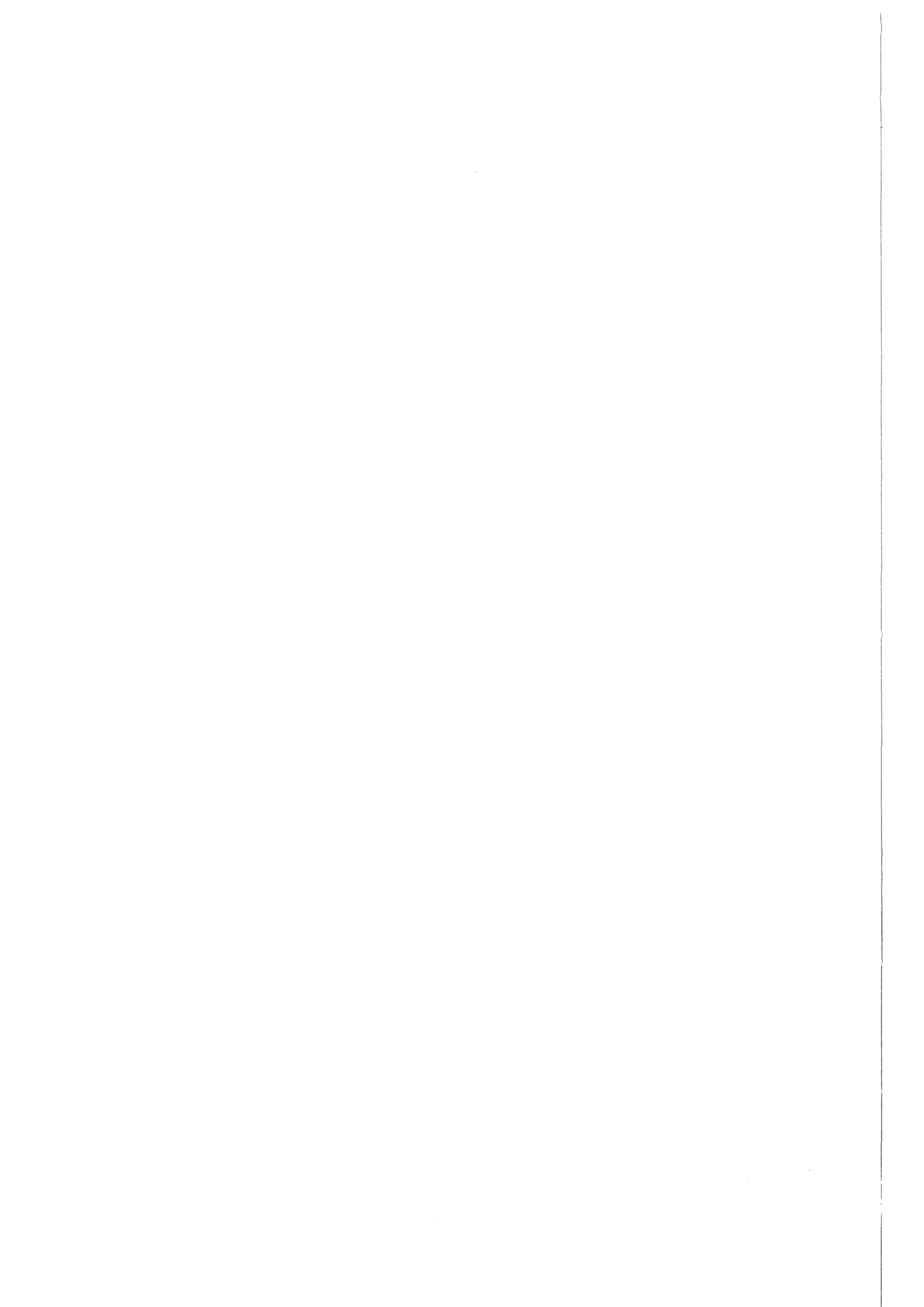
Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH  
ISSN 0303-4003

Parameterstudie zum Korrosionsverhalten von  
Schweissverbindungen verschiedener austenitischer CrNi-Stähle  
in siedender 65 %-iger Salpetersäure (Huey-Test)

Im Zusammenhang mit der Korrosionsprüfung einer Vielzahl von austenitischen CrNi-Stählen auf ihre Eignung als Anlagenwerkstoffe in der Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen wurden an Schweissproben aus verschiedenen Grundwerkstoff/Zusatzwerkstoff-Kombinationen Korrosionsversuche unter den standardisierten Bedingungen des Huey-Tests durchgeführt. Die untersuchten Grundwerkstoffe waren austenitische CrNi-Stähle der Typen 18Cr10Ni, 25Cr20Ni und 17Cr14Ni4Si, die Schweisszusatzwerkstoffe austenitische CrNi-Stähle der Typen 18Cr10Ni, 25Cr20Ni und 29Cr36Ni. Als Parameter wurden Hersteller, chemische Zusammensetzung, Wärmebehandlung, Schweissnahtform und Blechwalzrichtung variiert.

Der Einfluss des Schweissens auf das Korrosionsverhalten sollte untersucht werden hinsichtlich der Schweissverbindung als Ganzem, der Grundwerkstoffe, der Schweisszusatzwerkstoffe und der Wärmeeinflusszone (WEZ). Aus dem Huey-Test wurden Abtragsgeschwindigkeiten (Gravimetrie) und Korrosionseindringtiefen (Metallographie) als Korrosionsdaten gewonnen.

Die Grundwerkstoffe werden weder durch das Schweissverfahren noch durch die Verbindung mit den Schweisszusatzwerkstoffen in ihrem Korrosionsverhalten beeinflusst. Die erhaltenen Korrosionsdaten sind identisch mit den aus früheren Untersuchungen an unverschweissten Proben gewonnenen. Die Schweisszusatzwerkstoffe verhalten sich im verschweissten Zustand gegenüber interkristalliner Korrosion besser als alle Grundwerkstoffe. Sie werden durch Grundwerkstoffe mit hohen Abtragsraten ungünstig beeinflusst. Mit abnehmenden CrNi-Gehalten wird auch die Resistenz gegen interkristalline Korrosion geringer. In den Wärmeeinflusszonen (WEZ) wird bei den hier vorliegenden Temperatur-Zeit-Vorgaben keine vermehrte interkristalline Korrosion festgestellt.

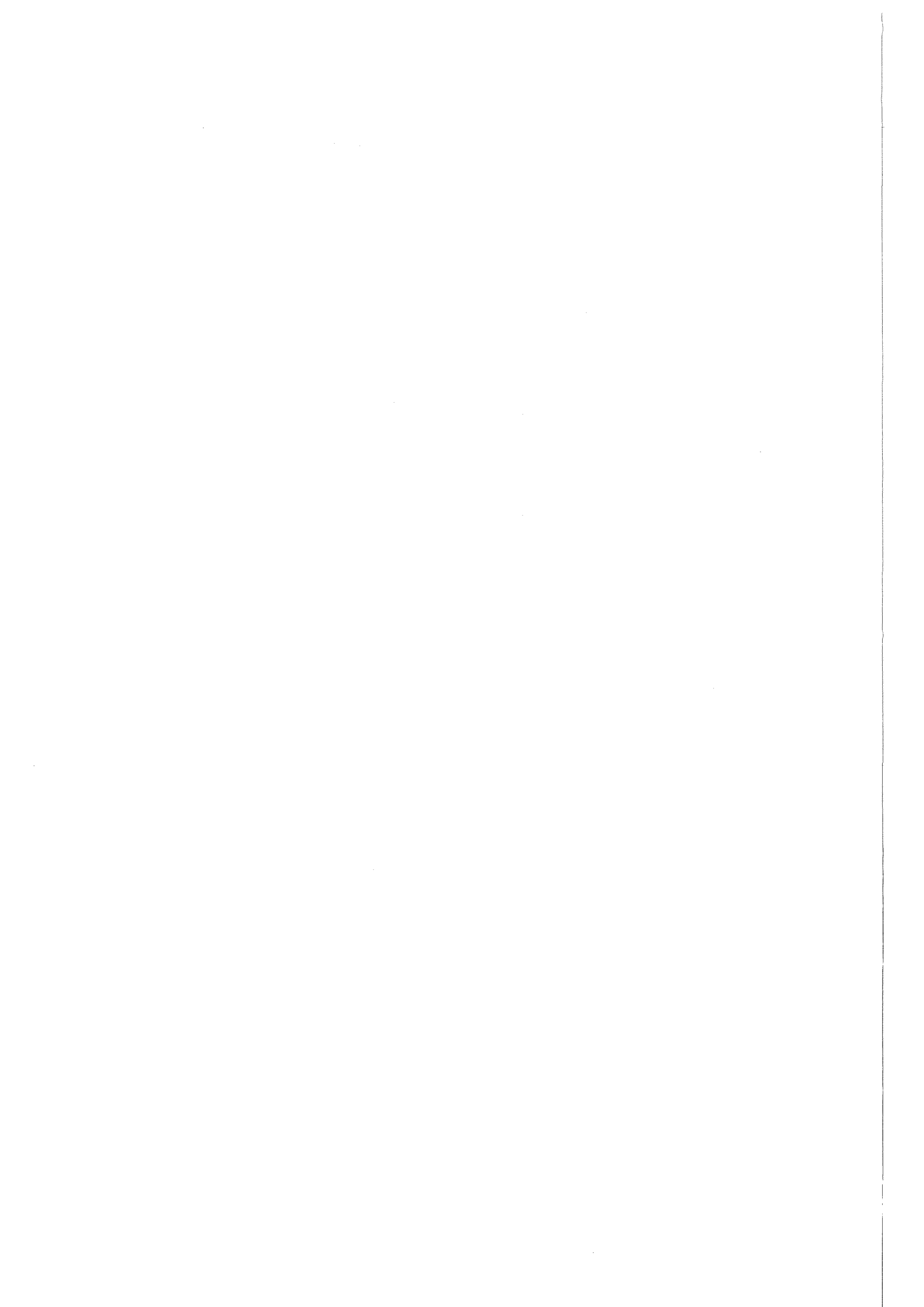


Parameter Study of the Corrosion Behaviour  
of Welding Joints Combining Various Austenitic Stainless  
Steels in Boiling 65 % Nitric Acid  
(Huey - Test)

As part of the corrosion testing of numerous austenitic CrNi-steels as appropriate materials for nuclear reprocessing purposes welding samples, made of various matrix and welding filler materials, had been subject to corrosion testing under ASTM Standard Huey-Test conditions. The tested matrix materials were austenitic steels of typ 18Cr10Ni, 25Cr20Ni and 17Cr14Ni4Si, the tested welding filler materials were austenitic steels of type 18Cr10Ni, 25Cr20Ni and 29Cr36Ni. The following parameters were modified: producer, chemical composition, heat treatment, weld form and the direction of rolled sheet metal.

The influence of welding on corrosion behaviour was investigated with respect to the welding joint as a whole, the matrix materials, the welding filler materials and the heat affected zone (HAZ). By gravimetry the rate of metal loss, by metallography the depth of local dissolution was checked and evaluated as corrosion data.

The resulting corrosion behaviour of matrix materials was not affected by the process of welding and the combination with welding filler materials. Corrosion data confirm results of recent investigations on unwelded samples. After welding, the welding filler materials are better resistant against intergranular corrosion than all matrix materials. Their behaviour is unfavourably influenced by matrix materials with high corrosion rates. With decreasing contents of chromium and nickel the resistance against intergranular corrosion also gets worse. Within the heat affected zones (HAZ) there is no accelerated intergranular corrosion caused by the applied heat treatment.





<u>Gliederung</u>	<u>Seite</u>
1. Einleitung	9
2. Experimenteller Teil	
2.1 Probenmaterial	10
2.2 Probenvorbereitung	11
2.2.1 Verschweißen gleichartiger und ver- schiedener Materialien	11
2.2.2 Temperaturmessungen während des Schweißens	12
2.3 Probenahme	12
3. Korrosionsuntersuchungen nach der Huey-Prüfmethode	12
3.1 Grundsätzliches Vorgehen	12
3.2 Durchführung des Huey-Tests	13
3.3 Nachuntersuchungen	14
4. Experimentelle Ergebnisse	15
4.1 Korrosionsverhalten der Grundwerkstoffe im Huey-Test	15
4.1.1 Werkstoffe Nr.1.4306s technisch lösungs- geglüht, verschweißt mit Zusatzwerkstoff Nr. 2.4656 (Thyssen, Thermanit 30/40E/SG)	15
4.1.1.1 - 1.4306s, Creusot-Loire, Charge TO 805, Schmiedematerial und Blech 12 mm, U-Naht (Versuch JS 59)	16
4.1.1.2 - 1.4306s, Krupp-SW, Charge 294273, Schmiedematerial, U-Naht (Versuch JS 87)	17
4.1.1.3 - 1.4306s, Krupp-SW, Charge 293783, Blech 10 mm, parallel Walzrichtung, U-Naht (Versuch JS 67)	18
4.1.1.4 - 1.4306s, Krupp-SW, Charge 293783, Blech 10 mm, quer Walzrichtung, U-Naht (Versuch JS 69)	19
4.1.2 Werkstoffe Nr.1.4306s technisch lösungs- geglüht, verschweißt mit Zusatzwerkstoff Nr. 1.4316 (Thyssen, Thermanit JE/SG)	19

4.1.2.1	- 1.4306s, Krupp-SW, Charge 293783, Blech 10 mm, U-Naht (Versuch JS 65)	19
4.1.2.2	- 1.4306s, Krupp-SW, Charge 294273, Schmiedematerial, U-Naht (Versuch JS 85)	20
4.1.3	Werkstoff Nr. 1.4306s technisch lösungsge- glüht, verschweißt mit Zusatzwerkstoff 2RE10 (Sandvik)	21
4.1.3.1	- 1.4306s, Krupp-SW, Charge 294273, Schmiedematerial und Schmiedematerial wärmebehandelt (3 min, 1050°C), U-Naht (Versuch JS 81)	21
4.1.4	Werkstoff Nr. 1.4306s ESU, Krupp-SW, Charge 018876, Schmiedematerial technisch lösungsgeglüht, verschweißt mit verschiedenen Zusatzwerkstoffen	23
4.1.4.1	- 1.4306s ESU, verschweißt mit Zusatzwerkstoff Nr. 24656 (Thyssen, Thermanit 30/40E/SG), U-Naht (Versuch JS 75)	23
4.1.4.2	- 1.4306s ESU, verschweißt mit Zusatzwerkstoff Nr. 2.4656 (Thyssen, Thermanit 30/40E/SG), V-Naht (Versuch JS 80)	24
4.1.4.3	- 1.4306s ESU, verschweißt mit Zusatzwerkstoff Nr. 1.4316 (Thyssen, Thermanit JE/SG), U-Naht (Versuch JS 73)	25
4.1.4.4	- 1.4306s ESU, verschweißt mit Zusatzwerkstoff 2RE10 (Sandvik), Schmiedematerial technisch lösungsgeglüht und Schmiedematerial wärmebe- handelt (3 min, 1050°C), U-Naht (Versuch JS 71)	25
4.1.5	Werkstoff UHB 25L, Nyby-Uddeholm, Charge LU 9367 Blech 10 mm, technisch lösungsgeglüht, ver- schweißt mit Zusatzwerkstoff Nr. 2.4656 (Thyssen, Thermanit 30/40E/SG), U-Naht (Versuch UHB 112)	26
4.1.6	Werkstoffe UHB25L, Nyby-Uddeholm, Charge LU 9367, Blech 10 mm, technisch lösungsgeglüht, ver- schweißt mit Zusatzwerkstoff 2RE10 (Sandvik)	27

4.1.6.1	- UHB 25L, Blech parallel Walzrichtung, V-Naht (Versuch UHB 115)	27
4.1.6.2	- UHB 25L, Blech parallel Walzrichtung, U-Naht (Versuch UHB 114)	27
4.1.6.3	- UHB 25L, Blech quer Walzrichtung, V-Naht (Versuch UHB 121)	28
4.1.7	Werkstoff URANUS 65, Creusot-Loire, Charge T7393, Blech 6 mm, technisch lösungsgeglüht, verschweißt mit Zusatzwerkstoff Nr. 2.4656 (Thyssen, Thermanit 30/40E/SG), V-Naht (Versuch UR 107)	28
4.1.8	Werkstoff URANUS S1, Creusot-Loire, Muster, Blech 7 mm, verschweißt mit Zusatzwerkstoff Nr. 2.4656 (Thyssen, Thermanit 30/40E/SG), U-Naht (Versuch US 13)	29
4.2	Korrosionsverhalten der Zusatzwerkstoffe im Huey-Test	30
4.2.1	Allgemeiner Befund	30
4.2.2	Zusatzwerkstoff Nr. 2.4656 (Thyssen, Thermanit 30/40E/SG)	31
4.2.3	Zusatzwerkstoff 2RE10 (Sandvik)	32
4.2.4	Zusatzwerkstoff Nr. 1.4316 (Thyssen, Thermanit JE/SG)	33
4.3	Korrosionsverhalten der Grundwerkstoffe in der Wärme- einflußzone (WEZ)	33
4.4	Temperatureinfluß des Schweißvorgangs auf die Umgebung der Schweißnähte	34
5.	Zusammenfassung der Ergebnisse	35
6.	Danksagung	37
7.	Literatur	37



Parameterstudie zum Korrosionsverhalten von  
Schweissverbindungen verschiedener austenitischer CrNi-Stähle  
in siedender 65 %-iger Salpetersäure (Huey-Test)

1. Einleitung

Zur Voraussage eines möglicherweise zu erwartenden Langzeitverhaltens von Materialien für Wiederaufarbeitungsanlagen wurden an einer Vielzahl von Materialien Korrosionsuntersuchungen in siedender 65 %-iger Salpetersäure (Huey-Test) durchgeführt /1,2/. Bei diesen Untersuchungen beschränkte man sich überwiegend auf die Prüfung des Grundwerkstoffes ohne bislang verarbeitungstechnische Aspekte zu berücksichtigen.

Schweissnähte stellen in der Regel Schwachstellen hinsichtlich der Korrosionsbeständigkeit einer Konstruktion dar. Das macht zusätzliche Untersuchungen erforderlich, für die es jedoch an aussagefähigen Beispielen hinsichtlich der für uns interessanten Werkstoffgruppen mangelt. Die Ursache hierfür liegt in der bei solchen Untersuchungen schwer überschaubaren Parametervielfalt, die sich bei der Herstellung von Schweissverbindungen zwangsläufig ergibt. Obwohl die Mehrzahl der Variablen nur schwer in den "Griff zu bekommen" ist, erscheint es lohnenswert, Korrosionsuntersuchungen an Schweissnähten durchzuführen, da gerade die hier vorzufindende Vielfalt der Werkstoffzustände auch beim Bau von Wiederaufarbeitungsanlagen auftritt. Die Untersuchung von Schweissnähten an speziell vorbereiteten Proben im Huey-Test kann zwar, wie allgemein bei allen Versuchen im Labormassstab, nicht die in der Praxis auftretenden Korrosionsbedingungen lückenlos simulieren. Der Huey-Test kommt jedoch unter allen bekannten Prüfmethoden diesem Ziel noch am nächsten und wird deshalb bei Qualitätsuntersuchungen an Werkstoffen für Wiederaufarbeitungsanlagen favorisiert.

Mit diesem Bericht wird der Versuch unternommen, trotz der oben genannten Schwierigkeiten, Tendenzen im Korrosionsverhalten von Grundwerkstoffen, Schweisszusatzwerkstoffen und in den Wärmeeinflusszonen aufzuzeigen. Anhand der gewonnenen Ergebnisse könnten dann bei späteren Untersuchungen Variable, die hier keinen Einfluss auf das Korrosionsverhalten hatten, von vornherein unberücksichtigt bleiben. Möglicherweise können auch einzelne Material-/Verarbeitungskombinationen als unbrauchbar verworfen werden, wenn sie durch ein besonders ungünstiges Korrosionsverhalten auffallen.

## 2. Experimenteller Teil

### 2.1 Probenmaterial

Als Grundwerkstoffe wurden die folgenden Werkstoffe verwendet. Ihre chemische Zusammensetzung ist in Abb.1 wiedergegeben (s.S. 40).

Werkstoff	Hersteller	Charge	Typ
1.4306s	Krupp-SW	294273	1810 CrNi Stahl
1.4306s	Krupp-SW	293783	"
1.4306s	Creusot-Loire	TO 805	"
1.4306s ESU	Krupp-SW	018876	"
UHB 25L	Nyby-Uddeholm	LU9367	2520 CrNi Stahl
URANUS 65	Creusot-Loire	T 7397	"
URANUS S1	Creusot-Loire		1714 CrNiSi Stahl

Als Zusatzwerkstoffe wurden eingesetzt

Werkstoff	Hersteller
2.4656	Thyssen (Thermanit 30/40 E/SG)
1.4316	Thyssen (Thermanit JE/SG)
2RE10	Sandvik

Im Normalfall wurden zwei Teile des gleichen Werkstoffes unter Zugabe des jeweiligen Zusatzwerkstoffes miteinander verschweisst. Lediglich bei den Versuchen, beschrieben in 4.1.3.1 und 4.1.4.4, wurden Probenmaterialien in unterschiedlichen Anfangszuständen miteinander verschweisst.

## 2.2 Probenvorbereitung

Die durchgeführten Schweißversuche, der jeweils verwendete Schweißzusatzwerkstoff und die Besonderheiten der Grundwerkstoffe sind in Abb. 2 zusammengefasst. Die Schweißnahtvorbereitung, das Anbringen der Thermoelemente und das Verschweißen der Proben wurde am Fraunhofer-Institut für Angewandte Materialforschung in Bremen durchgeführt.

### 2.2.1 Verschweißen gleichartiger und verschiedener Materialien

Es wurden U- oder V-Nähte angelegt, die in Mehrlagenschweißung mit Zusatzwerkstoff aufgefüllt wurden. Die ersten drei Lagen wurden im WIG-Verfahren, die restlichen 6-10 Lagen nach dem E- Handverfahren verschweisst (Abb.3a). Vor jeder neuen Lage waren die Proben auf Raumtemperatur abgekühlt. Die Schweißgeschwindigkeit während des WIG-Schweißens variierte zwischen 5.3 und 11 cm/min von Lage zu Lage, während des E-Hand-Lichtbogenschweißens zwischen 7.7 und 36.7 cm/min. Beim WIG-Verfahren wurde als Schutzgas Ar 99.997

mit einem Verbrauch von 10 l/min und als Wurzelgas Ar + H<sub>2</sub> mit einem Verbrauch von 20 l/min verwendet. Der Schweissstrom lag zwischen 55 und 80 A. Der Schweissstrom beim E-Hand-Lichtbogenschweissen variierte von 80-100 A.

### 2.2.2 Temperaturmessungen während des Schweissens

Um Informationen über die während des Schweissvorgangs auftretenden Temperaturen in der Umgebung der Schweissnaht und der Wärmeeinflusszone zu gewinnen, wurden Bohrungen nach der in Abb.3b gezeigten Weise angelegt und mit NiCr-Ni Mantelthermoelementen bestückt. Die damit ermittelten Temperaturverläufe sind in Abb.3l an einem Beispiel zu sehen und werden in 4.4 diskutiert.

### 2.3 Probenahme

Aus den auf diese Weise verschweissten Werkstücken wurden die Proben in Form des Teils A in Abb.3b herausgefräst, nach gründlicher Reinigung elektropoliert und dann im Huey-Test eingesetzt. Die Abb.5-9 zeigen die Geometrie der einzelnen Schweissproben, die Art der Schweissnaht und die Stellen, an denen den Proben Teile für metallographische Querschliffe entnommen wurden.

## 3. Korrosionsuntersuchungen nach der Huey-Prüfmethode

### 3.1 Grundsätzliches Vorgehen

Der Huey-Test ist ein zuerst in den USA nach ASTM und später auch in Europa nach Euronorm standardisiertes Verfahren, das zur Untersuchung der Korrosionsbeständigkeit nichtrostender Stähle in siedender (120° C) 65 %-iger Salpetersäure eingesetzt wird /3,4,5/. Dieses Verfahren prüft auf Gewichtsverlust, der sich durch allgemeinen, gleichmässigen Abtrag der Oberflächen, durch selektive Auflösung von Kornflächen, selektive Auflösung von



korngrenzennahen Bereichen, Auflösung von Ausscheidungen auf Korngrenzen, aber auch durch "Herausfallen" ganzer Körner ergeben kann. In der Praxis überlagern sich diese Erscheinungsformen des Korrosionsangriffs. Vor allem bei unbeständigen Stählen kommt es im Laufe der fortschreitenden Metallauflösung zur verstärkten Aufrauung und damit Vergrößerung der ursprünglichen Probenoberfläche, wodurch das zu Versuchsbeginn eingestellte Oberflächen- zu Säuremengen-Verhältnis verändert wird. Des weiteren reichern sich durch die Metallauflösung die Korrosionsprodukte in der zerklüfteten Oberfläche und in der Salpetersäure an. Dadurch kann eine Verschiebung des freien Korrosionspotentials von anfänglich etwa 900 mV (nhe) auf etwa 1300 mV (nhe) (damit in den Transpassivbereich hinein) eintreten, wodurch die Korrosionsbedingungen erheblich verschärft werden /6/.

Die Korrosionsprodukte werden bei den periodischen Unterbrechungen mit Säureerneuerung zwar aus der Lösung entfernt, können sich aber mit fortschreitender Korrosion in den angegriffenen Korngrenzen anreichern. Das Huey-Verfahren eignet sich deshalb aufgrund seiner Praxisnähe zur vergleichenden Korrosionsprüfung von Anlagenwerkstoffen in Salpetersäure, wo (wie in der Aufarbeitung von Kernbrennstoffen) sich durch verfahrenstechnische oder konstruktionsbedingte Gegebenheiten Korrosionsprodukte anreichern und dann erhöhte Korrosionspotentiale im Transpassivbereich zur Folge haben können. Austenitische CrNi-Stähle erleiden bei diesen Bedingungen oft starke, überwiegend interkristalline Korrosionsschädigungen (im folgenden kurz IK genannt).

### 3.2 Durchführung des Huey-Tests

Jeweils eine der elektropolierten Schweissproben wurde nach dem Reinigen und Wiegen in einem Glaskolben unter Einhaltung des geforderten Oberflächen/Volumen-Verhältnisses (pro  $1 \text{ cm}^2$  Probenoberfläche 20 ml

Salpetersäure, 65 %-ig) in siedender Salpetersäure der Korrosion ausgesetzt (Huey-Test). Nach jeweils 48 Stunden Versuchsdauer (1 Periode) wurden die Proben mit Wasser gewaschen, getrocknet, gewogen und dann erneut in frischer Salpetersäure eingesetzt. Für die standardisierte Durchführung des Huey-Tests ist eine Versuchszeit von nur 5 Perioden vorgeschrieben. Die Praxis ergab jedoch /1,2/, dass sich oft erst nach 10-15 Perioden deutliche Hinweise auf mangelnde Korrosionsbeständigkeit abzuzeichnen beginnen. Die Prüfzeit wurde deshalb auf 15 Perioden ausgedehnt und damit die Basis für eine Langzeitaussage erheblich verbessert.

### 3.3 Nachuntersuchungen

Nach Durchführung der Huey-Tests wurden gemäss Abb.5-9 Metallstücke aus den Versuchsproben herausgesägt und diese dann nach metallographischer Vorbereitung auflichtmikroskopisch untersucht. Die Überprüfung des Gewichtsverlustes wurde über 15 Perioden zu je 48 Stunden mit einer Analysenwaage durchgeführt. Die Werte wurden auf die Gesamtoberfläche der Probe in  $\text{mg}/\text{dm}^2$  bezogen und als mittlere Metallabtragsgeschwindigkeit pro Periode ( $\text{mg}/\text{dm}^2 \text{ d}$ ) bzw. extrapoliert auf ein Jahr ( $\text{mm}/\text{a}$ ) wiedergegeben. Der Verlauf der Abtragsgeschwindigkeit über 15 Perioden für alle durchgeführten Versuche ist den Abb.32-48 zu entnehmen. Eine Übersicht über die Abtragsgeschwindigkeit in der 5. und 15. Periode für alle Versuche gibt die Abb.30. Da bei Schweissproben verschiedene Werkstoffe miteinander kombiniert werden und keine definierte Probenoberfläche vorliegt, kann die Angabe von Gewichtsverlusten als integrale Grösse nicht das Korrosionsverhalten des einzelnen Werkstoffs beschreiben. Weil an praktisch allen Schweissproben IK oder IK-ähnliche Korrosion auftrat, wurden die in die Tiefe des Werkstoffs führenden Schädigungen in Matrix und Schweissgut (decklagenseitig und wurzelseitig) ausgemessen. Bei Vorliegen vieler IK-Angriffsstellen wurde eine mittlere und eine grösste IK-Eindringtiefe angegeben. In Fällen vereinzelter IK fand lediglich die tiefste Schädigung

Berücksichtigung. Diese Vorgehensweise trägt einer möglichen Bauteileschädigung durch "Voreilen" eines einzigen, örtlichen Korrosionspfades Rechnung und berücksichtigt damit den ungünstigsten Fall, der im Korrosionstest auftrat. Der hier verwendete Begriff IK ist nicht als interkristalline Korrosion im klassischen Sinne gemäss z.B. der Chromverarmungstheorie zu verstehen, da der Huey-Test nicht bei den typischen IK-Potentialen prüft. Das Erscheinungsbild der Korrosion im Transpassivbereich ist aber teilweise sehr der IK ähnlich, weshalb dieser Begriff zur Beschreibung der beobachteten Korrosionsform recht günstig ist. Neben einem bevorzugten Angriff der Korngrenzen finden sich jedoch noch andere Korrosionsformen, wobei sich der Angriff an Gefügeheterogenitäten, Ausscheidungen etc. orientieren kann. Folgende Messgrössen dienen zur Beurteilung und Deutung der im Experiment erhaltenen Korrosionserscheinungen:

- Massenverlust der Proben über 15 Perioden im Huey-Test
- IK-Eindringtiefe nach der 15. Periode im Huey-Test in Matrix und Schweissgut

Die Messdaten wurden durch Oberflächenaufnahmen und metallographische Querschliffe ergänzt.

Eine Übersicht über die Vorgehensweise bei der Korrosionsuntersuchung gibt Tafel 1 (Seite 39).

#### 4. Experimentelle Ergebnisse

##### 4.1 Korrosionsverhalten der Grundwerkstoffe im Huey-Test

4.1.1 Werkstoffe Nr. 1.4306s, technisch lösungsgeglüht, verschweisst mit Zusatzwerkstoff Nr. 2.4656 (Thyssen, Thermanit 30/40E/SG)

Es wurde Material der Firma Creusot-Loire (Charge Nr. TO 805) und der Firma

Krupp-SW (Charge Nr. 294273 und Charge Nr. 293783) untersucht.

4.1.1.1 1.4306s, Creusot-Loire, Ch. TO 805, Schmiedematerial und  
Blech 12 mm, U-Naht (Versuch JS 59)

Von diesem Werkstoff wurde ein Teil im Anlieferungszustand aus Schmiedematerial und ein lösungsgeglühtes Teil ( $3'1050^{\circ}$  C) aus Blechmaterial 12 mm unter Zugabe von Zusatzwerkstoff Nr.2.4656 miteinander verschweisst. Die Abtragsraten dieser Werkstoffkombination lag in der 5. Periode bei 0.16 mm/a in der 15. Periode bei 0.23 mm/a. Die Korrosionsgeschwindigkeit erhöhte sich linear mit der Anzahl der Huey-Perioden (Abb.32).

Das Schmiedematerial im Anlieferungszustand (Versuch JS 59/J2) wies perl schnurartige Ausscheidungen entlang der Korngrenzen auf und besass eine durchschnittliche Korngrösse von 110  $\mu$ m (Abb.10a). Neben massiver interkristalliner Korrosion wurden auch Kornflächen angegriffen und teilweise fielen ganze Körner heraus. Die mittlere Eindringtiefe der IK lag bei 75  $\mu$ m, die grösste Eindringtiefe bei 155  $\mu$ m (Abb.27, Versuch JS 59/J2).

Die Angaben über die IK-Eindringtiefen beziehen sich hier wie im folgenden immer auf eine Gesamtversuchsdauer von 720 h (15 Perioden Huey) nach der die Proben metallographisch untersucht wurden.

Die mittleren und maximalen IK-Eindringtiefen für Grundwerkstoff und Schweissnaht (decklagenseitig, wurzelseitig) für diesen und alle weiteren Versuche sind Abb. 27-29 zu entnehmen.

Das Blechmaterial (Versuch JS59/J8) erfuhr im Anlieferungszustand eine erheblich geringere Schädigung durch IK mit einer mittleren Eindringtiefe von 17  $\mu$ m und

einer grössten IK Eindringtiefe von 28  $\mu\text{m}$ . Die Oberfläche wurde gleichmässig korrodierend abgetragen und vereinzelt durch relativ "stumpfe" IK geschädigt (Abb.10b). Die gesamte Abtragsrate von 0.16 mm/a in der 5. und von 0.23 mm/a in der 15. Periode als integraler Wert für die Kombination aus beiden Materialien durch Verschweissen miteinander, lag etwas höher als die der vergleichbaren Werkstoffkombinationen und muss der äusserst starken Anfälligkeit des Schmiedematerials zugeschrieben werden (Abb.10a).

Schweissnaht: Werkstoff Nr. 2.4656

Die Decklagenseite der Schweissnaht war sehr beständig gegenüber IK und zeigte lediglich eine gewisse Oberflächenrauigkeit (Abb.17a). Die Wurzelseite der Schweissnaht hingegen wurde von IK angegriffen, was sich in Abb.17b in Form von "IK-Keilen" zeigt. Die mittlere IK-Eindringtiefe lag bei 25  $\mu\text{m}$ , die maximale IK-Eindringtiefe bei 48  $\mu\text{m}$ . Innerhalb des Schweissgutes befand sich ein Lunker mit ca. 50  $\mu\text{m}$  Durchmesser (Abb.19a).

Anmerkung: Die Korrosionserscheinungen im Schweissgutbereich sind für alle Versuche sehr ähnlich, weshalb auf deren einzelnen metallographischen Nachweis im Querschliff hier im weiteren verzichtet wird. Die Angabe der Tiefe der Korrosionsschädigung genügt zur Beschreibung des Korrosionsverhaltens. Die Abb. 19-25 dienen zur Übersicht des Schweissnahtbereichs, weshalb auf eine stärkere Vergrösserung verzichtet wurde.

4.1.1.2 1.4306s, Krupp-SW, Ch. 294273, Schmiedematerial, U-Naht  
(Versuch JS 87)

Das Schmiedematerial dieser Charge zeigte im Querschliff Ausscheidungen auf den Korngrenzen und auch in den Kornflächen und besass eine mittlere Korngrösse von 42  $\mu\text{m}$  (Abb.11b). Die Abtragsrate in der 5. Periode betrug 0.1 mm/a, in der 15. Periode 0.22 mm/a. Die Korrosionsgeschwindigkeit erhöhte sich linear mit der Zahl der Huey-Perioden (Abb.33). Die mittlere IK-Eindringtiefe betrug 20  $\mu\text{m}$ ,

die grösste gefundene Schädigungstiefe 27  $\mu\text{m}$ . Der Angriff erfolgte mit einer sehr gleichmässigen Schädigungstiefe an fast allen Korngrenzen. Einzelne Körner waren herausgefallen und teilweise wurden auch Kornflächen aufgelöst. Die erhaltenen IK-Eindringtiefen lagen um den Faktor 3.75 günstiger als beim Schmiedematerial der Firma Creusot-Loire.

Schweissnaht: Werkstoff Nr.2.4656

Die Decklagenseite zeigte keinerlei IK-Angriff, an der Wurzelseite fand sich eine Schädigung von im Mittel 13  $\mu\text{m}$  und maximal 20  $\mu\text{m}$  Tiefe. Grössere Lunker im Schweissgut wurden nicht festgestellt (Abb.19b).

4.1.1.3 1.4306s, Krupp-SW, Charge 293783, Blech 10mm, parallel zur Walzrichtung, U-Naht (Versuch JS 67)

Es wurde hier Blechmaterial 12 mm, parallel zur Walzrichtung verschweisst. Die mittlere Korngrösse betrug 66  $\mu\text{m}$ . Im Vergleich zum Schmiedematerial der gleichen Charge lag die Abtragsrate mit 0.11 mm/a in der 5. Periode praktisch gleich, aber in der 15. Periode mit 0.19 mm/a etwas besser (Abb.34). Auch bei diesem Material waren perlschnurartige Ausscheidungen auf den Korngrenzen zu finden, die /2/ zum Probeninneren hin vermehrt auftraten (Abb.12a). Die Oberfläche wurde auch hier von IK angegriffen, einzelne Körner fielen heraus. Der Angriff erfolgte an nahezu allen Korngrenzen mit einer gleichmässigen Eindringtiefe von 12  $\mu\text{m}$ .

Schweissnaht: Werkstoff Nr.2.4656

Die Decklagenseite war frei von Schädigung durch IK. Die Wurzelseite jedoch wies 4 IK-Angriffsstellen mit einer mittleren Tiefe von 23  $\mu\text{m}$  auf. Im Schweissgut wurden keine Lunker gefunden (Abb.21a).

4.1.1.4 1.4306s, Krupp-SW, Charge 293783, Blech 10 mm, quer Walzrichtung,  
U-Naht (Versuch JS 69)

Im Unterschied zum vorhergehenden Versuch wurde hier Blechmaterial 12 mm, quer zur Walzrichtung verschweisst. Die ermittelten Korrosionsraten betragen in der 5. Periode 0.11 mm/a und in der 15. Periode 0.16 mm/a (Abb.35). Der Wert in der 5. Periode ist also gleich dem der parallel zur Walzrichtung geschweissten Probe, der Betrag in der 15. Periode liegt geringfügig günstiger. Es fanden sich wiederum perlschnurartige Ausscheidungen auf den Korngrenzen, die zum Materialinneren hin vermehrt auftraten (Abb.12b). Das Erscheinungsbild der gefundenen IK deckte sich mit dem der parallel der Walzrichtung entnommenen Probe und die Eindringtiefe betrug durchschnittlich 15  $\mu\text{m}$ . Vereinzelt erreichte die IK eine Tiefe bis zu 22  $\mu\text{m}$ .

Schweissnaht: Werkstoff Nr.2.4656

Die Decklagenseite wies keine IK auf, lediglich eine leichte Oberflächenrauhigkeit. Die Wurzelseite wurde durch IK bis in eine mittlere Tiefe von 15  $\mu\text{m}$  geschädigt. Etwaige Lunker oder sonstige Schweißfehler wurden nicht gefunden (Abb.21b)

4.1.2 Werkstoffe Nr.1.4306s technisch lösungsgeglüht, verschweisst mit Zusatzwerkstoff Nr. 1.4316 (Thyssen, Thermanit JE/SG)

4.1.2.1 1.4306s, Krupp-SW, Charge 293783, Blech 10 mm, U-Naht (Versuch JS 65)

Die Abtragsrate dieser Werkstoffkombination betrug in der 5. Periode 0.15 mm/a und in der 15. Periode 0.23 mm/a (Abb.36). Die Abtragungsgeschwindigkeit erhöhte sich linear mit der Anzahl der Huey-Perioden. Die Schädigung durch IK betraf Tiefen von 23  $\mu\text{m}$  im Durchschnitt, der tiefste Angriff wurde mit 27  $\mu\text{m}$  ermittelt. Das Erscheinungsbild der IK wiederholte sich hier in der bekannten Weise in Form

eines keilartigen Eindringens an Korngrenzen und Verbreiterung dieser Keile durch Auflösen von Kornflächen (Abb.12c). Die Korngrenzen waren perlschnurartig mit Ausscheidungen belegt. Teilweise traten diese Ausscheidungen auch in Körnern auf und wurden dann bevorzugt herausgelöst.

Schweissnaht: Werkstoff Nr.1.4316

An der Decklagenseite trat IK mit einer durchschnittlichen Tiefe von 20  $\mu\text{m}$  auf, der tiefste Angriff wurde mit 50  $\mu\text{m}$  festgestellt. Die Wurzelseite der Schweissnaht verhielt sich mit durchschnittlich 10  $\mu\text{m}$  und maximal 22  $\mu\text{m}$  IK-Tiefe im Vergleich dazu um einiges besser. Innerhalb des Schweissguts befanden sich zwei grosse Lunker, der grössere mit einer Länge von 1.2 mm und einer Breite von 0.8 mm (Abb.23a).

4.1.2.2 1.4306s, Krupp-SW, Charge 294273, Schmiedematerial, U-Naht  
(Versuch JS 85)

Der Werkstoff zeigte wie in 2.1.1.2 bereits beschrieben im metallographischen Querschliff gehäufte Ausscheidungen auf den Korngrenzen und vereinzelt auch Ausscheidungen in den Körnern (Abb.11a). Die Abtragsrate betrug in der 5. Periode 0.1 mm/a, in der 15. Periode 0.25 mm/a (Abb.37). Die Zunahme der Abtragungsgeschwindigkeit erfolgt annähernd linear mit der Anzahl der Perioden. Die Abtragsraten für diese Werkstoffkombinationen liegen somit etwas höher als für die weiter oben beschriebene Kombination 1.4306s Krupp-SW Ch.294273, Schmiedematerial, verschweisst mit dem Zusatzwerkstoff Nr.2.4656 (Abb.11b). Das schlechtere Verhalten wird beim Vergleich der IK- Eindringtiefen deutlicher. Die mittlere Eindringtiefe betrug hier 40  $\mu\text{m}$  gegenüber 20  $\mu\text{m}$  bei der Kombination mit Zusatzwerkstoff Nr.2.4656. Auch die grösste Schädigungstiefe lag mit 75  $\mu\text{m}$  gegenüber 27  $\mu\text{m}$  erheblich höher. Der Angriff erfolgte sehr regelmässig an nahezu allen Korngrenzen, mit gleichmässiger Eindringtiefe. Einzelne Körner fielen heraus. An manchen Stellen eilte der Tiefenangriff bis zu 75  $\mu\text{m}$  voraus.



Innerhalb der untersuchten Kombinationen aus Grundwerkstoff 1.4306 Krupp-SW und verschiedenen Zusatzwerkstoffen war diese Variante die ungünstigste.

Schweisnaht: Werkstoff Nr.1.4316

Schweisseitig wurde eine Aufrauhung der Oberfläche festgestellt. Nur an einer Stelle trat eine Schädigung bis in 40  $\mu\text{m}$  Tiefe auf. Wurzelseitig wurden mehrere Angriffsstellen mit Schädigungen bis zu 30  $\mu\text{m}$  gefunden. Innerhalb des Schweissgutes befand sich ein Lunker mit einer Länge von 300  $\mu\text{m}$  und einer Breite von 175  $\mu\text{m}$  (Abb.23b).

4.1.3 Werkstoff Nr. 1.4306s technisch lösungsgeglüht,  
verschweisst mit Zusatzwerkstoff 2RE10 (Sandvik)

4.1.3.1 1.4306s, Krupp-SW, Charge 294273, Schmiedematerial und Schmiedematerial wärmebehandelt (3min, 1050<sup>o</sup> C); U-Naht (Versuch JS 81)

Bei diesem Versuch wurde eine Probe im Anlieferungszustand mit einer lösungsgeglühten (3' 1050<sup>o</sup> C/H<sub>2</sub>O) Probe mit Hilfe des Schweisszusatzwerkstoffes 2RE10 verschweisst. Beide Proben für diese Werkstoffkombination wurden wie in Abb.4 zu sehen ist, als "Querscheiben" aus dem Schmiedematerial herausgearbeitet und unterschieden sich dadurch von den bisher verwendeten Proben.

Die erhaltenen Abtragungsgeschwindigkeiten bewegen sich bis zur 5. Periode mit 0.18 mm/a in den bisher bekannten Grössenordnungen und decken sich mit früheren Ergebnissen an unverschweisstem Material /1,2/. Dann setzt jedoch eine rapide, quasi-exponentielle Zunahme der Abtragungsgeschwindigkeit mit jeder weiteren Periode ein (Abb.38) und in der 15. Periode wird schliesslich eine Abtragungsgeschwindigkeit von 1.98 mm/a erhalten. Dabei unterscheiden sich die beiden miteinander verschweissten Proben stark voneinander (Abb.13). Das nicht wärmebehandelte, sich im schmiedeharten Anlieferungszustand befindende Material

(JS 81/2) wurde massiv zerstört (Abb.13a). Davon wurde die gesamte Oberfläche betroffen. Neben dem Herausfallen und der Auflösung ganzer Körner traten Aushöhlungen bevorzugt entlang von Korngrenzen, möglicherweise auch entlang von Seigerungszeilen auf. Die Schädigung des Werkstoffs war so stark, dass es schwerfiel, die ursprüngliche Probenoberfläche zu erkennen, und somit wurde es schwierig, exakte Schädigungstiefen anzugeben. Die mit dieser Einschränkung ermittelten Korrosionstiefen betrug durchschnittlich 125  $\mu\text{m}$  und an besonders geschädigten Stellen bis zu 385  $\mu\text{m}$ .

Das lösungsgeglühte Material (JS 81/1) (Abb.13b) wurde deutlich weniger, aber immer noch massiv angegriffen. So wurde eine mittlere Schädigungstiefe von 110  $\mu\text{m}$  gefunden, und die tiefste Schädigung erreichte 150  $\mu\text{m}$ . Die vermutliche, ursprüngliche Oberfläche war noch zu erkennen. Das Lösungsglühen der Probe hatte demnach eine deutliche Verbesserung des Korrosionsverhaltens zur Folge. Der Vergleich der Abb.13a und 13b miteinander zeigt auch, dass das Lösungsglühen eine Abnahme der Zahl von Ausscheidungen auf den Korngrenzen bewirkte. Die anormale, hohe Abtragsrate dieser Werkstoffkombination muss zum grössten Teil dem katastrophalen Korrosionsverhalten des Werkstoffes, der sich im Anlieferungszustand befand, zugeschrieben werden. Die verwendeten Proben, sowohl die im Anlieferungszustand als auch die im lösungsgeglühten Zustand, wurden aus dem äusseren Bereich des Knüppels (s. Abb.4) entnommen. Im Vergleich zu früheren Untersuchungen wäre dann ein relativ gutes Korrosionsverhalten zu erwarten gewesen. Untersuchungen am Material im Anlieferungszustand die zum Vergleich herangezogen werden könnten, liegen leider nicht vor. Das sehr schlechte Korrosionsverhalten muss der unbekanntem Wärmebehandlung des geschmiedeten Werkstoffes zugeschrieben werden.

#### Schweisnaht: Werkstoff 2RE10

Das Zusatzmaterial war im Vergleich zum Grundmaterial äusserst wenig angegriffen. Schweisseitig waren nur Schädigungen ver-

einzelnt bis in 45  $\mu\text{m}$  Tiefe zu erkennen, wobei offen bleibt, ob es sich um eine Korrosionseinwirkung oder einen Schweissfehler handelte. Die Wurzelseite war stark zerklüftet, da die Schweissnaht weit "durchgeschweisst" war.

Im Inneren des Schweissguts und am Übergang Schweissgut-Matrix wurden Lunken im Durchmesser von ca. 350  $\mu\text{m}$  gefunden (Abb.24a).

4.1.4 Werkstoff Nr. 1.4306s ESU, Krupp-SW, Charge 018876, Schmiedematerial technisch lösungsgelüht, verschweisst mit verschiedenen Zusatzwerkstoffen

4.1.4.1 1.4306s ESU, verschweisst mit Zusatzwerkstoff Nr. 2.4656, (Thyssen, Thermanit 30/40E/SG), U-Naht (Versuch JS 75)

Dieser Grundwerkstoff ist von einer Vielzahl grauer Ausscheidungen durchsetzt, die teilweise metallisch weiss glänzende Partikel (5  $\mu\text{m}$ ) einschliessen. Röntgenmikrosondenuntersuchungen deuten darauf hin, dass es sich bei diesen Ausscheidungen um Oxide des Aluminiums, Chroms und Siliziums, bzw. um ein Gemisch aus diesen Oxiden handelt /2/.

Die Abtragsrate betrug in der 5. und 15. Periode jeweils 0.1 mm/a. Der Abb.39 ist zu entnehmen, dass die Abtragsrate über 15 Perioden hinweg praktisch unverändert war und lediglich um den Mittelwert 0.12 mm/a schwankte. Somit unterscheidet sich dieser Werkstoff von dem bisher betrachteten 1.4306s, bei dem die Abtragsgeschwindigkeit ungefähr linear mit der Anzahl der Perioden zunahm. Insgesamt liegen die Abtragsraten, bezogen auf die 15. Periode, fast um den Faktor 2 günstiger als beim 1.4306s. Das gilt auch für die folgenden 3 Versuche am 1.4306s ESU.

Der metallographische Querschliff (Abb.14b) zeigt, dass die Oberfläche der Probe fast ausschliesslich an Korngrenzen geschädigt wurde, wobei der Angriff keilförmig und meist scharf begrenzt in die Tiefe erfolgte. Ausscheidungen entlang der Korngrenzen lagen jedoch nicht vor. Als elektroschlacke-umgeschmolzener (ESU) Werkstoff ist er wenig sensibilisierungsanfällig. Die restliche Oberfläche schien lediglich durch einen geringen allgemeinen Abtrag betroffen zu sein. Der Angriff in die Tiefe erfolgte gleichmässig mit einem mittleren Wert von 15  $\mu\text{m}$ . Die tiefste Schädigung betrug 20  $\mu\text{m}$ .

Schweissnaht: Werkstoff Nr.2.4656, U-Naht

Die Decklagenseite war frei von einem erkennbaren Korrosionsangriff. Wurzelseitig traten kerbartige Angriffe bis in 20  $\mu\text{m}$  Tiefe auf (Abb.29).

4.1.4.2 1.4306s ESU, verschweisst mit Zusatzwerkstoff Nr.2.4656  
(Thyssen, Thermanit 30/40E/SG), V-Naht (Versuch JS 80)

Es wurde eine durchschnittliche Abtragungsgeschwindigkeit von 0.11 mm/a gemessen (Abb.40). Das Erscheinungsbild des Korrosionsangriffs ist dem in Abb.14b+c identisch. Die mittlere Eindringtiefe lag bei 15  $\mu\text{m}$ . Tiefere Schädigung lag bis zu 17  $\mu\text{m}$  vor.

Schweissnaht: Werkstoff Nr.2.4656, V-Naht

Neben einer gewissen Oberflächenrauigkeit konnte an der Decklagenseite keine Schädigung durch Korrosion entdeckt werden. Auf der Wurzel-  
seite war ein einziger kerbartiger Angriff von 18  $\mu\text{m}$  Tiefe erkennbar (Abb. 20).

Beim Vergleich zwischen der U-Naht und der V-Naht wurde kein Unterschied im Korrosionsverhalten gefunden

4.1.4.3 1.4306s ESU, verschweisst mit Zusatzwerkstoff Nr. 1.4316  
(Thyssen, Thermanit JE/SG), U-Naht (Versuch JS 73)

Für diese Kombination kann wieder eine durchschnittliche Abtragsrate angegeben werden, da der Metallverlust über alle Perioden konstant war. Im Mittel ergaben sich 0.12 mm/a, also der gleiche Wert wie in Abschnitt 4.1.4.1 (Abb.41). Der Angriff erfolgte in der bekannten Weise keilförmig entlang von Korngrenzen (Abb.14a). Daneben gab es vereinzelt eine "rundere" Form des Angriffs, der sich offenbar an zufällig im Oberflächenbereich befindlichen oxidischen Ausscheidungen orientierte. Die durchschnittliche Korrosionstiefe betrug 20 µm, maximal wurden 30 µm erreicht.

Schweissnaht: Werkstoff Nr.1.4316

Die Decklagenseite war recht uneben und zeigte einen am Rekristallisationsgefüge orientierten Abtrag. Da bei dieser Probe ziemlich weit "durchgeschweisst" worden war, war die Wurzelseite extrem stark "zerklüftet". Eine ins Materialinnere führende Korrosionsform wurde nicht gefunden (Abb.23c).

4.1.4.4 1.4306s ESU, verschweisst mit Zusatzwerkstoff 2RE10 (Sandvik),  
Schmiedematerial technisch lösungsgeglüht und Schmiedematerial  
wärmebehandelt (3 min, 1050<sup>o</sup> C), U-Naht (Versuch JS 71)

Bei diesem Versuch wurde Material im Anlieferungszustand mit Material nach einer Lösungsglühung (3' 1050<sup>o</sup> C) verschweisst. Für die Abtragsraten ergaben sich die gleichen Werte wie in den vorhergehenden Versuchen am 1.4306s ESU. Sie betragen 0.11 mm/a im Mittel (Abb.42). Der Werkstoff im Anlieferungszustand erlitt wiederum den "keilförmigen" Angriff entlang von Korngrenzen (Abb.14d). Die durchschnittliche Schädigungstiefe erreichte 20 µm, maximal wurden 40 µm ermittelt. Die lösungsgeglühte Probe war in ihrem Korrosionsverhalten etwas

günstiger. Hier wurde eine mittlere Schädigung von 15  $\mu\text{m}$  Tiefe und der tiefste Angriff bei etwa 25  $\mu\text{m}$  festgestellt (Abb.14e).

Schweissnaht: Werkstoff 2RE10

Die Wurzelseite war wesentlich "zerklüfteter" als die Decklagenseite, die lediglich eine gewisse Oberflächenrauigkeit aufwies.

Ein Korrosionsangriff in die Tiefe wurde nicht festgestellt

(Abb. 24b).

4.1.5 Werkstoff UFB 25L, Nyby-Uddeholm, Charge LU9367, Blech 10 mm,

technisch lösungsgeglüht, verschweisst mit Zusatzwerkstoff

Nr. 2.4656 (Thyssen, Thermanit 30/40E/SG), U-Naht (Versuch UFB 112)

Alle Proben dieses Grundwerkstoffs wurden für die Schweissversuche im Anlieferzustand (technisch lösungsgeglüht) im Schweissversuch verwendet. Die mittlere Korngrösse betrug 85  $\mu\text{m}$ . Neben vielen feinen besitzt dieses Material auch vereinzelt grobe Ausscheidungen /1/, Abb.15. Die Abtragsrate im Huey-Test blieb über alle 15 Perioden konstant, bei einem niedrigen, durchschnittlichen Wert von 0.071 mm/a (Abb.43). Damit erweist sich dieser Grundwerkstoff unter den in dieser Untersuchung verwendeten Werkstoffen als das in 65%-iger  $\text{HNO}_3$  (120° C, 720 h) korrosionsbeständigste Material. Dieses Ergebnis wurde durch die gefundenen geringen IK-Eindringtiefen von 10  $\mu\text{m}$  erhärtet. (Abb.27). Nur an wenigen Korngrenzen (Abb.15d) erfolgte ein interkristalliner Angriff "keilförmig" ins Materialinnere. Dieses, für Korrosion im Transpassivbereich typische Erscheinungsbild des Angriffs wurde auch in den folgenden drei Versuchen am gleichen Grundwerkstoff gefunden (Abb.15a,b,c).

Schweissnaht: Werkstoff Nr.2.4656

An der Decklagenseite trat ein Angriff, orientiert an der Erstarrungsrichtung des Rekristallisationsgefüges, zwischen Dendriten

auf. Dabei wurden mittlere Tiefen von 10  $\mu\text{m}$  und in einem Fall sogar 40  $\mu\text{m}$  erreicht. Die Wurzelseite war vom Schweißen sehr zerklüftet und zeigte keinen erkennbaren Korrosionsangriff (Abb.22a).

4.1.6 Werkstoffe UHB 25L, Nyby-Uddeholm, Charge LU 9367, Blech 10 mm, technisch lösungsgelüht, verschweisst mit Zusatzwerkstoff 2RE10 (Sandvik)

4.1.6.1 UHB 25L, Blech parallel Walzrichtung, V-Naht (Versuch UHB 115)

Die mittlere Abtragsrate betrug 0.055 mm/a, die mittlere Eindringtiefe 12  $\mu\text{m}$  und die grösste Schädigungstiefe 15  $\mu\text{m}$ . Der Abtrag war wiederum über alle 15 Perioden praktisch konstant (Abb.44). Das Erscheinungsbild der Korrosion glich dem im Versuch zuvor (Abb.15a).

Schweisnaht: Werkstoff Nr 2RE10, V-Naht

Das Rekristallisationsgefüge wies teilweise sehr grosse Körner auf, wobei vereinzelt Korngrenzen decklagenseitig und wurzelseitig angegriffen wurden. Es wurden Schädigungstiefen von 10  $\mu\text{m}$  erreicht. Innerhalb des Schweissgutes wurde ein halbkugeliger Lunker von ca. 150  $\mu\text{m}$  Durchmesser gefunden (Abb.25a).

4.1.6.2 UHB 25L, Blech parallel Walzrichtung, U-Naht (Versuch UHB 114)

Die über 15 Perioden praktisch konstante Metallabtragsgeschwindigkeit lag bei 0.068 mm/a (Abb.45), die mittlere IK-Eindringtiefe bei 7  $\mu\text{m}$ . Die grösste IK-Schädigung betrug 10  $\mu\text{m}$  Tiefe (Abb.26). Das Material (Abb.15b) wurde in gleicher Weise wie in Abb.15d und Abb.15a geschädigt.

Schweisnaht: Werkstoff Nr. 2RE10, U-Naht

Die als U-Naht hergestellte Schweissverbindung wies die gleichen Schädigungen auf wie die als V-Naht erstellte Verbindung. Es wurde jedoch kein Lunker gefunden (Abb. 25b).

4.1.6.3 UHB 25L, Blech quer Walzrichtung, V-Naht (Versuch UHB 121)

Es ergab sich wiederum eine konstante Abtragungsgeschwindigkeit von 0.061 mm/a (Abb.46) bei einer mittleren IK- Eindringtiefe von 10  $\mu\text{m}$ . An einer Stelle ging die Schädigung bis in 25  $\mu\text{m}$  Tiefe. Die Korrosion erfolgte in der für den Werkstoff UHB 25L bekannten Art (Abb.15c).

Schweisnaht: Werkstoff Nr. 2RE10

Weder an der Decklagenseite noch an der Wurzelseite konnten Schädigungen in die Tiefe festgestellt werden. Im Querschleiff war lediglich eine leichte Aufräuhung der Oberflächen zu erkennen (Abb. 25c).

4.1.7 Werkstoff URANUS 65, Creusot-Loire, Charge T7393, Blech 6 mm, technisch lösungsgeglüht, verschweisst mit Zusatzwerkstoff Nr. 2.4656 (Thyssen, Thermanit 30/40E/SG), V-Naht (Versuch UR 107)

Die mittlere Korngrösse dieses Materials lag bei 48  $\mu\text{m}$ . In einer zeilenartigen Struktur und parallel zur Oberfläche in Walzrichtung verlaufen grobe Ausscheidungen bzw. orientierte Verunreinigungen. Daneben liegen viele kleinere Ausscheidungen ungeordnet im gesamten Gefüge vor (Abb.16a).

Im Verlauf der 15 Huey-Prüfperioden war eine stete Zunahme der Abtragungsgeschwindigkeit zu beobachten (Abb.47). Von 0.087 mm/a in der 5. Periode erhöhte sie sich auf 0.233 mm/a in der 15. Periode. Dieses Material



reagierte somit recht empfindlich auf die sich im Verlaufe von 15 Perioden im Huey-Test verschärfenden Prüfbedingungen. Es erfolgte starke IK an praktisch allen Korngrenzen (überlagert von Kornauflösungen) und es wurden reihenweise ganze Körner abgelöst ("allgemeiner Abtrag von Körnerreihen"). Das hatte zur Folge, dass die ursprüngliche Probenoberfläche kaum mehr erkennbar war. Deshalb scheinen die gemessenen 20  $\mu\text{m}$  durchschnittliche Eindringtiefe eher noch zu niedrig zu sein.

Schweissnaht: Werkstoff Nr.2.4656

An beiden Seiten der Schweissnaht trat starke IK auf, die sich am Gefüge des rekristallisierten Schweissgutes orientierte. Decklagenseitig lag die mittlere Schädigungstiefe bei 20  $\mu\text{m}$ , die grösste bei 30  $\mu\text{m}$ . Die Wurzelseite verhielt sich gegenüber dem Korrosionsangriff mit maximal 30  $\mu\text{m}$  Eindringtiefe genauso. Innerhalb des Schweissgutes fanden sich mehrere kleine Lunker ( $\varnothing$  50  $\mu\text{m}$ ). Insgesamt zeigte sich bei dieser Werkstoffkombination damit ein für den Zusatzwerkstoff 2.4656 untypisches, ungünstiges Korrosionsverhalten (Abb.22b).

4.1.8 Werkstoff URANUS S1, Creusot-Loire, Muster, Blech 7 mm, verschweisst mit Zusatzwerkstoff Nr. 2.4656 (Thyssen, Thermanit 30/40E/SG), U-Naht (Versuch US 13)

Ahnlich wie der zuvor beschriebene Werkstoff der gleichen Firma weist auch dieses Material Ausscheidungen und Verunreinigungen auf, die teilweise als Walztextur mit Zeilengefüge parallel zur Oberfläche verlaufen (Abb.16b). Insgesamt ist die Häufigkeit und Grösse jedoch geringer als bei dem Werkstoff URANUS 65. In Vergleich zu den anderen untersuchten Werkstoffen war die Abtragungsgeschwindigkeit mit durchschnittlich 0.624 mm/a, die bereits ab der 2. Periode des Huey-Tests erreicht wurde und sich dann kaum mehr veränderte sehr

hoch (Abb.48). Andererseits war im metallographischen Querschliff praktisch keinerlei Korrosionsangriff in die Tiefe des Materials zu erkennen, Abb.16b. Im Gegensatz zu den zuvor untersuchten Werkstoffen, wo ein schwacher allgemeiner Abtrag bei gleichzeitiger in die Tiefe gehender Schädigung vorlag, wird hier eine mögliche interkristalline Korrosion durch die massive allgemein abtragende Korrosion beim Angriff in das Metallinnere sozusagen "überholt" und damit nicht mehr erkennbar.

#### Schweissnaht: Werkstoff Nr.2.4656

Die Decklagenseite wurde durchschnittlich bis in 20  $\mu\text{m}$  Tiefe geschädigt. Der Angriff orientierte sich an der Gefügestruktur oder erfolgte grubchenartig. Maximal wurden 25  $\mu\text{m}$  Eindringtiefe erreicht. Auf der Wurzelseite wurde ein grubchenartiger Angriff bis in 20  $\mu\text{m}$  Tiefe beobachtet, an einer Stelle betrug die Schädigungstiefe 40  $\mu\text{m}$ . Allerdings war es wurzelseitig schwierig, zwischen Korrosionsangriff und Schweissgutform zu unterscheiden. Entlang der Phasengrenze Schweissgut/Matrix verlief ein Saum aus beim Erstarren der Schmelze "aufgestauten" Seigerungen (Abb.22c). Mit solchen Erscheinungen ist oft das Entstehen von Heissrissen innerhalb des Schweissgutes verknüpft /7/. Die Abb.26f zeigt eine von drei Stellen, wo das der Fall ist.

## 4.2 Korrosionsverhalten der Zusatzwerkstoffe im Huey-Test

### 4.2.1 Allgemeiner Befund

Bei praktisch allen Versuchen und unabhängig vom Zusatzwerkstoff ergab sich, dass meistens die Wurzelseite wesentlich korrosionsanfälliger ist als die Decklagenseite (Abb.27,28,29). Das gilt sowohl hinsichtlich der IK als auch für andere Korrosionsformen, die besonders an der Wurzelseite nicht eindeutig zu beurteilen sind. Der Grund hierfür liegt in der stark zerklüfteten Oberfläche,

die sich beim Erstarren des Schweißgutes wurzelseitig beim "Durchschweißen" bildet.

So entstehen Aushöhlungen und Spalte, die es von der metallographischen Beurteilung her sehr schwer machen, zu unterscheiden, ob die beobachtete Oberflächenunregelmässigkeit vom Schweißvorgang oder aber von Säure-Korrosionseinwirkungen stammt. Ungeachtet dieser Schwierigkeiten erscheint es plausibel, dass sich die Wurzelseite des Schweißgutes korrosionsanfälliger zeigt. Zum einen bietet die zerklüftete Oberfläche die Möglichkeit zur Anreicherung von Korrosionsprodukten in Poren und Spalten. Zum anderen entsteht beim Schweißen ein Schmelzbad, in dem sich Grund- und Zusatzwerkstoff vermischen und ein Konzentrationsausgleich der Legierungselemente stattfindet. So wird die Konzentration an Ni und Cr im Falle eines gegenüber dem Grundwerkstoff überlegierten Schweißguts durch Vermischung mit Grundwerkstoff an der Wurzelseite niedriger sein als an der Decklagenseite /7/. Eine Übersicht über die angelegten Schweißnähte geben die metallographischen Querschliffe in Abb.19-25.

#### 4.2.2 Zusatzwerkstoff Nr. 2.4656, (Thyssen, Thermanit 30/40 E/SG)

Der Werkstoff ist mit rund 29 % Cr und ca. 36 % Ni gegenüber den Grundwerkstoffen stark überlegiert. Deshalb wird der zuvor beschriebene Effekt an diesem Material besonders deutlich. Die Decklagenseite erweist sich beim Verschweißen von Grundmaterial der Werkstoffe Nr.1.4306s und 1.4306s ESU als nahezu völlig unempfindlich gegenüber dem Prüfmedium (Abb.28). Lediglich im Falle der Kombination mit den Werkstoffen URANUS S1 und URANUS 65 wurde im Huey-Test nach 15 Perioden eine bis in 30 µm Tiefe führende Schädigung festgestellt. Diese beiden Grundwerkstoffe unterscheiden sich jedoch auch stark von den übrigen hier verwendeten Werkstoffen durch ihre sehr hohe Metallabtragsgeschwindigkeit. Als Vermutung liegt deshalb nahe, dass aufgrund

der sich ergebenden Aufkonzentration von Korrosionsprodukten in der Salpetersäure, eine Verschärfung der Korrosionsbedingungen durch Verschieben des freien Korrosionspotentials in anodischer Richtung, d.h. weiter in den Transpassivbereich hinein eintrat. Die Kombination aus Werkstoff UHB 25L und Zusatzwerkstoff Nr.2.4656 liefert ebenfalls eine höhere Korrosionsanfälligkeit als für den Werkstoff Nr.1.4306s und 1.4306s ESU, liegt aber mit 10 µm Schädigungstiefe günstiger als für URANUS 65 und URANUS S1.

Im Gegensatz zur Decklagenseite wurde die Wurzelseite des Schweissgutes aus Zusatzwerkstoff Nr.2.4656 bei fast allen untersuchten Schweisskombinationen stärker angegriffen (Abb.29). Die Wurzelseite verhielt sich dabei praktisch genauso wie die angrenzende Matrix des Grundwerkstoffes. In Abweichung von den metallographischen Querschliffen (Abb.19-25) war die Wurzelseite oft nicht vollständig "durchgeschweisst" und bestand überwiegend aus Material des Grundwerkstoffes. Somit liefert nur die Beurteilung der Decklagenseite der Schweissnähte eine genaue Aussage über die spezifische Korrosionsbeständigkeit der hier verwendeten Schweisszusatzwerkstoffe.

#### 4.2.3 Zusatzwerkstoff 2RE10, (Sandvik)

Dieser Werkstoff enthält nach Herstellerangaben 25 % Cr und 20 % Ni. Sein Korrosionsverhalten ist in den hier durchgeführten Untersuchungen nahezu identisch mit dem des Werkstoffs Nr.2.4656. Beim Verschweissen von Werkstoff UHB 25L wurden mit 5-10 µm Schädigungstiefe bessere bis gleiche, bei der Kombination mit Werkstoff Nr.1.4306s ESU minimal schlechtere Werte erzielt. Insgesamt dürften die Unterschiede im Korrosionsverhalten zwischen Werkstoff Nr.2.4656 und 2RE10 unterhalb der experimentellen Nachweisgrenze liegen. Immerhin bestätigt sich in Versuch JS 81 die in 4.2.2 festgestellte Tendenz, dass mit erhöhten Abtragsgeschwindigkeiten des Grundmetalls gleichzeitig eine vermehrte Schädigung des Schweissgutes durch Aufkonzentration der

Korrosionsprodukte in  $\text{HNO}_3$  einhergeht.

#### 4.2.4 Zusatzwerkstoff Nr.1.4316, (Thyssen, Thermanit JE/SG)

Mit 18-21 % Cr und 9-11 % Ni ist dieser Werkstoff unter den betrachteten Zusatzwerkstoffen der niedrigstlegierte. Sowohl in der Schweisskombination mit Werkstoff Nr.1.4306s als auch als Zusatzelektrode bei Werkstoff Nr.1.4306s ESU erweist sich dieses Material als das vergleichsweise korrosionsanfälligste. Es wurden Eindringtiefen von 13  $\mu\text{m}$  (1.4306s ESU) bis zu 50  $\mu\text{m}$  (1.4306s) ermittelt. Wiederum wirkt sich die Kombination mit dem Grundwerkstoff der die höchste Abtragungsgeschwindigkeit besitzt korrosionsfördernd auf den Zusatzwerkstoff aus.

#### 4.3 Korrosionsverhalten der Grundwerkstoffe in der Wärmeeinflusszone (WEZ)

Der korrosionsanfälligste Teil einer Schweissverbindung wird meist in der Wärmeeinflusszone (WEZ) angetroffen. Das ist der Teil, in dem durch den Schweissprozess Gefügewandlungen oder Gefügeänderungen auftreten. In geschweissten CrNi-Stählen tritt IK knapp neben der Schweisse im Grundwerkstoff auf, der durch den Schweissvorgang auf die Ausscheidungstemperatur der Chromkarbide erhitzt wurde. Die Lage und Breite dieser Zone hängt von der Dauer und Höhe der Temperatureinwirkung ab. Diese wiederum ist vom Schweissverfahren, der chemischen Zusammensetzung und der Dicke der Probe abhängig. Somit ist eine Voraussage über den Ort und die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von IK sehr schwierig.

Bei den hier untersuchten Grundwerkstoff-Schweisszusatzwerkstoff-Kombinationen wurde in keinem Falle vermehrte IK in den in Frage kommenden Wärmeeinflusszonen gefunden, obwohl mikroskopisch in Abständen von 20  $\mu\text{m}$  die einzelnen

Eindringtiefen ausgemessen wurden. Dafür gibt es wahrscheinlich mehrere Gründe:

1. die verwendeten Grundwerkstoffe erwiesen sich bereits in früheren Untersuchungen (1) als vergleichsweise wenig sensibilisierungsanfällig
2. Effekte traten massiv bei einer Sensibilisierungsglühung von 30 min Dauer, bei einer Temperatur von  $700^{\circ}\text{C}$  auf. In den hier diskutierten Schweissversuchen betrug die durch den Schweissvorgang bewirkte Wärmebeeinflussung, z.B. bei  $600^{\circ}\text{C}$  im längsten Fall lediglich 11 min (s. 4.4).
3. Der Huey-Test prüft nicht speziell auf die IK-Anfälligkeit durch Chromkarbidausscheidungen auf Korngrenzen, sondern erzeugt bei Korrosionspotentialen im oder in der Nähe des Transpassivbereiches auch bei Fehlen von Ausscheidungen einen IK-ähnlichen Angriff. Deshalb tritt in jedem Fall an der gesamten Oberfläche des Grundmaterials auch IK auf, die dann eine Unterscheidung von einer durch Sensibilisierung verursachten IK sehr schwierig macht.

#### 4.4 Temperatureinfluss des Schweissvorgangs auf die Umgebung der Schweissnähte

An jeder Schweissprobe wurden 5 verschiedene Bohrungen in der Nähe der Schweissnaht (Abb.3b) mit Thermoelementen bestückt und der Temperaturverlauf während des Schweissens zeitlich verfolgt. Damit konnte die durch den Schweissvorgang erfolgte Wärmebehandlung des Werkstoffs in der Wärmeeinflusszone beurteilt werden.

Für das Auftreten von Sensibilisierungseffekten im Werkstoff ist, neben der Temperatur, vor allem die Dauer der Wärmeeinwirkung bedeutsam. Die zeitlichen

Temperaturverläufe für alle Versuche ergaben, dass die Temperaturen von 600° C längstens für 11 Minuten, die von 700° C maximal für 5 Minuten überschritten wurden. Es ergaben sich diese Zeiten aus der Addition aller bei jeweils einer Probe anfallenden Wärmebehandlungszeiten, das ist die Summe der Wärmebehandlungen der einzelnen Lagen. Meist war die Wärmeeinflussdauer sogar noch erheblich kürzer als die genannten Maximalwerte. Im Vergleich mit üblichen Sensibilisierungsparametern (650° C, 30 min) oder (700° C, 30 min) wird deutlich, dass die beim Schweißen erfolgte Wärmebehandlung kaum zur Sensibilisierung der Werkstoffe ausreichte (Abb.31).

#### 5. Zusammenfassung der Ergebnisse

Im verlängerten Huey-Test (65 %-ige Salpetersäure, 15 Perioden zu je 48 h) wurden Schweissproben aus Kombinationen verschiedener Grund- und Schweisszusatzwerkstoffe der Korrosion unterworfen. Zur Auswertung der Huey-Tests wurden die Gewichtsverluste über die Versuchszeit, die Korrosionseindringtiefen nach der letzten Prüfperiode und die metallographische Beurteilung von Querschliffen herangezogen. Dabei wurden die folgenden Ergebnisse erhalten:

Grundwerkstoffe: Für die Grundwerkstoffe ergibt sich hinsichtlich der Korrosionsbeständigkeit mit dem besten Werkstoff beginnend die Reihenfolge UHB 25L, 1.4306s ESU, 1.4306s, URANUS 65 und URANUS Sl. Die untersuchten Werkstoffe zeigten nach 720 h Huey-Test interkristalline Korrosion, die bei vermehrter IK-Anfälligkeit durch einen Angriff auch der Körner begleitet wurde. Lediglich beim Werkstoff URANUS Sl fand sich keine interkristalline Korrosion, dafür wurde aber eine unverhältnismässig starker allgemeiner Abtrag, der vermutlich der interkristallinen Korrosion "voraussetzt", festgestellt. Diese Ergebnisse bestätigen frühere Untersuchungen an unverschweissten Proben /1,2/ und zeigen,

dass das Ausmessen von Korrosionseindringtiefen zum Erhärten von Werkstoffbeurteilungen aus Abtragsmessungen am betrachteten System gut geeignet ist.

Eine Beeinflussung des Korrosionsverhaltens der Grundwerkstoffe durch die Zusatzwerkstoffe wurde nicht beobachtet.

Zur Beurteilung der Güte der Schweisszusatzwerkstoffe allein konnte nur die Decklagenseite der Schweissnähte herangezogen werden. Wurzelseitig war eine Unterscheidung zwischen Schweissfehlern und Korrosionserscheinungen oft nicht eindeutig möglich. Alle Schweisszusatzwerkstoffe sind im verschweissten Zustand korrosionsbeständiger (speziell gegen interkristalline Korrosion) als die Grundwerkstoffe. Die Schweisszusatzwerkstoffe Thermanit, 30/40E/SG (Werkstoff Nr.2.4656) und 2RE10 sind in ihrem Korrosionsverhalten vergleichbar und etwas besser als Thermanit JE/SG (Werkstoff Nr.1.4316). Thermanit JE/SG und 2RE10 zeigten im Aufbau der Mehrlagennähte gehäuft Schweissfehler in Form von Lunkern im Gefüge. Beim Zusatzwerkstoff Thermanit 30/40E/SG war das hier kaum der Fall.

Höhere Abtragungsgeschwindigkeiten der Grundwerkstoffe beschleunigten auch das Korrosionsgeschehen am Schweisszusatzwerkstoff (vermutlich durch Aufkonzentration der Korrosionsprodukte in der Säure). Ein Unterschied im Korrosionsverhalten zwischen V- und U-Nähten wurde nicht festgestellt.

In der Wärmeeinflusszone (WEZ) wurde keine vermehrte Korrosion gefunden. Die bei austenitischen CrNi-Stählen oft an Schweissnähten verstärkt auftretende interkristalline Korrosion war hier nicht nachweisbar. Der Grund dafür dürfte in der mit dem Schweißen einhergehenden Wärmebehandlung zu suchen sein, die bei den hier verwendeten an sich schon wenig sensibilisierbaren Werkstoffen nicht zu einer Chromkarbidausscheidung im Sinne der Chromverarmungstheorie führte.

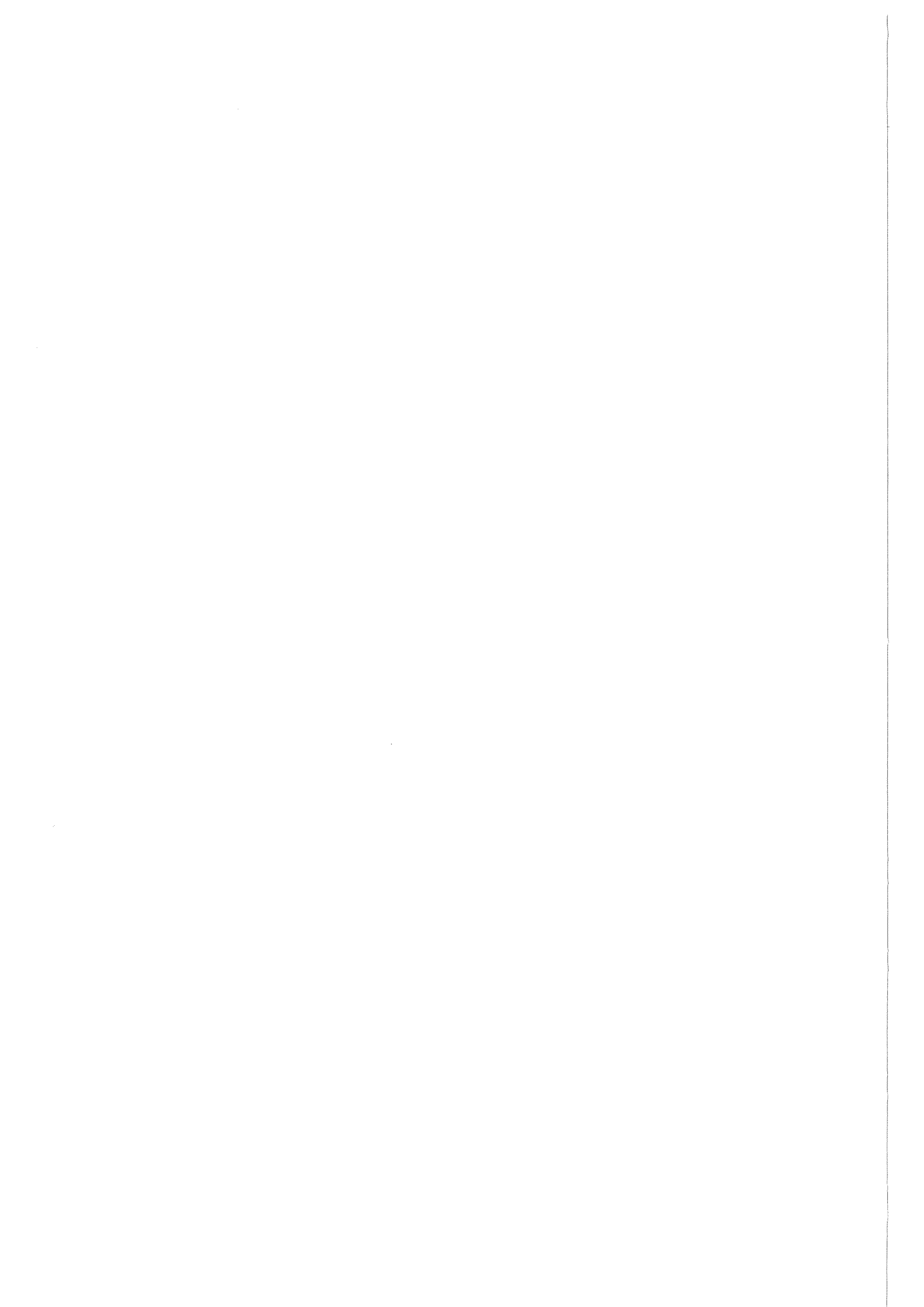


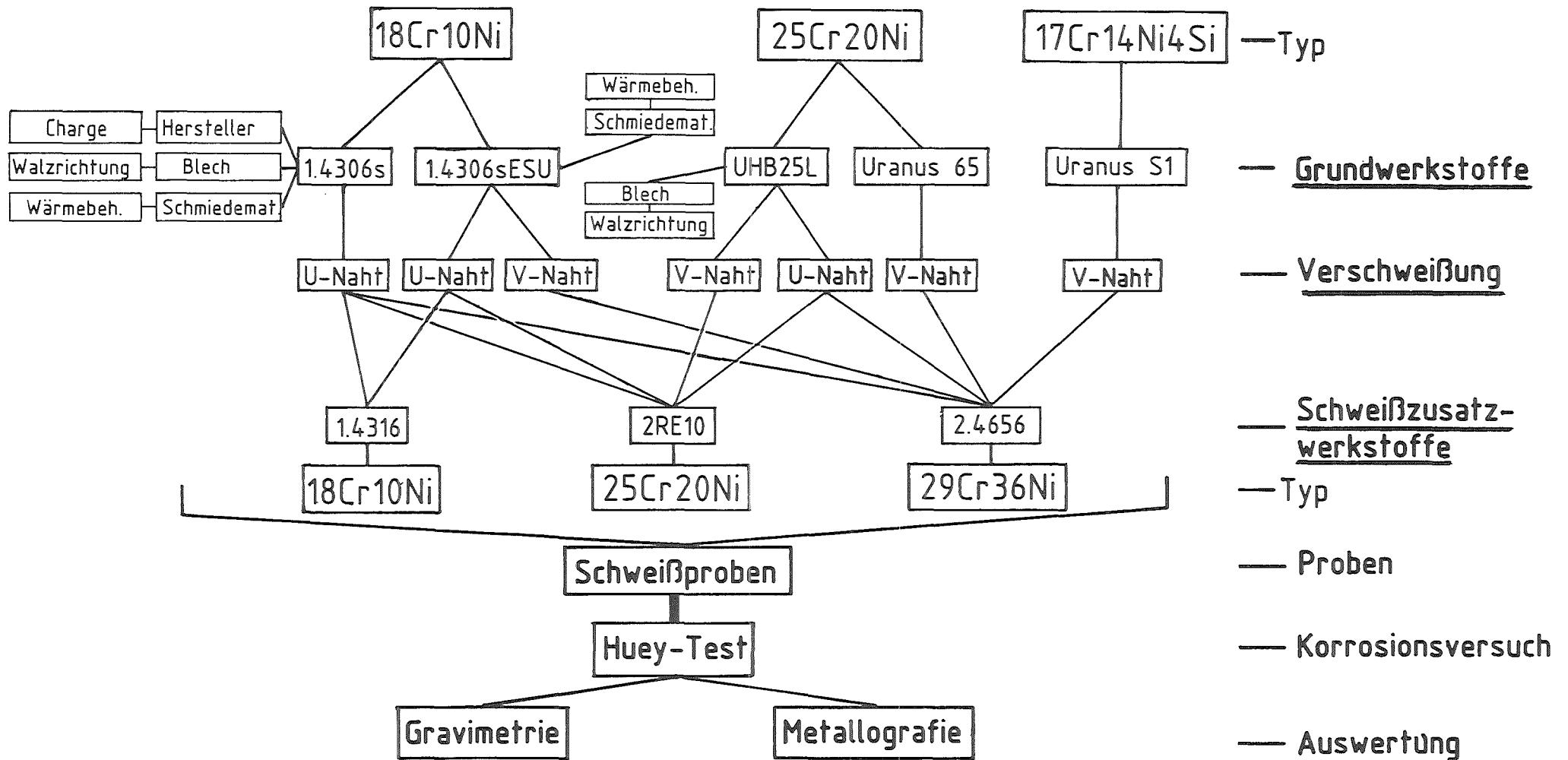
## 6. Danksagung

Unser besonderer Dank gilt dem Fraunhofer-Institut für Angewandte Materialforschung in Bremen für die Durchführung der Schweißversuche. Für die Durchführung der experimentellen Untersuchungen sei den Herren H. v. Berg, E. Pott, P. Graf und H. Zimmermann gedankt.

## 7. Literatur

- /1/ R. Kraft, S. Leistikow, E. Pott, KfK 3609 (1983)
- /2/ R. Kraft, S. Leistikow, E. Pott, KfK 3802 (1984)
- /3/ W.R. Huey, Trans.Amer.Soc. Steel Treatm. 18 (1930) 1126-1143
- /4/ Euronorm 121-72 (1972)
- /5/ ASTM Standards A262-77a (1977)
- /6/ R. Simon, persönliche Mitteilung
- /7/ Boese, Werner, Wirtz, "Das Verhalten der Stähle beim Schweißen"  
Deutscher Verlag für Schweißtechnik, Düsseldorf (1980)





# Korrosionsuntersuchungen an Schweißverbindungen

<u>Werkstoff</u>	<u>Hersteller</u>	<u>Charge</u>	<u>Form</u>	<u>Analyse</u>	<u>C</u>	<u>Si</u>	<u>Mn</u>	<u>P</u>	<u>S</u>	<u>Cr</u>	<u>Mo</u>	<u>Ni</u>
1.4306 s	Creusot-Loire	TO 805	Blech,12mm	KfK/IMF	0.012	0.20	0.79		0.0013	19.7	0.008	11.2
1.4306 s	Creusot-Loire	TO 805	Schmiedemat.	KfK/IMF	0.006	0.19	0.72		0.001	19.6	0.006	11.4
1.4306 s	Krupp-SW	294273	Schmiedemat.	Hersteller	0.015	0.03	1.73	0.016	0.002	19.46	0.04	12.3
1.4306 s	Krupp-SW	293783	Blech,12mm	Hersteller	0.017	0.03	1.58	0.019	0.007	19.10	0.02	12.5
1.4306 s ESU	Krupp-SW	018876	Schmiedemat.	Hersteller	0,019	0.02	1.64	0.017	0.002	19.36	0.05	12.27
UHB 25 L	Nyby-Uddeholm	LU 9367	Blech,10mm	Hersteller	0.016	0.30	1.51	0.017	0.009	24.5		20.0
URANUS 65	Creusot-Loire	T 7393	Blech,6mm	Hersteller	0.009	0.19	0.47	0.026	0.006	24.74	0.21	19.8
URANUS S1	Creusot-Loire	Muster	Blech,7mm	Hersteller	0.009	3.72	1.7	0.035	0.025	17.45		13.96

### Schweißzusatz- werkstoff

1.4316	Thyssen,Thermanit	JE/SG	Elektrode	Hersteller	0.025		2.0			18-21		9-11
2.4656	Thyssen,Thermanit	30/40E/SG	Elektrode	Hersteller	0,015					29	3.8	36
2 RE 10	Sandvik		Elektrode	Hersteller						25		20

KfK

Art, Herkunft und chemische Analyse der untersuchten Werkstoffe  
Angaben in Gewichtsprozent

**WERKSTOFF/  
HERSTELLER**

**CHARGE**

**FORM**

**WÄRMEBEHANDLUNG**

**VERSUCH**

**ZUSATZWERKSTOFF**

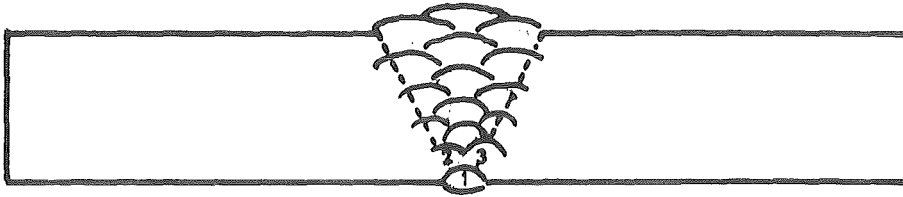
**NAHTFORM**

1.4306 s Creusot-Loire	TO 805	Schmiedematerial	Hersteller	JS 59,J 2	2.4656	U-Naht	
	TO 805	Blech 12mm		JS 59,J 8			
1.4306 s Krupp-SW	294273	Schmiedematerial	Hersteller	JS 87	2.4656	U-Naht	
	293783	Blech parallel W.R.,12mm		JS 67			
	293783	Blech quer W.R.,12mm		JS 69			
	293783	Blech parallel W.R.,12mm		JS 65			
	294273	Schmiedematerial		JS 85			
	294273	Schmiedematerial		JS 81,J 2			
	294273	Schmiedematerial		3min/1050°C			JS 81,J 1
1.4306 s ESU Krupp-SW	018876	Schmiedematerial	3min/1050°C	JS 71,A 1	2 RE 10	U-Naht	
	018876			Hersteller			JS 71,A 2
	018876			JS 73			
	018876			JS 75			
	018876			JS 80			
UHB 25 L Nyby-Uddeholm	LU 9367		Blech parallel W.R.,10mm	Hersteller	UHB 115	2 RE 10	V-Naht
	LU 9367	Blech parallel W.R.,10mm	UHB 114				
	LU 9367	Blech quer W.R.,10mm	UHB 121				
	LU 9367	Blech parallel W.R.,10mm	UHB 112				
URANUS 65 Creusot-Loire	T 7393	Blech 6mm	Hersteller	UR 107	2.4656	V-Naht	
URANUS S1 Creusot-Loire	Muster	Blech 7mm	Hersteller	US 13	2.4656	V-Naht	

KJK

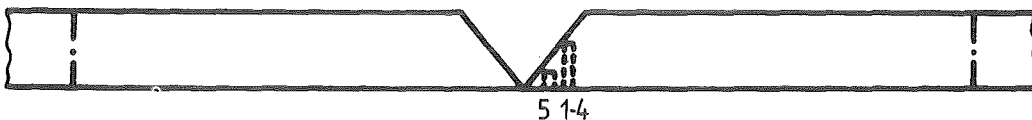
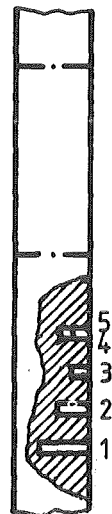
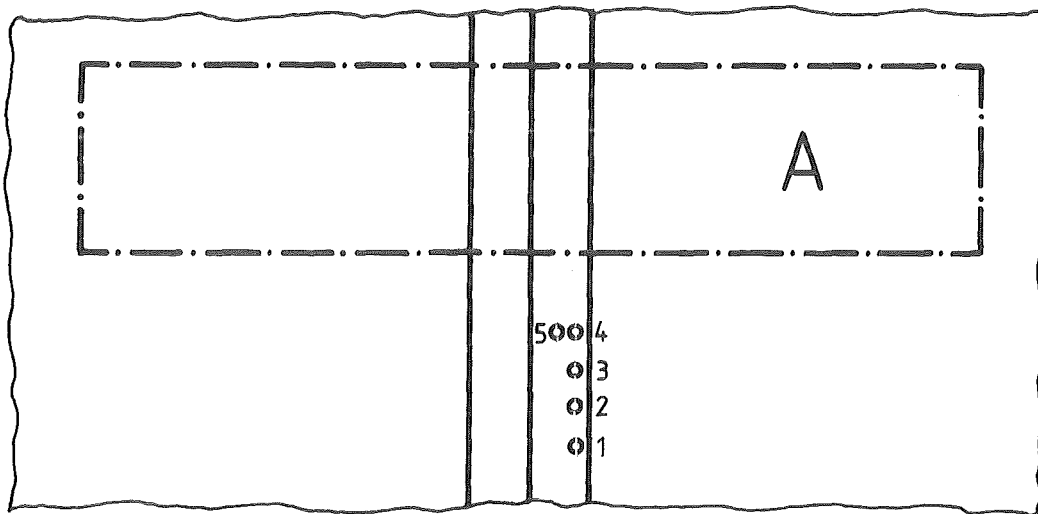
Übersicht der Versuche an Schweißproben im Huey-Test

a) Schweißverfahren, Prinzipskizze  
V-Naht (Beispiel) oder U-Naht



Lage 1-3 nach WIG-Verfahren alle weiteren Lagen nach E-Handverfahren mit dem jeweiligen Schweißzusatzwerkstoff als Elektrode

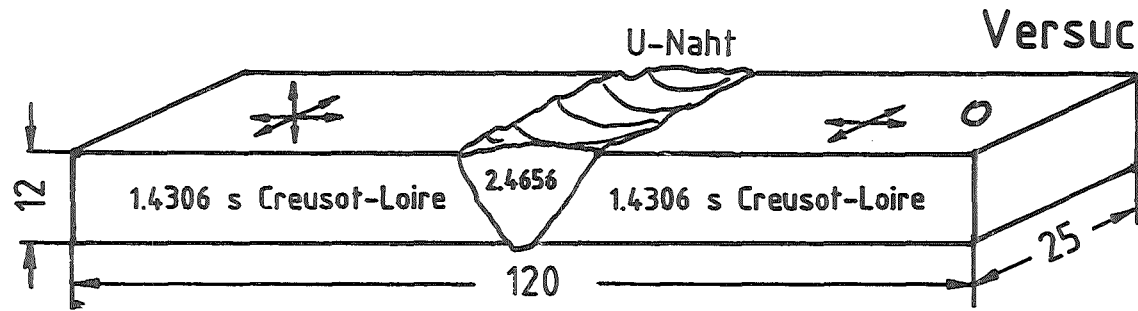
b) Anordnung der Bohrungen zur Aufnahme von Thermoelementen vor dem Verschweißen



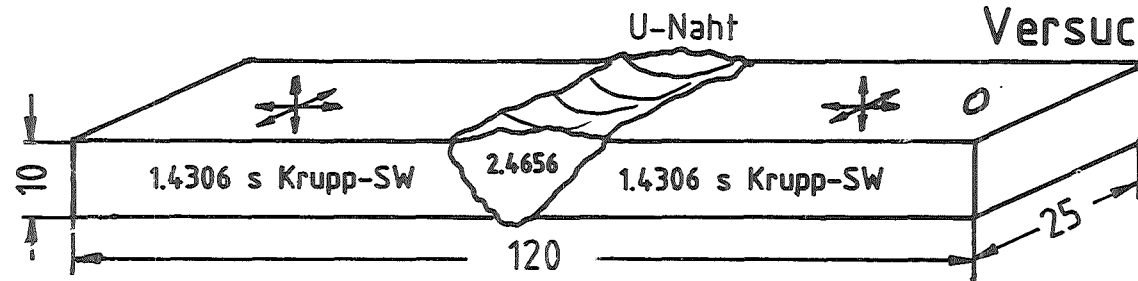
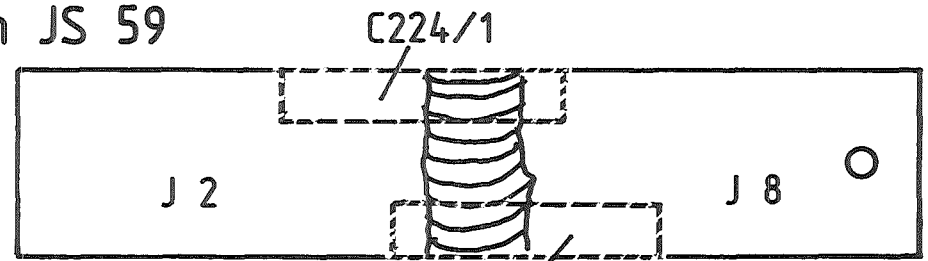
Maßstab 1:1



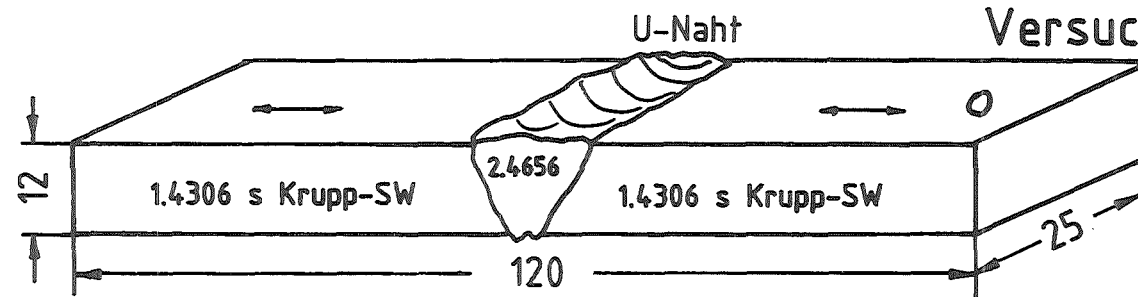
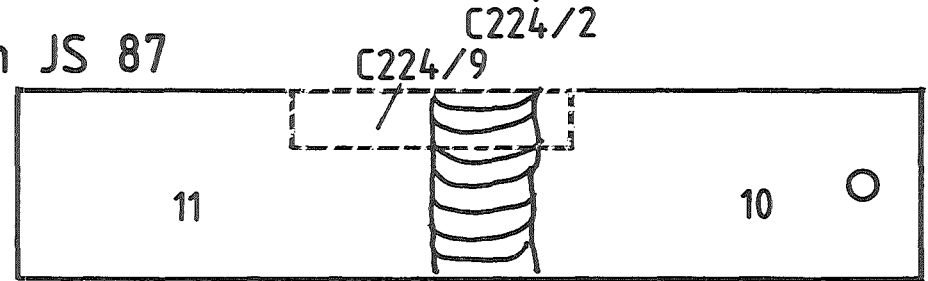




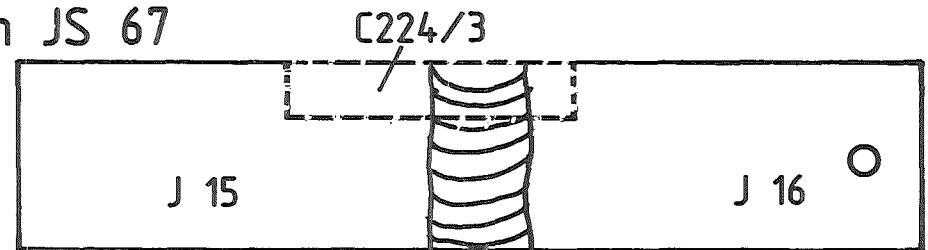
Versuch JS 59



Versuch JS 87



Versuch JS 67

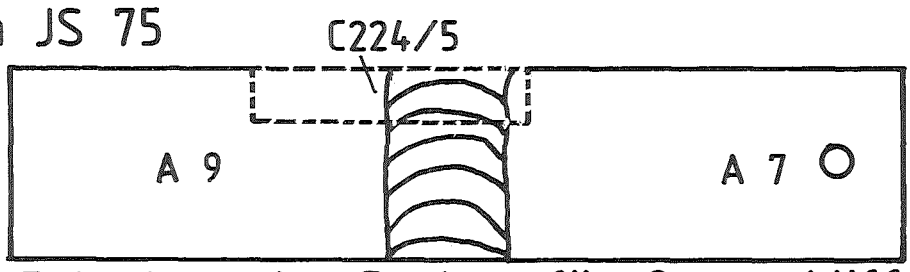
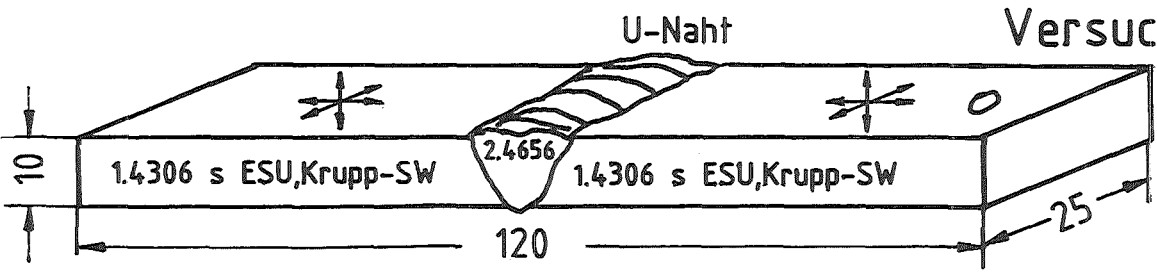
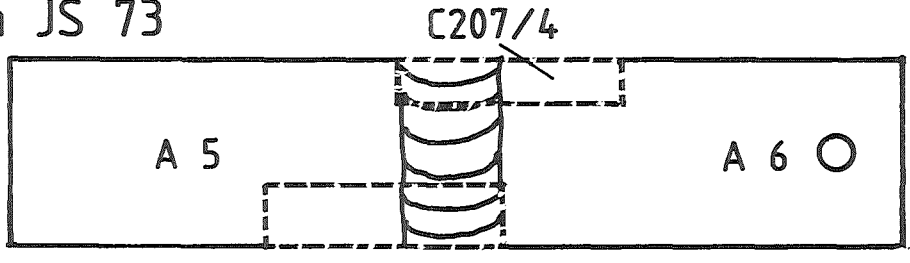
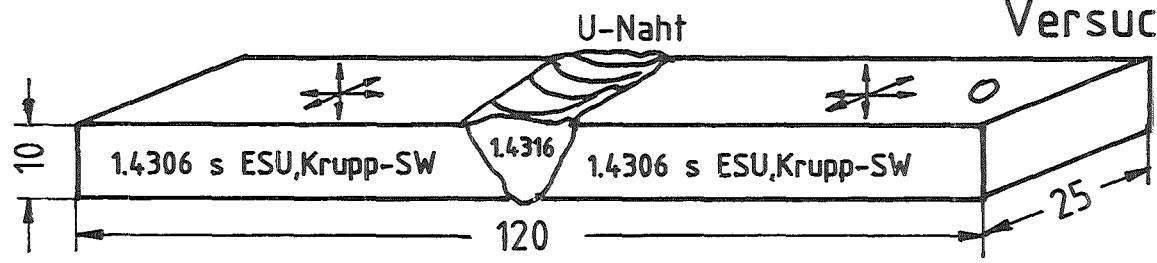
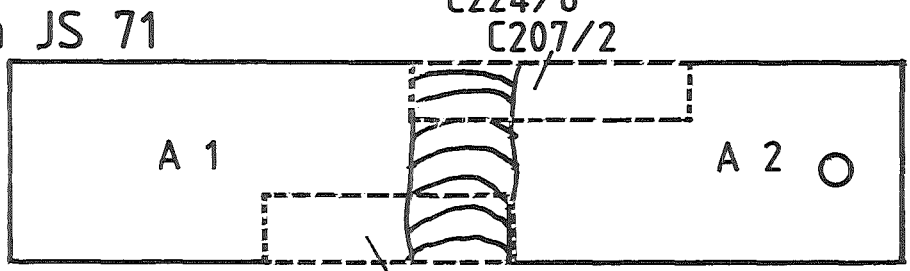
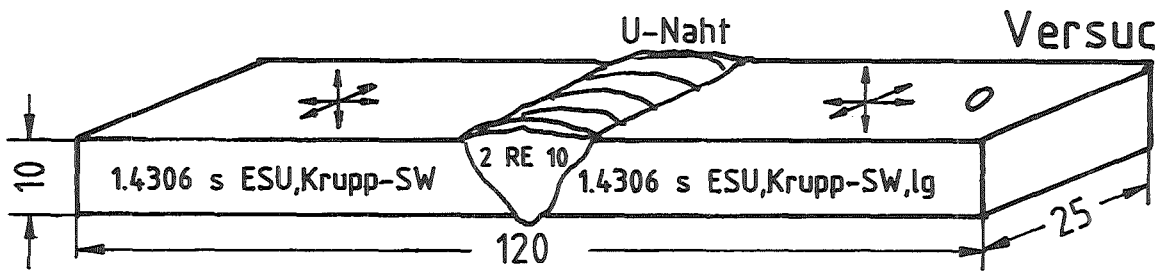
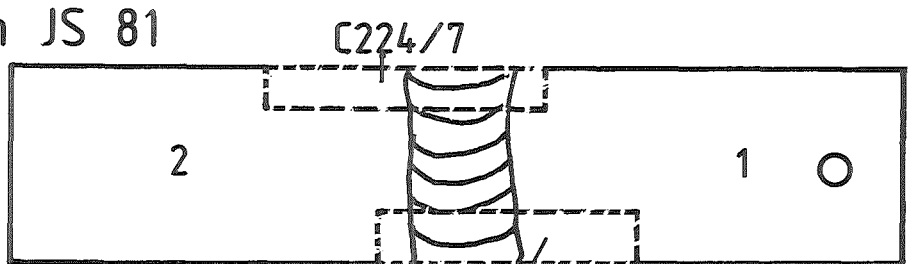
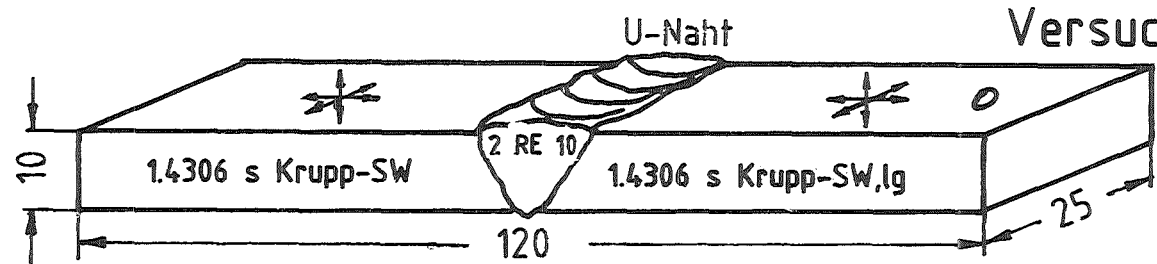


Abmessungen, Walzrichtung

Entnahme der Proben für Querschliffe,  
Schliffnummer





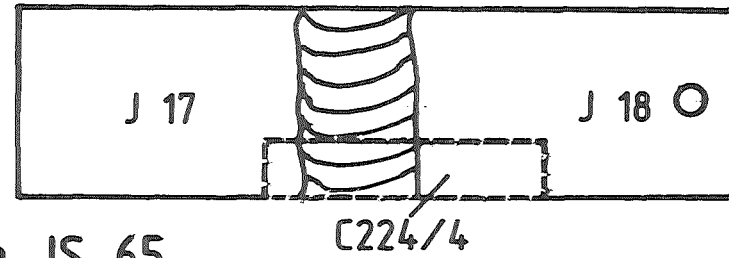
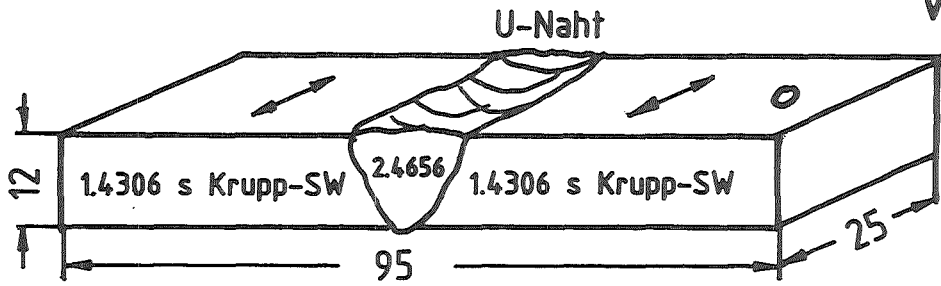


Abmessungen, Walzrichtung

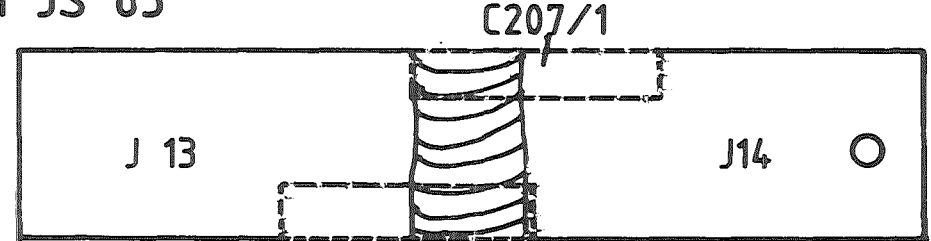
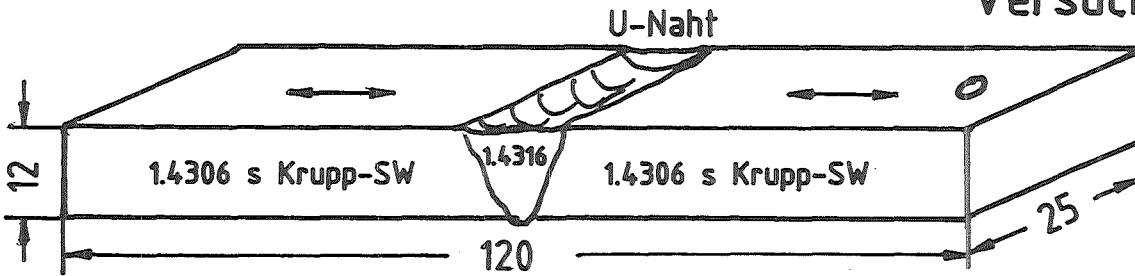
Entnahme der Proben für Querschliffe  
Schliffnummer



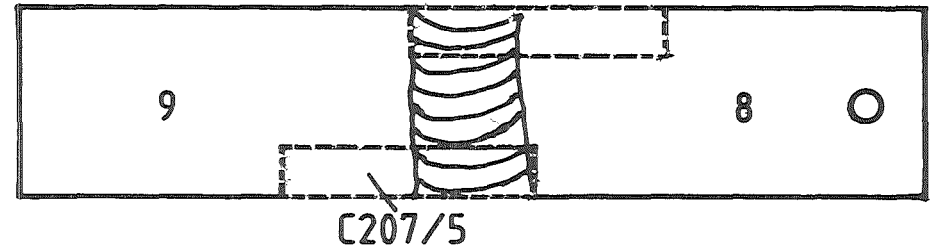
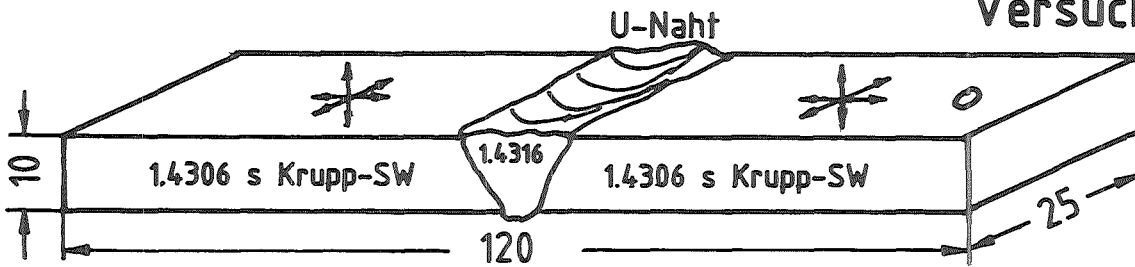
Versuch JS 69



Versuch JS 65



Versuch JS 85

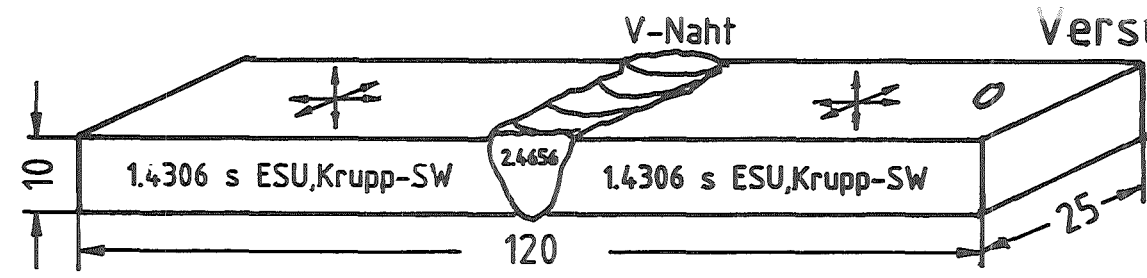


Abmessungen, Walzrichtung

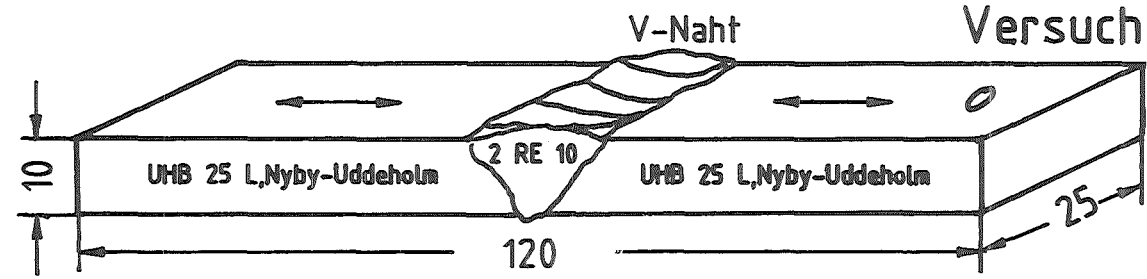
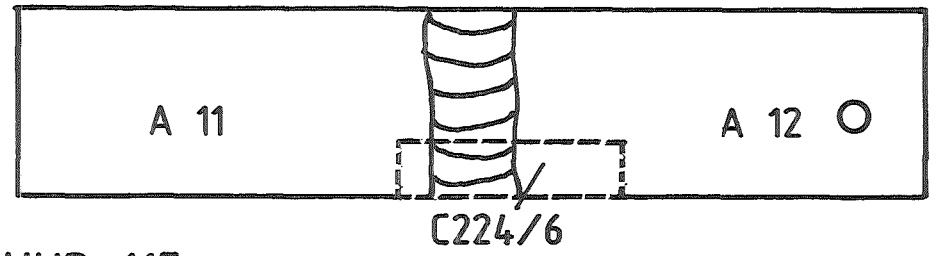
Entnahme der Proben für Querschliffe,  
Schliffnummer



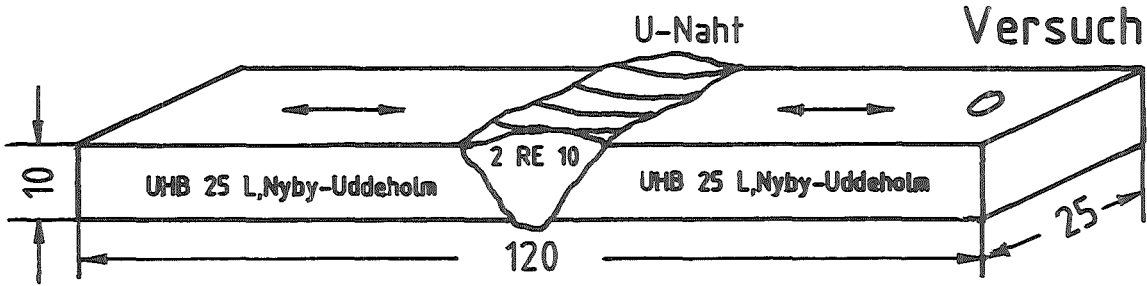
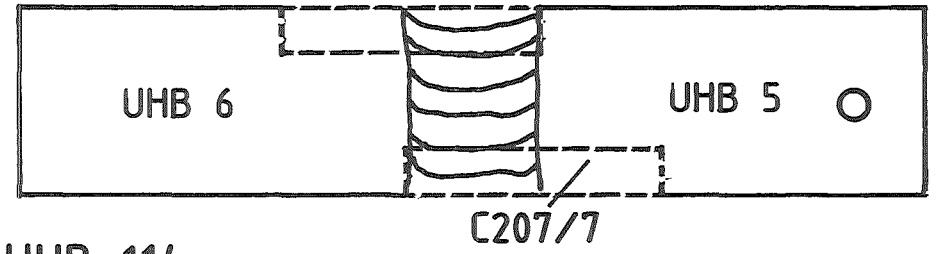
Schweißproben für Huey-Test — Metallographie



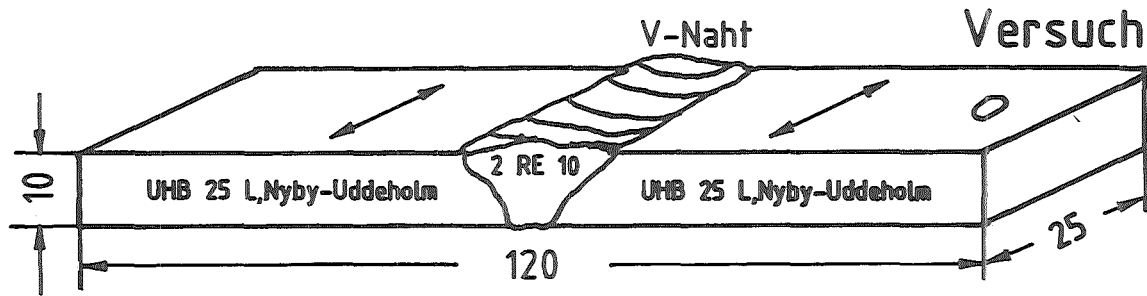
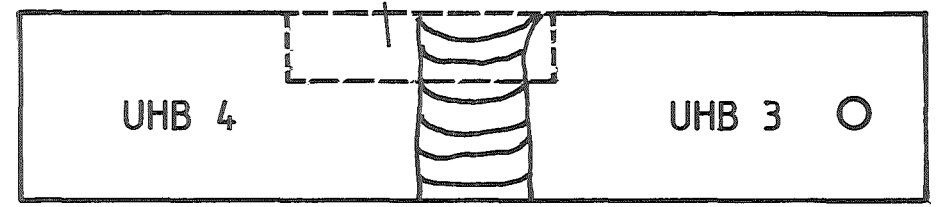
Versuch JS 80



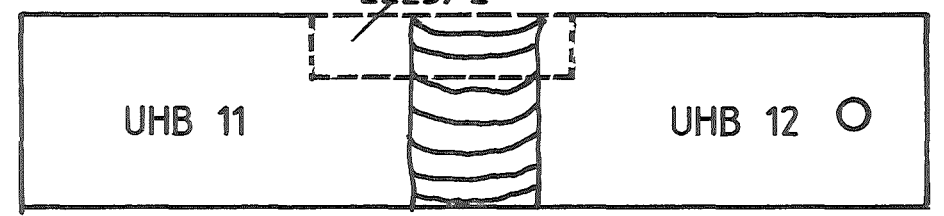
Versuch UHB 115



Versuch UHB 114



Versuch UHB 121

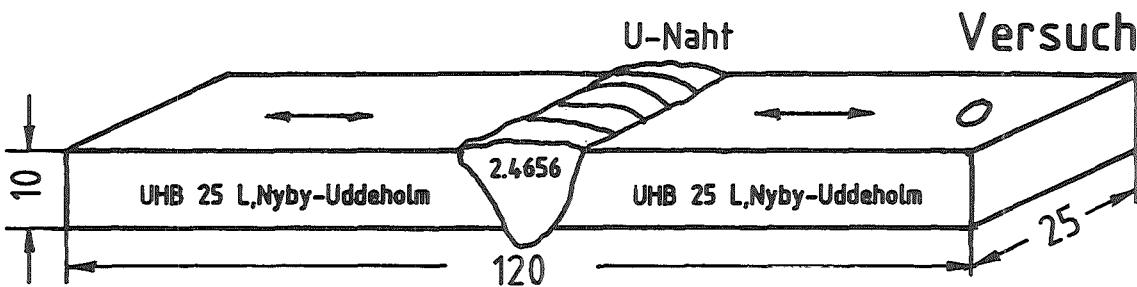


Entnahme der Proben für Querschliffe  
Schliffnummer

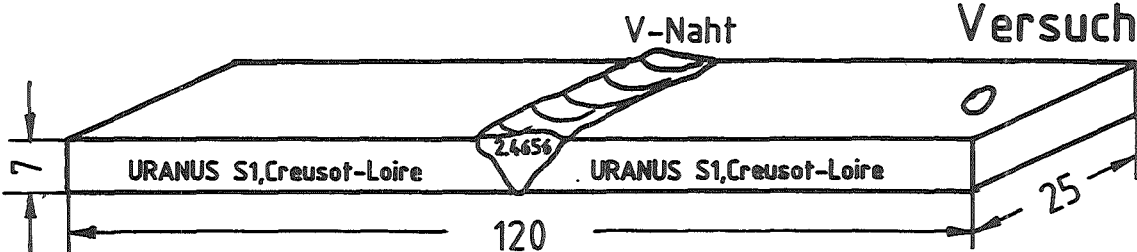
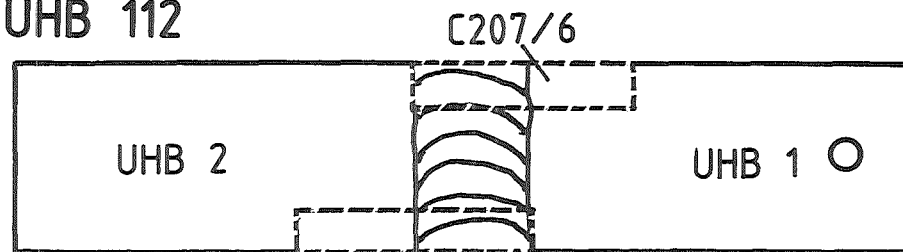
Abmessungen, Walzrichtung



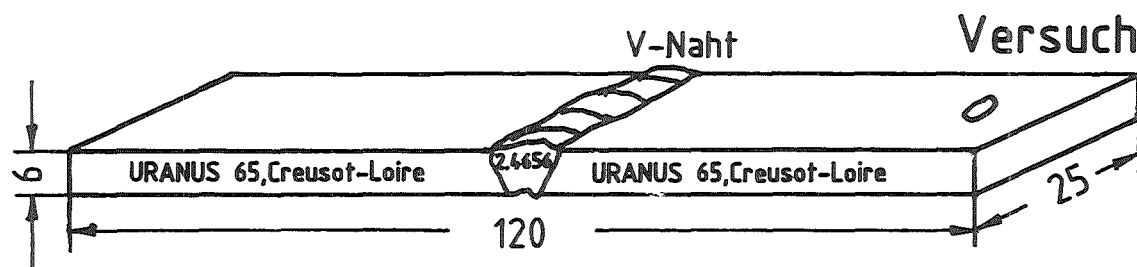
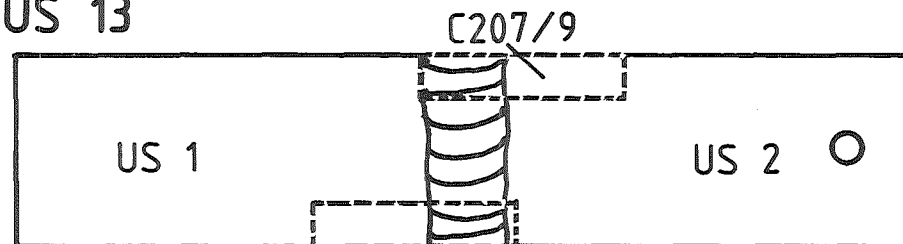
Schweißproben für Huey-Test — Metallographie



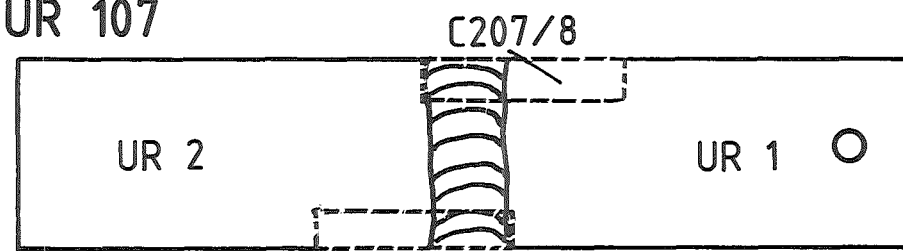
Versuch UHB 112



Versuch US 13



Versuch UR 107



Abmessungen, Walzrichtung

Entnahme der Proben für Querschliffe  
Schliffnummer



Schweißproben für Huey-Test — Metallographie

a

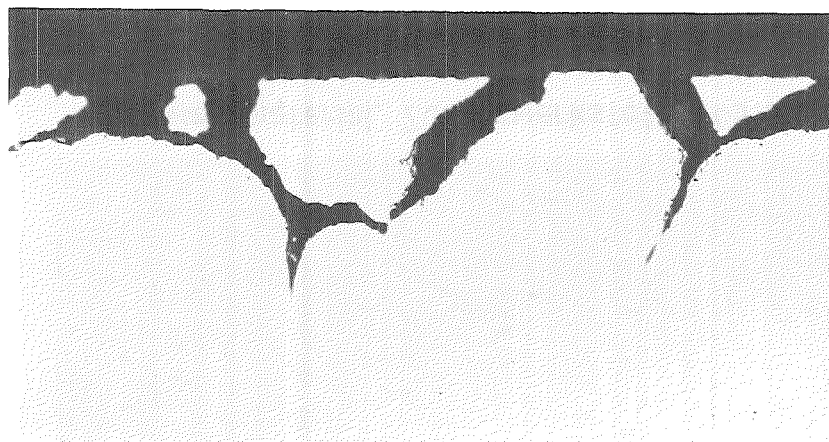


geätzt  
 ─── 50 μm

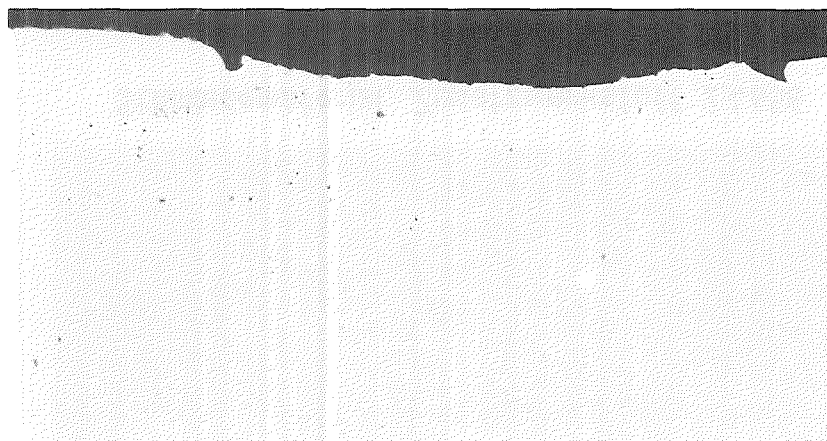
b



ungeätzt  
 ─── 20 μm



Schmiedematerial

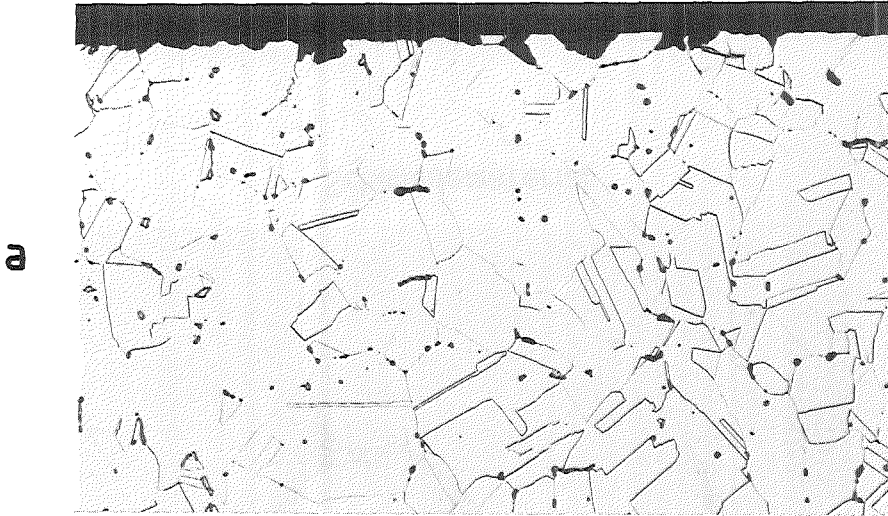


Blech 12 mm

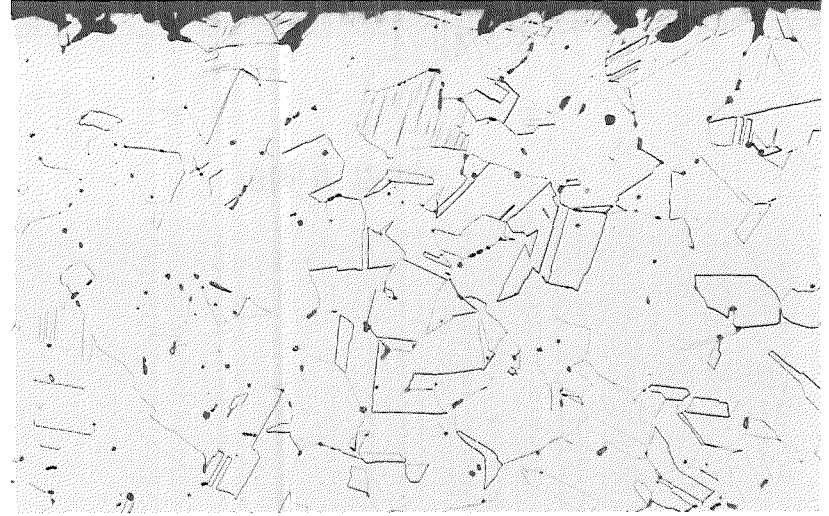
Abb. 10



Korrosionsuntersuchungen nach Huey (15 Perioden, 720 h) an Werkst.Nr. 1.4306s, Creusot-Loire Ch. TO 805, verschweißt mit Zusatzwerkstoff 2.4656, Querschliffe geätzt, ungeätzt



Schmiedematerial, Zusatzwerkstoff 1.4316



Schmiedematerial, Zusatzwerkstoff 2.4656

50  $\mu$ m

Abb. 11

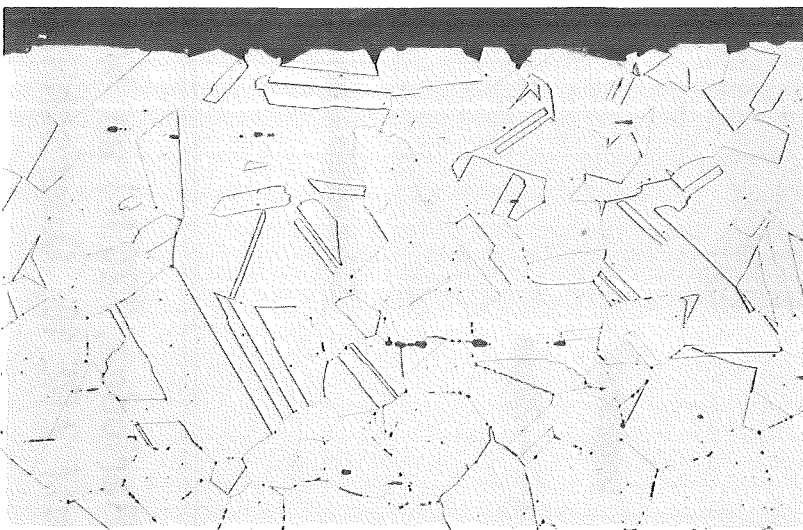
KIK

Korrosionsuntersuchungen nach Huey (15 Perioden, 720 h) an Werkst.Nr. 1.4306s, Krupp-SW Ch. 294273, Schmiedematerial, verschweißt mit verschiedenen Zusatzwerkstoffen



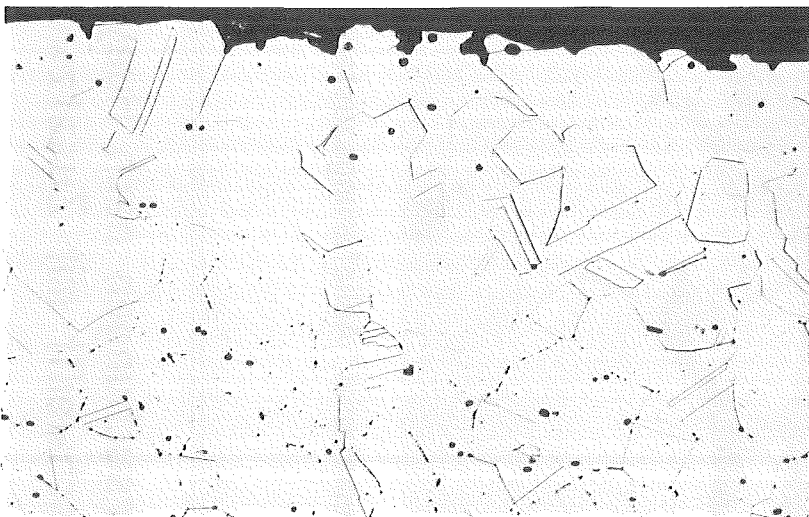
**a**

Blech 12 mm, parallel  
zur Walzrichtung  
Zusatzwerkstoff Nr. 2.4656



**b**

Blech 12 mm, quer  
zur Walzrichtung  
Zusatzwerkstoff Nr. 2.4656



**c**

Blech 12 mm, parallel  
zur Walzrichtung  
Zusatzwerkstoff Nr. 1.4316

— 50  $\mu$ m

**kfk**

Korrosionsuntersuchungen nach Huey (15 Perioden, 720 h)  
an Werkstoff Nr. 1.4306s, Krupp-SW, Ch. 293783, verschweißt  
mit verschiedenen Zusatzwerkstoffen, Querschliff geätzt

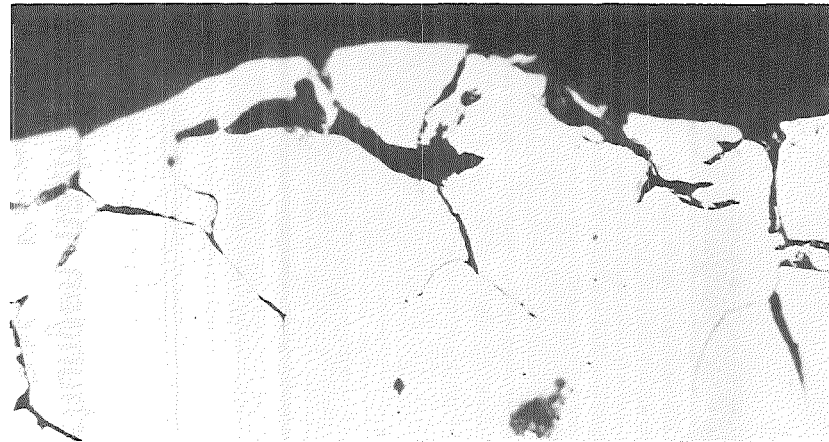
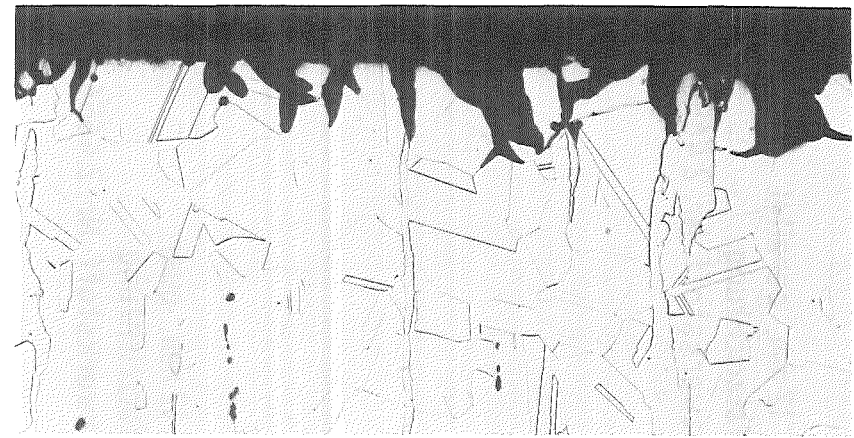
a



geätzt

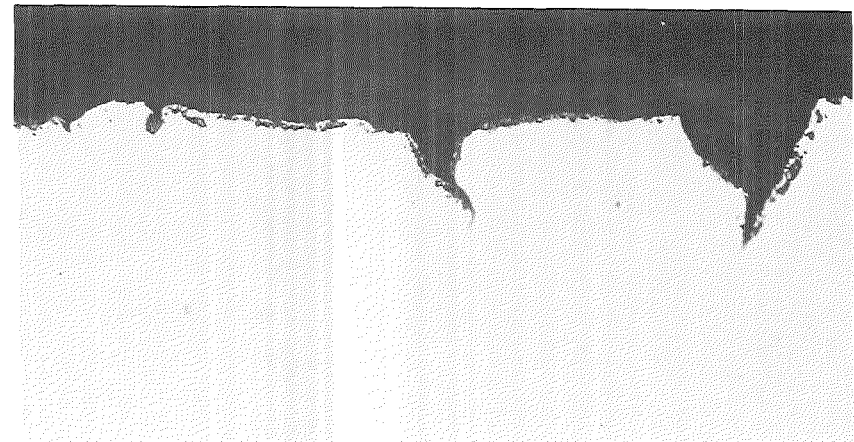
50  $\mu$ m

b



ungeätzt

20  $\mu$ m



Schmiedematerial, Anlieferungszustand

Schmiedematerial, lösungsgeglüht 3 min 1050°C

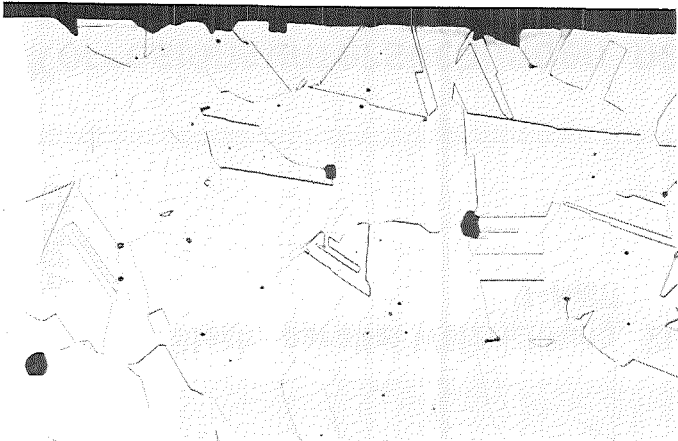
Abb. 13



Korrosionsuntersuchungen nach Huey (15 Perioden, 720 h) an Werkstoff Nr. 1.4306s Krupp-SW Ch. 294273 verschweißt mit Zusatzwerkstoff 2 RE 10, Querschliffe geätzt, ungeätzt

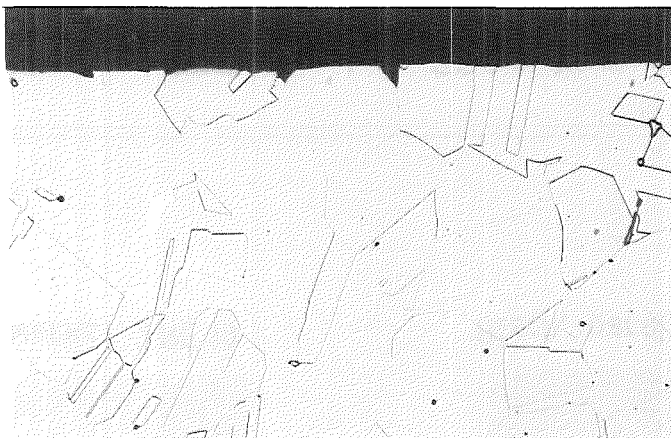


a



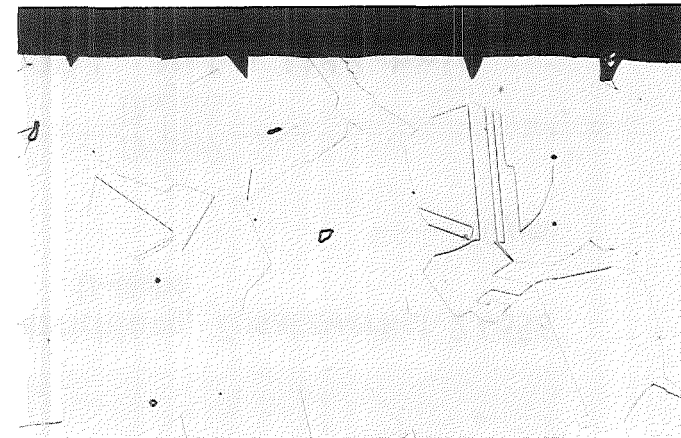
Zusatzwerkstoff Nr. 1.4316

b



Zusatzwerkstoff Nr. 2.4656, U-Naht

c



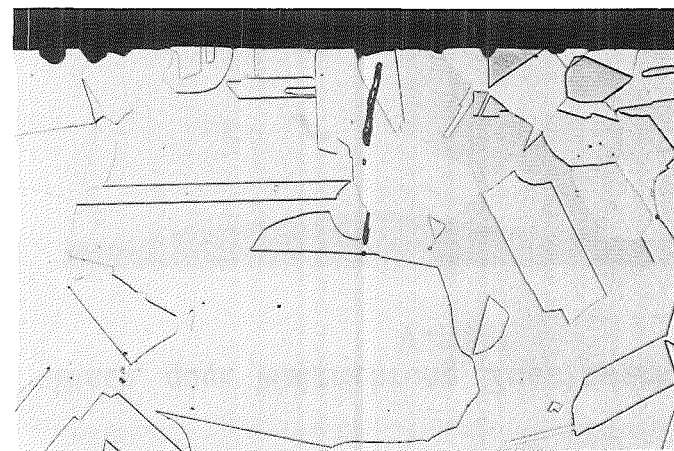
Zusatzwerkstoff Nr. 2.4656, V-Naht

d



Anlieferungszustand Zusatzwkst. 2 RE10

e



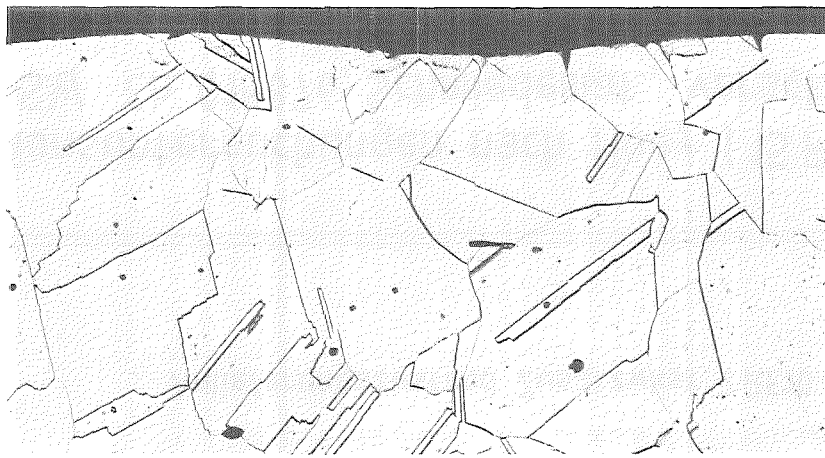
lösungsgeglüht, 3 min 1050°C, Zw. 2 RE10

50 µm



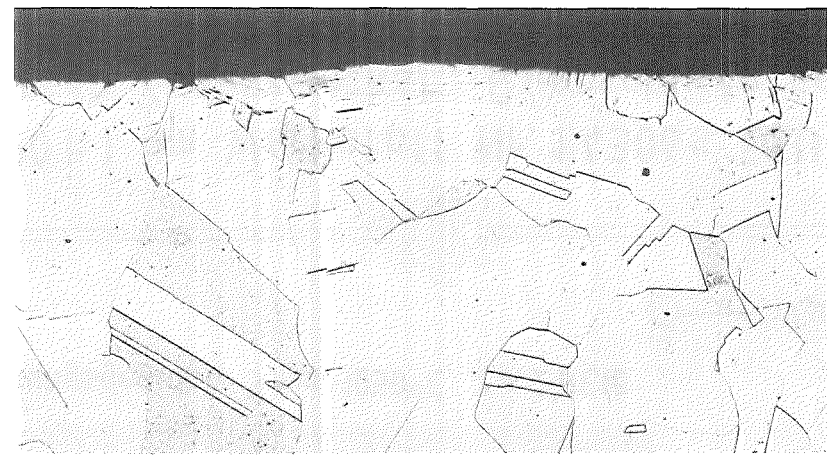
Korrosionsuntersuchungen nach Huey (15 Perioden, 720 h) am Werkstoff Nr. 1.4306s ESU, Krupp-SW Ch. 018876, Schmiedemat., verschweißt m. versch. Zusatzwerkst., Querschlitze geätzt

a



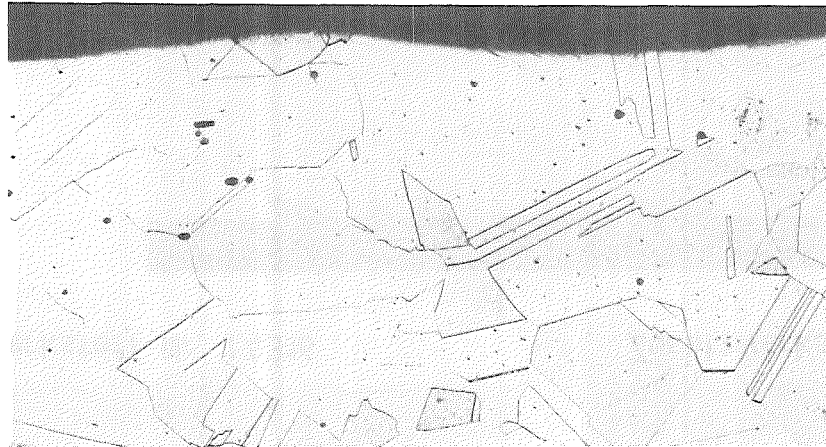
Blech, parallel Walzrichtung, Zusatzwerkst. 2 RE 10  
V-Naht

c



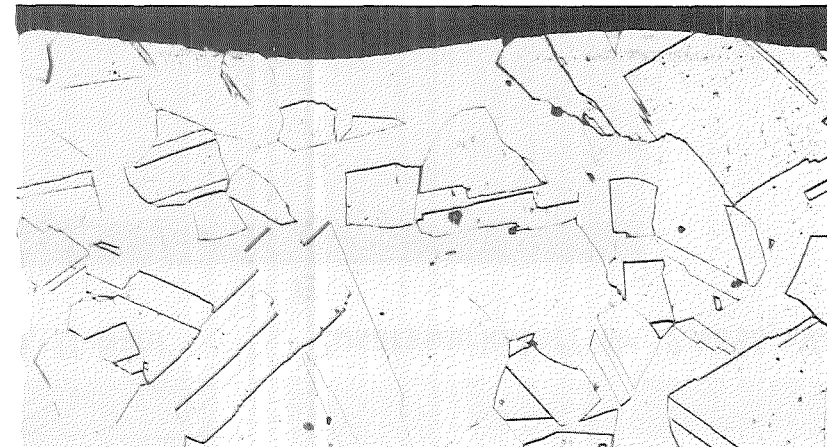
Blech, quer Walzrichtung, Zusatzwerkstoff 2 RE 10  
V-Naht

b



Blech, parallel Walzrichtung, Zusatzwerkst. 2 RE 10  
U-Naht

d



Blech, parallel Walzrichtung, Zusatzwerkst. 2.4656  
U-Naht

50 μm



Korrosionsuntersuchungen nach Huey (15 Perioden, 720 h) an UHB 25 L, Nyby-Uddeholm,  
Ch. LU 9367 Werkst.Nr. 1.4845, verschweißt mit versch. Zusatzwerkstoffen, Querschlitze geätzt

a

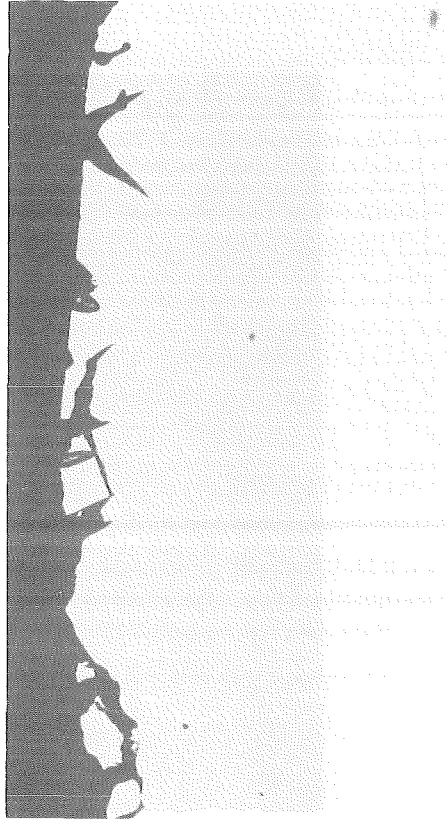


geätzt  
 |—| 50 μm

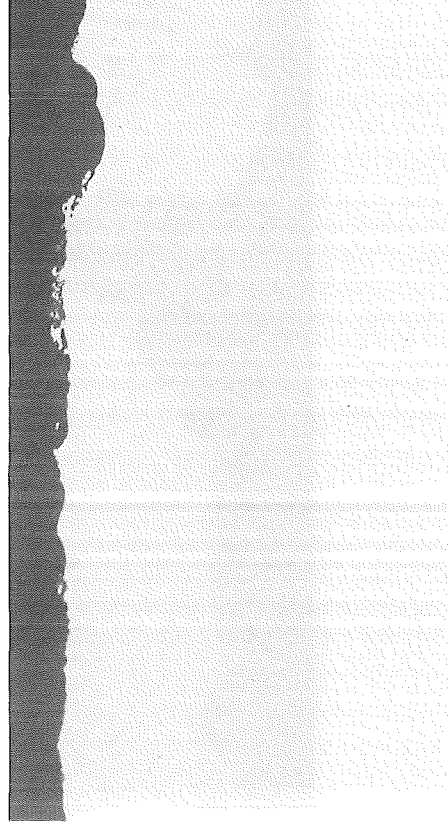
b



geätzt  
 |—| 50 μm



ungeätzt  
 |—| 20 μm

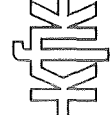


ungeätzt  
 |—| 20 μm

Uranus 65, Ch. T 7393, Blech 6 mm

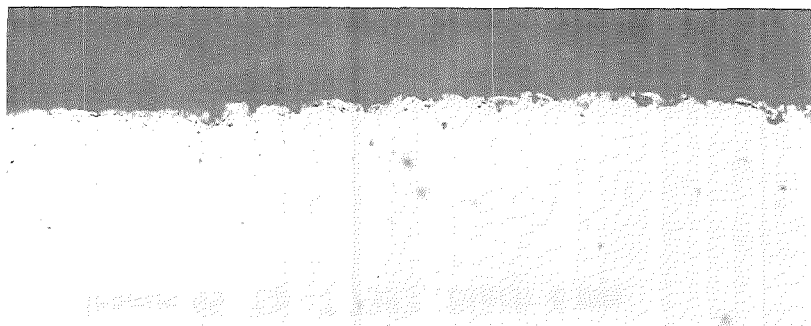
Uranus S1, Blech 7 mm

Abb. 16



Korrosionsuntersuchungen nach Huey (15 Perioden, 720 h) an den Werkstoffen Uranus 65 und Uranus S1, Creusot-Loire, verschleißt mit Zusatzwerkst. 2.4656, Querschleife geätzt, ungeätzt

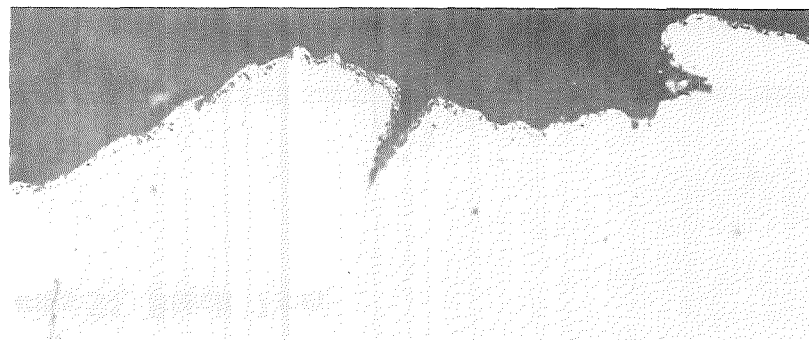
Decklagenseite



ungeätzt

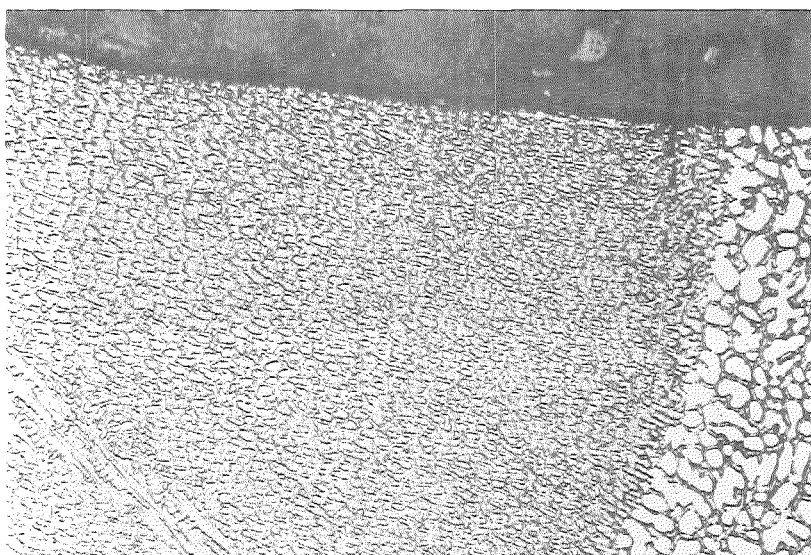
—|— 20 µm

Wurzelseite



geätzt

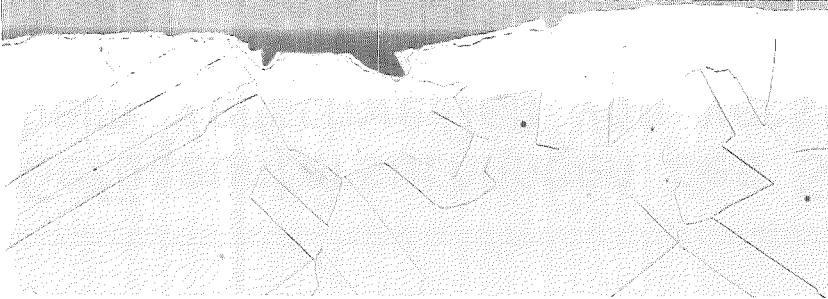
—|— 50 µm



Korrosionsuntersuchungen nach Huey an Zusatzwerkstoff Nr.2.4656  
Grundwerkstoff Nr.1.4306s, Creusot-Loire, Ch.TO 805

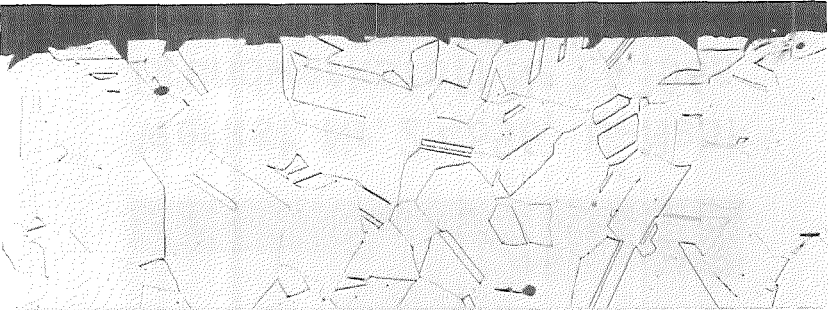


a



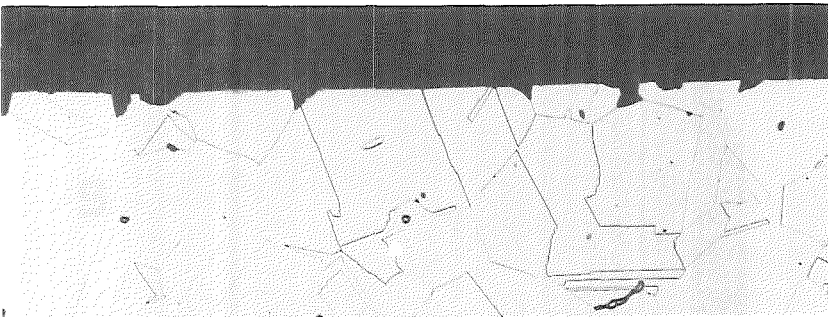
Werkstoff Nr. 1.4306s, Creusot-Loire, Ch. TO 805  
Blech 12 mm

b



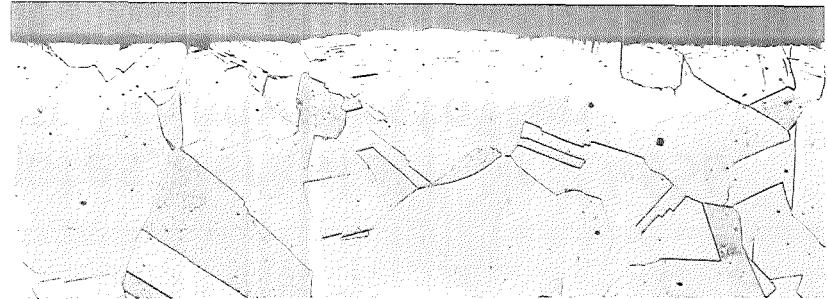
Werkst.Nr. 1.4306s, Krupp-SW, Ch. 293783, Blech 12 mm

c



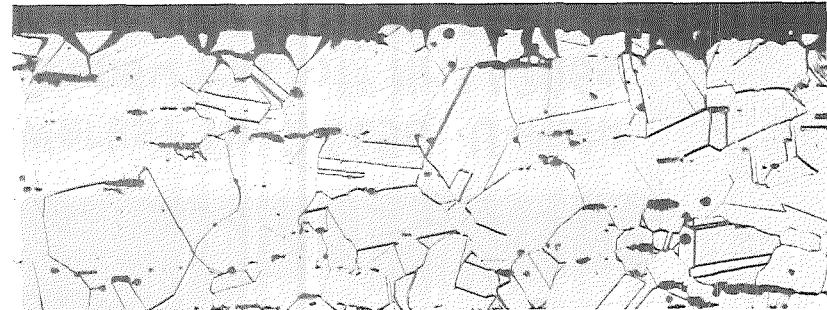
Werkstoff Nr. 1.4306s ESU, Krupp-SW, Ch. 018876  
Schmiedematerial

d



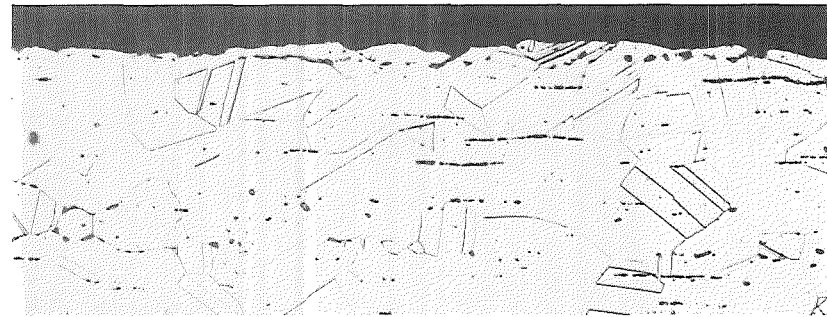
UHB 25 L, Nyby-Uddeholm Ch. LU 9367 W.Nr 1.4845

e



Uranus 65, Creusot-Loire, Ch. T 7393

f



Uranus S1, Creusot-Loire

50 μm

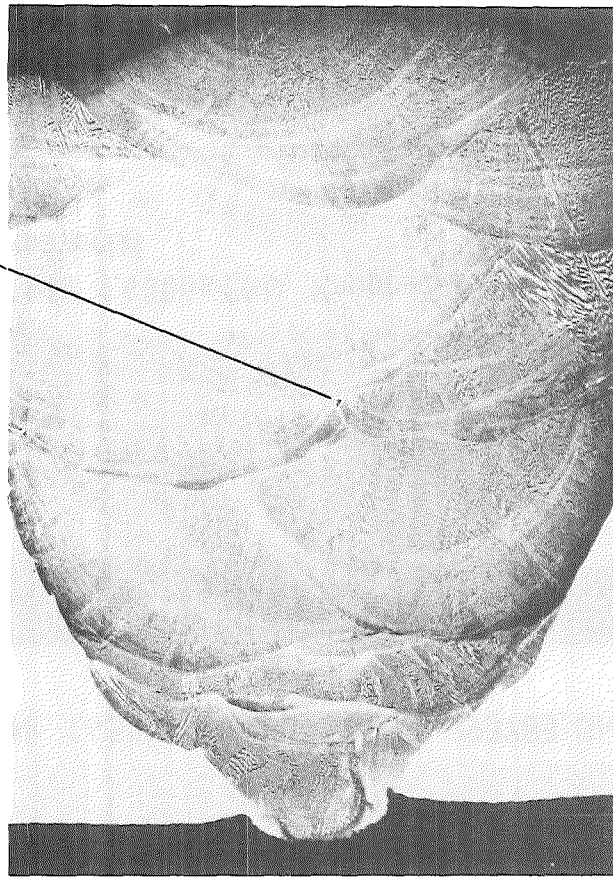
Abb. 18



Korrosionsuntersuchungen nach Huey (15 Perioden) an verschiedenen Werkstoffen  
verschweißt mit Zusatzwerkstoff 2.4656 Querschleife, geätzt

Lunker

a



Werkst. Nr. 2.4656, U-Naht  
Grundwerkstoff Nr.1.4306s  
Creusot-Loire Ch. TO 805



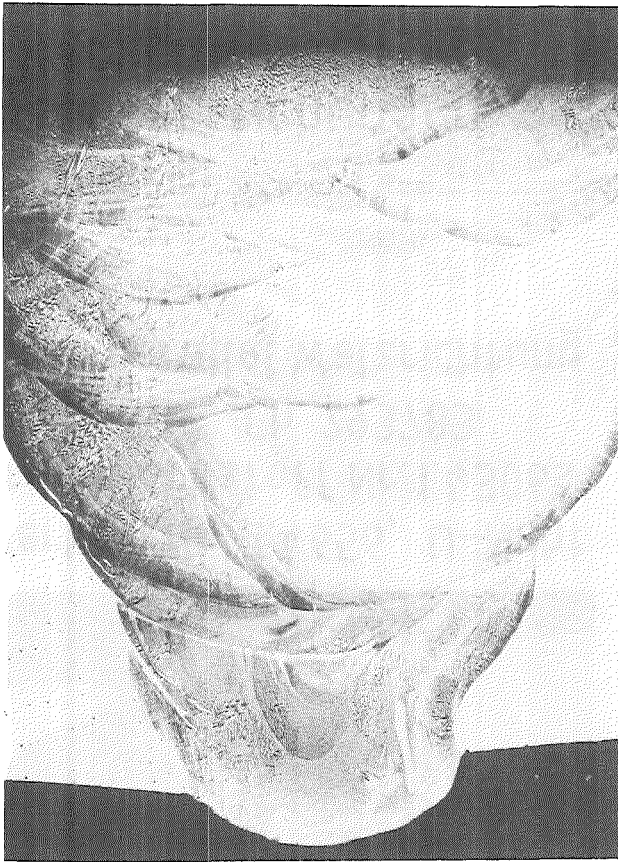
Werkst. Nr. 2.4656, U-Naht  
Grundwerkstoff Nr.1.4306s  
Krupp-SW Ch. 294273

1mm

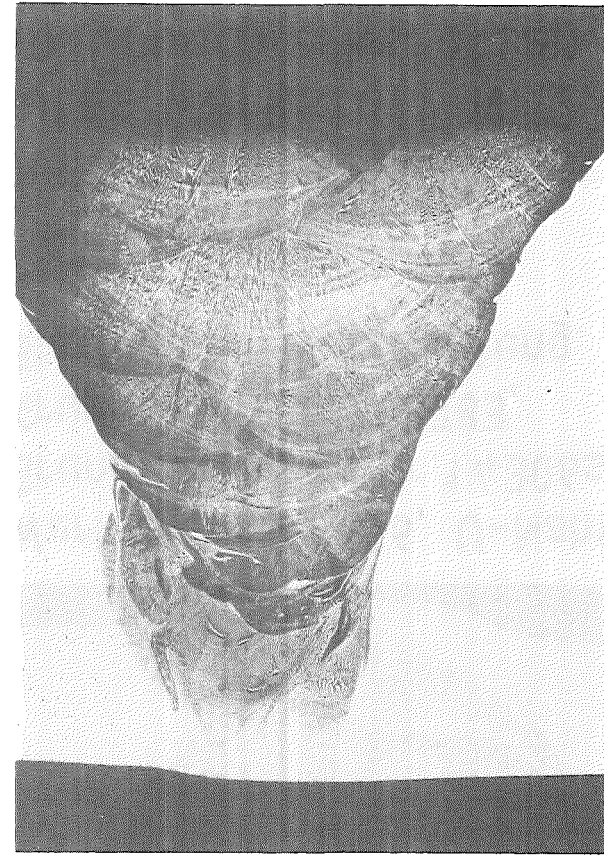
Gefügeuntersuchungen des Schweißgutes, Werkstoff Nr. 2.4656  
beim Verschweißen von verschiedenen Grundwerkstoffen  
Querschliffe, geätzt, nach Huey-Test (15 Perioden, 720 h)

kik

a



b



Werkstoff Nr.2.4656,U-Naht

Werkstoff Nr.2.4656,V-Naht

— 1mm

Abb. 20

KfK

Gefügeuntersuchungen des Schweißgutes, Werkstoff Nr.2.4656 beim Verschweißen von Werkstoff Nr.1.4306 s ESU, Krupp-SW, Charge Nr.018876, Schmiedematerial Querschlitze, geätzt, nach Huey-Test (15 Perioden, 720h)

a



Werkst. Nr. 2.4656, U-Naht  
Grundwerkstoff Nr.1.4306s  
Krupp-SW, Ch. 293783  
Blech parallel Walzrichtung

b



Werkst. Nr. 2.4656, U-Naht  
Grundwerkstoff Nr.1.4306s  
Krupp-SW, Ch. 293783,  
Blech quer Walzrichtung

— 1 mm

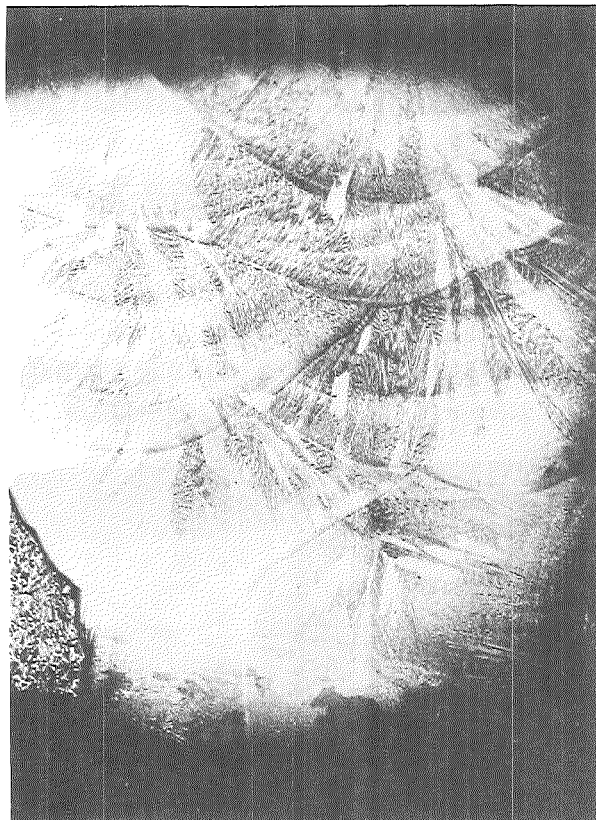
— 60 —

kjk

Gefügeuntersuchungen des Schweißgutes, Werkstoff Nr. 2.4656  
beim Verschweißen von verschiedenen Grundwerkstoffen  
Querschliffe, geätzt, nach Huey-Test (15 Perioden, 720 h)



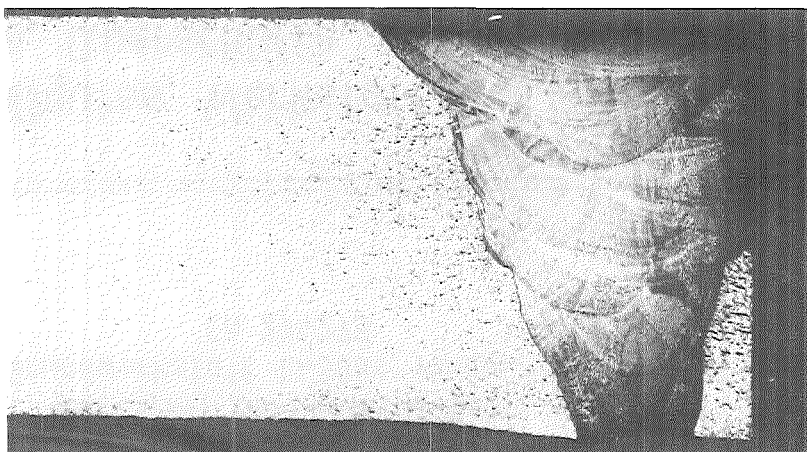
d



Werkstoff Nr. 2.4656,U-Naht

Grundwerkstoff UHB 25 L

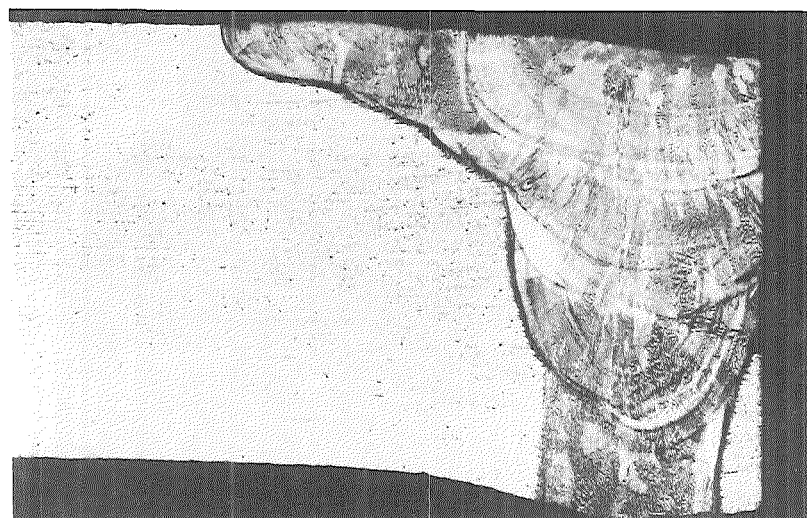
D



Werkstoff Nr. 2.4656,V-Naht

Grundwerkstoff URANUS 65

C



Werkstoff Nr. 2.4656,V-Naht

Grundwerkstoff URANUS S1

— 61 —

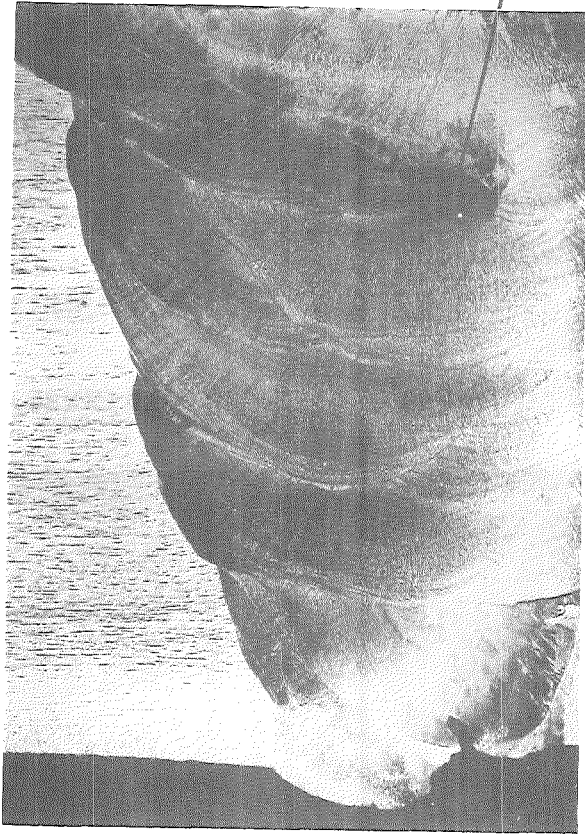
— 1mm



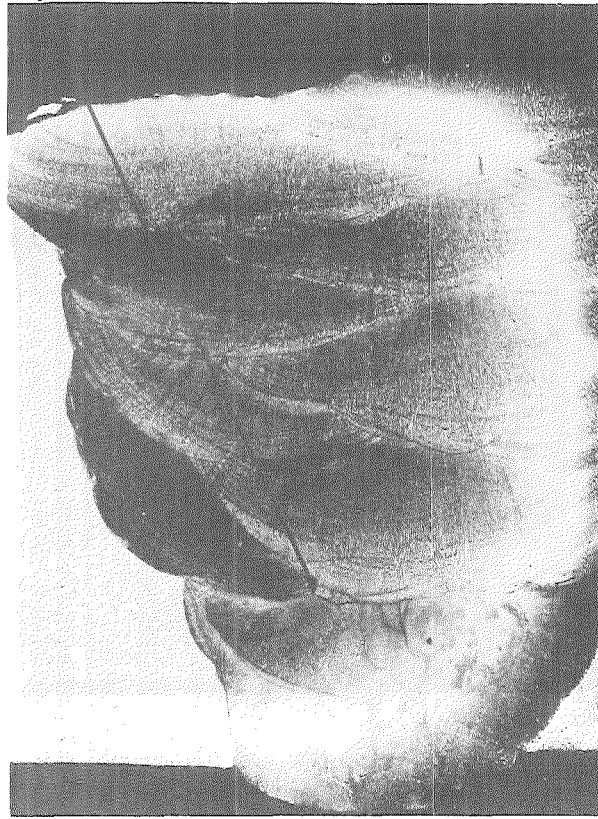
Gefügeuntersuchungen des Schweißgutes, Werkstoff Nr.2.4656 beim Verschweißen von verschiedenen Grundwerkstoffen, Querschliffe, geätzt, nach Huey-Test ( 720 h )

Lunker

a



b



c



Werkstoff Nr. 1.4316, U-Naht  
Grundwerkstoff 1.4306s, Krupp-SW  
Ch. 293783

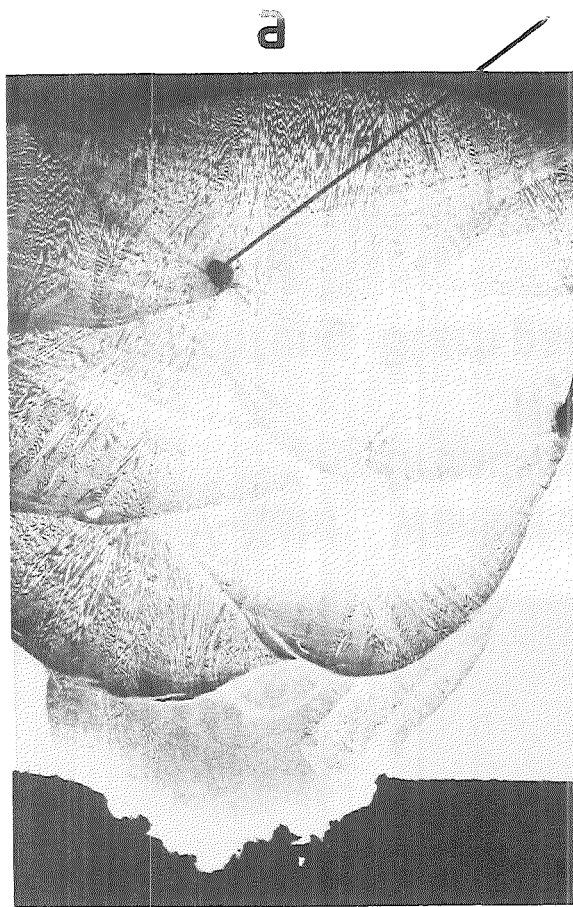
Werkstoff Nr. 1.4316, U-Naht  
Grundwerkstoff 1.4306s, Krupp-SW  
Ch. 294273

Werkstoff Nr. 1.4316, U-Naht  
Grundwkst. 1.4306s ESU, Krupp-SW  
Ch. 018876

1 mm

KJK

Gefügeuntersuchung des Schweißgutes, Werkstoff Nr. 1.4316 beim Verschweißen von verschiedenen Grundwerkstoffen, Querschliffe, geätzt, nach Huey-Test (15 Perioden, 720 h)



Werkstoff 2 RE 10, U-Naht  
Grundwerkstoff Nr.1.4306s  
Krupp-SW



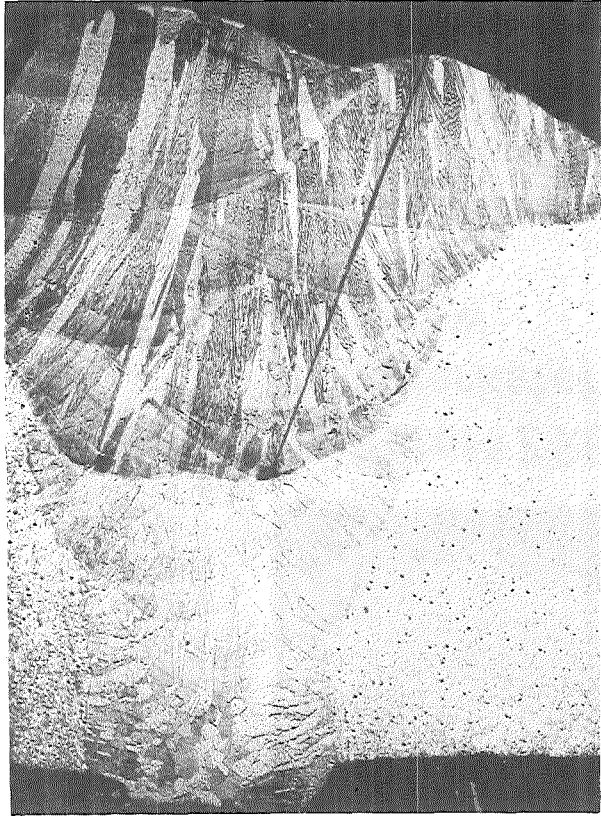
Werkstoff 2 RE 10, U-Naht  
Grundwerkst.Nr.1.4306s ESU  
Krupp-SW

→ 1mm



a

Lunker  
/



D



C



Werkstoff 2 RE 10, V-Naht

Werkstoff 2 RE 10, U-Naht

Werkstoff 2 RE 10, V-Naht

Grundwerkstoff UHB 25 L

Nyby Uddeholm

Blech parallel Walzrichtung

Blech parallel Walzrichtung

Blech quer Walzrichtung

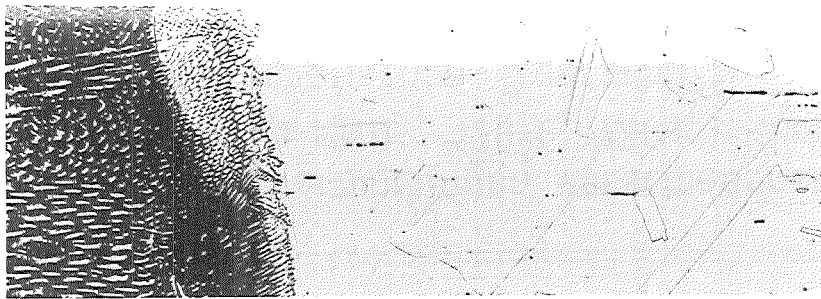
1mm



Gefügeuntersuchungen des Schweißgutes, Werkstoff 2 RE 10  
beim Verschweißen von verschiedenen Grundwerkstoffen  
Querschliffe, geätzt, nach Huey-Test (15 Perioden, 720h)

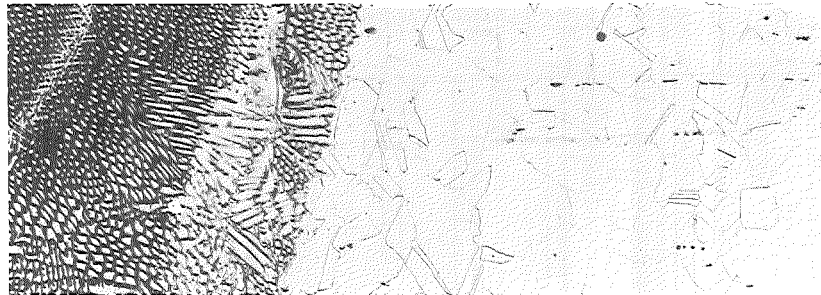
Abb. 25

a



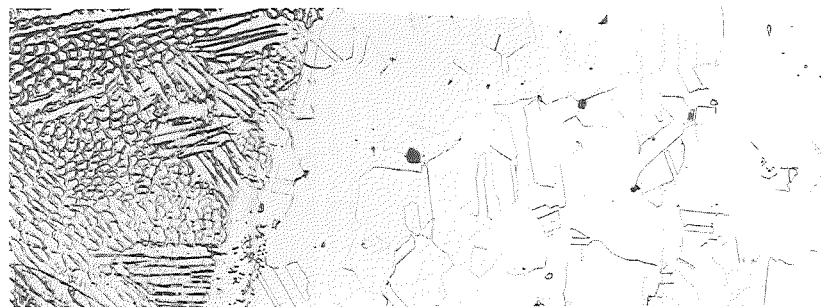
Werkstoff Nr. 1.4306s, Creusot-Loire, Ch. TO 805

b



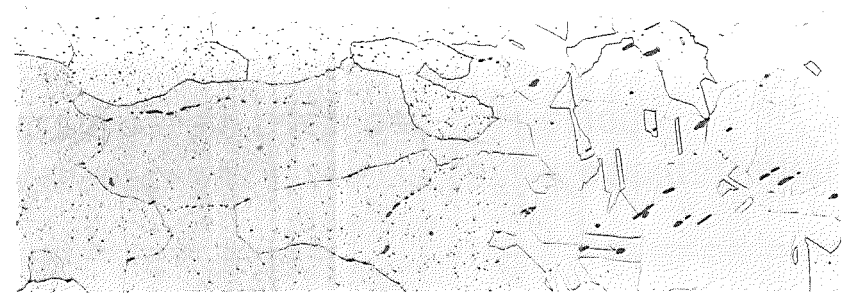
Werkstoff Nr. 1.4306s, Krupp-SW, Ch. 293783

c



Werkstoff Nr. 1.4306s ESU, Krupp-SW, Ch. 018876

d



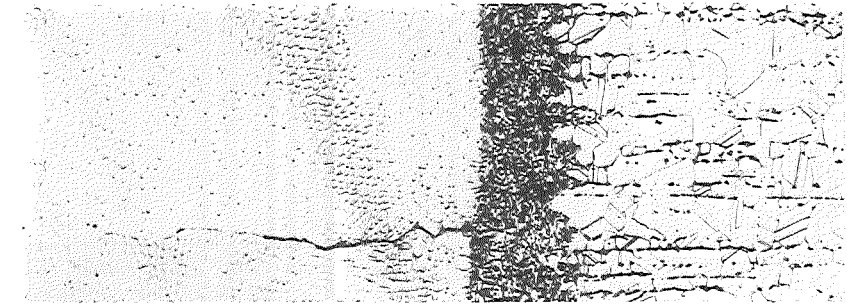
UHB 25 L, Nyby-Uddeholm, Ch. LU 9367, Wkst. 1.4845

e



Uranus 65, Creusot-Loire, Ch. T 7393

f



Uranus S1, Creusot-Loire

50 μm

Abb. 26



Gefügeuntersuchungen am Übergang Schweißgut-Matrix verschiedener Werkstoffe verschweißt mit Zusatzwerkstoff Nr. 2.4656, Querschliffe geätzt

Korrosionseindringtiefe  
[µm]

Korrosionseindringtiefe  
[µm]

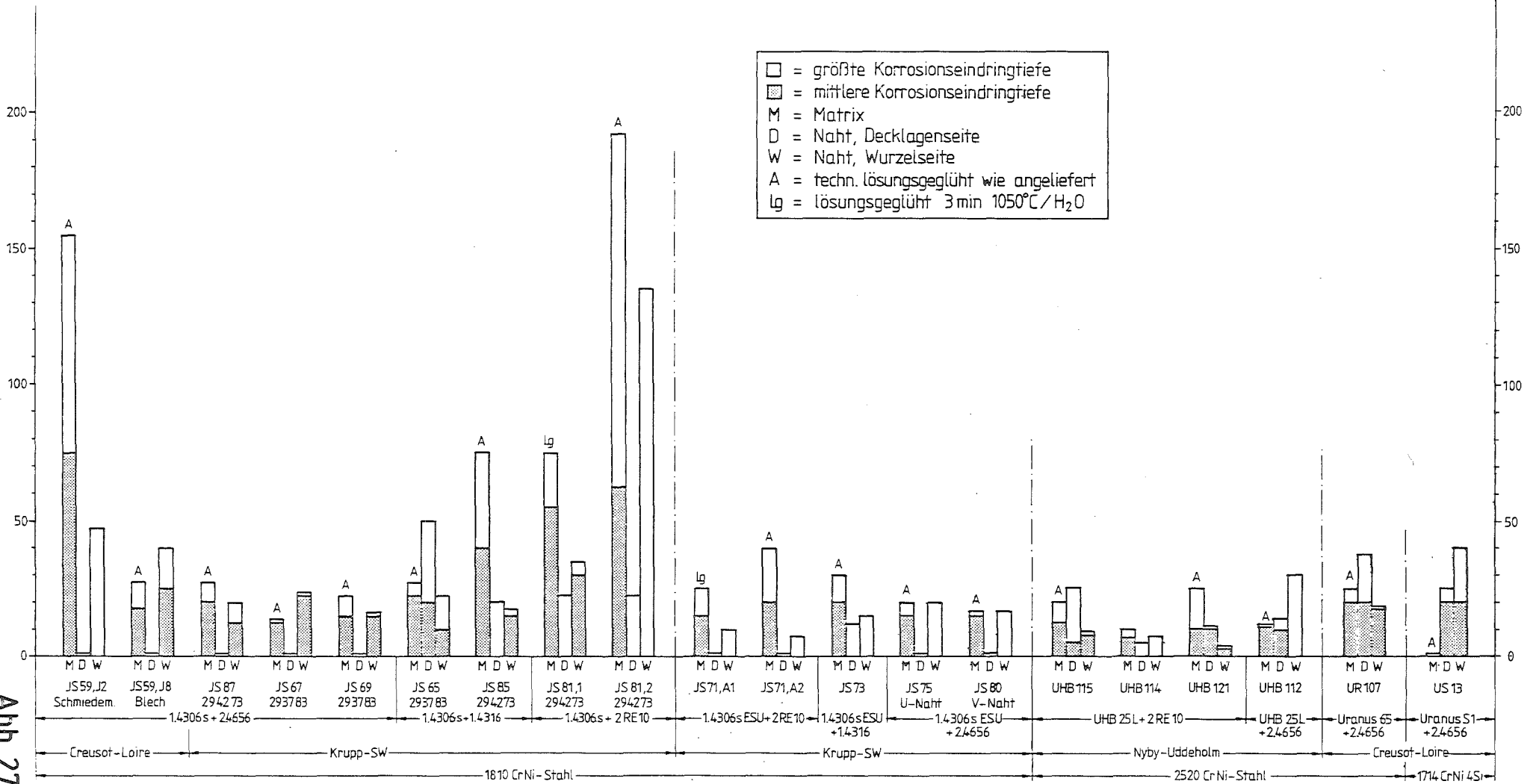


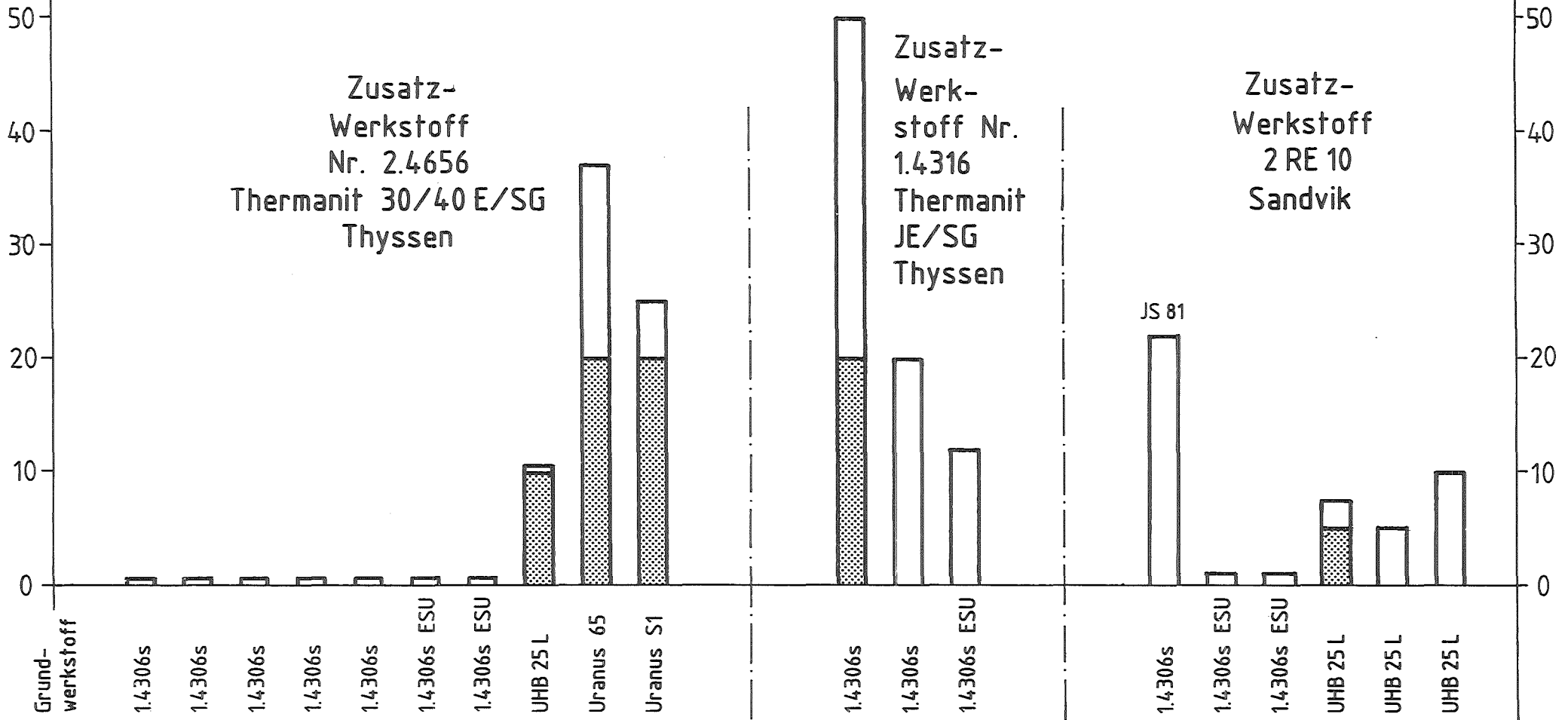
Abb. 27



Korrosion an Schweißverbindungen verschiedener Grundwerkstoff-Zusatzwerkstoff-Kombinationen im Huey-Test (65%ige HNO<sub>3</sub>, 120°C, 720 h): Korrosionseindringtiefen nach der 15. Periode gemessen am metallografischen Querschliff

Eindringtiefe  
[ $\mu\text{m}$ ]

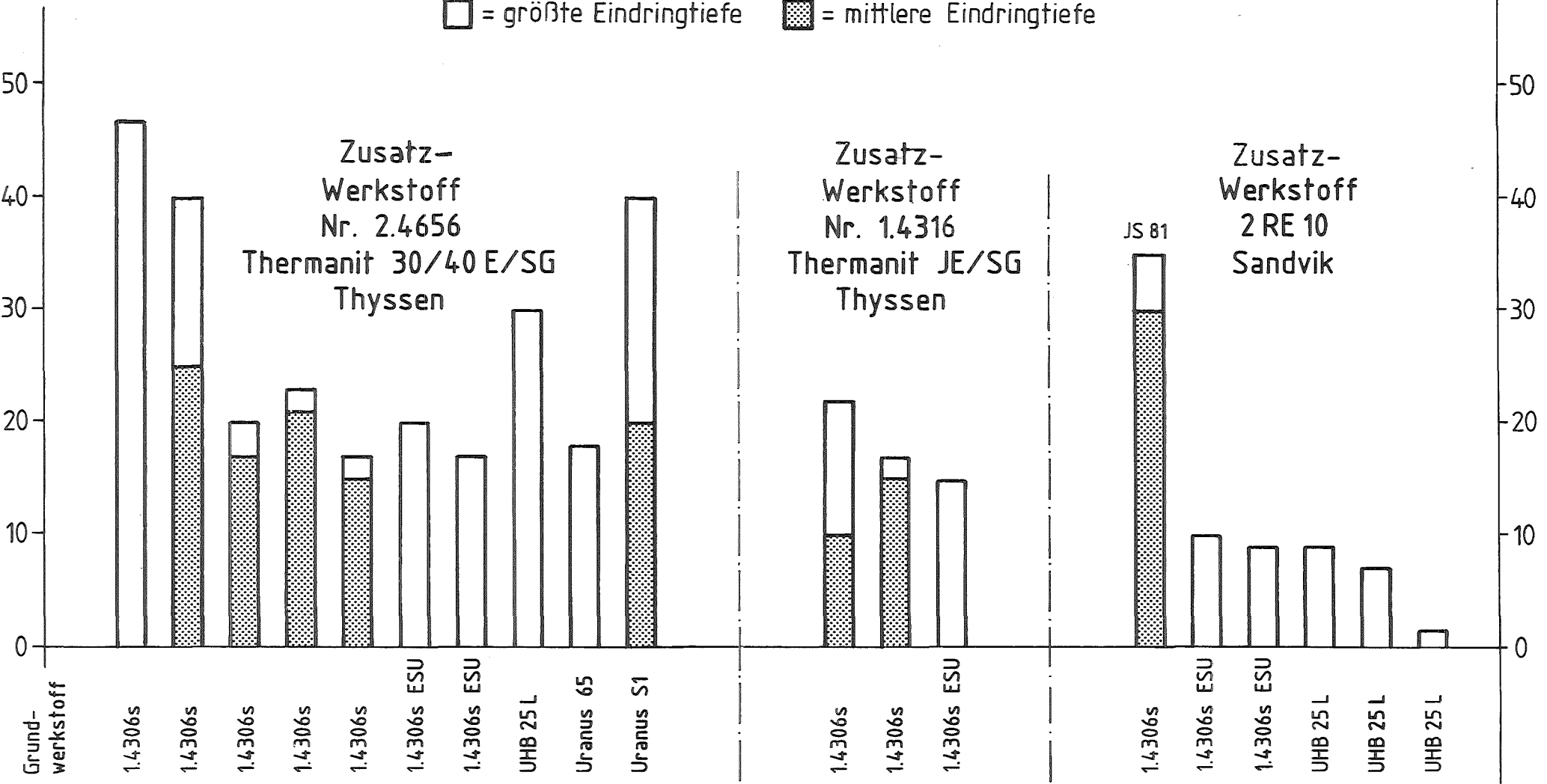
□ = größte Eindringtiefe    ▨ = mittlere Eindringtiefe



Korrosionseindringtiefe in Schweißgut, Decklagenseite

Eindringtiefe [µm]

□ = größte Eindringtiefe    ▨ = mittlere Eindringtiefe



Korrosionseindringtiefe in Schweißgut, Wurzelseite

Abb. 29



Abtragsgeschwindigkeit  
 $\Delta l/t$  mm/a

Abtragsgeschwindigkeit  
 $\Delta m/A \cdot t$  mg/dm<sup>2</sup>d

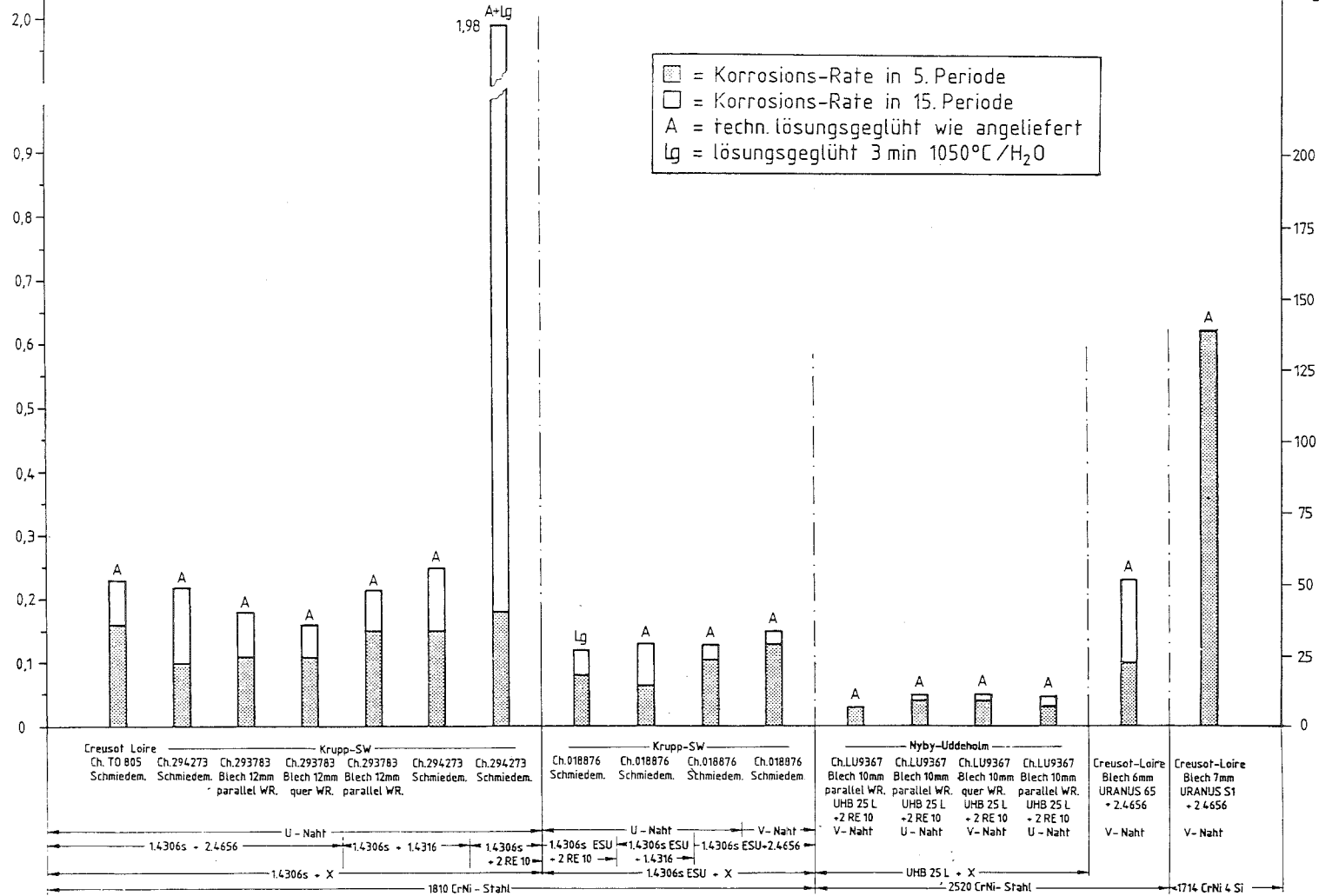
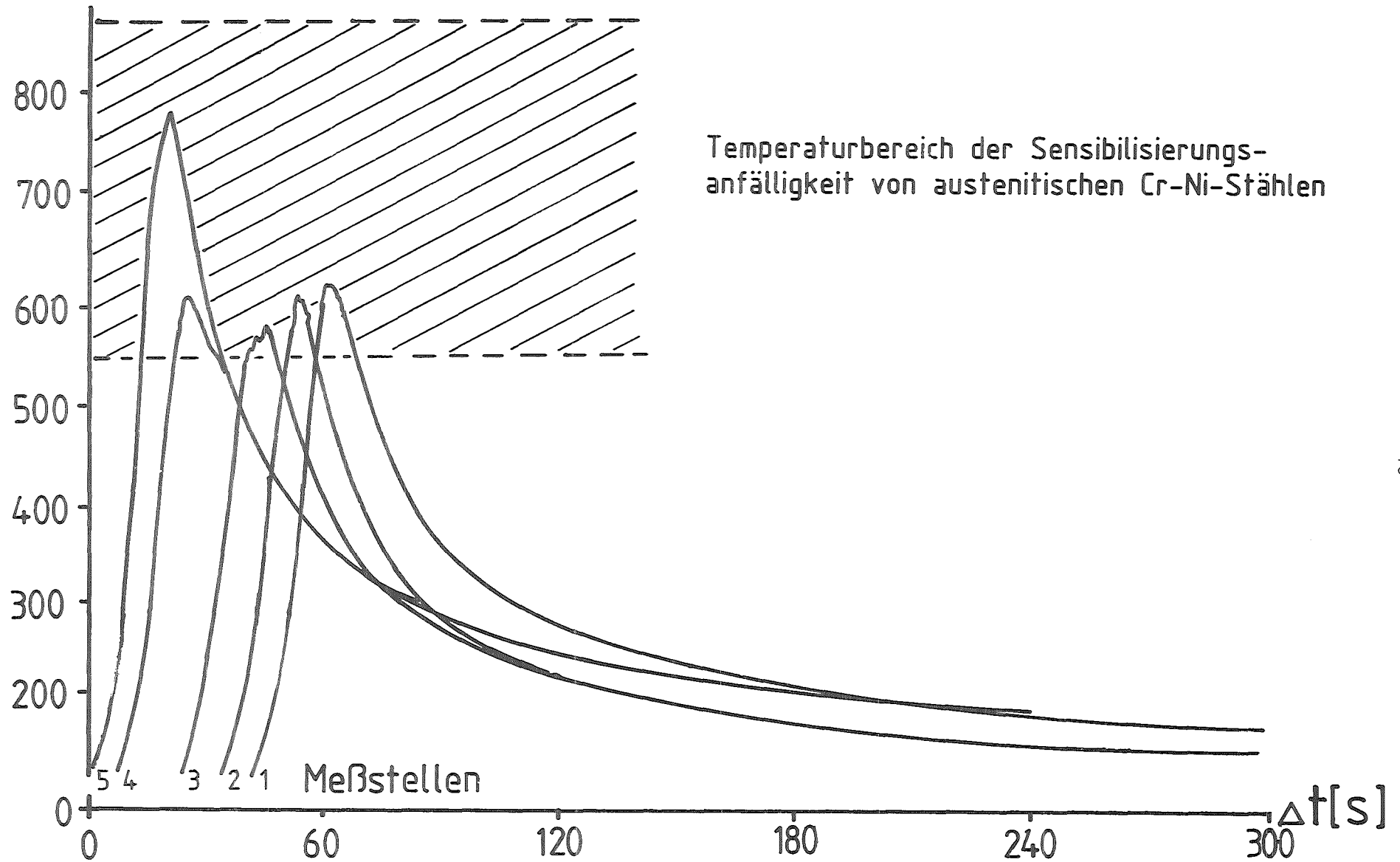


Abb. 30



Korrosion an Schweißverbindungen verschiedener Grundwerkstoff-Zusatzwerkstoff-Kombinationen im Huey-Test (65%ige HNO<sub>3</sub>, 120°C, 240 und 720 h): Korrosionsgeschwindigkeit in 5. und 15. Periode



Zeitlicher Temperaturverlauf während des Schweißens an 5 Meßstellen in der Nähe der Schweißnaht (Probe Nr. JS80, 3. Lage)

# Abtragsgeschwindigkeit

## Versuch JS 59

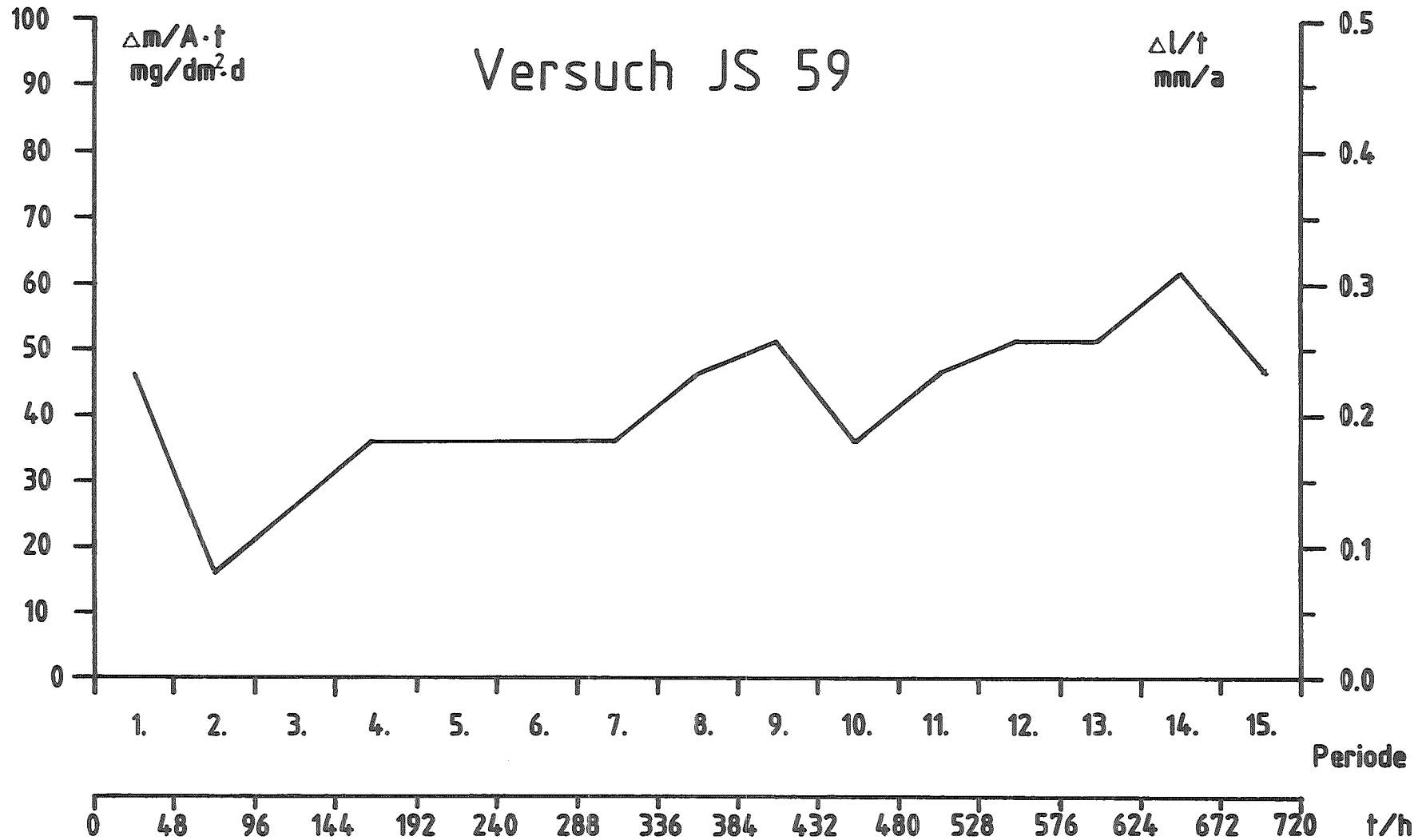


Abb. 32

KfK

Korrosionsuntersuchungen nach Huey am Werkstoff Nr. 1.4306s, Creusot-Loire, Schmiedemat.  
Blech 12 mm, Ch. TO 805, verschweißt mit Zusatzwerkstoff Nr. 2.4656, U-Naht

# Abtragsgeschwindigkeit

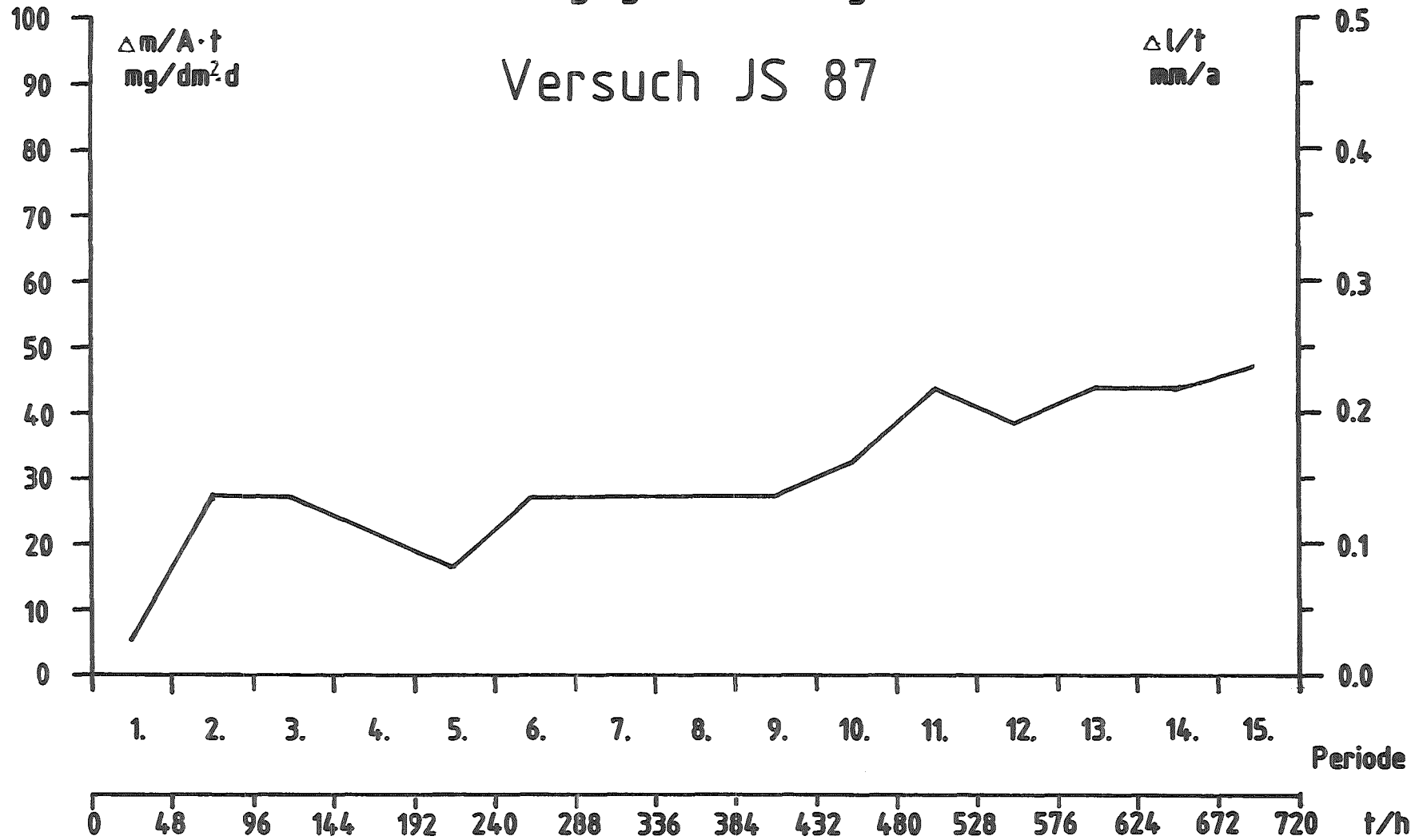


Abb. 33



Korrosionsuntersuchungen nach Huey am Werkstoff Nr. 1.4306s, Krupp-SW Schmiedematerial, Ch. 294273, verschweißt mit Zusatzwerkstoff Nr. 2.4656, U-Naht

# Abtragsgeschwindigkeit

## Versuch JS 67

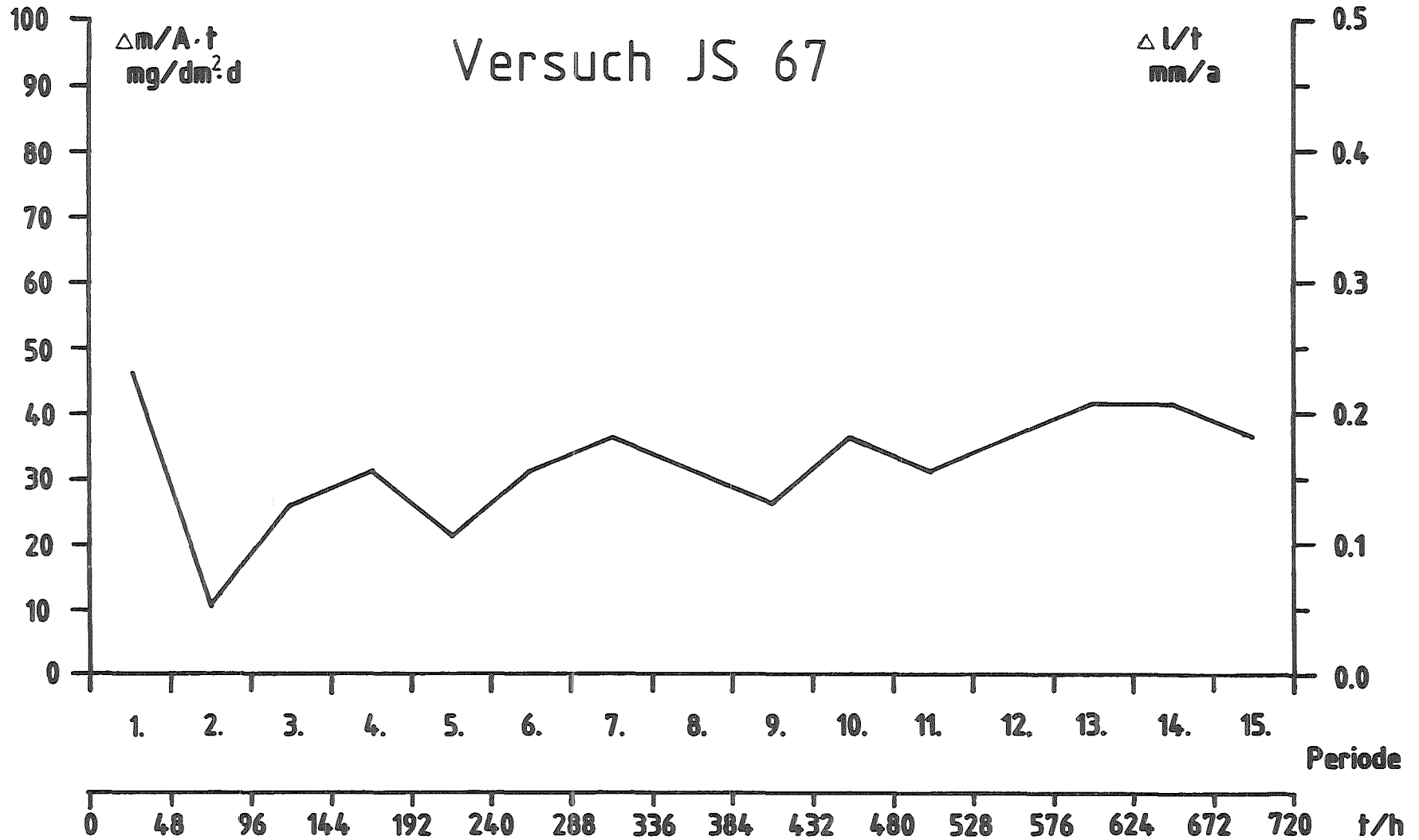


Abb. 34



Korrosionsuntersuchungen nach Huey an Werkstoff Nr. 1.4306s, Krupp-SW, Blech parallel Walzrichtung, Ch. 293783, verschweißt mit Zusatzwerkstoff Nr. 2.4656, U-Naht

# Abtragsgeschwindigkeit

## Versuch JS 69

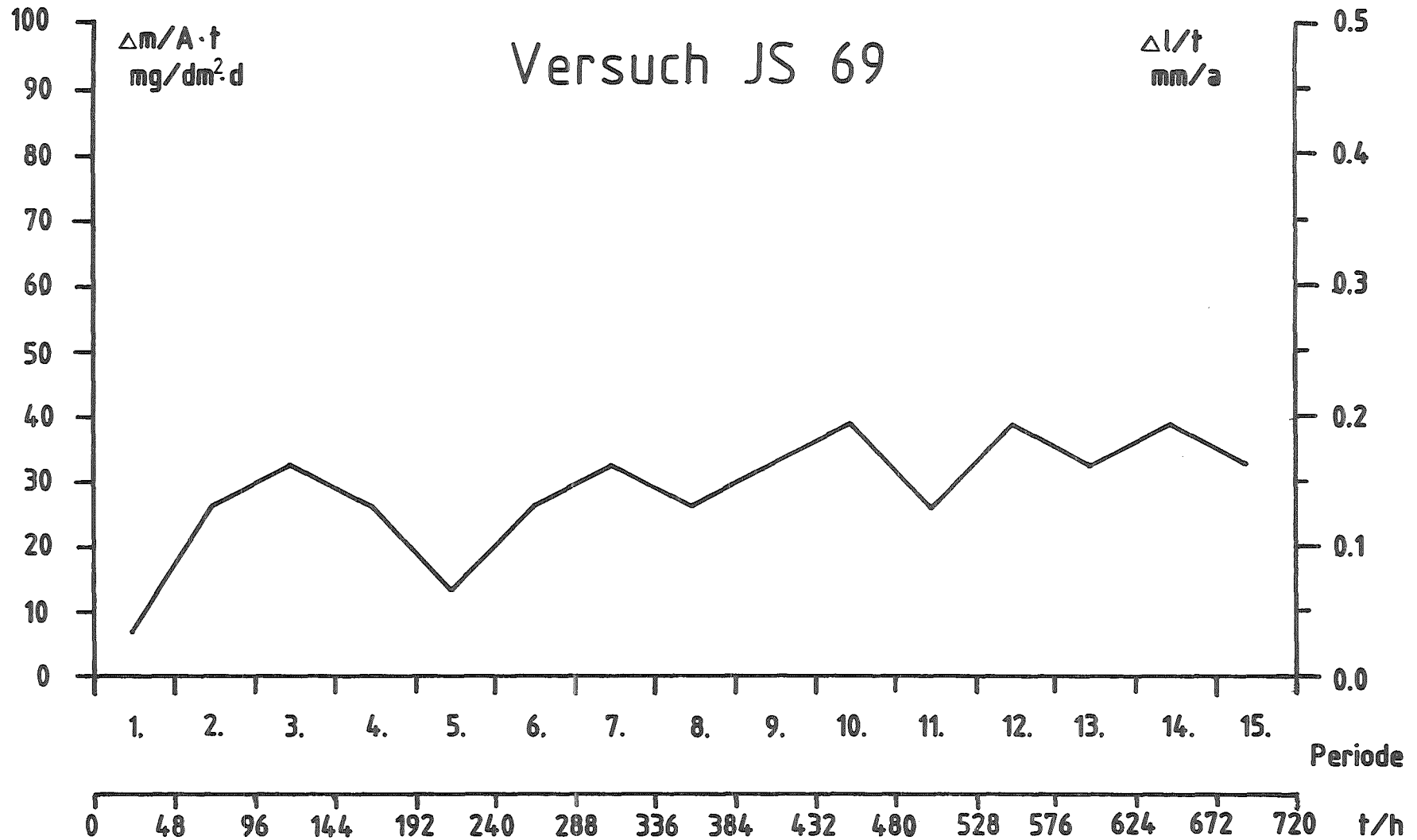


Abb. 35



Korrosionsuntersuchungen nach Huey am Werkstoff Nr. 1.4306s, Krupp-SW, Blech quer Walzrichtung, Ch. 293783, verschweißt mit Zusatzwerkstoff Nr. 2.4656, U-Naht

# Abtragsgeschwindigkeit

## Versuch JS 65

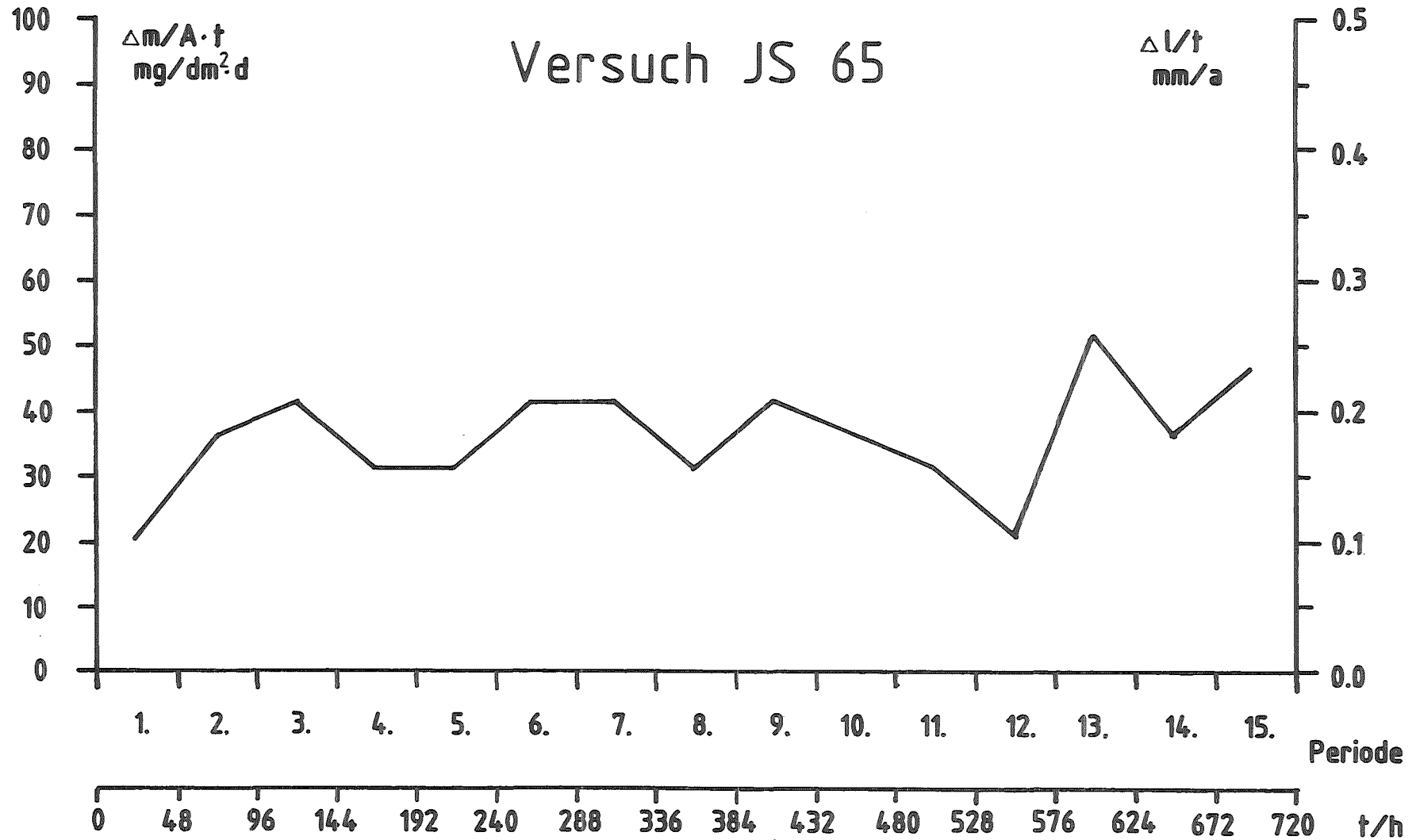


Abb. 36

KfK

Korrosionsuntersuchungen nach Huey am Werkstoff Nr. 1.4306s, Krupp-SW, Blech parallel Walzrichtung, Ch. 293783, verschweißt mit Zusatzwerkstoff Nr. 1.4316, U-Naht

# Abtragsgeschwindigkeit

## Versuch JS 85

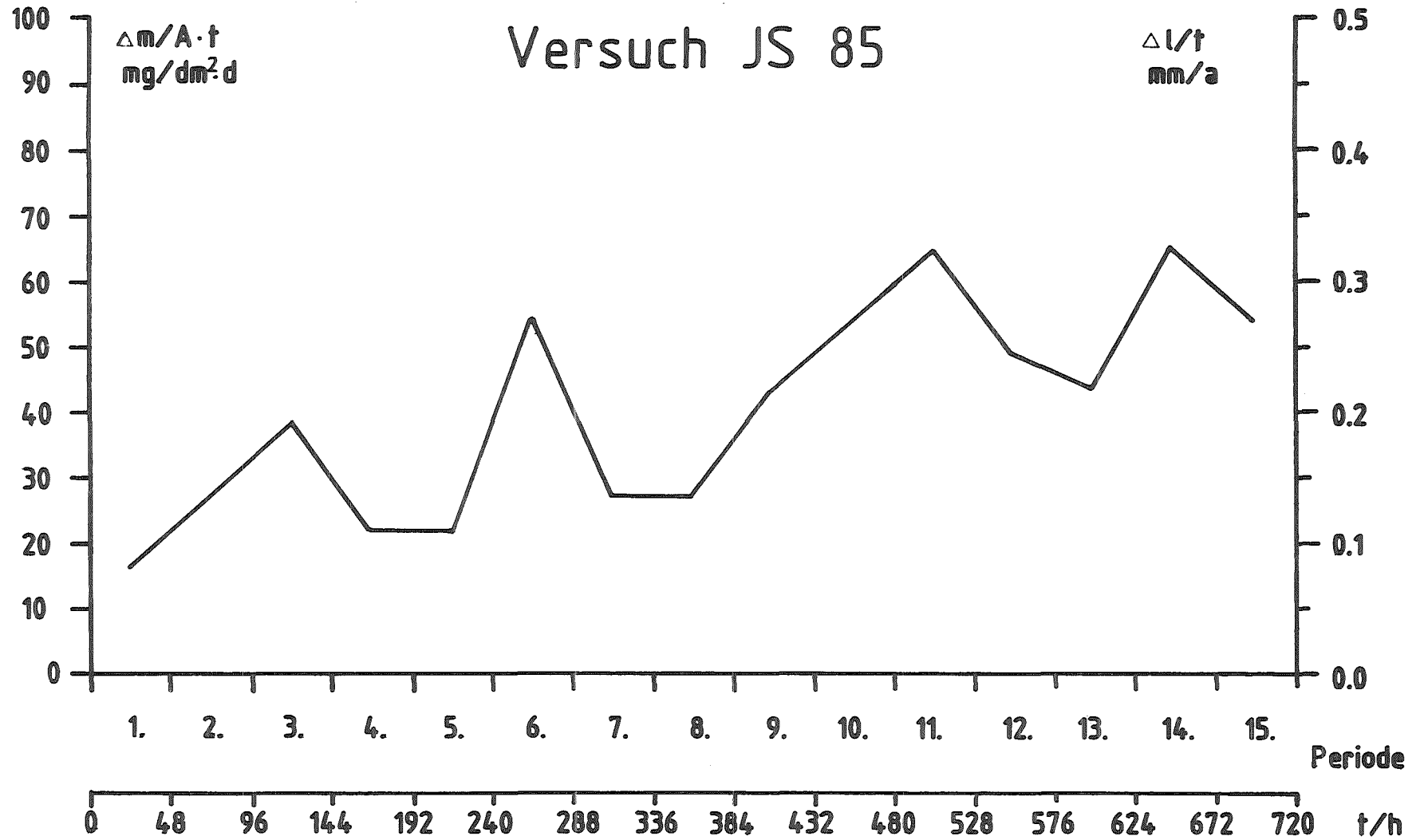


Abb. 37



Korrosionsuntersuchungen nach Huey am Werkstoff Nr. 1.4306s, Krupp-SW, Schmiedematerial, Ch. 294273, verschweißt mit Zusatzwerkstoff Nr. 1.4316, U-Naht



# Abtragsgeschwindigkeit

## Versuch JS 81

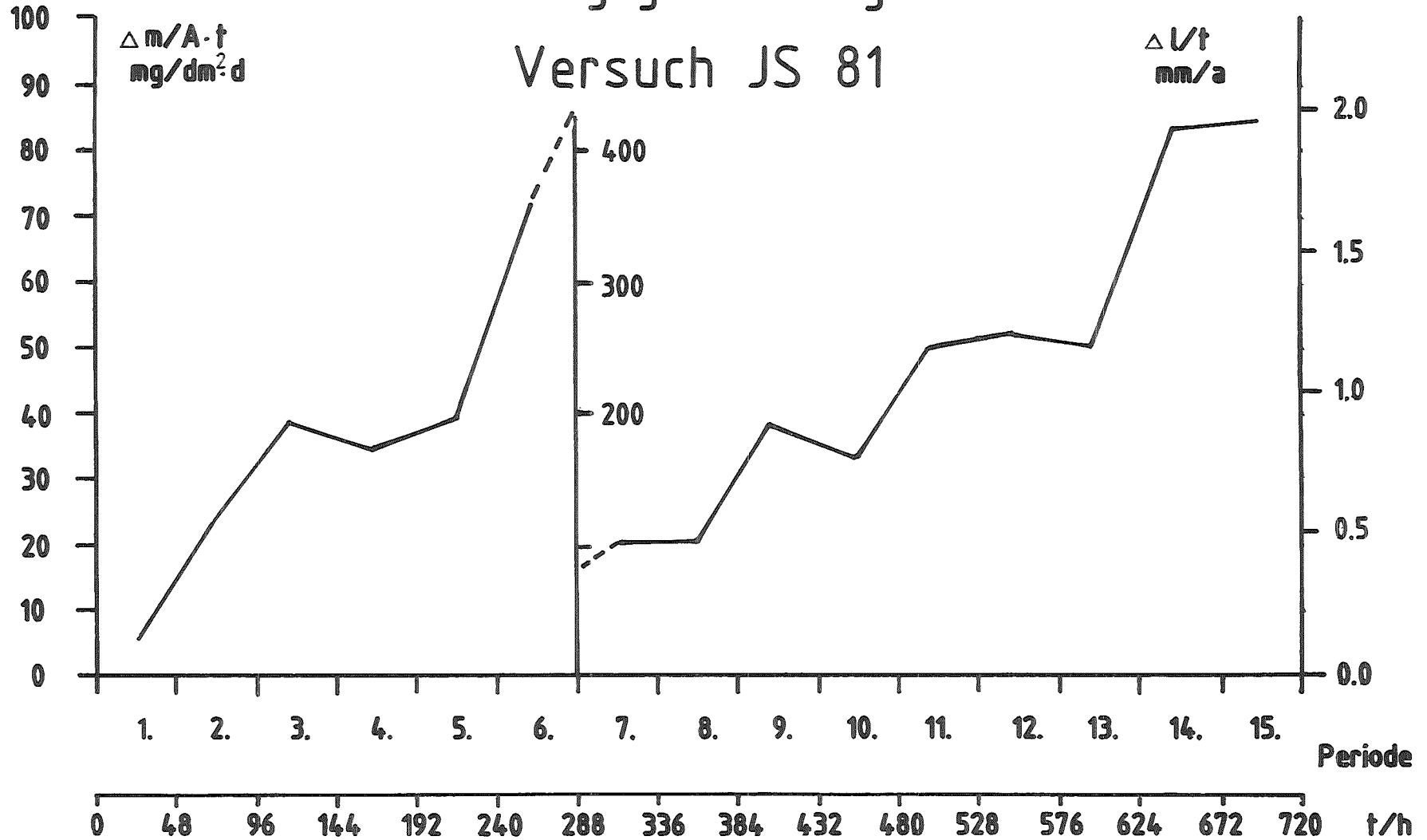


Abb. 38



Korrosionsuntersuchungen nach Huey am Werkstoff Nr. 1.4306s, Krupp-SW, Schmiedematerial, Ch. 294273, verschweißt mit Zusatzwerkstoff 2 RE 10, U-Naht

# Abtragungsgeschwindigkeit

## Versuch JS 75

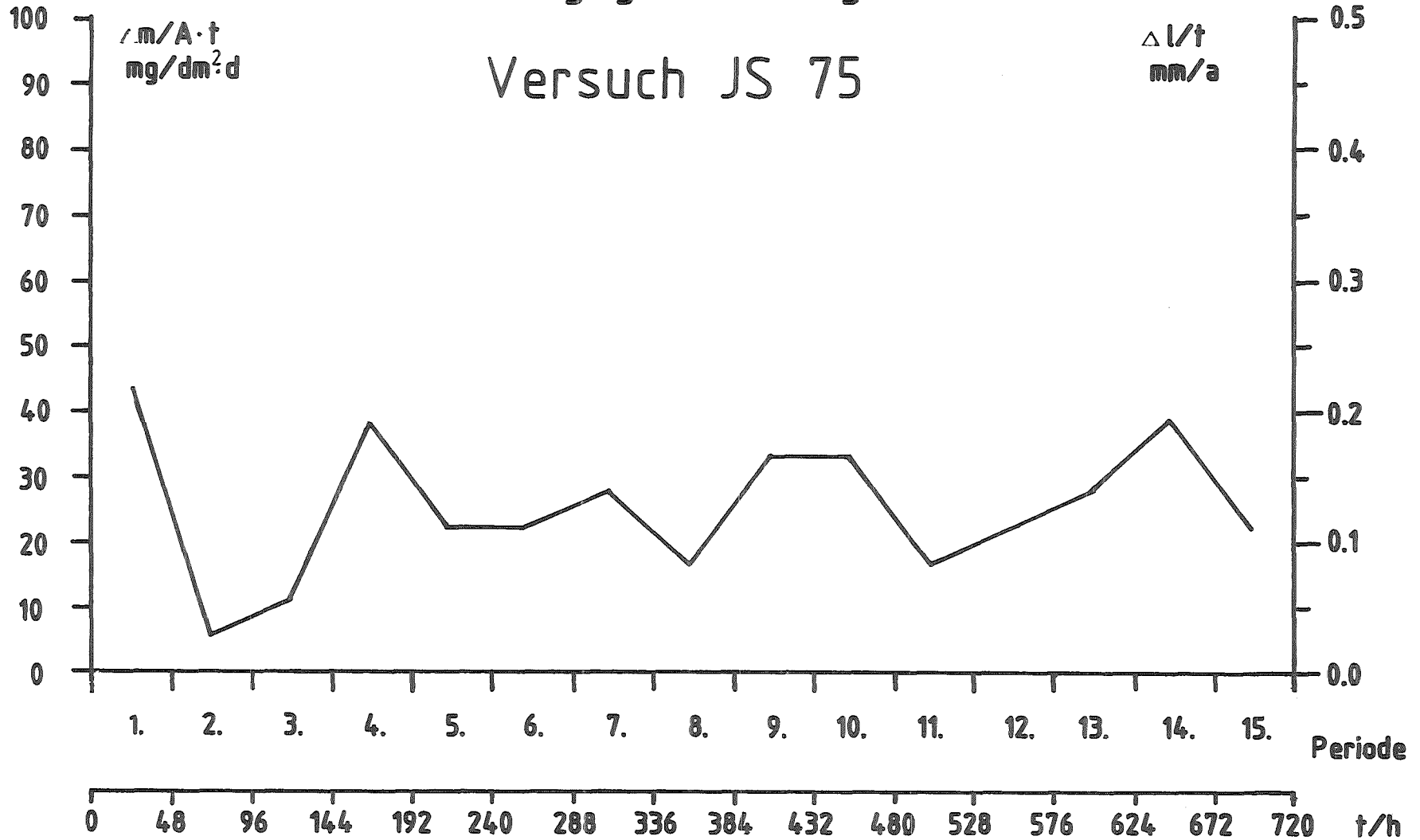


Abb. 39



Korrosionsuntersuchungen nach Huey am Werkstoff Nr. 1.4306s ESU, Krupp-SW, Schmiedematerial, Ch. 018876, verschweißt mit Zusatzwerkstoff Nr. 2.4656, U-Naht

# Abtragsgeschwindigkeit

## Versuch JS 80

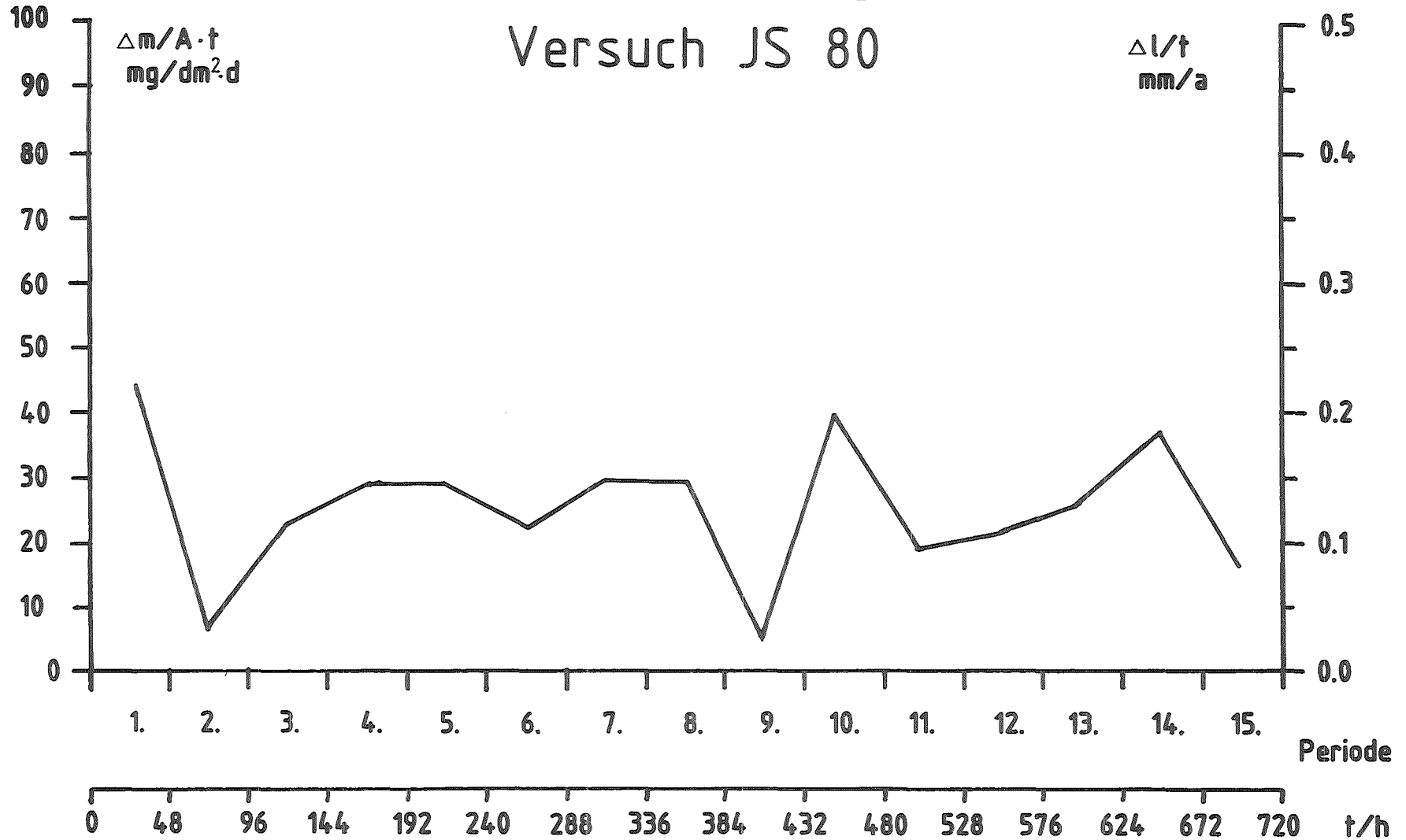


Abb. 4.0

— 79 —



Korrosionsuntersuchungen nach Huey am Werkstoff Nr. 1.4306s ESU, Krupp-SW, Schmiedematerial, Ch. 018876, verschweißt mit Zusatzwerkstoff Nr. 2.4656, U-Naht

# Abtragsgeschwindigkeit

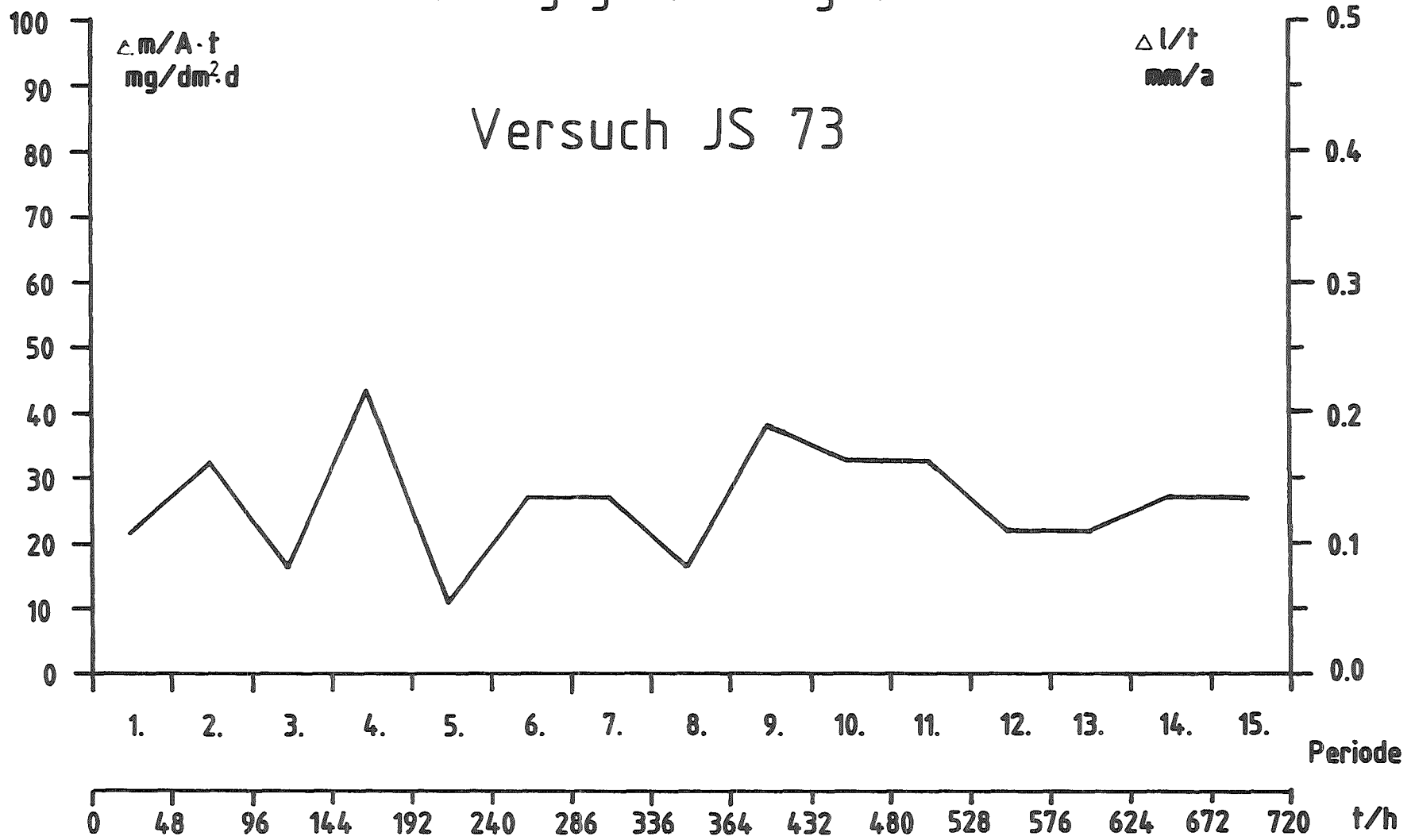


Abb. 4.1



Korrosionsuntersuchungen nach Huey am Werkstoff Nr. 1.4306s ESU, Krupp-SW, Schmiedematerial, Ch. 018876, verschweißt mit Zusatzwerkstoff Nr. 1.4316, U-Naht

# Abtragsgeschwindigkeit

## Versuch JS 71

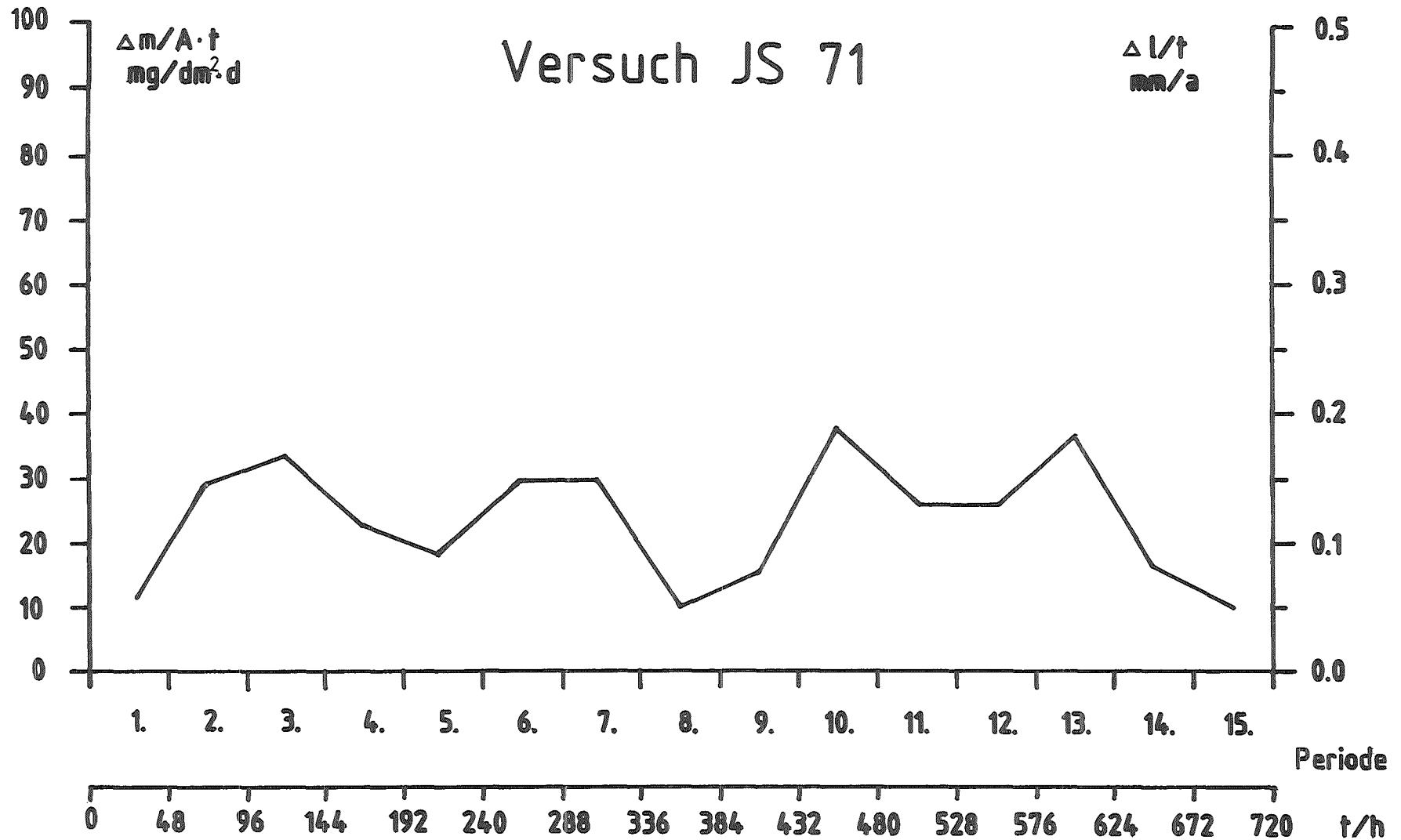


Abb. 42

KIK

Korrosionsuntersuchungen nach Huey am Werkstoff Nr. 1.4306s ESU, Krupp-SW, Schmiedematerial, Ch. 018876, verschweißt mit Zusatzwerkstoff 2RE 10, U-Naht

# Abtragsgeschwindigkeit

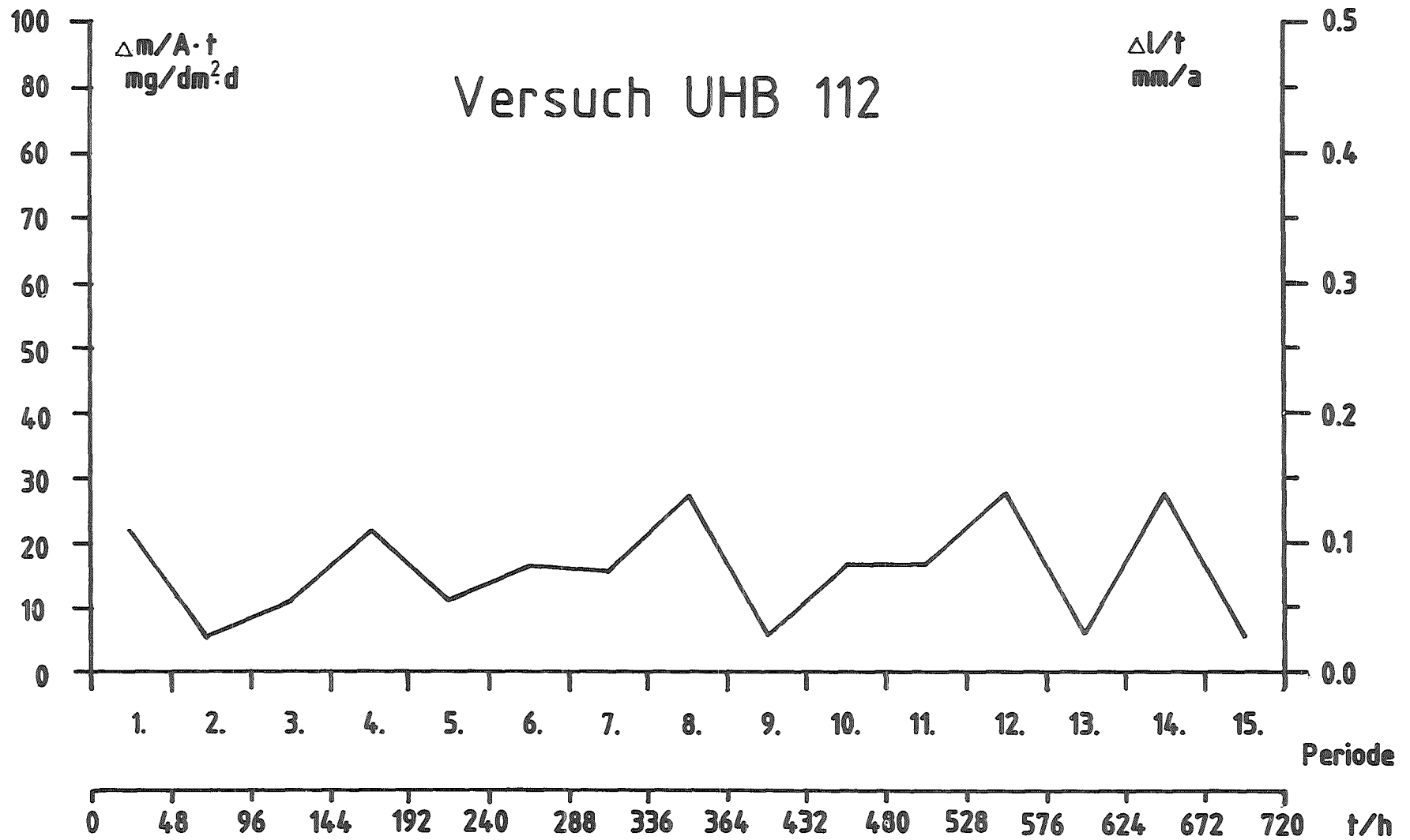


Abb. 43

KIK

Korrosionsuntersuchungen nach Huey am Werkstoff UHB 25 L, Nyby-Uddeholm, Blech parallel Walzrichtung, Ch. LU 9367, verschweißt mit Zusatzwerkstoff Nr. 2.4656

# Abtragsgeschwindigkeit

## Versuch UHB 115

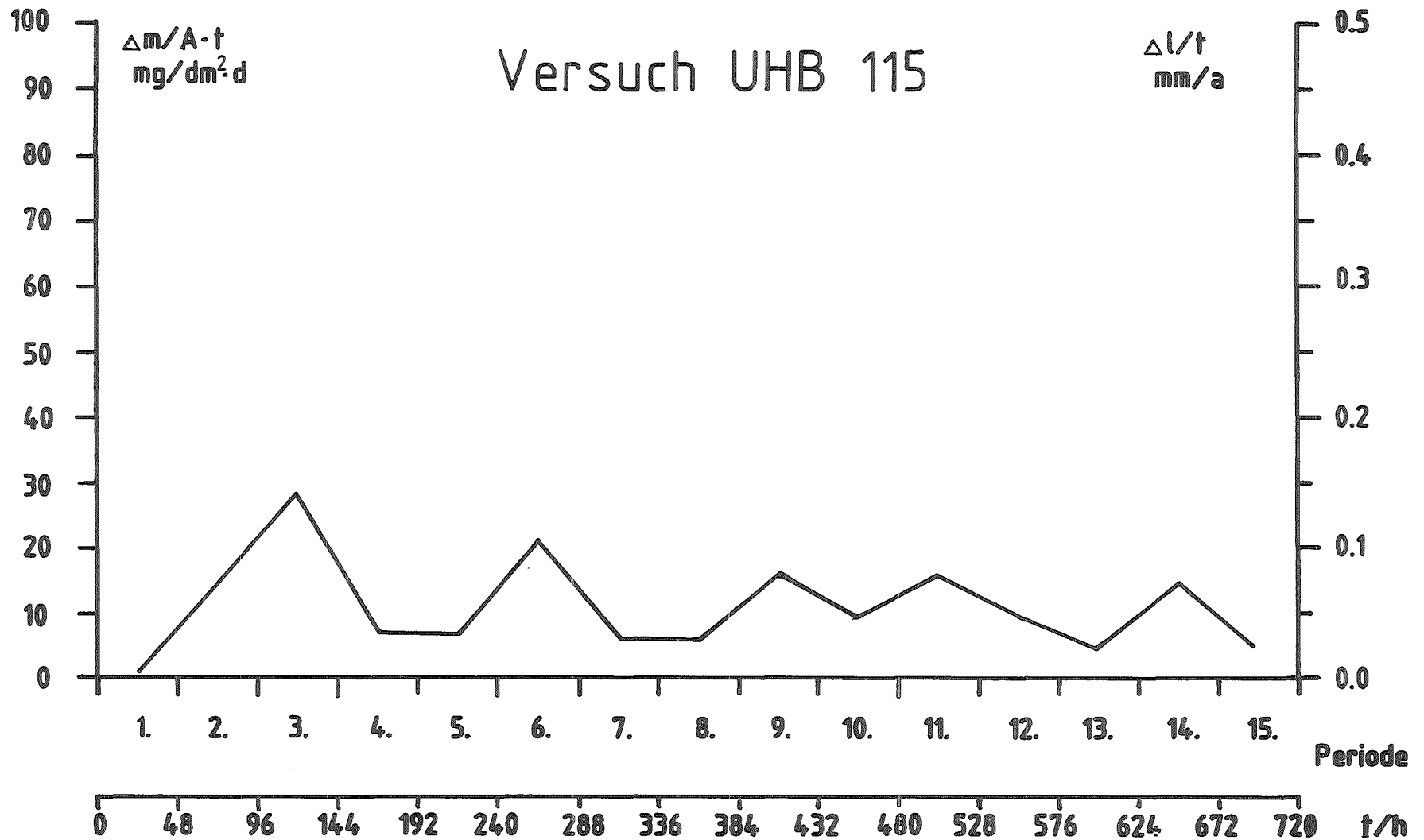


Abb. 44

KfK

Korrosionsuntersuchungen nach Huey am Werkstoff UHB 25 L, Nyby-Uddeholm, Blech parallel Walzrichtung, Ch. LU 9367, verschweißt mit Zusatzwerkstoff 2 RE 10, U-Naht

# Abtragsgeschwindigkeit

## Versuch UHB 114

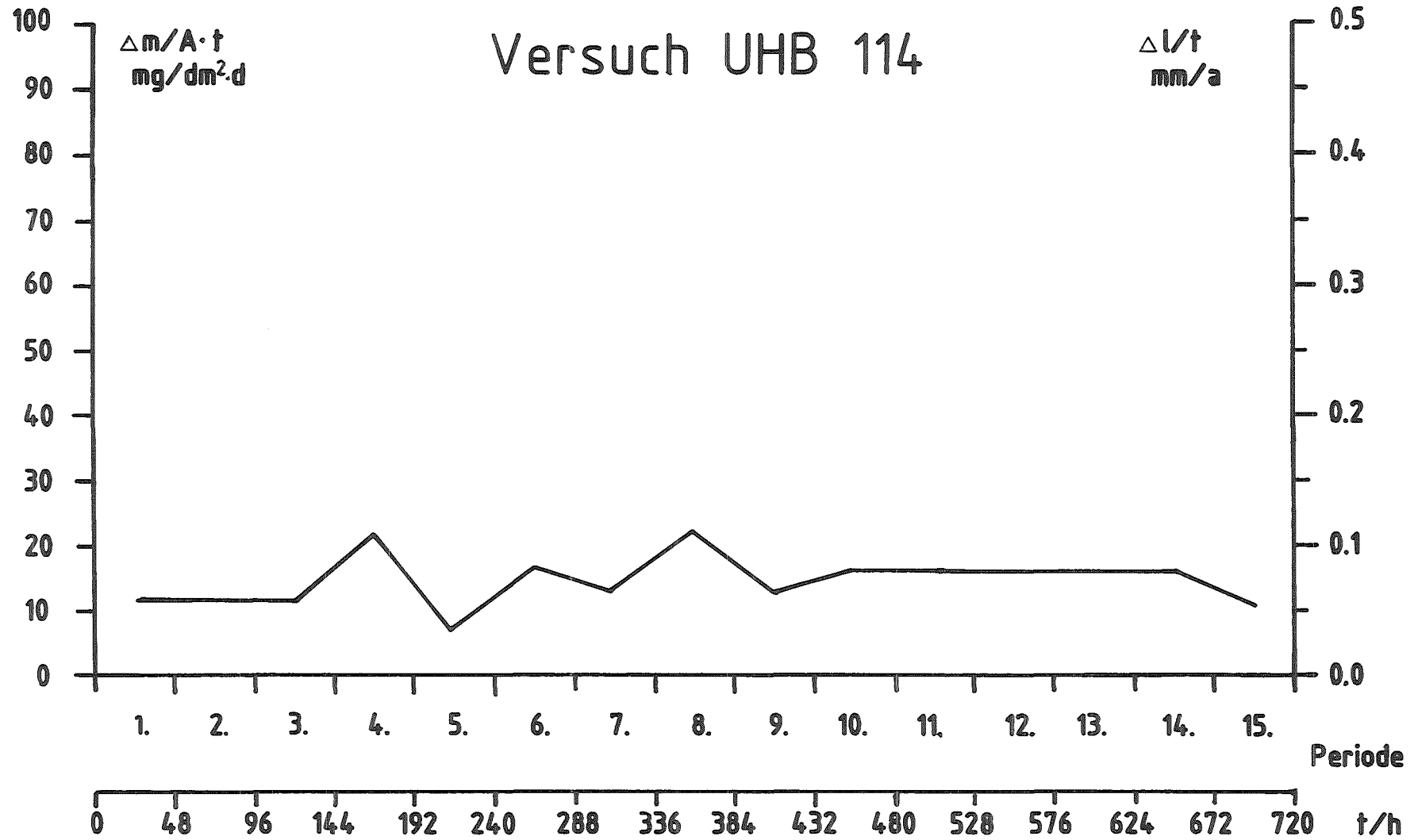


Abb. 4.5

KIK

Korrosionsuntersuchungen nach Huey am Werkstoff UHB 25 L, Nyby-Uddeholm, Blech quer Walzrichtung, Ch. LU 9367, verschweißt mit Zusatzwerkstoff 2 RE 10, U-Naht



# Abtragsgeschwindigkeit

## Versuch UHB 121

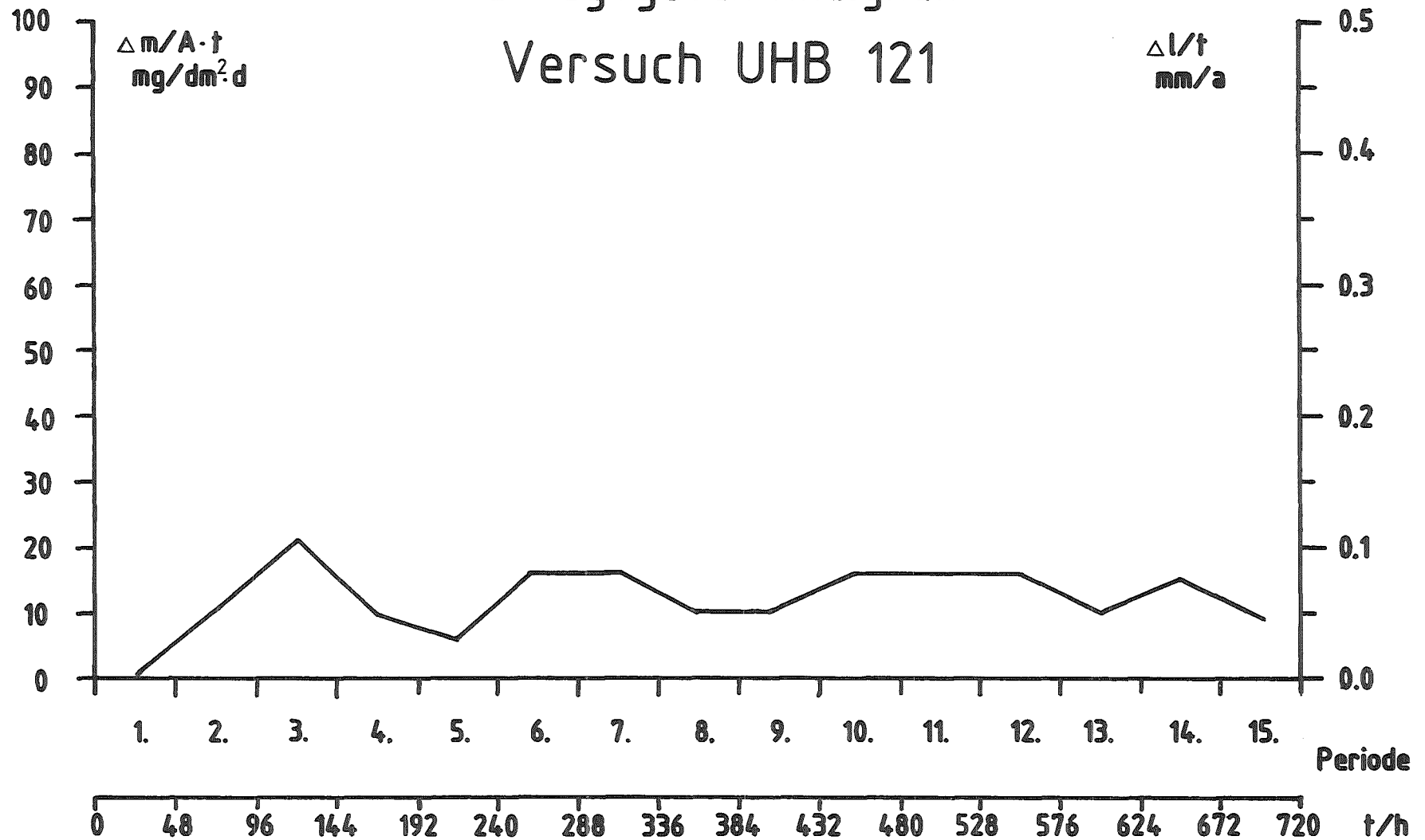


Abb. 46

KfK

Korrosionsuntersuchungen nach Huey am Werkstoff UHB 25 L, Nyby-Uddeholm, Blech quer Walzrichtung, Ch. LU 9367, verschweißt mit Zusatzwerkstoff 2 RE 10, V-Naht

# Abtragsgeschwindigkeit

## Versuch UR 107

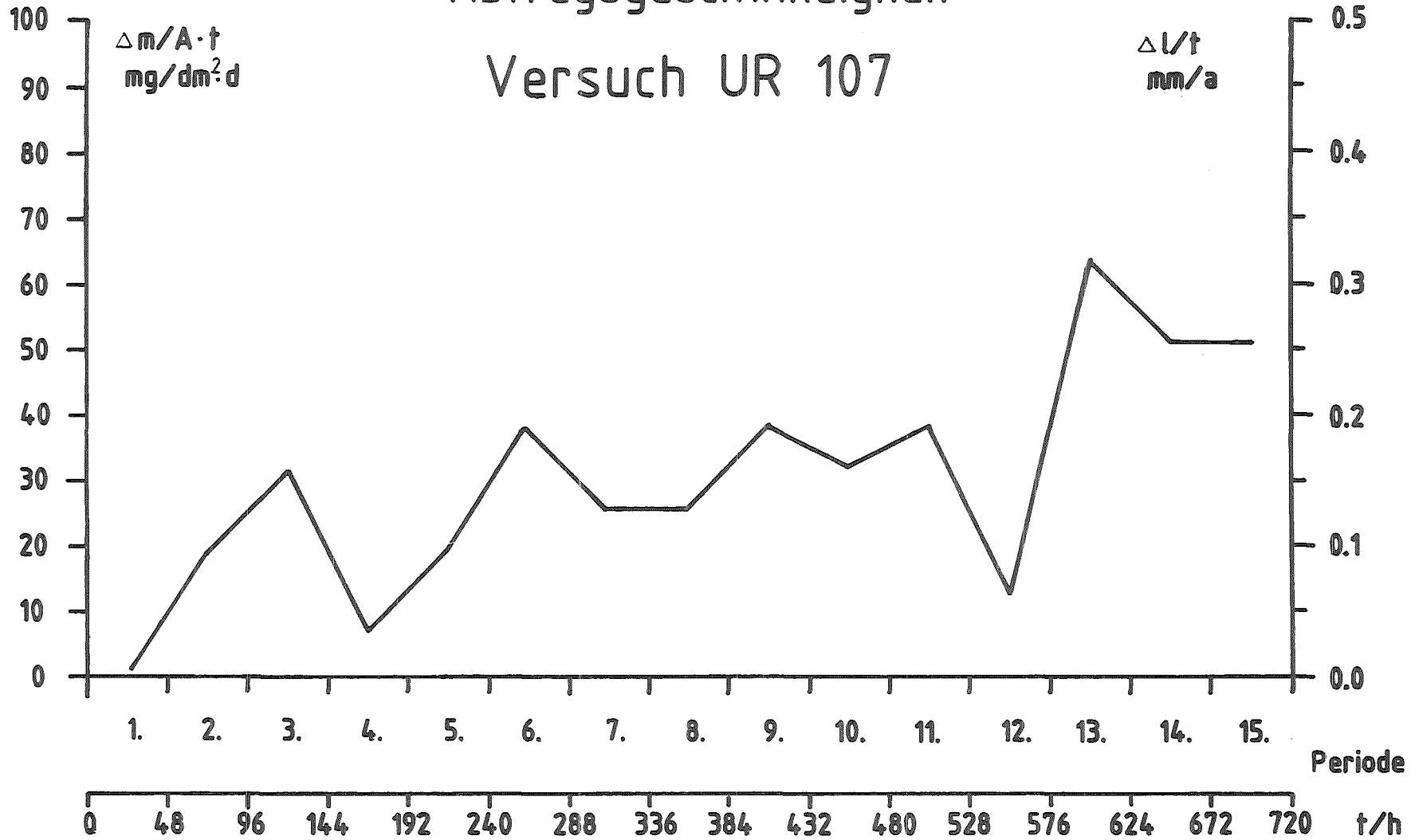


Abb. 47

KfK

Korrosionsuntersuchungen nach Huey am Werkstoff Uranus 65, Creusot-Loire, Blech 6 mm, Ch. T 7393, verschweißt mit Zusatzwerkstoff Nr. 2.4656, V-Naht

# Abtragsgeschwindigkeit

## Versuch US 13

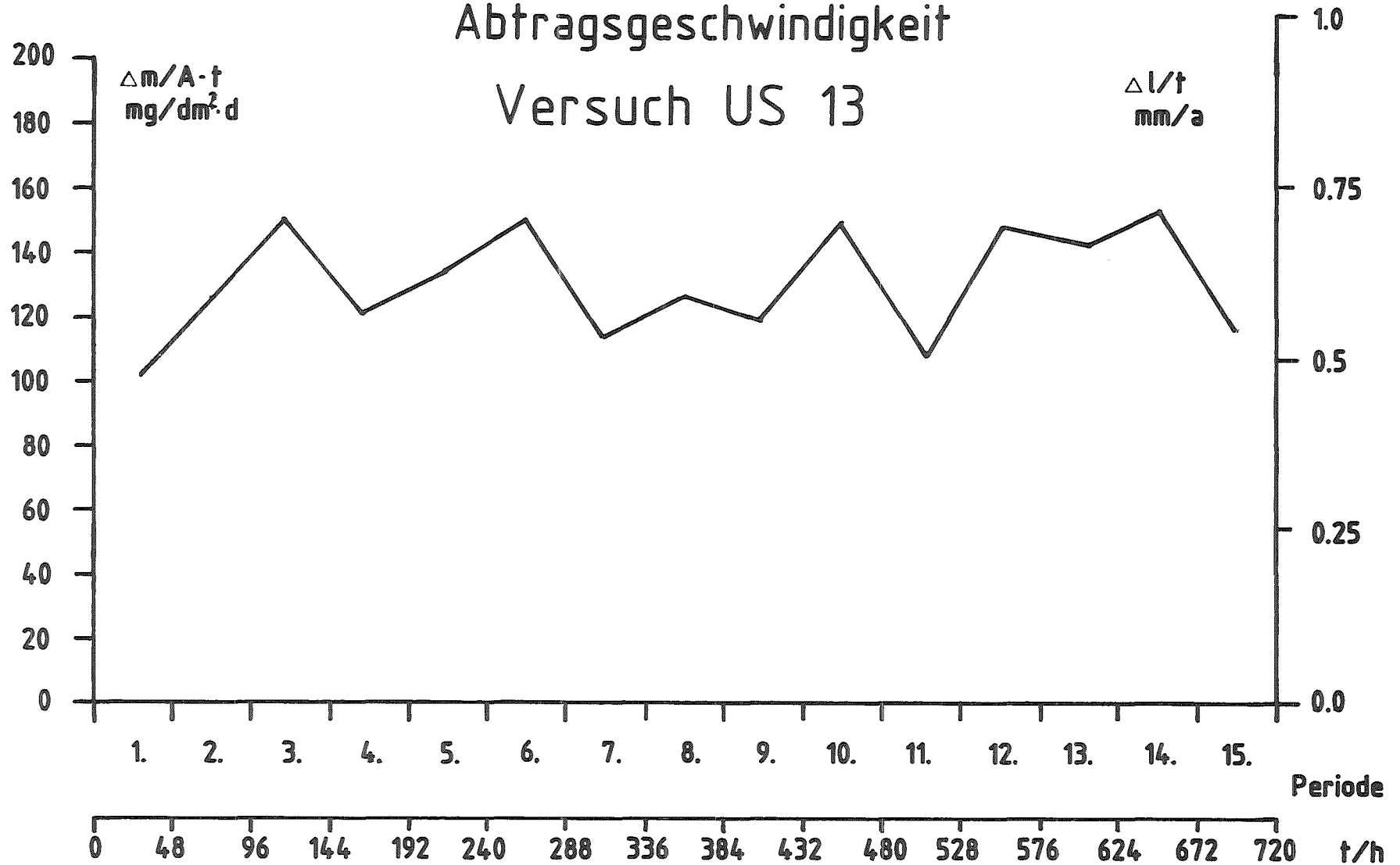


Abb. 48

— 87 —

KfK

Korrosionsuntersuchungen nach Huey am Werkstoff Uranus S 1, Creusot-Loire, Blech 7 mm, verschweißt mit Zusatzwerkstoff 2.4656, V-Naht