

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM  
KARLSRUHE**

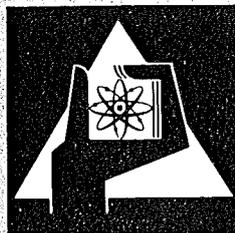
Februar 1974

KFK 1903

Institut für Reaktorentwicklung

**Selbstverschweißen von Strukturwerkstoffen  
in flüssigem Natrium**

F. Huber, K. Mattes, H. Weinhold



**GESELLSCHAFT  
FÜR  
KERNFORSCHUNG M.B.H.**

**KARLSRUHE**

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.  
KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

KFK 1903

Institut für Reaktorentwicklung

Selbstverschweißen von Struktur-  
werkstoffen in flüssigem Natrium

F. Huber

K. Mattes

H. Weinhold

Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe



## Zusammenfassung

Selbstverschweißen in flüssigem Natrium kann unter bestimmten Voraussetzungen an Komponenten natriumgekühlter Reaktoren auftreten und ist deshalb hinsichtlich seiner Auswirkungen auf die Betriebssicherheit entsprechend zu berücksichtigen. Zur Ermittlung der für den Vorgang des Selbstverschweißens verantwortlichen Größen werden seit 1968 im Kernforschungszentrum Karlsruhe in Zusammenarbeit mit der Fa. Interatom, Bensberg, Versuche durchgeführt.

Im wesentlichen wurden die vier Werkstoffe

1.4301

1.4981

1.6770

Inconel 718

untersucht, wobei durch Variation von Temperatur, Zeit, Anpreßkraft und Oberflächenbeschaffenheit der Einfluß des jeweiligen Parameters ermittelt wurde.

Nach den erzielten Ergebnissen läßt sich das Selbstverschweißen in drei Einzelvorgänge untergliedern:

1. Reduktion der Werkstoffoberfläche durch das Natrium,
2. Deformation der Berührungsstellen und Bildung einer tragenden Fläche infolge der Einwirkung der Anpreßkraft,
3. Selbstverschweißen der tragenden Fläche infolge Rekristallisation.

Über diese allgemein gültige Interpretation des Verschweißmechanismus hinaus wird versucht, eine empirische Beziehung zu entwickeln, mit deren Hilfe es möglich ist, die zum Lösen selbstverschweißter Komponenten erforderlichen Kräfte abzuschätzen, sowie den hinsichtlich des Selbstverschweißens günstigsten Werkstoff auszuwählen.

Wir danken

Herrn Dr. H.U. Borgstedt,	IMF
Herrn H. Knuth,	PSB/PL
Herrn O. Pelz,	EKM/FK
Frau Dr. H. Schneider,	IMF
Herrn E. Wild,	IRB
sowie der Hauptwerkstatt	

für die Mitarbeit und Unterstützung.

## Self-Welding of Structural Materials in Liquid Sodium

### Summary

Self-welding in liquid sodium may occur under specific conditions at components of sodium-cooled reactors and must, therefore, be taken into account accordingly with respect to its effects upon operational safety. To obtain the data required, experiments have been carried out at the Karlsruhe Nuclear Research Center since 1968 in cooperation with Interatom, Bensberg.

Mainly four materials were investigated, viz.,

1.4301  
1.4981  
1.6770  
Inconel 718

and the influence of the respective parameter was determined by variation of the temperature, time, contact pressure, and surface finish.

According to the results obtained, self-welding can be subdivided into three single processes:

1. Reduction of the material surface by sodium,
2. Deformation of the points of contact and formation of a supporting area as a result of the contact pressure.
3. Self-welding of the supporting area by recrystallization.

Beyond this generally applicable interpretation of the self-welding mechanism, the attempt is made to develop an empirical relation allowing to estimate the forces required for the separation of self-welded components and to select the most suitable material with respect to self-welding behaviour.

Our thanks for cooperation and assistance are due to:

Dr. H.U. Borgstedt,	IMF
H. Knuth,	PSB/PL
O. Pelz,	EKM/FK
Dr. H. Schneider,	IMF
E. Wild,	IRB

and to the central workshop.

## INHALTSVERZEICHNIS

	<u>Seite</u>
1. Einleitung	1
2. Kurzzeichen, Einheiten und Begriffe	2
3. Werkstoffprobe	5
4. Versuchsvorrichtung	6
5. Versuchsdurchführung	7
6. Auswahl der Testwerkstoffe	8
7. Versuchsbedingungen	8
8. Versuchsergebnisse	9
8.1 Einfluß der Versuchsparameter	9
8.1.1 Kontaktfläche	10
8.1.1.1 gedrehte Proben	10
8.1.1.2 geläppte Proben	10
8.1.1.3 Erklärung des Einflusses der Oberflächen- beschaffenheit	11
8.1.2 Festigkeitseigenschaften der Paarungs- werkstoffe	12
8.1.3 Anpreßkraft	13
8.1.4 Anpreßzeit	14
8.1.5 Anpreßtemperatur	15
8.1.6 Spülen	15
8.2 Metallografische Untersuchungen	16
8.3 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse	17
9. Fehlerbetrachtung	18
9.1 Temperatur	18
9.2 Zeit	19
9.3 Anpreßkraft	19
9.4 Planparallelität	19
9.5 Haftkraft	21
9.6 Sauerstoffkonzentration	21
9.7 Fläche	22

	<u>Seite</u>	
9.7.1	Kontaktfläche	22
9.7.2	Durch plastische Verformung sich bildende Fläche	22
9.8	Maximale Wellen- und Rauhtiefe	23
10.	Versuch einer Deutung des Selbstverschweißmechanismus	23
11.	Abschließende Bemerkungen	30
12.	Anmerkungen	31
12.1	Tabelle 2	31
12.2	Tabelle 3	32
13.	Verzeichnisse	35
13.1	Tabellen und Abbildungen	35
13.2	Literatur	36

## 1. Einleitung

Metallische Werkstoffe neigen unter flüssigem Natrium bei erhöhten Temperaturen an ihren Kontaktstellen zum Selbstverschweißen. Dieses Verhalten ist beim Bau natriumgekühlter Reaktoren in entsprechender Weise zu berücksichtigen. Um insbesondere für den schnellen natriumgekühlten Prototypreaktor SNR 300 die hierzu erforderlichen Daten zu ermitteln, laufen seit 1968 im Kernforschungszentrum Karlsruhe im Institut für Reaktorentwicklung experimentelle Untersuchungen.

In einer Versuchsphase I wurde zunächst eine große Anzahl von Werkstoffpaarungen hinsichtlich ihrer Neigung zum Selbstverschweißen getestet. Hierüber ist in [1] ausführlich berichtet worden. Die mehr durch die Art "verschweißt - verschweißt nicht" gekennzeichnete Methode der Versuchsdurchführung, die große Zahl der in dieser Phase untersuchten Werkstoffpaarungen und die damit verbundene geringe Anzahl Meßpunkte je Versuchsbedingung und Werkstoffpaarung, die zusätzlich untereinander noch relativ stark streuten, ließen verallgemeinernde Schlußfolgerungen über das Selbstverschweißen nur bedingt zu.

Aufbauend auf den Erkenntnissen der Versuchsphase I, wurde deshalb ein Versuchsprogramm für eine Versuchsphase II ausgearbeitet. Wesentlicher Bestandteil dieses Programmes war, daß durch geeignete Variation von Anpreßkraft, Kontaktfläche, Temperatur und Zeit der Einfluß dieser Parameter auf den Grad des Selbstverschweißens ermittelt werden sollte. Um bei der Vielzahl der Parameter dieses Programm in absehbarer Zeit durchführen zu können und um möglichst viele Meßpunkte zu bekommen, wurde die Anzahl der Testwerkstoffe beschränkt und zwar im wesentlichen auf je einen Vertreter eines austenitischen und eines ferritischen Stahles sowie einer Nickelbasislegierung.

Der vorliegende Bericht beschreibt ausschließlich die Versuchsphase II. Die entsprechenden Versuche wurden wie die der Phase I in der Natrium-Behälter-Versuchsanlage (NABEA) des Instituts für Reaktorentwicklung [2] in stagnierendem Natrium durchgeführt.

## 2. Kurzzeichen, Einheiten und Begriffe

Im Verlaufe der Untersuchungen wurden die im folgenden erläuterten Kurzzeichen, Einheiten und Begriffe verwendet bzw. eingeführt.

2.01  $A$  [ $\text{mm}^2$ ] Kontaktfläche

Die Kontaktfläche bezieht sich auf die Probe gemäß Abb. 1. Sie ist definiert durch den Durchmesser  $d_i$  und die Kreisringbreite  $s$ .

2.02  $A_t$  [ $\text{mm}$ ] tragende Fläche

Die tragende Fläche ist die durch teils plastische, teils elastische Deformation der Rauheitsvorsprünge von Metallflächen infolge des Gegeneinanderpressens entstehende wirkliche Kontaktfläche. Sie ist ein zur theoretischen Bestimmung der Haftkraft (s. 2.08) wichtiger Parameter.

2.03  $A_{te}$  [ $\text{mm}^2$ ] durch elastische Verformung gebildete tragende Fläche.

2.04  $A_{tp}$  [ $\text{mm}^2$ ] durch plastische Verformung gebildete tragende Fläche.

2.05  $\alpha$  [-] Verschweißfaktor

Der Verschweißfaktor  $\alpha$  gibt den Anteil der tragenden Fläche  $A_t$  (s. 2.02) an, der im Verlaufe des Versuchs selbstverschweißt ist.

2.06  $c_0$  [ $\text{ppM}_m$ ] massenbezogene Sauerstoffkonzentration im Natrium.

2.07  $F_a$  [ $\text{kp}$ ] Anpreßkraft

Die Proben werden mit der Anpreßkraft  $F_a$  gegeneinandergepreßt. Sie wird für die Dauer der Anpreßzeit  $t_a$  (s. 2.16) konstant gehalten.

2.08  $F_h$  [ $\text{kp}$ ] Haftkraft

Als Haftkraft  $F_h$  wird die zum Zerreißen eines selbstverschweißten Probenpaares erforderliche Kraft bezeichnet.

#### 2.09 Kontaktkante

Im Verlaufe der Versuche hat sich herausgestellt, daß die Haftkraft (s. 2.08) von der Größe der tragenden Fläche (s. 2.02) abhängt. Um den schwer definierbaren Anteil aus elastischer Verformung auszuschalten, wurde die Probe mit Kontaktkante gemäß Abb. 2 eingeführt. Bei dieser Probe verformt sich die Kontaktstelle infolge des Anpressens nur plastisch. Die so entstandene Fläche ist nach dem Zerreißen auf der Gegenfläche als Abdruck optisch ausmeßbar und ist mit  $A_{tp}$  identisch. Die Kontaktkante ist definiert durch den Durchmesser  $d$  und den Kantenwinkel  $\varphi$ . Eine Modifikation bestand darin, daß in eine Kontaktfläche (s. 2.01) eine Art Plan- gewinde geschnitten wurde (s. 12.2 Anmerkung 11 und 12).

#### 2.10 Gegenfläche

Als Gegenfläche wird die Fläche bezeichnet, gegen die eine Probe mit ihrer Kontaktfläche (s. 2.01) bzw. Kontaktkante (s. 2.09) gepreßt wird. Die Größe der Gegenfläche ist nicht definiert, sie ist jedoch größer als die größte der gewählten Kontaktflächen.

2.11  $\sigma_0$  [ $\text{kp/mm}^2$ ] Elastizitätsgrenze des Probenwerkstoffes.

2.12  $\sigma_{0,2}(T_a; t_a)$  [ $\text{kp/mm}^2$ ] 0,2 %-Zeit-Dehngrenze für die Anpreßtemperatur  $T_a$  (s. 2.15) und die Anpreßzeit  $t_a$  (s. 2.16).

2.13  $\sigma_R$  [ $\text{kp/mm}^2$ ] wirkliche Bruchfestigkeit

Da nur die tragende Fläche (s. 2.02) mehr oder weniger verschweißt und diese Fläche im Vergleich zur Kontaktfläche (s. 2.01) klein ist, werden beim Zerreißen Fließvorgänge unterdrückt. Aus diesem Grund ist zur Abschätzung von Haftkräften (s. 2.08) die wirkliche (reale, auf den tatsächlichen Querschnitt bezogene) Bruchfestigkeit einzusetzen.

2.14 Spülphase

Das Selbstverschweißen wird wesentlich von den vor dem Anpressen stattfindenden Redoxvorgängen beeinflusst. Um dem Natrium die Möglichkeit zu geben, in entsprechender Weise auf die Kontakt- und Gegenflächen einwirken zu können, werden die Proben vor dem Anpressen auf Abstand gehalten. Dieser als Spülphase bezeichnete Versuchszustand ist definiert durch die Spültemperatur (s. 2.17), die Spülzeit (s. 2.18) und die Sauerstoffkonzentration  $c_0$  (s. 2.06) des Natriums.

2.15  $T_a$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] Anpreßtemperatur

Die Proben werden bei der Temperatur  $T_a$  angepreßt. Diese Temperatur wird für die Dauer der Anpreßzeit  $t_a$  (s. 2.16) konstant gehalten.

2.16  $t_a$  [ $\text{h}$ ] Anpreßzeit

Die Anpreßzeit  $t_a$  wird vom Zeitpunkt des Anpressens bis zum Zeitpunkt des Abschaltens der Beheizung gerechnet.

2.17  $T_s$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] Spültemperatur

Als Spültemperatur  $T_s$  wird die Na-Temperatur während der Spülphase (s. 2.14) definiert. Die Spültemperatur wird für die Dauer der Spülzeit (s. 2.18) konstant gehalten.

2.18  $t_s$  [ $\text{h}$ ] Spülzeit

Die Spülzeit  $t_s$  wird vom Zeitpunkt des Erreichens der vorgegebenen Spültemperatur  $T_s$  (s. 2.17) bis zum Zeitpunkt des Anpressens gerechnet. Ist  $T_s \neq T_a$ , wird die Aufheiz- bzw. Abkühlzeit von  $T_s$  auf  $T_a$  nicht berücksichtigt, da diese im Vergleich zur Spülzeit klein ist.

2.19  $\max. (W + R_t)$  [ $\mu\text{m}$ ] maximale Wellen- und Rauhtiefe

Im Laufe der Untersuchungen wurde anhand geläppter und gedrehter Proben festgestellt, daß die Haftkraft von der Oberflächenbeschaffenheit der Proben beeinflusst wird. Ein Maß für die Oberflächenbeschaffenheit ist die maximale Wellen-

und Rauhtiefe. Sie wurde von Kontakt- und Gegenfläche stichprobenartig mit Hilfe eines Perth-O-Meters ermittelt. Die Prüflänge betrug 5 mm. Allgemein waren Flächen mit  $\max (W + R_t) > 4 \mu\text{m}$  gedreht und solche mit  $\max (W + R_t) < 1 \mu\text{m}$  geläpft.

### 3. Werkstoffprobe

Für die Versuche wurden zwei unterschiedliche Probenformen benutzt.

Abb. 1 zeigt die hauptsächlich eingesetzte Probenform. Durch Variation der Kreisringbreite  $s$  wurde die Größe der Kontaktfläche und somit bei konstanter Anpreßkraft die Größe der Flächenpressung variiert.

Die in Abb. 2 dargestellte Probe mit Kontaktkante wurde erst zu einem späteren Zeitpunkt eingesetzt. Wird eine Paarung mit einer solchen Probe angepreßt, so verformt sich die Kontaktkante durch die Einwirkung der Anpreßkraft entsprechend der Warmstreckgrenze des Paarungswerkstoffes. Nach dem Zerreißen dieser Paarung bleibt auf der Gegenfläche der so entstandene kreisringförmige Abdruck der optisch ausmeßbaren Kontaktfläche erhalten. Diese Fläche ist mit der durch plastische Verformung gebildeten Fläche  $A_{tp}$  identisch und hat daher für die Untersuchung des Verschweißverhaltens eine besondere Bedeutung. Außerdem wird sie zur Abschätzung der zu erwartenden Haftkraft benutzt.

Die Proben wurden aus Rundstahl 80  $\emptyset$  gefertigt. Ca. 35 dieser Proben wurden zu einer Säule zusammengesetzt und in die unter 4. behandelte Versuchsvorrichtung eingebaut. Die Kontakt- und Gegenflächen waren entweder gedreht oder geläpft. Proben mit Kontaktkante waren grundsätzlich gedreht.

Wie bei einem Versuch festgestellt wurde, kann sich eine Probensäule infolge Planparallelitätsabweichungen einzelner Proben so verbiegen, daß die einzelnen Paarungen wegen der asymmetrischen Belastung ungleichmäßig verschweißen (s. 9.4). Aus diesem Grunde wurden von diesem Zeitpunkt an bei allen Proben die Kontaktfläche bzw. -kante und die Gegenfläche in einem Arbeitsgang auf einem Dorn überdreht und nur solche Proben zur Säule zusammengesetzt, deren Planparallelitätsabweichung  $\leq 0,01$  mm betrug.

Die Proben wurden nach jedem Versuch für den nachfolgenden überarbeitet, d.h. sie wurden mehrmals eingesetzt. Vor ihrem Zusammenbau zur Säule wurden sie mit Trichloräthylen gereinigt.

Wegen der an den geläpften Proben haftenden Lapppaste erfolgte bei diesen Proben außer der Reinigung mit Trichloräthylen zusätzlich eine Reinigung in destilliertem Wasser mittels Ultraschall.

#### 4. Versuchsvorrichtung

Die Versuchsvorrichtung ist in Abb. 3 dargestellt. Zur Durchführung der Versuche stehen zwei dieser Vorrichtungen zur Verfügung. Durch Anziehen der Spindelmutter werden die Proben über die zentrale Zugstange aneinandergedreht. Die Größe der Anpreßkraft ist über den Ringkraftmesser einstellbar. Die maximale Anpreßkraft beträgt  $\max F_a = 2000 \text{ kp}$ . Um kleinere durch Temperaturunterschiede und Setzen der Probensäule verursachte Dehnungen auszugleichen, ist als elastisches Element ein Tellerfederpaket zwischengeschaltet.

Da die verschweißte Probensäule nicht in ihrer gesamten Länge mit der in Abb. 4, Bild 3 und 4 gezeigten Zerreißvorrichtung auseinandergelassen werden kann, ist die Säule mittels zweier Trennringe in drei Säulenstücke zerlegbar. Diese Trennringe sind in Abb. 4, Bild 2 gerade noch erkennbar.

Während der Spülphase werden die einzelnen Proben auf Abstand gehalten. Dies geschieht mittels drei um  $120^\circ$  versetzte Blechstreifen, die an entsprechenden Schienen befestigt sind (s. Abb. 4, Bild 2). In diese Bleche sind herausragende Zungen gestanzt, auf denen die einzelnen Proben zunächst liegen. Beim Anziehen der Probensäule werden diese Zungen von den Proben weggebogen.

Die Versuchsvorrichtung ermöglicht, daß Proben aus verschiedenen Werkstoffen mit unterschiedlicher Kontaktfläche und Oberflächenbeschaffenheit gepaart und demzufolge die Versuchsparameter Werkstoff, Kontaktfläche (bzw. Flächenpressung) und Oberflächenbeschaffenheit gleichzeitig und unter sonst gleichen Bedingungen variiert werden können.

Um Ausreißer zu erkennen, wurden in der Regel je Parameter mindestens 3 bis maximal 15 Paarungen eingesetzt.

## 5. Versuchsdurchführung

Wie bereits unter 1. berichtet, wurden die Untersuchungen in der Natrium-Behälter-Anlage (NABEA) durchgeführt. Das Fließschema ist in Abb. 4 dargestellt. Abb. 5 zeigt einige Aufnahmen aus dem Versuchsablauf.

Nach dem Vorheizen des Versuchsbehälters (1) wurden die Säulen mit Natrium von  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  aus dem Lagertank (4) geflutet und das Natrium anschließend auf die vorgesehene Spültemperatur aufgeheizt. Während der folgenden Spülphase wurde das Natrium über den Reinigungskreislauf im Bypaß umgewälzt. Der Oxidgehalt wurde hierbei mit einem Pluggingmeter gemessen (9). Die Kaltfallentemperatur  $T_K$  wurde während des Spül- und Reinigungsprozesses im Bereich  $130 \leq T_K \leq 140\text{ }^{\circ}\text{C}$  geregelt, wobei sich eine Plugging-Temperatur  $T_p \leq 150\text{ }^{\circ}\text{C}$  einstellte. Dies entspricht nach Eichelberger [3] einer Sauerstoffkonzentration  $c_o \leq 3\text{ ppm}_m$ .

Nach Ablauf der vorgegebenen Spülzeit wurde der Spül- und Reinigungsprozeß beendet und die Probensäule mit der vorgesehenen Anpreßkraft verspannt. War als Anpreßtemperatur eine von der Spültemperatur abweichende Temperatur vorgesehen, so mußte vor dem Anpressen die Natriumtemperatur erst auf die Anpreßtemperatur geregelt werden. Unter den nunmehr herrschenden Bedingungen verblieb die Versuchsanordnung bis zum Ende der vorgegebenen Anpreßzeit. In dieser Phase wurde ständig die Anpreßtemperatur, die Anpreßkraft und der Natriumfüllstand überwacht und, wenn erforderlich, korrigiert. Nach Ablauf der Anpreßzeit wurde das Natrium wieder abgelassen und nach dem Erkalten des Versuchsbehälters (1) die Vorrichtung ausgebaut (vgl. Abb. 4, Bild 2). Die im Verlaufe des Versuches mehr oder weniger verschweißte Probensäule (vgl. Abb. 4, Bild 3) wurde mit Wasserdampf und Wasser von dem noch an ihr haftenden Natrium gereinigt. Die einzelnen Paarungen der demontierten Säulenstücke sind dann mit einer Zerreißmaschine (vgl. Abb. 4, Bild 4), wie sie für Zerreißversuche verwendet wird, auseinandergerissen worden. Hierbei wurde die Kraft gemessen, mit der die einzelnen Proben aneinanderhafteten. Diese Kraft dient als Maß für den Grad des Selbstverschweißens und wird mit Haftkraft bezeichnet.

## 6. Auswahl der Testwerkstoffe

Die untersuchten Testwerkstoffe sind in Tabelle 1 einschließlich der Analysenwerte ihrer Legierungsbestandteile zusammengefaßt.

Die Auswahl der Werkstoffe orientierte sich an den für den SNR 300 vorgesehenen Strukturwerkstoffen.

Der Werkstoff 1.4301 wurde zunächst wegen seiner kurzen Lieferzeit anstelle des Werkstoffes 1.4948 in das Programm aufgenommen. Beide Werkstoffe unterscheiden sich nur in der Toleranzbreite ihrer Legierungsbestandteile. Eine zu einem späteren Zeitpunkt durchgeführte Analyse des Werkstoffes 1.4301 ergab jedoch einen zu geringen Nickelgehalt von 8,42 % anstatt von mindestens 9 %. Um einen echten Vergleich zu ermöglichen wurde auch der Werkstoff 1.4948 eingesetzt, jedoch erst zu einem späteren Zeitpunkt.

Der Werkstoff 1.6770 ist für den SNR 300 im Rahmen dieser Untersuchungen von untergeordneter Bedeutung, er wurde hauptsächlich wegen seiner Verwendung für die kompakte natriumgekühlte Kernkraftwerksanlage, Karlsruhe (KNK) mit einbezogen.

Es hat sich bei dieser Art der Versuchsdurchführung gezeigt, daß bei Paarungen aus unterschiedlichen Werkstoffen die Haftkräfte stark streuten. Der Grund hierfür dürfte die ungleiche thermische Ausdehnung dieser Werkstoffe sein, wodurch während des Abkühlvorganges parallel zu den Kontaktflächen Schubspannungen aufgebaut werden, die die zu messenden Haftkräfte mehr oder weniger verfälschen. Deshalb wurden die Testwerkstoffe im wesentlichen nur mit sich selbst und nicht untereinander gepaart.

## 7. Versuchsbedingungen

Die für die durchgeführten Versuche gewählten Versuchsbedingungen sind in Tab. 2 aufgelistet.

Da die Versuchsphase II in erster Linie dazu diente, den Verschweißvorgang und den Einfluß der einzelnen Parameter kennenzulernen, wurden die Versuchsbedingungen so ausgewählt, daß in den meisten Fällen mit Selbstverschweißen zu rechnen war. So wurden bis auf zwei Ausnahmen alle Versuche mit einer Spülphase gefahren. Die Dauer der

Spülphase betrug einheitlich  $t_s = 24$  h. Sowohl die Spültemperatur als auch die Anpreßtemperatur betrug bei fast allen Versuchen  $T_s = T_a = 700$  °C. Bei dieser Temperatur wurde der Einfluß der Anpreßzeit  $t_a$  (4 bis 336 h), der Anpreßkraft  $F_a$  (275 bis 1100 kp), der maximalen Wellen- und Rauhtiefe  $\max(W + R_t)$  ( $> 4$   $\mu\text{m}$  und  $< 1$   $\mu\text{m}$ ) sowie der Kontaktfläche  $A$  ( $A_{tp}$  bis 880  $\text{mm}^2$ ) untersucht. Die Temperatur wurde in dieser Versuchsphase nur in wenigen Fällen variiert.

Die maximale Wellen- und Rauhtiefe  $\max(W + R_t)$  wurde stichprobenartig ermittelt. Zum Ausmessen der Oberfläche diente ein Perth-O-Meter. Abb. 6 zeigt je eine repräsentative Aufnahme einer gedrehten und einer geläpften Fläche.

## 8. Versuchsergebnisse

### 8.1 Einfluß der Versuchsparameter

Die erzielten Haftkräfte der einzelnen Versuche sind in Tab. 3, Blatt 1 bis 19, zusammengefaßt. Angegeben ist hierbei der sich aus einer Meßwertreihe ergebende arithmetische Mittelwert mit seinem mittleren Fehler nach [4]. Zur Erhöhung der Aussagenkraft von Mittelwert und mittlerem Fehler ist die Anzahl  $n$  der Einzelmessungen der Meßwertreihe ebenfalls angegeben. Da für eine sichere Auslegung Maximalwerte interessieren, wurden auch die jeweils in einer Meßreihe vorkommenden maximalen Haftkräfte aufgeführt. Eine die einzelnen Parameter betreffende Fehlerbetrachtung wird in 9. durchgeführt.

Im folgenden wird versucht, anhand der Versuchsergebnisse den Einfluß des jeweiligen Versuchsparameters auf die Haftkraft qualitativ zu bestimmen. Die Variation des Kantenwinkels  $\varphi$  sowie der Kantenlänge  $l$  bei Proben mit Kontaktkante (vgl. 12.1 Anm. 1 und 2) ergab keinen Anhaltspunkt über eine Abhängigkeit der Haftkraft. Aus diesem Grund werden diese Parameter nicht mehr gesondert betrachtet.

In den Abbildungen 7 bis 14 sind die Haftkräfte in Abhängigkeit der jeweiligen Versuchsparameter dargestellt. Zur leichteren Zuordnung der Meßpunkte zu den in der Tabelle 3 angegebenen Werten sind jedem Punkt der Darstellung zwei in Klammern gesetzte Zahlen beigelegt. Die erste Zahl gibt die Blatt-Nr. der Tabelle 3 und die zweite Zahl die Zeilen-Nr. an, aus der der Meßpunkt stammt.

### 8.1.1 Einfluß der Kontaktfläche

Um die relativ große Streuung der Meßwerte, wie sie sich in der Versuchsphase I gezeigt hat, zu verringern, wurden zunächst die Kontakt- und Gegenflächen der Proben geläpft. Bei einem Vergleich mit den Ergebnissen der Versuchsphase I [1] stellte sich jedoch heraus, daß sich geläppte und gedrehte Flächen hinsichtlich des Selbstverschweißens unterschiedlich verhalten. Dies bedeutet, daß der Einfluß der Fläche auf die Haftkraft mit der jeweiligen Wellen- und Rauhtiefe der in Kontakt kommenden Flächen verbunden ist. Gedrehte und geläppte Proben werden daher getrennt betrachtet.

#### 8.1.1.1 Gedrehte Proben

In Abb. 7 sind die bei gedrehten Proben erzielten Haftkräfte in Abhängigkeit von der jeweiligen Kontaktfläche aufgeführt. Hierbei handelt es sich um Paarungen aus den Werkstoffen 1.4301 und 1.4981, die bei 700 °C 168 h mit 1100 kp angepreßt worden waren.

Anhand der Abbildung kann festgestellt werden, daß die erzielten Haftkräfte eine gewisse Unabhängigkeit von der Größe der Kontaktfläche zeigen, d.h. bei konstanter Anpreßkraft, von der Flächenpressung relativ unabhängig sind.

Da die Ergebnisse des Versuches II/7 verglichen mit denen der Versuche II/12 bzw. II/16 zu stark differieren, erscheint es sinnvoll, die einzelnen Meßpunkte nur innerhalb eines Versuches zu betrachten. Mögliche Gründe für das unterschiedliche Verhalten der gleichen Paarung bei scheinbar gleichen Versuchsbedingungen werden in den Kapiteln 9.1, 9.3 und 9.6 näher erläutert.

#### 8.1.1.1 Geläppte Proben

In Abb. 8 sind die Haftkräfte über der jeweiligen Kontaktfläche aufgetragen, die durch Paarung von Proben mit geläpften Kontakt- und Gegenflächen erzielt wurden. Die Versuchsbedingungen für diese geläpften Proben waren gleich denen der unter 8.1.1.1 behandelten gedrehten Proben. Die Meßpunkte (3/6) und (3/10) der Paarung 1.4981/1.4981 fallen aus der Reihe. Aus den insbesondere unter 9.6 über die Sauerstoffkonzentration dar-

gelegten Gründen kann angenommen werden, daß diese Haftkräfte stark verfälscht sind.

Allgemein ist aus Abb. 8 die Tendenz zu erkennen, daß bei den geläppten Proben im Gegensatz zu den gedrehten die Haftkraft mit zunehmender Kontaktfläche steigt. Außerdem liegen die Haftkräfte von geläppten Proben höher als die von gedrehten. Hieraus läßt sich folgern, daß die Oberflächenbeschaffenheit der Kontakt- und Gegenfläche einen relativ großen Einfluß auf die Haftkraft ausübt.

### 8.1.1.3 Erklärung des Einflusses der Oberflächenbeschaffenheit

Man kann davon ausgehen, daß nur die wirklich sich berührenden Flächenteilchen zwei aufeinandergepreßter Werkstoffflächen mehr oder weniger verschweißen können. Diese wirklich sich berührende, in ihrer Summe als tragende Fläche  $A_t$  bezeichnete Fläche läßt sich aus einem plastisch verformten und einem elastisch verformten Anteil zusammengesetzt vorstellen. Welcher Anteil nun überwiegt, hängt davon ab, ob die Oberflächenbeschaffenheit mehr in der Nähe einer rein plastischen oder einer rein elastischen Oberflächenkonfiguration liegt. Eine rein plastische Oberflächenkonfiguration ist z.B. die Kontaktkante oder eine Fläche mit entsprechend tiefen Drehriefen. Eine rein elastische Oberflächenkonfiguration ist praktisch nicht existent, man kann sie sich nur als vollkommen ebene Fläche vorstellen. Die Größe der durch plastische Verformung sich bildenden tragenden Fläche  $A_{tp}$  bei einer Paarung mit Kontaktkante ist in ersten Näherung abhängig von der Anpreßkraft und von der Festigkeit des Paarungswerkstoffes. Die Größe der durch elastische Verformung sich bildenden tragenden Fläche  $A_{te}$  bei einer Paarung mit einer theoretisch vollkommen ebenen Kontakt- und Gegenfläche ist gleich der Größe der Kontaktfläche selbst und wäre in dieser theoretischen Form sogar unabhängig von der Anpreßkraft.

Eine realistische Fläche besitzt nun infolge ihrer Bearbeitung eine Vielzahl Auflagestellen. Je feiner die Bearbeitung ist, desto größer ist auch ihre Anzahl. Mit steigender Anzahl der Auflagestellen steigt auch der Anteil, der nur elastisch verformt wird. Hieraus folgt, daß die tragende Fläche von geläppten Proben infolge eines größeren Anteils elastischer Verformung größer ist als die von gedrehten Proben. Da die Haftkraft als proportional der tragenden Fläche angenommen

werden kann, ist demzufolge auch die Haftkraft von geläpften Proben größer als die von gedrehten.

### 8.1.2 Einfluß der Festigkeitseigenschaften der Paarungswerkstoffe

Aus der bereits unter 8.1.2 behandelten Abb. 8 ist ersichtlich, daß der weniger warmfeste ferritische Stahl 1.6770 stärker mit sich verschweißt, als die austenitischen Stähle mit sich und untereinander und diese wiederum stärker als die Nickelbasislegierung Inconel 718. Am Beispiel der Paarung des austenitischen Stahles 1.4301 mit dem ferritischen Stahl 1.6770 läßt sich außerdem schlußfolgern, daß das Verschweißverhalten sich nach dem Werkstoff mit der geringeren Festigkeit, d.h. in diesem Fall nach dem ferritischen Stahl 1.6770, richtet.

In Tab. 4 wurden die von den vorzugsweise eingesetzten Werkstoffen erhaltenen Haftkräfte einem dem Paarungswerkstoff zugeordneten Warmfestigkeitswert gegenübergestellt und in die Abb. 9 übertragen. Aus dieser Abbildung kann man in erster Näherung schlußfolgern, daß die Haftkraft umgekehrt proportional zur Warmfestigkeit des Paarungswerkstoffes ist.

Unter 3. wurde verallgemeinernd gesagt, daß die Größe der durch plastische Verformung sich bildenden tragenden Fläche von der Festigkeit des Werkstoffes abhängt. Genau genommen ist für ihre Größe nach dem Anpressen ohne Berücksichtigung nachfolgender Fließvorgänge die Elastizitätsgrenze des Werkstoffes maßgebend (s. 10.). Die Haftkraft hingegen einer mehr oder weniger über die tragende Fläche selbstverschweißten Paarung ist der Größe der Zerreißfestigkeit direkt proportional, d.h. letztlich, daß für die Größe der Haftkraft das Verhältnis der Zerreißfestigkeit zur Elastizitätsgrenze maßgebend sein muß. Berücksichtigt man, daß bei 700 °C angepreßt und bei 20 °C auseinandergerissen wird, so ergibt sich für die im wesentlichen eingesetzten Werkstoffe die nachfolgende Gegenüberstellung.

Werkstoff	$\sigma_B/20\text{ }^\circ\text{C}$ [kp/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{0,2}/700\text{ }^\circ\text{C}$ [kp/mm <sup>2</sup> ]	$\frac{\sigma_B/20\text{ }^\circ\text{C}}{\sigma_{0,2}/700\text{ }^\circ\text{C}} = V$	$\frac{F_h}{V}$
1.6770	50	3,5	14,3	470
1.4301	60	8	7,5	384
1.4981	60	12	5,0	478
Inc. 718	130	90	1,5	390

Da in der zur Verfügung stehenden Literatur keine Angaben über die Elastizitätsgrenze bei 700 °C zu finden waren, wurde als Vergleichsgröße die Fließgrenze  $\sigma_{0,2}$  bei 700 °C benutzt. Dividiert man die in der Tab. 4 aufgeführten Haftkräfte durch die jeweils ermittelte Verhältniszahl der obigen Gegenüberstellung, so ergibt sich ein nahezu konstanter Wert. Dies bedeutet, daß nicht, wie zunächst vermutet, die Festigkeit allgemein, sondern, wie später vermerkt, das Verhältnis zwischen Zerreißfestigkeit und Elastizitätsgrenze für die Größe der Haftkraft bestimmend ist.

### 8.1.3 Einfluß der Anpreßkraft

In Abb. 10 sind die von gedrehten Proben aus dem Werkstoff 1.4981 erzielten Haftkräfte in Abhängigkeit der zugehörigen Anpreßkraft mit entsprechender Kontaktfläche als Parameter aufgetragen. Aus dieser Darstellung kann entnommen werden, daß die Haftkräfte mit zunehmender Anpreßkraft steigen. Auch bei geläppten Proben konnte ein ähnliches Verhalten, jedoch mit verstärktem Einfluß der Kontaktfläche, festgestellt werden.

Um die bisher erkennbaren Einflüsse der Wellen- und Rauhtiefe der Kontaktfläche sowie deren Größe auf die Haftkraft auszuklammern, ist in Abb. 11 die Haftkraft als Funktion der sich nur durch plastisches Verformen bildenden tragenden Fläche von Proben mit Kontaktkante aufgetragen. Nach dieser Darstellung scheint zunächst offensichtlich auch das Verhältnis der Haftkraft zur Anpreßkraft mit wachsender Anpreßkraft zu steigen. In Abb. 12 ist die sich bildende tragende Fläche  $A_{tp}(F_a)$  in Abhängigkeit der sie erzeugenden Anpreßkraft dargestellt. Aus dieser Abbildung geht hervor, daß die tragende Fläche  $A_{tp}(F_a)$

als annähernd proportional der Anpreßkraft angenommen werden kann. Unter der Annahme, daß die tragenden Flächen gleichmäßig verschleißt waren, müßten demzufolge auch die Haftkräfte den Anpreßkräften über die Bruchfestigkeit proportional sein. In Abb. 11 ist dies jedoch nicht der Fall. Eine mögliche Ursache könnte in dem mit wachsender tragender Fläche abnehmenden Einfluß der Kerbwirkung liegen. Durch entsprechende Zerreißversuche gekerbter, geometrisch ähnlicher Proben konnte dieser Einfluß jedoch nicht mit Bestimmtheit nachgewiesen werden.

Vergleicht man aus Abb. 10 die Punkte gleicher Flächenpressung (7/8, 5/14, 2/5) und errechnet sich aus der jeweiligen Haftkraft und Kontaktfläche eine Haftfestigkeit  $\sigma_h$ , so stimmen die Werte für  $F_a = 275 \text{ kp}$  mit  $\sigma_h = 4,05 \text{ kp/mm}^2$  und  $F_a = 550 \text{ kp}$  mit  $\sigma_h = 4,36 \text{ kp/mm}^2$  gut überein. Demgegenüber liegt der Wert für  $F_a = 1100 \text{ kp}$  mit  $\sigma_h = 5,7 \text{ kp/mm}^2$  höher.

Aus dieser Tatsache läßt sich der Schluß ableiten, daß wahrscheinlich infolge günstiger Ausgangsbedingungen (vgl. 9.3 und 9.6) die mit 1100 kp angepreßten Proben im Verhältnis stärker verschleißten und daß unter vollkommen gleichen Bedingungen daher die Haftkraft, wie eingangs vermutet, sich annähernd proportional zur Anpreßkraft verhält.

#### 8.1.4 Einfluß der Anpreßzeit

Abb. 13 zeigt ebenfalls von Paarungen mit gedrehten Kontakt- und Gegenflächen aus dem Werkstoff 1.4981 den Einfluß der Anpreßzeit. Hierbei ist zu erkennen, daß abgesehen von relativ kurzen Zeiten ( $< 24 \text{ h}$ ), die Anpreßzeit einen relativ geringen Einfluß auf die Haftkraft ausübt. Trägt man wie in Abb. 14 dargestellt, die von Proben mit Kontaktkante erzielten Haftkräfte gegen die erzeugte tragende Fläche  $A_{tp}(t_a)$  mit der Zeit als Parameter auf, so findet man eine gute Proportionalität zwischen tragender Fläche  $A_{tp}(t_a)$  und Haftkraft. Diese Beobachtung bekräftigt die bereits gemachte Aussage, daß letztlich die Größe der tragenden Fläche  $A_{tp}$  für die Haftkraft bestimmend ist, sie sagt aber auch aus, daß die tragende Fläche und damit die Haftkraft über das Fließen der Paarungswerkstoffe von der Anpreßzeit abhängt.

### 8.1.5 Einfluß der Anpreßtemperatur

Um den Einfluß der Anpreßtemperatur abschätzen zu können, werden in der nachfolgenden Gegenüberstellung die bei 700 und 550 °C unter sonst gleichen Bedingungen von Paarungen mit Kontaktkante erzielten Ergebnisse der Werkstoffe 1.4301 und 1.4981 verglichen. Als Vergleichsgröße wird hierzu die Haftfestigkeit  $\sigma_h$  benutzt.

$T_a$ [°C]	Paarung m. Kontakt- kante	$A_{tp}$ [mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_h$ [kp/mm <sup>2</sup> ]	s. Tab. 3 Blatt/Zeile
700	1.4981	55	45 ± 2,9	1/12
700	1.4301	65	27 ± 2,4	1/1
550	1.4981	16	39 ± 4,8	12/11
550	1.4301	20	44 ± 3,2	12/8

Man kann aus dieser Gegenüberstellung keine eindeutige Abhängigkeit der Haftfestigkeit von der Anpreßtemperatur feststellen. Wohl aber ist eine Abhängigkeit der tragenden Fläche  $A_{tp}$  von der Temperatur zu erkennen. Somit läßt sich der Einfluß der Temperatur auf die Haftkraft über die temperaturabhängigen Festigkeitseigenschaften des Paarungswerkstoffes erklären, die für die Bildung der tragenden Fläche verantwortlich sind.

### 8.1.6 Einfluß des Spülens

Der Einfluß des Spülens wurde mit zwei gleichbestückten Probensäulen bei einer Anpreßtemperatur von 550 °C untersucht. Die eine Probensäule wurde bei dieser Temperatur 24 h gespült. Die zweite wurde bei gleicher Spülzeit bei einer Natriumtemperatur von 700 °C gespült. Zusätzlich wurde bei dieser Säule zur Erniedrigung der Sauerstoffkonzentration ein Zirkongetter in das Natrium eingesetzt. Nach Beendigung der Spülphase wurde die Temperatur von 700 °C auf 550 °C abgesenkt und die Säule angepreßt. Im ersten Fall verschweißte keine der 35 Paarungen, im zweiten Fall verschweißten alle 35 Paarungen. Beim Ausbau zeigte sich ein deutlicher Unterschied im Aussehen der beiden Probensäulen. Die Proben, die bei 700 °C gespült worden waren, waren metallisch blank, während die bei 550 °C gespülten stark oxidiert aussahen.

Diese Ergebnisse zeigen deutlich, daß das Verschweißen von Oxidschichten auf der Kontaktfläche beeinflusst wird. Dieser zum Zeitpunkt des Anpressens herrschende Oberflächenzustand hängt von den Redoxvorgängen während der Spülphase ab, die im wesentlichen von der Sauerstoffkonzentration und der Temperatur des Natriums bestimmt werden. Mit Selbstverschweißen muß daher immer dann gerechnet werden, wenn Bedingungen vorliegen, die eine oxidfreie Metalloberfläche bewirken.

Die ausgewählten Testwerkstoffe sind Legierungen im wesentlichen der Elemente Cr, Fe und Ni. Abb. 15 zeigt die Existenzbereiche der Natriumchromit- und -ferritphase in Abhängigkeit von Temperatur und Sauerstoffkonzentration [57]. Aus dieser Abbildung geht hervor, daß z.B. bei einer Sauerstoffkonzentration von  $c_o \leq 10 \text{ ppM}_m$ , wie sie als Versuchsbedingung vorlag, Chromoxide bei einer Temperatur über  $650^\circ\text{C}$  und Eisenoxide über  $400^\circ\text{C}$  vom Natrium mit Sicherheit reduziert werden. Da Nickeloxid in jedem Fall von flüssigem Natrium reduziert wird, läßt sich für die im wesentlichen chromhaltigen Legierungen allgemein sagen, daß eine das Selbstverschweißen verhindernde Oxidschicht mit Sicherheit bei Temperaturen  $> 650^\circ\text{C}$  und Sauerstoffkonzentrationen  $< 10 \text{ ppM}_m$  abgebaut wird.

## 8.2 Metallografische Untersuchungen

Es wurden von zwei selbstverschweißten Paarungen Schliffbilder angefertigt.

Abb. 16 zeigt die Schweißstelle der Paarung 1.4301/1.4981 (s. Tab. 3, Blatt 4, Zeile 5). Es handelt sich hierbei um eine Aufnahme mit wachsender Vergrößerung, die mit Hilfe eines Elektronenrastermikroskopes erstellt wurde, sowie um ein Schliffbild.

In der Bilderfolge 1-4 rührt die Schwärzung längs der Trennlinie von dem noch verbliebenen Natrium her, das nach dem Reinigungsprozeß mit Wasser während des Aufnehmens im Elektronenrastermikroskop aus den Kapillaren austrat. Im Bereich der ungeschwärzten Stellen längs der Trennlinie muß demnach der Kontakt der beiden Flächen so eng sein, daß dieser Effekt nicht auftreten konnte.

Die Struktur der Trennstelle läßt sich deutlicher aus dem Schliffbild erkennen. Hier ist eine klare Trennlinie zu sehen, die nur gelegentlich unterbrochen ist. Es ist außerdem klar zu erkennen, daß in un-

mittelbarem Bereich der Trennlinie eine Strukturveränderung stattgefunden hat (Feinkornbildung).

Abb. 17 zeigt die Schweißstelle eines Probenpaares mit Kontaktkante (s. Tabelle 3, Blatt 8, Zeile 12). Hier ist zwischen den beiden Proben keine eindeutige Trennlinie mehr feststellbar. Bedingt durch den hohen Verformungsgrad im Bereich der Kontaktstelle hat sich der Werkstoff teilweise rekristallisiert und sich auf diese Weise verzahnt, was letztlich auf eine Verschweißung hinausläuft. Man kann demzufolge annehmen, daß infolge der relativ hohen Temperatur und der großen Verformung im Bereich der Kontaktstellen die Rekristallisation ein wesentlicher Mechanismus des Selbstverschweißens darstellt.

### 8.3 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

Zusammenfassend kann gesagt werden:

- Alle getesteten Werkstoffe neigten zum Selbstverschweißen.
- Unter konstanten Versuchsbedingungen zeigte die Haftkraft eine Abhängigkeit von den Festigkeitseigenschaften der betreffenden Paarungswerkstoffe.
- Das Verschweißverhalten richtete sich im wesentlichen nach dem Werkstoff mit den geringeren Festigkeitswerten.
- Die Haftkraft geläppter Kontaktflächen (geringe Wellen- und Rauhtiefe) wurde bei konstanter Anpreßkraft von der Größe der Fläche beeinflusst. Sie stieg mit wachsender Kontaktfläche.
- Die Haftkraft gedrehter Kontaktflächen (große Wellen- und Rauhtiefe) zeigte bei konstanter Anpreßkraft eine geringe Abhängigkeit von der Größe der Fläche.
- Die Anpreßkraft beeinflusste bei konstanter Kontaktfläche die Haftkraft. Sie stieg annähernd proportional mit der Anpreßkraft.
- Die durch die Spülphase bedingten Redoxvorgänge an der Oberfläche der Proben beeinflusste das Verschweißverhalten in starkem Maße. Zum Zeitpunkt des Anpressens noch oxidierte Proben verschweißten kaum oder nicht.

- Zeit und Temperatur beeinflussen die Haftkraft nicht direkt. Der Einfluß der Zeit beruht auf den zeitabhängigen Fließvorgängen der Berührungsstellen und der der Temperatur auf den temperaturabhängigen Redoxvorgängen an der Oberfläche und den ebenfalls temperaturabhängigen Warmfestigkeitseigenschaften der Paarungswerkstoffe.

## 9. Fehlerbetrachtungen

Da wegen des komplexen Zusammenhangs zwischen Haftkraft und den sie beeinflussenden Parametern, insbesondere wegen der nicht definierbaren Anpreß-, Oberflächen- und Redoxbedingungen, eine allgemeingültige Beziehung zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht aufgestellt und infolgedessen auch eine umfassende Fehlerbetrachtung noch nicht angestellt werden kann, wird im folgenden nur eine Wichtung der einzelnen Meßgrößen vorgenommen.

### 9.1 Temperatur

Die Temperatur wurde mit Ni-Cr Ni-Thermoelementen gemessen. Entsprechend DIN 43710 beträgt bei 300 °C die zulässige Abweichung  $\pm 2,2$  °C und über 300 °C  $\pm 0,7$  % der jeweiligen Temperatur.

Zur Anzeige und Registrierung wurde ein Mehrfach-Punktschreiber mit dem Meßbereich 50 bis 900 °C und einer Genauigkeit von 1 % bei Vollauschlag benutzt.

Aus diesen beiden Angaben errechnet sich z.B. für 700 °C ein Fehler von  $\pm 14$  °C.

Die Temperatur beeinflusst die Haftkraft über die Festigkeitseigenschaften der Paarungswerkstoffe (vgl. 8.2) und über die Oberflächenchemie während der Spülphase (vgl. 8.6).

Bei 700 °C ist die unterschiedliche Beeinflussung infolge einer Temperaturabweichung von  $\pm 14$  °C hinsichtlich der Oberflächenchemie vernachlässigbar. Da jedoch insbesondere bei dem untersuchten ferritischen Stahl und den beiden austenitischen Stählen die Warmfestigkeitseigenschaften sich im Bereich um 700 °C relativ stark mit der Temperatur ändern, kann ein Temperaturfehler sich in einer entsprechenden Streuung der Haftkräfte bemerkbar machen.

## 9.2 Zeit

Die angegebenen Zeiten wurden mit einer Abweichung von ca.  $\pm 0,1$  h eingehalten. Da diese Abweichung sowohl im Vergleich zur konstanten Spülzeit von 24 h als auch im Vergleich zu den gewählten Anpreßzeiten (mit Ausnahme zur Anpreßzeit  $t_a = 4$  h) klein ist, kann sie vernachlässigt werden.

## 9.3 Anpreßkraft

Die durch die Anpreßkraft hervorgerufene Verformung des Ringkraftmessers wird auf eine Meßuhr übertragen. Die Ablesegenauigkeit dieser Meßuhr beträgt  $\pm 0,01$  mm. Diese Auslenkung entspricht einer Kraft von  $\pm 20$  kp.

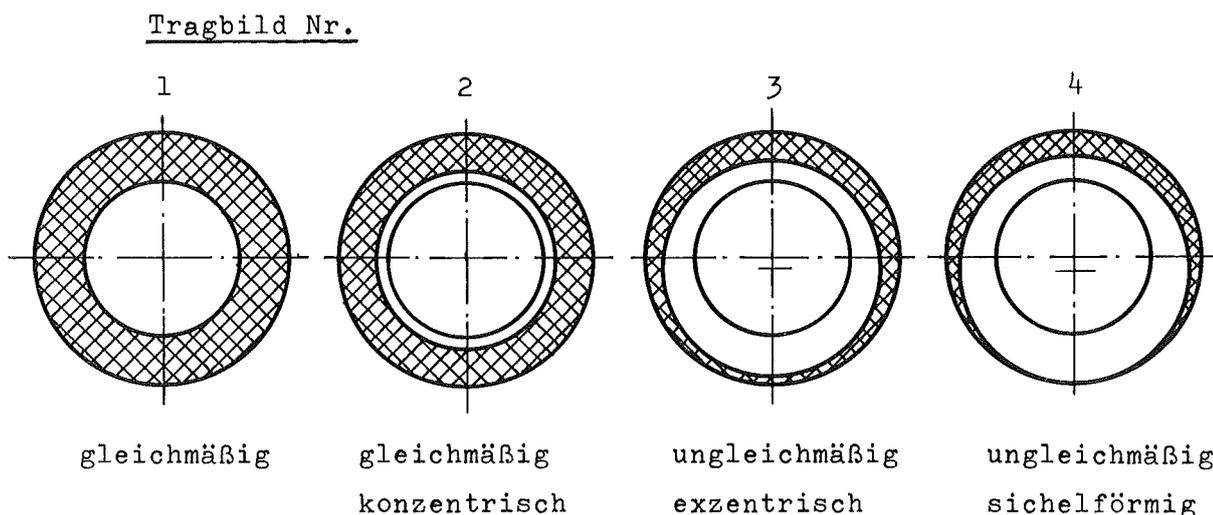
## 9.4 Planparallelität

Es hat sich jedoch gezeigt, daß die Abweichung der Anpreßkraft wesentlich weniger ins Gewicht fällt, als die Gleichmäßigkeit, mit der sich die Anpreßkraft auf die Kontaktfläche verteilt. Ein Kriterium für diese Gleichmäßigkeit ist die Planparallelität der einzelnen Proben der Säule. Bei den ersten Versuchen wurden die Proben vor ihrem Zusammenbau zur Säule stichprobenartig auf ihre Planparallelität überprüft. Zugelassen war aus fertigungstechnischen Gründen eine Abweichung von  $\Delta h \leq 0,01$  mm. Erst als bei dem Versuch II/4 die Haftkräfte, wie schon in der Phase I beobachtet, stark streuten, wurde nachfolgend die Planparallelität jeder Probe überprüft. Hierbei ergab sich von den insgesamt in zwei Versuchsvorrichtungen eingesetzten 56 Proben die folgende Verteilung:

Anzahl der Proben	Planparallelitätsabweichung		
	$\Delta h$	[mm]	x)
7	0	<	$\Delta h < 0,01$
30	0,01	$\leq$	$\Delta h < 0,02$
4	0,02	$\leq$	$\Delta h < 0,03$
5	0,03	$\leq$	$\Delta h < 0,04$
2	0,04	$\leq$	$\Delta h < 0,06$
4	0,06	$\leq$	$\Delta h < 0,08$
1			$\Delta h = 0,18$

x) gemessen über die Mittellinie der Kontaktfläche

Anhand dieser Verteilung ist zu ersehen, daß der überwiegende Anteil der Proben außerhalb der tolerierten Abweichung liegt. Da jedoch sowohl während des Anpressens als auch beim Zerreißen eine Deformation der Probe nicht auszuschließen ist, können zur besseren Beurteilung der Homogenität der Schweißstelle die sich durch das Anpressen ergebenden Tragbilder herangezogen werden. Diese Tragbilder waren nach dem Zerreißen als eine Art Schatten deutlich auf den Kontaktflächen zu erkennen und ließen sich in vier typische Formen unterteilen:



Zum Vergleich wurden für den Versuch II/4 die jedem Tragbild zugeordneten Haftkräfte addiert und arithmetisch gemittelt. Das Ergebnis ist in der folgenden Tabelle zusammengefaßt:

Tragbild	Anzahl der Paarungen	zugeordnete mittlere Haftkraft [ $\bar{k}_p$ ]
1	1	0
2	12	855
3	18	405
4	17	200

Abgesehen von dem statistisch nichtssagenden Wert für das Tragbild 1 ist ein Sinken der mittleren Haftkraft mit wachsender Asymmetrie des Tragbildes deutlich zu erkennen. Die Asymmetrie des Tragbildes bewirkt bei zentrisch angreifender Kraft die Bildung von Momenten und Kerbwirkungen und täuscht somit geringe Haftkräfte vor. Eine asymmetrische Verteilung der Anpreßkraft über die Kontaktfläche und damit die Bildung asymmetrischer Tragbilder konnte aber auch selbst bei planparallelen Proben infolge nicht planparalleler Andrückteller der Vorrichtung erfolgen. Die kugelige Lagerung des unteren Andrücktellers sollte derartige Abweichungen ausgleichen, war aber infolge Selbsthemmung nur bedingt dazu in der Lage. Erst als nach dem Versuch II/12 die gesamte Vorrichtung hinsichtlich ihrer Planparallelität überarbeitet wurde, verbesserte sich die Gleichmäßigkeit der Aufteilung der Haftkraft auf die Kontaktfläche, was sich bei den Folgeversuchen in höheren Haftkräften und geringerer Streuung niederschlug.

### 9.5 Haftkraft

Die Haftkraft wurde mit einer Genauigkeit von  $\pm 1\%$  bei Vollausschlag gemessen. Entsprechend den Meßbereichen der Zerreißmaschine ergeben sich die folgenden Fehler.

Haftkraft $\overline{F_{kp}}$	Fehler $\overline{F_{kp}}$
$0 \leq F_h < 1000$	$\pm 10$
$1000 \leq F_h < 2000$	$\pm 20$
$2000 \leq F_h < 5000$	$\pm 50$
$5000 \leq F_h \leq 10000$	$\pm 100$

### 9.6 Sauerstoffkonzentration

Chemische Analysen des Natriums während der Versuche konnten aus technischen Gründen nicht durchgeführt werden. Zur Bestimmung der Sauerstoffkonzentration diente nur die Plugging-Temperatur während der Spül- und Reinigungsphase über die Beziehung nach Eichelberger [3]. Die Plugging-Temperatur wurde über die Kaltfalltemperatur auf ca.

140 °C eingeregelt. Demzufolge kann mit einiger Sicherheit angenommen werden, daß die Sauerstoffkonzentration zum Zeitpunkt des Anpressens  $c_O \leq 10 \text{ ppM}_m$  betrug. Da jedoch die Dauer der Einwirkung des Natriums mit dieser geringen Sauerstoffkonzentration auf die Werkstoffoberflächen unbestimmt ist, können für jeden Versuch gleichbleibende Spülbedingungen nicht vorausgesetzt werden. Wie unter 8.6 behandelt, beeinflussen die auf der Metalloberfläche haftenden Oxide das Selbstverschweißen entscheidend. Aus diesem Grund sind größere Unterschiede in den Haftkräften verschiedener, jedoch unter sonst gleichen Versuchsbedingungen durchgeführten Versuche möglich. Als Beispiel seien hier die Versuche II/6 und II/11 genannt.

## 9.7 Fläche

### 9.7.1 Kontaktfläche

Der Fehler der Kontaktfläche ergibt sich aus den bei der Fertigung der Proben zugelassenen Toleranzen. Zulässig war, bezogen auf den jeweiligen Durchmesser, eine Toleranz von  $\pm 0,05 \text{ mm}$ . Der sich für jede Kontaktfläche ergebende Fehler ist nachfolgend zusammenfassend dargestellt:

Kontaktfläche $A \text{ [mm}^2\text{]}$	150	220	300	440	600	880
Fehler $\pm \Delta A \text{ [mm}^2\text{]}$	5,4	5,5	5,6	5,8	6,0	6,3

### 9.7.2 Durch plastische Verformung sich bildende tragende Fläche

Der sich durch plastische Verformung bildende Abdruck auf der Gegenfläche einer Paarung mit Kontaktkante wurde optisch ausgemessen. Hierbei betrug der Fehler des mittleren Durchmessers  $\pm 0,1 \text{ mm}$  und der der Kreisringbreite im allgemeinen  $\pm 0,01 \text{ mm}$ . Bei dem als konstant anzunehmenden mittleren Durchmesser errechnen sich je nach Größe der Fläche folgende Fehler:

---

$A_{tp}$ [mm <sup>2</sup> ]	15	20	30	40	50	60
$\pm \Delta A_{tp}$ [mm <sup>2</sup> ]	1,30	1,31	1,34	1,36	1,39	1,41

---

Diese Fehler gelten nicht für Grenzbereiche der Variation der Kantenlänge oder des Kantenwinkels (vgl. 12.1 Anm. 1 und 2), da hier die Abdrücke nur sehr verschwommen und undeutlich waren.

### 9.8 Maximale Wellen- und Rauhtiefe

Die bearbeitungsspezifische Oberflächenbeschaffenheit, z.B. durch Drehen, Schleifen, Walzen oder Läppen, beeinflusst über die sich bildende tragende Fläche die Größe der Haftkraft. Als Kriterium für die Oberflächenbeschaffenheit dient die maximale Wellen- und Rauhtiefe. Nicht erfaßt wird hierbei das ebenfalls wichtige Rauheitsprofil der Oberfläche. Die vorliegenden Untersuchungen erstreckten sich nur auf gedrehte und geläppte Flächen.

Die Bandbreite, innerhalb derer sich die maximale Wellen- und Rauhtiefe sowie das Rauheitsprofil bewegte, war relativ groß. Es ist deshalb anzunehmen, daß die Haftkraft von der Oberflächenbeschaffenheit her innerhalb der jeweiligen Bandbreite beeinflusst wurde.

### 10. Versuch einer Deutung des Selbstverschweißmechanismus

Nach den aufgezählten Einzelergebnissen läßt sich der Vorgang des Selbstverschweißens unter Natrium in drei Einzelvorgänge untergliedern:

- a) Reduktion der Werkstoffoberfläche durch das Natrium,
- b) Deformation der Berührungsstellen und Bildung einer tragenden Fläche infolge Einwirkung der Anpreßkraft,
- c) Selbstverschweißen der tragenden Fläche infolge Rekristallisation.

Im folgenden wird versucht, eine für die erzielten Ergebnisse gültige analytische Funktion zu finden.

Wie bereits an anderer Stelle erläutert, ist die unter a) genannte Reduktion der Werkstoffoberfläche im wesentlichen abhängig von der Sauerstoffkonzentration und der Temperatur des Natriums. Die unter c) aufgeführte Rekristallisation ist ebenfalls abhängig von der Temperatur, aber auch von der Zeit und von dem von der Anpreßkraft bestimmten Verformungsgrad. Im Rahmen dieses Berichtes wird auf die sich abspielenden Redox- und Rekristallisationsvorgänge nicht eingegangen, vielmehr wird versucht, mit Hilfe der unter b) genannten Deformationsvorgänge über die tragende Fläche zu einer ausreichenden Aussage über die möglicherweise zu erwartenden Haftkräfte zu gelangen.

Nimmt man an, daß nur die durch Deformation sich bildende tragende Fläche  $A_t$  mehr oder weniger verschweißt, so läßt sich die zu erwartende Haftkraft für eine Paarung aus gleichen Werkstoffen durch (1) ausdrücken.

$$F_h = \alpha \cdot \sigma_R \cdot A_t \quad (1)$$

Hierbei bedeutet:

- $\alpha$  von den Redox- und Rekristallisationsvorgängen abhängiger Verschweißfaktor
- $\sigma_R$  wirkliche Bruchfestigkeit des Werkstoffes zum Zeitpunkt des Zerreißens
- $A_t$  tragende Fläche

Bei Proben mit Kontaktkante kann eine rein plastische Verformung vorausgesetzt werden. Nach Bowden und Tabor [6] ist mit Hinweis auf die theoretischen Arbeiten von Henckey [7] und Ishlinsky [8] zur plastischen Deformation ein mittlerer Fließdruck  $p_m = c \cdot \sigma_0$  anzunehmen, wobei  $\sigma_0$  die Elastizitätsgrenze darstellt. Für den Fall von Vorsprüngen von konischer oder pyramidaler Gestalt haben Bishop, Hill und Mott [9] eine direkte Proportionalität zwischen Fließdruck und Elastizitätsgrenze für Öffnungswinkel  $\varphi \cong 90^\circ$  gefunden; der Proportionalitätsfaktor betrug hierbei  $c = 3$ . Bezogen auf die Kontaktkante, ergibt sich somit für rein plastische Verformung die tragende Fläche  $A_{tp}$  in angenäherter Form aus (2).

$$A_{tp} = \frac{F}{p_m} = \frac{F}{3 \cdot \sigma_0} \quad (2)$$

Wie jedoch unter 8.4 gezeigt wurde, ist die Größe der tragenden Fläche über das Kriechen zeitabhängig. Es ist deshalb sinnvoll, anstelle einer repräsentativen Elastizitätsgrenze die temperatur- und zeitabhängige Fließgrenze  $\sigma_{0,2}(T_a; t_a)$  einzusetzen; wobei der Faktor c neu zu definieren wäre. Hieraus resultiert (3).

$$A_{tp}(T_a; t_a) = \frac{F_a}{c' \cdot \sigma_{0,2}(T_a; t_a)} \quad (3)$$

Kontaktflächen, die größer sind als die durch (3) bestimmte tragende Fläche, beinhalten einen mehr oder weniger großen Anteil aus elastischer Verformung. Dieser Anteil ist schwer definierbar. Im folgenden wird daher versucht, durch einen idealisierten Ansatz Parameter und deren Einfluß zu ermitteln. Für Vorsprünge von kugelförmiger Form, die gegen eine ebene Platte aus gleichem Werkstoff gepreßt werden, errechnen sich die jeweils aus elastischer Verformung resultierenden tragenden Flächen nach Hertz [10] gemäß (4).

$$A_{tei} = 3,8 \left( \frac{F_{ai} \cdot r_i}{E} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (4)$$

Hierbei bedeutet:

- $A_{tei}$  aus elastischer Verformung resultierendes tragendes Flächenteilchen,
- $F_{ai}$  auf den kugelförmigen Vorsprung einwirkender Kraftanteil der Anpreßkraft,
- $r_i$  Radius des kugelförmigen Vorsprungs.

In (4) sei vorausgesetzt, daß die Flächenpressung die Elastizitätsgrenze nicht überschreitet.

Nimmt man außerdem an, die Oberflächenrauheit ließe sich ideal durch eine Sinusfunktion der Form

$$y = \frac{R}{2} \cdot \sin \frac{2\pi x}{L} \quad (5)$$

ausdrücken, wobei R die Rauhtiefe und L den Abstand von Gipfel zu Gipfel darstellt, hätte eine Kontaktfläche der Größe A demnach

$$n = \frac{A}{L^2} \quad (6)$$

Auflagepunkte. Der jeweilige Krümmungsradius aus (5) würde sein

$$r = \frac{L^2}{2 \pi^2 R} \quad (7)$$

In (4) eingesetzt, ergäbe sich je Auflagepunkt eine tragende Fläche von:

$$A_{tei} = 3,8 \left( \frac{F_{ai} L^2}{2 \pi^2 R E} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (8)$$

Unter Berücksichtigung von (6) ergäbe sich die gesamte elastisch deformierte tragende Fläche aus (9).

$$A_{te} = n \cdot A_{tei} = \frac{A}{1,9} \cdot \left( \frac{F_a L}{R E} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (9)$$

In der Beziehung (9) ist die Oberfläche idealisiert durch eine Sinusfunktion eingearbeitet. Da eine solche Fläche nicht existent ist, kann diese Beziehung nur zu einer Art Ähnlichkeitsbetrachtung zu den folgenden Überlegungen benutzt werden.

Bei wirklichen Flächen tritt weder rein plastische Verformung nach (3) noch rein elastische Verformung entsprechend (9) auf, vielmehr muß man annehmen, daß beide Verformungsarten zusammen vorkommen.

Man kann nunmehr definieren, daß die die tragende Fläche erzeugende Anpreßkraft sich entsprechend anteilig zur Verformungsart nach (10) aufteilt.

$$F_a = F_{ap} + F_{ae} = k \cdot F_a + (1-k) F_a \quad (10)$$

wobei k den Anteil der Anpreßkraft darstellt, der die plastische Deformation bewirkt.

Aus dieser Definition und unter den bereits getroffenen Annahmen ergäbe sich zur Abschätzung der tragenden Fläche aus (3) und (9) die allgemeine Funktion (11).

$$A_t = \frac{k \cdot F_a}{c' \cdot \sigma_{0,2}(T_a; t_a)} + \frac{A}{1,9} \left( \frac{(1-k) F_a \cdot L}{R \cdot E} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (11)$$

Setzt man (11) in (1), so ergibt sich für die Haftkraft die Beziehung (12)

$$F_h = \alpha \cdot \sigma_R \left[ \frac{k \cdot F_a}{c' \cdot \sigma_0(T_a; t_a)} + \frac{A}{1,9} \left( \frac{(1-k) F_a \cdot L}{R \cdot E} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \quad (12)$$

Nach Definition (10) beträgt für rein plastische Verformung, wie sie bei Proben mit Kontaktkante vorliegt, der Faktor  $k = 1$ , d.h. die entsprechende Haftkraft  $F_{hp}$  errechnet sich aus (13).

$$F_{hp} = \frac{\alpha}{c'} \cdot F_a \frac{\sigma_R}{\sigma_{0,2}(T_a; t_a)} \quad (13)$$

Die Beziehung (13) sagt aus, daß bei Paarungen mit Kontaktkante die Haftkraft proportional der Anpreßkraft (vgl. 8.3) und proportional dem Verhältnis der wirklichen Bruchfestigkeit zur zeit- und temperaturabhängigen Fließgrenze (vgl. 8.2) ist; diese Beziehung ist in Bezug auf die Versuchsergebnisse realistisch.

Für Kontaktflächen der Bedingung  $A > A_{tp}$  würde sich der aus elastischer Verformung resultierende Haftkraftanteil  $\Delta F_{he}$  aus (12) gemäß (14) errechnen.

$$\Delta F_{he} = \alpha \cdot \sigma_R \frac{A}{1,9} \left( \frac{(1-k) \cdot F_a \cdot L}{R \cdot E} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (14)$$

Nimmt man zunächst an, daß der elastische Verformung bewirkende Anteil der Anpreßkraft  $(1-k) F_a$  konstant ist, bestätigt die Beziehung (14) den experimentell gefundenen Einfluß der Kontaktfläche als auch den der Oberflächenbeschaffenheit, hier ausgedrückt in L und R. Ebenfalls bestätigt wird die bisher nicht bewiesene Annahme, daß bei Kontaktflächen  $A > A_{tp}$  die tragende Fläche durch teils plastische und teils elastische Verformung gebildet wird.

Der Faktor  $(1-k)$ , der den Anteil der elastische Verformung bewirkenden Anpreßkraft ausdrückt, hängt jedoch ab von Zahl und Form der Auflagestellen und von der Kraft, die anteilig auf die jeweilige Auflagestelle einwirkt; er ist somit eine Funktion der in (14) genannten Parameter. Wegen dieses komplexen Zusammenhangs kann die oben angestellte Parameterbetrachtung nicht in vollem Umfang aufrechterhalten werden. Aus der Überlegung heraus läßt sich jedoch sagen, daß mit wachsendem  $F_a$  und R

der (1-k)-Wert fällt und mit wachsendem A, L und E steigt. Hieraus folgt, daß bei konstanten Werten von  $F_a$ , R und E der Einfluß der Fläche größer als proportional zu  $A^{\frac{1}{3}}$  und der des Spitzenabstandes größer als proportional zu  $L^{\frac{2}{3}}$  sein muß.

Da das Profil einer wirklichen Fläche durch L und R nicht ausgedrückt werden kann und die Funktion für (1-k) nicht bekannt ist, wurde in Anlehnung an die entwickelten Beziehungen ein empirischer Ansatz (15) aufgestellt. Dieser Ansatz erlaubt, Haftkräfte für beliebige Kontaktflächen mit ausreichender Genauigkeit abzuschätzen.

$$F_h = \alpha \cdot \sigma_R \cdot A_{tp} \left( \frac{A}{A_{tp}} \right)^m \quad (15)$$

Am Beispiel der Paarung 1.4981/1.4981 wurde die Funktion  $F_h(A)$  für gedrehte und geläppte Proben aufgestellt. Das Ergebnis ist in Abb. 18 dargestellt.

Als Exponent ergab sich

für gedrehte Flächen	m	=	0,2
für geläppte Flächen	m	=	0,32

Der Exponent m ist bestimmt durch die spezifische Oberflächenbeschaffenheit. Demnach sind die gefundenen Werte auch für andere Werkstoffpaarungen als repräsentativ anzusehen.

Der Verschleißfaktor errechnete sich durch Einsetzen der durch einen Zerreißversuch ermittelten Spannung  $\sigma_R = 87 \text{ kp/mm}^2$  und der experimentell gefundenen tragenden Fläche  $A = A_t = A_{tp} = 55 \text{ mm}^2$  in die Beziehung (15). Der Wert  $\alpha$  ist wegen der werkstoffspezifischen Redox- und Rekristallisationsvorgänge nicht auf andere Werkstoffe übertragbar, er kann jedoch unter günstigen Umständen, d.h. geringe Sauerstoffkonzentration, hohe Versuchstemperatur und vollkommene Rekristallisation, auf den Wert  $\alpha = 1$  ansteigen. Die bei der Fläche  $A = 600 \text{ mm}^2$  auftretende Abweichung läßt sich dadurch begründen, daß mit zunehmender Fläche der wirklich in Kontakt kommende Anteil infolge Unregelmäßigkeiten kleiner wird, d.h. bei extrem großen Flächen die Auflage auf wenige Stellen reduziert werden kann.

In den vorhergehenden Betrachtungen wurden im wesentlichen Paarungen aus gleichen Werkstoffen vorausgesetzt. Werden zwei verschiedene Werkstoffe gegeneinandergedreht, so sind zur Ermittlung der Haftkraft die Festigkeitswerte des weniger festen Werkstoffes in die entsprechenden Beziehungen einzusetzen.

Im folgenden wird die Beziehung (15) auf ihre Anwendbarkeit auf die Paarung 1.4301/1.4301 untersucht.

Vorausgesetzt wird:

$$\begin{aligned}
 m &= 0,2 && \text{für gedrehte Flächen} \\
 m &= 0,32 && \text{für geläppte Flächen} \\
 \sigma_R &= 80 \text{ kp/mm}^2 && \text{(Schätzwert)}
 \end{aligned}$$

Der Wert  $\alpha$  wird entsprechend der Beziehung (3) und (13) bzw. (15) aus den Werten der Tabelle 3, Blatt 1, Zeile 1 errechnet.

$$\alpha = \frac{F_h}{\sigma_R \cdot A_{tp}} = \frac{1740}{80 \cdot 65} = 0,335$$

Die Paarung mit den gedrehten Flächen 220, 440 und 880 mm<sup>2</sup> werden aus den in 9.3 behandelten Gründen nicht berücksichtigt. Unter den genannten Voraussetzungen ergibt sich die folgende Gegenüberstellung:

	Kontaktfläche A [mm <sup>2</sup> ]	Haftkraft nach (15) F <sub>h</sub> [kp]	gemessene Haftkraft F <sub>hm</sub> [kp]	vgl. Tab. 3 Blatt/Zeile
gedreht	65 (A <sub>tp</sub> )	(1740)	1740 ± 120	1/1
	150	2056	1990 ± 80	1/2
	300	2363	1660 ± 290	1/8
	600	2714	2710 ± 460	1/10
geläppt	220	2570 (3456)	2880 ± 160	3/2
	440	3209 (4315)	4590 ± 790	3/3
	880	4006 (5387)	5320 ± 1070	3/4

Diese Gegenüberstellung zeigt für gedrehte Flächen eine relativ gute Übereinstimmung. Da die Werte der geläpften Flächen aus einem anderen Versuch stammen und daher identische Spülbedingungen nicht vorausge-

setzt werden können, wird auch der Verschleißfaktor  $\alpha$  für die geläpften Flächen nicht identisch mit dem für die gedrehten Flächen sein. Unter der Annahme, daß für die geläpften Flächen  $\alpha=0,45$ , wurden die in Klammern gesetzten Werte errechnet, die mit den gemessenen etwas besser übereinstimmen.

Zusammenfassend läßt sich am Beispiel der Paarungen 1.4981/1.4981 und 1.4301/1.4301 sagen, daß unter den vorausgesetzten Bedingungen die zu erwartenden Haftkräfte mit Hilfe der Beziehung (13) mit ausreichender Genauigkeit ermittelt werden können.

#### 11. Abschließende Bemerkungen

Dieser Bericht befaßte sich ausschließlich mit den Ergebnissen der nunmehr abgeschlossenen Versuchsphase II. Als Nachteil der angewandten Versuchsmethode hat sich gezeigt, daß es wenig sinnvoll ist, zwei verschiedene Werkstoffe, d.h. Werkstoffe mit unterschiedlichem Wärmeausdehnungskoeffizient, zu paaren. Um diesen Nachteil zu beseitigen, wurden Vorrichtungen gebaut, mit denen es möglich ist, Werkstoffproben unter Natrium bei entsprechend hoher Temperatur sowohl anzupressen als auch wieder auseinanderzureißen. In der der Versuchsphase II nachfolgenden Phase III werden daher Versuche mit diesen Vorrichtungen durchgeführt. Neben bestätigenden Tests mit den bisherigen Werkstoffen werden mit Priorität auf den SNR 300 bezogene Werkstoffpaarungen eingesetzt. Insbesondere wird es sich hierbei um Paarungen mit den Werkstoffen Stellite 6, Colmonoy 4, Nimonic 90 und Wolframkarbit handeln, wobei diese Werkstoffe nicht nur mit sich selbst sondern auch untereinander gepaart werden.

12. Anmerkungen

12.1 Anmerkungen zur Tabelle 2

- 1 Neben Proben mit definierter Kontaktfläche gemäß Abb. 1 wurden auch Solche mit Kontaktkante gemäß Abb. 2 eingesetzt. Hierbei wurde der Kantenwinkel  $\varphi$  wie folgt variiert:

$$\varphi_1 = 120^\circ$$

$$\varphi_2 = 170^\circ$$

$$\varphi_3 = 178^\circ$$

$$\varphi_4 = 179^\circ$$

Durch diese Variation sollte festgestellt werden, inwieweit der Winkel  $\varphi$  die Haftkraft beeinflusst. Hierbei betrug die Kantenlänge einheitlich  $l = l_1 = 126 \text{ mm}$ .

- 2 Neben Proben mit definierter Kontaktfläche gemäß Abb. 1 wurden auch solche mit Kontaktkante eingesetzt. Der Kantenwinkel betrug hierbei einheitlich  $\varphi = \varphi_1 = 120^\circ$ . Außer der normalen Kantenlänge von  $l = l_1 = 126 \text{ mm}$  gemäß Abb. 2 kamen noch Proben mit den Kantenlängen

$$l_2 = 785 \text{ mm}$$

$$l_3 = 1570 \text{ mm}$$

zum Einsatz. Verwendet wurden hierzu Proben mit einer Kontaktfläche  $A = 880 \text{ mm}^2$  ( $s = 7 \text{ mm}$ ), in die eine Art Plangewinde geschnitten wurde. Das Zahnprofil entsprach einer Kontaktkante mit dem Kantenwinkel  $\varphi_1 = 120^\circ$ . Die unterschiedlichen Kontaktlängen ergaben sich durch die Wahl des Vorschubs von  $1,12 \text{ mm/U}$  und  $0,56 \text{ mm/U}$ .

Durch Variation der Kantenlänge sollte festgestellt werden, ob die Größe der sich bildenden tragenden Fläche vom Verformungsgrad abhängig ist.

- 3 Neben den Proben mit den definierten Kontaktflächen gemäß Abb. 1 wurden auch solche mit Kontaktkante gemäß Abb. 2 eingesetzt.
- 4 Es wurden nur Proben mit Kontaktkante gemäß Abb. 2 eingesetzt.

- 5 Da Proben mit Kontaktkante eingesetzt wurden, entspricht die Kontaktfläche A der durch plastische Verformung sich bildenden tragenden Fläche  $A_{tp}$ .
- 6 Zur Erniedrigung der Sauerstoffkonzentration des Natriums unter den durch die Pluggingtemperatur während des Spül- und Reinigungsbetriebes bestimmten Wert wurde die Probensäule zusätzlich noch in mit Zirkonspänen gefüllte Maschendrahtkissen eingepackt.
- 7 Die Probensäule wurde unmittelbar nach dem Fluten mit Natrium angepreßt (keine Spülphase).
- 8 Die Probensäule wurde schon vor ihrem Einbau in den Versuchsbehälter angepreßt (keine Spülphase).

#### 12.2 Anmerkungen zur Tabelle 3

- 1 Paarungen von Proben mit Kontaktkante gemäß Abb. 2. Hierbei betrug der Kantenwinkel  $\varphi = \varphi_1 = 120^\circ$ . Die Kontaktfläche A entspricht der nach dem Versuch ausgemessenen durch plastische Verformung entstandenen tragenden Fläche  $A_{tp}$  (vgl. Anm. 1 zur Tab. 2).
- 2 Nicht verschweißt; Paarung nach dem Versuch während der Demontage der Säule ohne Krafteinwirkung auseinandergegangen.
- 3 Verschweißt; Haftkraft jedoch nicht meßbar, da die Paarung infolge unkontrollierter Krafteinwirkung während der Demontage oder des Zerreißvorganges (z.B. durch den Abreißschlag einer anderen verschweißten Paarung) von der Säule abplatzte.
- 4 Probe oxidiert; zur Ermittlung des Einflusses einer Oxidschicht auf das Selbstverschweißen wurde die Probe vor dem Versuch 12 h bei  $600^\circ\text{C}$  im Ofen künstlich oxidiert.
- 5 Kontaktfläche der Paarung gedreht und gemäß Anmerkung 4 oxidiert; Gegenfläche geläppt.
- 6 Paarung gemäß Anmerkung 1 mit einem Kantenwinkel  $\varphi = \varphi_2 = 170^\circ$  (vgl. Anm. 1 zur Tab. 2).

- 7 Paarung gemäß Anmerkung 1 mit einem Kantenwinkel  $\varphi = \varphi_3 = 178^\circ$  (vgl. Anm. 1 zur Tab. 2).
- 8 Paarung gemäß Anmerkung 1 mit einem Kantenwinkel  $\varphi = \varphi_4 = 179^\circ$  (vgl. Anm. 1 zur Tab. 2).
- 9 Gegenfläche ca.  $0,05 \mu\text{m}$  mit Zirkon beschichtet. Dieser Maßnahme lag die Überlegung zugrunde, daß eine aufgebrachte Zirkonschicht im Natrium während der Spülphase oxidiert und so Selbstverschweißen verhindert.
- 10 Paarung bei einer Zerreißkraft von 8500 kp noch nicht auseinandergerissen. Von dieser Paarung wurde ein Schliffbild angefertigt (s. Abb. 16).
- 11 Paarung von Proben mit Kontaktkante mit der Kantenlänge  $l = l_2 = 785 \text{ mm}$  (vgl. Anm. 2 zur Tab. 2).
- 12 Paarung gemäß Anmerkung 11 mit der Kantenlänge  $l = l_3 = 1670 \text{ mm}$  (vgl. Anm. 2 zur Tab. 2).
- 13 Die durch plastische Verformung gebildete tragende Fläche  $A_{tp}$  konnte optisch nur ungenau ermittelt werden, deshalb ist die Angabe der Kontaktfläche in Klammern gesetzt.
- 14 Die Versuche II/6 und II/11 wurden unter gleichen Bedingungen durchgeführt. Die Ergebnisse waren jedoch stark unterschiedlich, so daß es sinnvoll erscheint, sie getrennt auszuweisen. In diesem Fall handelt es sich um ein Ergebnis aus Versuch II/6.
- 15 Ergebnisse aus Versuch II/11 (vgl. Anm. 14).
- 16 Paarung nicht auseinandergerissen; zur Anfertigung eines Schliffbildes verwendet (s. Abb. 17).
- 17 Erniedrigung der Sauerstoffkonzentration des Natriums gem. Anm. 6 zur Tab. 2.
- 18 Kontaktfläche optisch nicht mehr ausmeßbar.

19 s. Anm. 7 zur Tab. 2

20 s. Anm. 8 zur Tab. 2

13. Verzeichnisse

13.1 Verzeichnis der Tabellen und Abbildungen

Tabelle 1	Testwerkstoffe und ihre Legierungsbestandteile
Tabelle 2	Versuchsbedingungen
Tabelle 3	Ergebnisse der Untersuchungen zum Selbstverschweißen
Tabelle 4	Vergleich zwischen Haftkraft und einer repräsentativen Festigkeit
Abb. 1	Hauptsächlich eingesetzte Probenform
Abb. 2	Probe mit Kontaktkante
Abb. 3	Versuchsvorrichtung
Abb. 4	Fließschema der Natrium-Behälter-Versuchsanlage
Abb. 5	Aufnahmen aus dem Versuchsablauf
Abb. 6	Repräsentative Oberflächenprofile
Abb. 7	Einfluß der Kontaktkante gedrehter Proben auf die Haftkraft
Abb. 8	Einfluß der Kontaktfläche geläppter Proben auf die Haftkraft
Abb. 9	Vergleich zwischen Haftkraft und einer repräsentativen Festigkeit
Abb. 10	Einfluß der Anpreßkraft auf die Haftkraft
Abb. 11	Einfluß der tragenden Fläche $A_{tp}(F_a)$ auf die Haftkraft
Abb. 12	Einfluß der Anpreßkraft auf die tragende Fläche
Abb. 13	Einfluß der Anpreßzeit auf die Haftkraft
Abb. 14	Einfluß der tragenden Fläche $A_{tp}(t_a)$ auf die Haftkraft
Abb. 15	Existenzbereiche der Komplexoxide als Funktion der Temperatur und der Sauerstoffkonzentration im Natrium
Abb. 16	Aufnahmen einer verschweißten Kontaktstelle
Abb. 17	Metallografie einer verschweißten Paarung (Kontaktkante/Gegenfläche)
Abb. 18	Haftkraft als Funktion der Kontaktfläche

### 13.2 Literaturverzeichnis

- [1] K. Benndorf:  
Selbstverschweißen von Reaktorstrukturwerkstoffen  
unter Natrium bei hoher Temperatur  
KFK-Ext.Bericht 8/70-1
- [2] F. Huber, R.A. Müller:  
The Karlsruhe Sodium Tank Test Facility  
KFK 1203, 1970
- [3] R.L. Eichelberger:  
USAEC-Report AI-AEC-12865, 1968
- [4] F. Sass und Ch. Bouche:  
Dubbels Taschenbuch für den Maschinenbau I, 1958
- [5] H.U. Borgstedt:  
Die Stabilität der Oxidschichten auf austenitischen  
Stählen in Natrium in Abhängigkeit von dessen Sauerstoff-  
gehalt und der Temperatur  
(GfK-interner Bericht, nicht veröffentlicht)
- [6] F.P. Bowden, D. Tabor:  
The Friction and Lubrication of Solids,  
2<sup>nd</sup> Edition, Oxford, 1954
- [7] H. Hencky:  
Z. angew. Math. Mech., 1973
- [8] A.J. Ishlinsky:  
J. Appl. Math. Mech. (USSR)  
(Englische Übersetzung), 1944
- [9] R.F. Bishop, R. Hill, N.F. Mott:  
Proc. Phys. Soc., 1945
- [10] H. Hertz:  
Journal für reine und angew. Mathematik, 1886

Legierungsbestand- teil [Gew.%]		C	Si	Mn	P	S	Fe	Cr	Mo	Ni	Nb	Ti	Al	B
		Test- Werkstoff												
vorzugsweise einge- setzte Werkstoffe	S. Nr. 1.4301	0,06	0,90	1,25	0,022	0,030	Rest	17,95	<0,2	8,42	<0,2	—	—	—
	S. Nr. 1.4981	0,06	0,48	1,31	0,027	0,008	Rest	16,61	1,75	16,56	0,89	—	—	—
	Inconel 718	0,06	0,03	0,02	<0,005	0,002	18,72	18,46	2,96	53,45	5,27	0,99	0,52	0,003
	S. Nr. 1.6770	0,06	0,52	0,73	0,01	0,005	Rest	2,22	0,92	0,60	0,73	—	—	—
ausnahmsw. einges.W.St.	S. Nr. 1.4948	0,06	0,53	1,87	0,025	0,008	Rest	17,75	—	11,1	—	—	—	—
	S. Nr. 1.4961	0,04	0,46	1,26	0,018	0,008	Rest	16,9	—	12,8	NbTa 0,65	—	—	—
Werkstoff	Analyse						Lieferzustand							
S.Nr.1.4301	KFK, IMF Nr. 351/72						(keine Angabe)							
S.Nr.1.4981	DEW-WAZ gemäß DIN 30049 / 3B						lösungsgeglüht							
Inconel 718	DEW-WAZ gemäß DIN 30049 / 3B						lösungsgeglüht							
S.Nr.1.6770	KFK, IMF Nr. 350 / 72						(keine Angabe)							
S.Nr.1.4948	Böhler-WAZ gemäß DIN 30049 / 3B						abgeschreckt							
S.Nr.1.4961	Böhler-WAZ gemäß DIN 30049 / 3B						abgeschreckt							

GFK  
IRE

Untersuchungen zum Selbstverschweißen  
Testwerkstoffe und ihre  
Legierungsbestandteile

Tab. 1

$T_s$ [°C]	$t_s$ [h]	$T_a$ [°C]	$t_a$ [h]	$F_a$ [kp]	max. ( $W+R_t$ ) [µm]	A [mm <sup>2</sup> ]	Ergebnisse unter Tabelle 3 Blatt...	An- mer- kung	zugehörige Versuche Nr. II / ...
700	24	700	168	1100	>4	Atp 150; 220; 300; 440; 600; 880	1; 2	1;5	7; 9; 12; 16
				1100	<1	150; 220; 300; 440; 600; 880	3; 4		1; 2; 12; 16
				825	>4	Atp 150; 300; 600	5	2;5	25
				550	>4	Atp 150; 300; 600	5; 6	3;5	14; 15
				550	<1	220; 300; 440; 600; 880	6; 7		8; 14
				275	>4	Atp 150; 300; 600	7; 8	2;5	26
			336	1100	>4	Atp 150; 300; 600	8	3;5	21
				1100	<1	300; 600	8		21
				550	>4	Atp 150; 300; 600	8		22
				550	<1	300; 600	9		22
			144	1100	>4	Atp	9	4;5	6; 11
			24	1100	>4	Atp 150; 300; 600	9	3;5	19
				1100	<1	300; 600	10		19
				550	>4	Atp 150; 300; 600	10	3;5	20
				550	<1	300; 600	10		20
			4	1100	>4	Atp 150; 300; 600	10; 11	2;5	23
				550	>4	Atp 150; 300; 600	11; 12	2;5	24
		550	168	1100	>4	Atp 150; 300; 600	12; 13	3;5;6	27
				1100	<1	220; 440; 880	13; 14		4
550				1100	>4	Atp 150; 300; 600	14; 15	3;5	17; 28
				1100	<1	220; 300; 440; 600; 880	15; 16		3; 17
				550	>4	Atp 150; 300; 600	16; 17	3;5	18
				550	<1	300; 600	17		18
—	—	700		1100	<1	220; 440; 880	17; 18	7	5
—	—			1100	<1	220; 440; 880	18; 19	8	10

GFK  
IRE

Untersuchungen zum Selbstverschweißen  
Versuchsbedingungen

Tab. 2

Zeilen Nr.	Versuchsbedingungen							Versuchsergebnisse			Anmerkung (s.12.2)	
	T <sub>s</sub> [°C]	t <sub>s</sub> [h]	T <sub>a</sub> [°C]	t <sub>a</sub> [h]	F <sub>a</sub> [kp]	max. (W+R <sub>f</sub> ) [μm]	Werkstoffpaarung	A [mm <sup>2</sup> ]	Maximalwert	F <sub>h</sub> [kp] Mittelwert		n
1	700	24	700	168	1100	>4	1.4301/1.4301	65	2080	1740 ± 120	5	1
2								150	2190	1990 ± 80	4	
3								150	—	—	1	2
4								220	2250	1330 ± 160	8	
5								220	—	—	3	3
6								220	1980	1840 ± 70	3	4
7								220	—	1570 —	1	5
8								300	2880	1660 ± 290	6	
9								440	1040	970 ± 30	5	
10								600	4260	2710 ± 460	6	
11								880	1930	1110 ± 190	6	
12							1.4981/1.4981	55	3170	2490 ± 110	10	1
13								51	2350	2120 ± 110	4	6
14								( 70 )	2520	2520 ± 0	2	7;13
15								( 78 )	2850	2305 ± 450	2	8;13

Tabelle 3 Blatt 1

Ergebnisse der Untersuchungen zum Selbstverschweißen

Zeilen Nr.	Versuchsbedingungen								Versuchsergebnisse			Anmerkung (s.12.2)
	T <sub>s</sub> [°C]	t <sub>s</sub> [h]	T <sub>a</sub> [°C]	t <sub>a</sub> [h]	F <sub>a</sub> [kp]	max. (W+R <sub>f</sub> ) [μm]	Werkstoffpaarung	A [mm <sup>2</sup> ]	F <sub>h</sub> [kp]		n	
									Maximalwert	Mittelwert		
1	700	24	700	168	1100	>4	1.4981/1.4981	150	3700	3260 ± 170	6	
2								220	1730	1130 ± 140	8	
3								300	4220	3540 ± 180	6	
4								440	—	1345 —	1	
5								600	4120	3430 ± 270	6	
6								880	—	770 —	1	
7							Inc.718/Inc.718	30	650	560 ± 50	3	1
8								220	—	850 —	1	
9								220	—	—	1	2
10							1.6770/1.6770	440	7020	5800 ± 510	5	
11								880	8240	6630 ± 610	6	
12							1.4961/1.4961	220	2050	1200 ± 210	6	
13							1.4301/Inc.718	220	—	—	1	2
14							1.4981/Inc.718	300	—	—	1	2
15							1.4981/1.6770	440	—	2900 —	1	

Tabelle 3 Blatt 2

Ergebnisse der Untersuchungen zum Selbstverschweißen

Zeilen Nr.	Versuchsbedingungen							Versuchsergebnisse			Anmerkung (s.12.2)	
	T <sub>s</sub> [°C]	t <sub>s</sub> [h]	T <sub>a</sub> [°C]	t <sub>a</sub> [h]	F <sub>a</sub> [kp]	max. (W+R <sub>f</sub> ) [μm]	Werkstoffpaarung	A [mm <sup>2</sup> ]	Maximalwert	F <sub>h</sub> [kp] Mittelwert		n
1	700	24	700	168	1100	< 1	1.4301/1.4301	220	2180	2130 ± 60	2	9
2								220	3720	2880 ± 160	7	
3								440	5660	4590 ± 790	3	
4								880	6390	5320 ± 1070	3	
5								880	—	—	2	3
6							1.4981/1.4981	220	3530	2390 ± 370	4	
7								300	5150	4600 ± 450	3	
8								440	5900	5340 ± 260	4	
9								600	5900	5510 ± 340	3	
10								880	3190	2660 ± 540	2	
11								880	—	—	1	3
12							Inc.718/Inc.718	220	810	585 ± 80	4	
13								220	—	—	1	3
14							1.6770/1.6770	220	6910	6730 ± 100	4	
15								440	8370	6580 ± 1090	3	

Tabelle 3 Blatt 3

Ergebnisse der Untersuchungen zum Selbstverschweißen

Zeilen Nr.	Versuchsbedingungen							Versuchsergebnisse				Anmerkung (s.12.2)
	T <sub>s</sub> [°C]	t <sub>s</sub> [h]	T <sub>a</sub> [°C]	t <sub>a</sub> [h]	F <sub>a</sub> [kp]	max. (W+R <sub>f</sub> ) [μm]	Werkstoffpaarung	A [mm <sup>2</sup> ]	F <sub>h</sub> [kp]		n	
									Maximalwert	Mittelwert		
1	700	24	700	168	1100	< 1	1.6770/1.6770	880	—	7560 —	1	
2							1.4301/1.4981	220	5060	3340 ± 290	15	
3								440	6100	4600 ± 840	4	
4								880	8360	5940 ± 1070	5	
5								880	—	>8500 —	1	10
6							1.4301/Inc.718	220	—	1790 —	1	
7								220	—	————	3	2
8								440	—	————	3	2
9								880	—	————	2	2
10							1.4301/1.6770	220	—	5650 —	1	
11								440	—	7160 —	1	
12								880	—	8700 —	1	
13							1.4981/Inc. 718	220	—	————	3	2
14							1.4981/1.6770	440	—	8410 —	1	
15								880	—	————	1	3

Zeilen Nr.	Versuchsbedingungen							Versuchsergebnisse			Anmerkung (s.12.2)	
	T <sub>s</sub> [°C]	t <sub>s</sub> [h]	T <sub>a</sub> [°C]	t <sub>a</sub> [h]	F <sub>a</sub> [kp]	max. (W+R <sub>f</sub> ) [μm]	Werkstoffpaarung	A [mm <sup>2</sup> ]	F <sub>h</sub> [kp]			
									Maximalwert	Mittelwert	n	
1	700	24	700	168	825	> 4	1.4301/1.4301	300	970	870 ± 50	4	
2							1.4981/1.4981	40	1500	1270 ± 170	3	1
3								150	2000	1730 ± 100	4	
4								300	2250	1890 ± 170	4	
5								600	2820	2180 ± 280	4	
6							1.4948/1.4948	51	2050	1870 ± 90	3	1
7								(94)	1500	1070 ± 230	3	11
8								(110)	1200	900 ± 170	3	12
9								300	1620	1360 ± 130	3	
10							1.4301/1.4948	300	—	790 —	1	
11							1.4981/1.4948	150	—	1420 —	1	
12					550		1.4981/1.4981	31	975	810 ± 40	11	1
13								150	2100	1220 ± 90	12	
14								300	1620	1310 ± 80	12	
15								600	1800	1340 ± 70	11	

Zeilen Nr.	Versuchsbedingungen							Versuchsergebnisse			Anmerkung (s.12.2)	
	T <sub>s</sub> [°C]	t <sub>s</sub> [h]	T <sub>a</sub> [°C]	t <sub>a</sub> [h]	F <sub>a</sub> [kp]	max. (W+R <sub>f</sub> ) [μm]	Werkstoffpaarung	A [mm <sup>2</sup> ]	F <sub>h</sub> [kp]			n
									Maximalwert	Mittelwert		
1	700	24	700	168	550	> 4	Inc.718/Inc.718	19	644	470 ± 50	5	1
2								19	—	—	2	1;2
3							1.4981/Inc.718	300	—	—	2	2
4						< 1	1.4301/1.4301	220	840	430 ± 150	4	
5								440	1620	1000 ± 210	5	
6								880	—	450 —	1	
7								880	—	—	2	2
8							1.4981/1.4981	220	3500	3220 ± 260	3	
9								300	4000	2400 ± 390	6	
10								440	4700	4000 ± 240	4	
11								600	2410	1930 ± 220	6	
12								880	—	2430 —	1	
13							Inc.718/Inc.718	220	573	520 ± 50	3	
14								220	—	—	1	2
15							1.6770/1.6770	220	4200	4060 ± 140	2	

Tabelle 3 Blatt 6

Ergebnisse der Untersuchungen zum Selbstverschweißen

Zeilen Nr.	Versuchsbedingungen							Versuchsergebnisse			Anmerkung (s.12.2)	
	T <sub>s</sub> [°C]	t <sub>s</sub> [h]	T <sub>a</sub> [°C]	t <sub>a</sub> [h]	F <sub>a</sub> [kp]	max. (W+R <sub>f</sub> ) [μm]	Werkstoffpaarung	A [mm <sup>2</sup> ]	F <sub>h</sub> [kp] Maximalwert	Mittelwert		n
1	700	24	700	168	550	<1	1.6770/1.6770	440	5860	5350 ± 260	3	
2								880	5400	5280 ± 60	3	
3							1.4981/Inc.718	220	—	—	1	2
4					275	>4	1.4301/1.4301	150	610	360 ± 100	4	
5								300	400	375 ± 25	2	
6							1.4981/1.4981	16	470	420 ± 40	3	1
7								16	—	—	1	1 ; 3
8								150	1130	610 ± 180	4	
9								300	1400	960 ± 170	4	
10								600	1470	1190 ± 140	4	
11							1.4948/1.4948	23	890	800 ± 50	3	1
12								(42)	830	765 ± 70	2	11;13
13								—	860	790 ± 70	2	18
14								300	1120	970 ± 140	3	
15							1.4301/1.4948	150	—	370 —	1	

Tabelle 3 Blatt 7

Ergebnisse der Untersuchungen zum Selbstverschweißen

Zeilen Nr.	Versuchsbedingungen							Versuchsergebnisse			Anmerkung (s.12.2)	
	T <sub>s</sub> [°C]	t <sub>s</sub> [h]	T <sub>a</sub> [°C]	t <sub>a</sub> [h]	F <sub>a</sub> [kp]	max. (W+R <sub>f</sub> ) [μm]	Werkstoffpaarung	A [mm <sup>2</sup> ]	F <sub>h</sub> [kp]			n
									Maximalwert	Mittelwert		
1	700	24	700	168	275	> 4	1.4981/1.4948	150	—	1130 —	1	
2				336	1100		1.4981/1.4981	62	3950	3460 ± 230	6	1
3								150	3570	2870 ± 210	6	
4								300	3800	2810 ± 200	6	
5								600	3600	3280 ± 160	6	
6							Inc.718/Inc.718	23	—	135 —	1	1
7								23	—	—	2	1 ; 2
8							1.4981/Inc.718	300	—	—	1	2
9						< 1	1.4981/1.4981	300	4050	3010 ± 960	3	
10								600	3660	2490 ± 840	3	
11					550	> 4		34	1850	1450 ± 120	5	1
12								34	—	—	1	1 ; 16
13								150	2420	1990 ± 200	6	
14								300	2930	2340 ± 180	6	
15								600	2750	2640 ± 40	6	

Tabelle 3 Blatt 8

Ergebnisse der Untersuchungen zum Selbstverschweißen

Zeilen Nr.	Versuchsbedingungen								Versuchsergebnisse			Anmerkung (s.12.2)
	T <sub>s</sub> [°C]	t <sub>s</sub> [h]	T <sub>a</sub> [°C]	t <sub>a</sub> [h]	F <sub>a</sub> [kp]	max. (W+R <sub>f</sub> ) [μm]	Werkstoffpaarung	A [mm <sup>2</sup> ]	F <sub>h</sub> [kp]		n	
									Maximalwert	Mittelwert		
1	700	24	700	336	550	> 4	Inc.718/Inc.718	15	550	470 ± 60	3	1
2							1.4981/Inc.718	300	—	—	1	2
3						< 1	1.4981/1.4981	300	4880	3340 ± 890	3	
4								600	—	—	3	3
5				144	1100	> 4		48	880	610 ± 60	8	1 ; 14
6								48	—	—	2	1;2;14
7								48	—	—	2	1;3;14
8								48	3580	2710 ± 140	11	1;15
9				24				29	2000	1780 ± 110	5	1
10								150	3480	2930 ± 190	6	
11								300	3050	2530 ± 170	6	
12								600	3360	2690 ± 320	6	
13							Inc.718/Inc.718	11	169	157 ± 10	2	1
14								11	—	—	1	1;2
15							1.4981/Inc.718	300	—	—	1	2

Zeilen Nr.	Versuchsbedingungen							Versuchsergebnisse				Anmerkung (s.12.2)
	$T_s$ [°C]	$t_s$ [h]	$T_a$ [°C]	$t_a$ [h]	$F_a$ [kp]	max. ( $W+R_f$ ) [μm]	Werkstoffpaarung	A [mm <sup>2</sup> ]	$F_h$ [kp]		n	
								Maximalwert	Mittelwert			
1	700	24	700	24	1100	<1	1.4981/1.4981	300	5000	4470 ± 350	3	
2								600	4600	4380 ± 120	3	
3					550	>4		16	1640	1010 ± 190	6	1
4								150	670	425 ± 130	4	
5								150	—	—	2	3
6								300	370	320 ± 20	6	
7								600	965	690 ± 90	6	
8							Inc.718/Inc.718	12	106	100 ± 10	3	1
9							1.4981/Inc.718	300	—	—	1	2
10						<1	1.4981/1.4981	300	2450	1660 ± 400	3	
11								600	1260	1200 ± 30	3	
12				4	1100	>4	1.4301/1.4301	300	1610	1340 ± 100	4	
13							1.4981/1.4981	(13)	880	650 ± 130	3	1
14								(13)	—	—		1;2
15								150	1760	1550 ± 90	4	

Tabelle 3 Blatt 10

Ergebnisse der Untersuchungen zum Selbstverschweißen

Zeilen Nr.	Versuchsbedingungen							Versuchsergebnisse			Anmerkung (s.12.2)	
	T <sub>s</sub> [°C]	t <sub>s</sub> [h]	T <sub>a</sub> [°C]	t <sub>a</sub> [h]	F <sub>a</sub> [kp]	max. (W+R <sub>t</sub> ) [μm]	Werkstoffpaarung	A [mm <sup>2</sup> ]	F <sub>h</sub> [kp]			
									Maximalwert	Mittelwert	n	
1	700	24	700	4	1100	>4	1.4981/1.4981	300	1705	1500 ± 70	4	
2								600	1840	1550 ± 190	4	
3							1.4948/1.4948	27	1315	1200 ± 130	3	1
4								(96)	730	700 ± 20	3	11
5								(46)	1080	790 ± 140	3	12
6								300	685	660 ± 20	3	
7							1.4301/1.4948	300	—	1125 —	1	
8							1.4981/1.4948	300	—	1125 —	1	
9					550		1.4301/1.4301	150	920	720 ± 90	4	
10								300	740	690 ± 60	2	
11							1.4981/1.4981	13	740	500 ± 130	3	1
12								13	—	—	1	1;2
13								150	1170	940 ± 130	4	
14								300	1460	1140 ± 130	4	
15								600	1350	1190 ± 90	4	

Tabelle 3 Blatt 11

Ergebnisse der Untersuchungen zum Selbstverschweißen

Zeilen Nr.	Versuchsbedingungen							Versuchsergebnisse			Anmerkung (s.12.2)	
	$T_s$	$t_s$	$T_a$	$t_a$	$F_a$	max. ( $W+R_t$ )	Werkstoffpaarung	A [mm <sup>2</sup> ]	$F_h$ [kp]			
	[°C]	[h]	[°C]	[h]	[kp]	[μm]			Maximalwert	Mittelwert		n
1	700	24	700	4	550	>4	1.4948/1.4948	20	550	500 ± 60	2	1
2								20	—	—	1	1;2
3								(56)	500	450 ± 50	2	11
4								(21)	610	580 ± 40	2	12
5								300	590	530 ± 50	3	
6							1.4301/1.4948	150	—	775 —	1	
7							1.4981/1.4948	150	—	930 —	1	
8			550	168	1100		1.4301/1.4301	20	940	890 ± 50	2	1;17
9								150	1380	1260 ± 60	3	17
10								300	1020	930 ± 60	3	17
11							1.4981/1.4981	16	760	620 ± 60	4	1;17
12								150	870	740 ± 70	4	17
13								300	910	750 ± 60	4	17
14								600	860	600 ± 130	4	17
15							1.4948/1.4948	22	1150	1010 ± 110	4	1;17

Tabelle 3 Blatt 12

Ergebnisse der Untersuchungen zum Selbstverschweißen

Zeilen Nr.	Versuchsbedingungen								Versuchsergebnisse			Anmerkung (s.12.2)
	$T_s$	$t_s$	$T_a$	$t_a$	$F_a$	max. ( $W+R_t$ )	Werkstoffpaarung	A [mm <sup>2</sup> ]	$F_h$ [kp]		n	
	[°C]	[h]	[°C]	[h]	[kp]	[μm]			Maximalwert	Mittelwert		
1	700	24	550	168	1100	> 4	1.4948/1.4948	150	1950	1470 ± 320	3	17
2								300	1130	970 ± 80	3	17
3							1.4301/1.4981	150	—	990 —	1	17
4						< 1	1.4301/1.4301	220	2300	1290 ± 200	10	
5								220	—	—	2	2
6								220	—	—	2	3
7								440	465	320 ± 70	4	
8								440	—	—	1	2
9								880	685	620 ± 30	2	
10								880	—	—	3	3
11							1.4981/1.4981	220	630	440 ± 50	7	
12								440	—	295 —	1	
13								880	—	—	1	2
14							Inc.718/Inc.718	220	—	—	4	2
15							1.6770/1.6770	220	740	660 ± 40	3	

Zeilen Nr.	Versuchsbedingungen							Versuchsergebnisse			Anmerkung (s.12.2)	
	T <sub>s</sub> [°C]	t <sub>s</sub> [h]	T <sub>a</sub> [°C]	t <sub>a</sub> [h]	F <sub>a</sub> [kp]	max. (W+R <sub>t</sub> ) [μm]	Werkstoffpaarung	A [mm <sup>2</sup> ]	F <sub>h</sub> [kp]			n
									Maximalwert	Mittelwert		
1	700	24	550	168	1100	< 1	1.6770/1.6770	440	—	—	4	2
2								880	—	—	3	2
3							1.4301/1.4981	220	—	1100 —	1	
4							1.4981/Inc.718	220	—	—	1	3
5							Inc.718/1.6770	440	—	—	1	2
6							1.6770/1.4961	220	—	350 —	1	
7	550					> 4	1.4301/1.4301	—	—	—	2	1;2;18
8								300	—	—	3	2
9								600	—	—	3	2
10							1.4981/1.4981	—	—	—	10	1;2;18
11								150	310	300 ± 10	3	
12								150	—	—	7	2
13								300	460	450 ± 10	2	
14								300	—	—	8	2
15								600	470	390 ± 50	4	

Zeilen Nr.	Versuchsbedingungen								Versuchsergebnisse			Anmerkung (s.12.2)
	T <sub>s</sub> [°C]	t <sub>s</sub> [h]	T <sub>a</sub> [°C]	t <sub>a</sub> [h]	F <sub>a</sub> [kp]	max. (W+R <sub>f</sub> ) [μm]	Werkstoffpaarung	A [mm <sup>2</sup> ]	F <sub>h</sub> [kp]		n	
									Maximalwert	Mittelwert		
1	550	24	550	168	1100	>4	1.4981/1.4981	600	—	—	6	2
2							Inc.718/Inc.718	—	—	—	3	1;2;18
3							1.4301/1.4981	300	—	—	1	2
4							1.4981/Inc.718	300	—	—	1	2
5						<1	1.4301/1.4301	220	300	280 ± 20	2	
6								220	—	—	2	2
7								440	490	410 ± 70	3	
8								880	—	—	3	2
9							1.4981/1.4981	220	—	—	4	2
10								300	—	255 —	1	
11								300	—	—	2	2
12								440	—	205 —	1	
13								440	—	—	3	2
14								600	—	—	3	2
15								880	—	—	3	2

Zeilen Nr.	Versuchsbedingungen								Versuchsergebnisse			Anmerkung (s.12.2)
	T <sub>s</sub>	t <sub>s</sub>	T <sub>a</sub>	t <sub>a</sub>	F <sub>a</sub>	max. (W+R <sub>f</sub> )	Werkstoffpaarung	A [mm <sup>2</sup> ]	F <sub>h</sub> [kp]		n	
	[°C]	[h]	[°C]	[h]	[kp]	[μm]			Maximalwert	Mittelwert		
1	550	24	550	168	1100	<1	Inc.718/Inc.718	220	—	—	4	2
2							1.6770/1.6770	220	1930	1440 ± 270	4	
3								440	920	720 ± 120	4	
4								880	—	—	1	2
5							1.4301/1.4981	220	—	—	1	2
6								440	—	—	1	2
7								880	—	—	1	2
8							1.4301/Inc.718	220	—	—	1	2
9							1.4301/1.6770	220	—	250 —	1	
10								440	—	—	1	2
11							1.4981/Inc.718	220	—	—	1	2
12							1.4981/1.6770	440	—	—	1	2
13								880	—	—	1	2
14					550	>4	1.4981/1.4981	—	—	—	6	1;2;18
15								150	—	—	6	2

Zeilen Nr.	Versuchsbedingungen							Versuchsergebnisse			Anmerkung (s.12.2)	
	T <sub>s</sub> [°C]	t <sub>s</sub> [h]	T <sub>a</sub> [°C]	t <sub>a</sub> [h]	F <sub>a</sub> [kp]	max. (W+R <sub>f</sub> ) [μm]	Werkstoffpaarung	A [mm <sup>2</sup> ]	Maximalwert	F <sub>h</sub> [kp] Mittelwert		n
1	550	24	550	168	550	> 4	1.4981/1.4981	300	—	—	6	2
2								600	—	—	6	2
3							Inc.718/Inc.718	—	—	—	3	1;2;18
4							1.4981/Inc.718	300	—	—	1	2
5						< 1	1.4981/1.4981	300	—	—	3	2
6								600	—	—	3	2
7	—	—	700		1100		1.4301/1.4301	220	2560	2320 ± 490	4	19
8	—	—						220	—	—	1	3;19
9	—	—						440	4480	3140 ± 600	5	19
10	—	—						880	—	2680 —	1	19
11	—	—					1.4981/1.4981	220	4960	4140 ± 470	4	19
12	—	—						440	6820	2590 ± 1080	5	19
13	—	—						880	8560	6780 ± 990	3	19
14	—	—					Inc.718/Inc.718	220	435	360 ± 40	3	19
15	—	—						220	—	—	1	3;19

Zeilen Nr.	Versuchsbedingungen								Versuchsergebnisse			Anmerkung (s.12.2)
	T <sub>s</sub> [°C]	t <sub>s</sub> [h]	T <sub>a</sub> [°C]	t <sub>a</sub> [h]	F <sub>a</sub> [kp]	max. (W+R <sub>f</sub> ) [μm]	Werkstoffpaarung	A [mm <sup>2</sup> ]	F <sub>h</sub> [kp]		n	
									Maximalwert	Mittelwert		
1	—	—	700	168	1100	<1	1.6770/1.6770	220	7840	6900 ± 970	2	19
2	—	—						440	5880	5350 ± 440	3	19
3	—	—					1.4301/1.4981	220	—	—	1	2;19
4	—	—					1.4981/Inc.718	220	—	—	1	2;19
5	—	—					Inc.718/1.6770	440	—	1260 —	1	19
6	—	—					1.4301/1.4301	220	4450	3660 ± 190	11	20
7	—	—						440	3250	2200 ± 350	5	20
8	—	—						880	3300	1540 ± 380	6	20
9	—	—					1.4981/1.4981	220	2810	2360 ± 240	8	20
10	—	—						440	—	2500 —	1	20
11	—	—						880	—	1090 —	1	20
12	—	—					Inc.718/Inc.718	220	705	570 ± 140	2	20
13	—	—						220	—	—	2	3;20
14	—	—					1.6770/1.6770	220	—	3900 —	1	20
15	—	—						440	—	5460 —	1	20

Tabelle 3 Blatt 18

Ergebnisse der Untersuchungen zum Selbstverschweißen

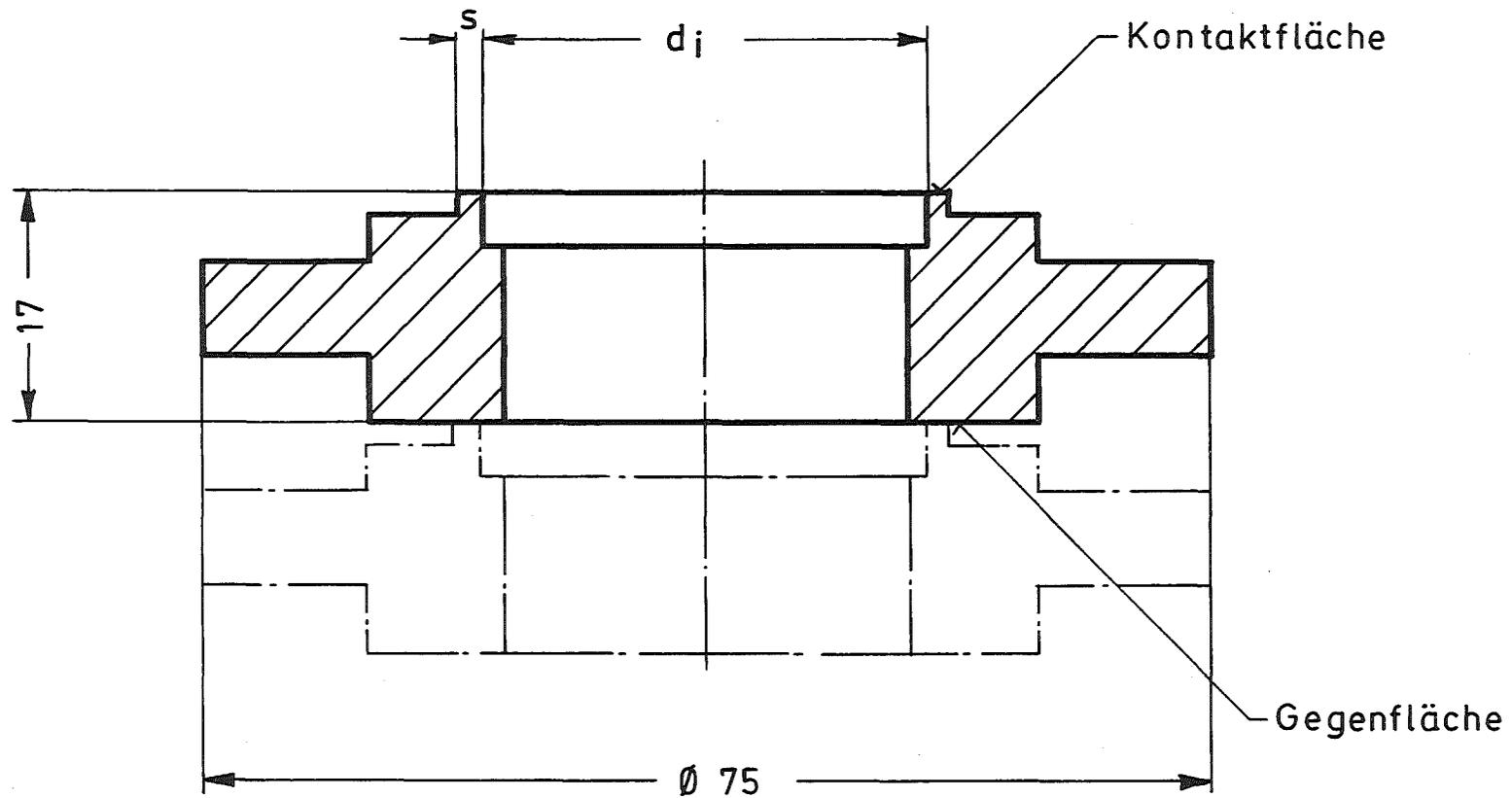
Zeilen Nr.	Versuchsbedingungen								Versuchsergebnisse			Anmerkung (s.12.2)
	T <sub>s</sub> [°C]	t <sub>s</sub> [h]	T <sub>a</sub> [°C]	t <sub>a</sub> [h]	F <sub>a</sub> [kp]	max. (W+R <sub>t</sub> ) [μm]	Werkstoffpaarung	A [mm <sup>2</sup> ]	F <sub>h</sub> [kp]		n	
									Maximalwert	Mittelwert		
1	—	—	700	168	1100	<1	1.6770/1.6770	880	—	8100 —	1	20
2	—	—					1.4301/Inc.718	220	—	—	1	2;20
3	—	—					1.4981/1.6770	220	—	5400 —	1	20
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												
13												
14												
15												

Versuchsbedingungen	Paarung	Haftkraft $F_h$ [kp]			Zeitstandsfestigkeit $\sigma_{B/10000}$ [kp/mm <sup>2</sup> ] bei 600°	
		max.	Mittelwert	n		
$F_d = 1100$ kp $T_s = 700^\circ$ C $t_s = 24$ h $T_d = 700^\circ$ C $t_d = 168$ h $A = 220$ mm <sup>2</sup> $\max.(W+R_t) < 1$ $\mu$ m	1. 6770/1.6770	<b>6910</b>	6730 ± 100	4	<b>5</b>	1)
	1. 4301/1.4301	<b>3720</b>	2880 ± 160	7	<b>12,4</b>	2)
	1. 4981/1.4981	<b>3530</b>	2390 ± 370	4	<b>18,5</b>	3)
	Inc. 718/Inc. 718	<b>810</b>	585 ± 80	4	<b>66</b>	4)
	1) Werkstoffblatt von Phoenix-Rheinrohr AG 2) Report NAA SR 4509 3) Werkstoffblatt von Mannesmann AG 4) DEW-Druckschrift 1123/2					

GFK  
IRE

Untersuchungen zum Selbstverschweißen  
 Vergleich zwischen Haftkraft und  
 einer repräsentativen Festigkeit

Tab. 4

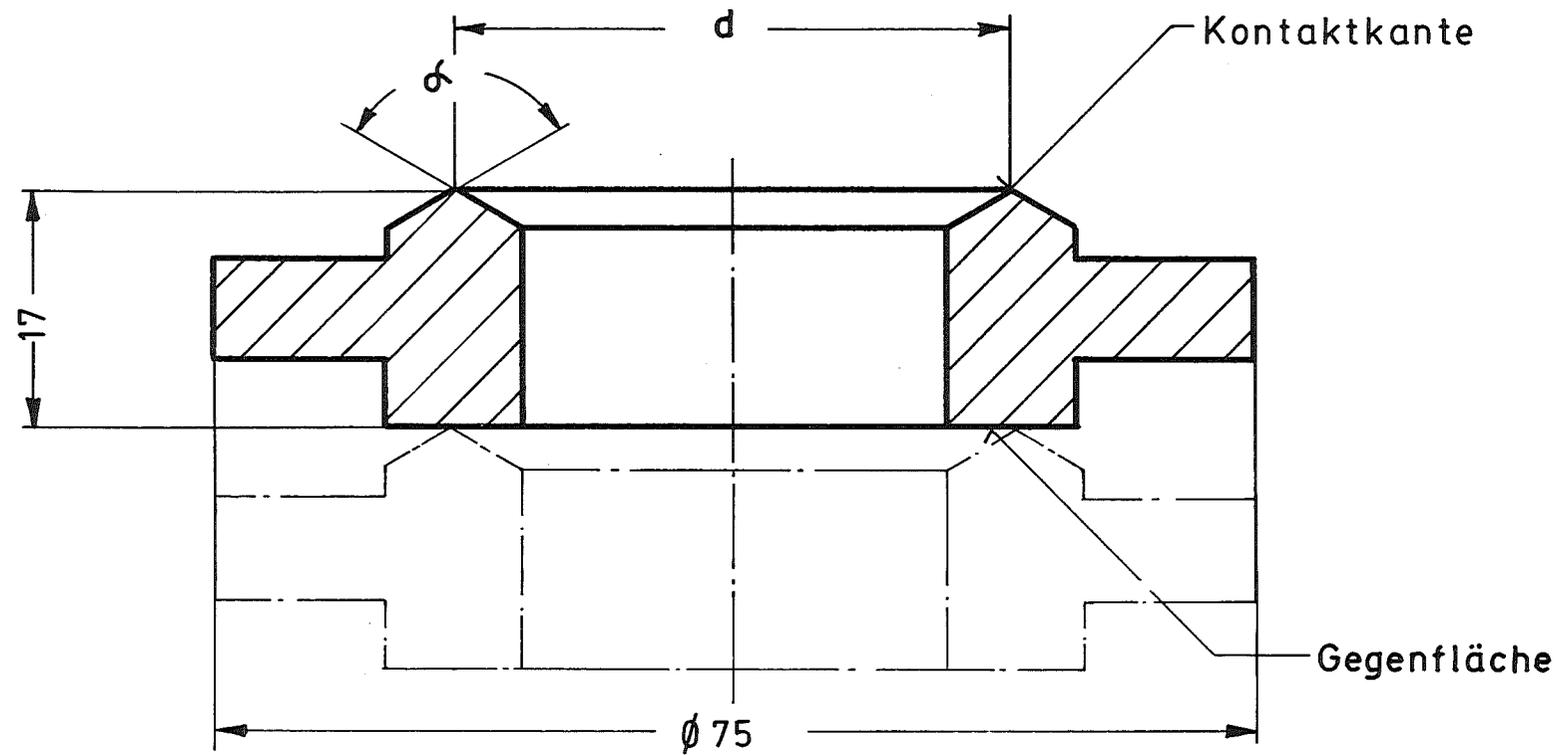


$d_j = 33 \text{ mm}$   
 $1,4 \leq s \leq 7 \text{ mm}$

GFK  
IRE

Untersuchungen zum Selbstverschweißen  
 Hauptsächlich eingesetzte  
 Probenform

Abb. 1

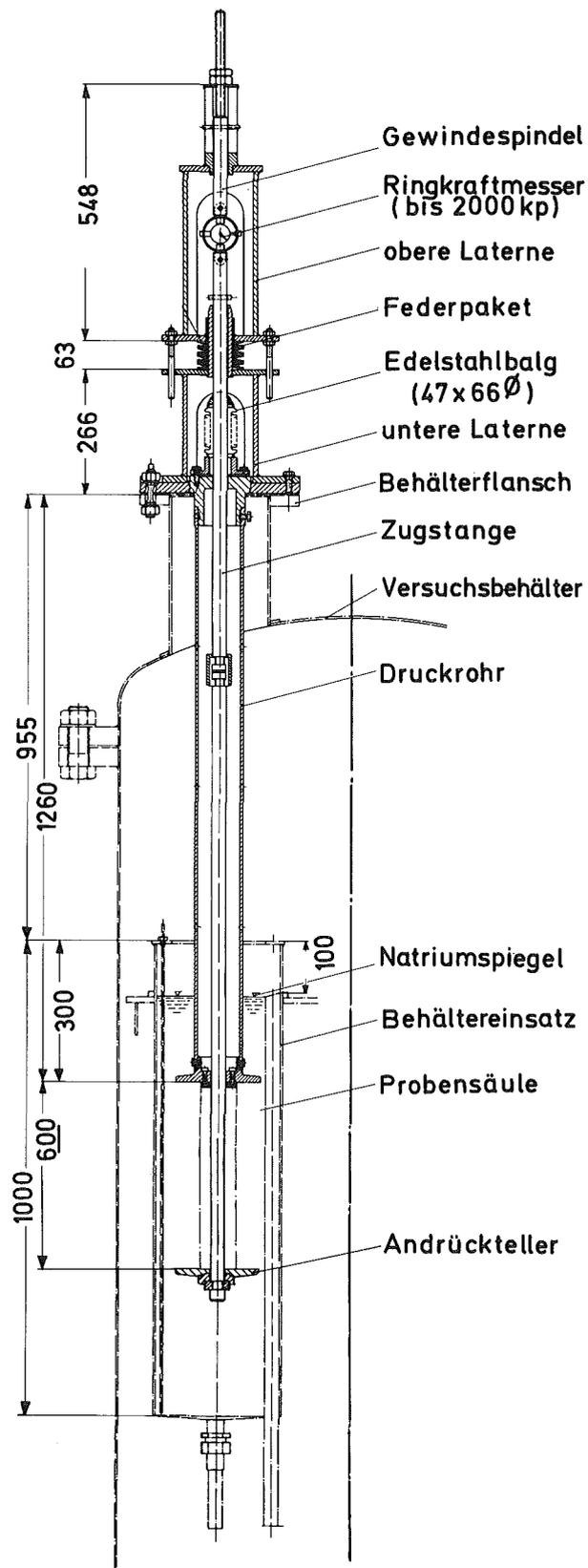


$d = 40 \text{ mm}$   
 $120^\circ < \alpha < 179^\circ$

GFK  
 IRE

Untersuchungen zum Selbstverschweißen  
 Probe mit Kontaktkante

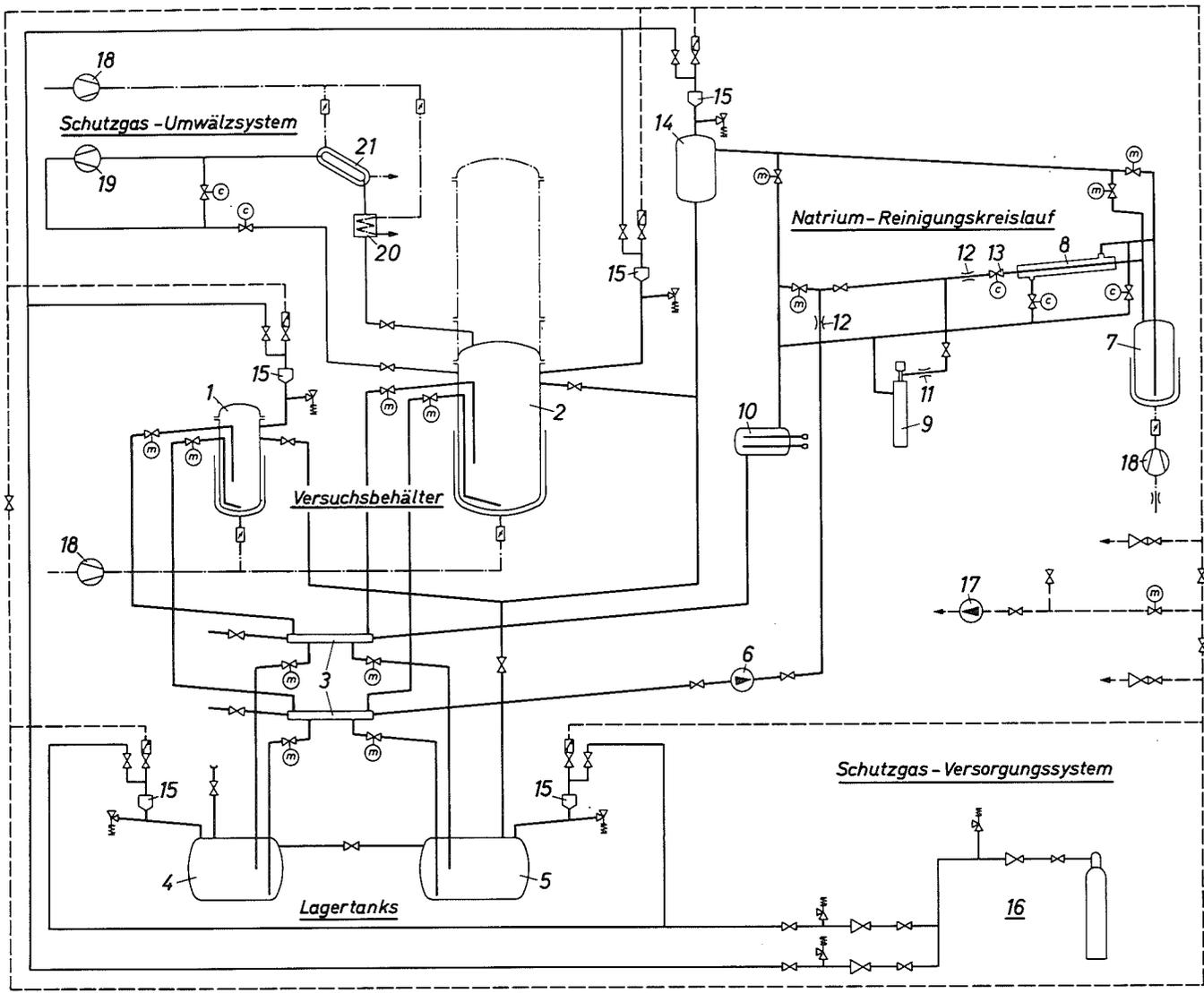
Abb. 2



GFK  
IRE

Untersuchungen zum Selbstverschweißen  
Versuchsvorrichtung

Abb. 3



— Natrium  
 — Schutzgas  
 - - - Vakuum- und Abföhrung  
 - - - K6hlluft

- 1 kleiner Versuchsbehälter
- 2 gro6er Versuchsbehälter
- 3 Sammler
- 4 kleiner Lagertank
- 5 gro6er Lagertank
- 6 elektromagnetische Pumpe
- 7 Kaltfalle
- 8 Wärmetauscher Natrium | Natrium
- 9 Pluggingmeter
- 10 Durchlaufheizer
- 11 permanentmagnetischer Durchfl6u6messer
- 12 elektromagnetischer Durchfl6u6messer
- 13 Regelventil
- 14 6berlaufbehälter
- 15 Dampfalle
- 16 Schutzgas - Versorgungssystem
- 17 Vakuumpumpe
- 18 K6hlluft - Gebläse
- 19 Schutzgas - Gebläse
- 20 Wärmetauscher Schutzgas | Luft
- 21 Versuchseinsatz

GFK  
IRE

Fließschema der Natrium-Behälter-Versuchsanlage (NABEA)

Abb. 4

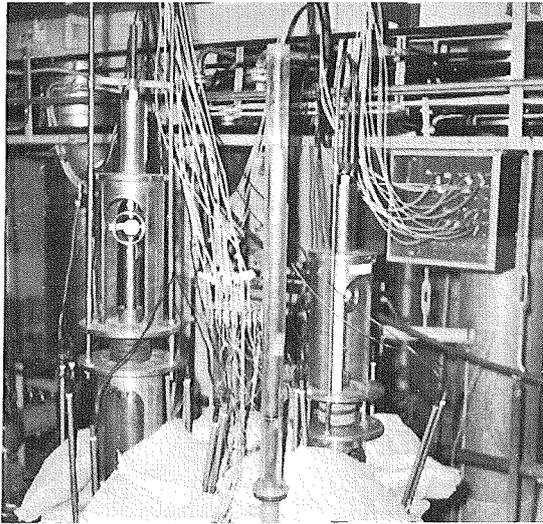


Bild 1: Zwei in den Versuchsbehälter eingebaute Versuchsvorrichtungen während eines Versuchs

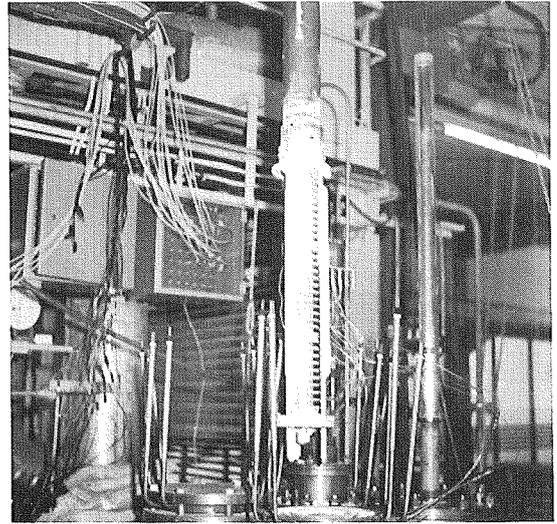


Bild 2: Ausbau einer Versuchsvorrichtung

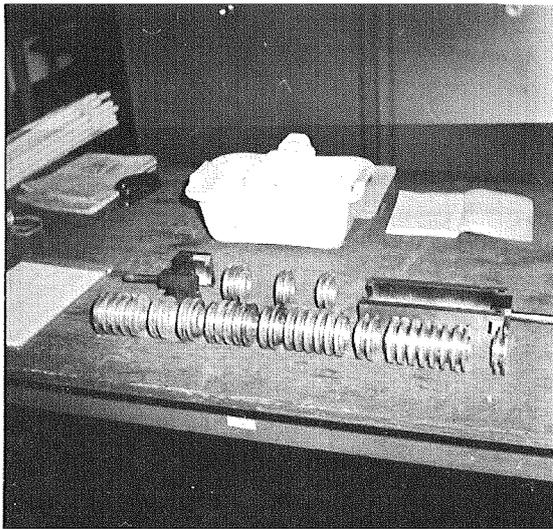


Bild 3: Nach einem Versuch demontierte Probensäule mit Zerreißvorrichtung

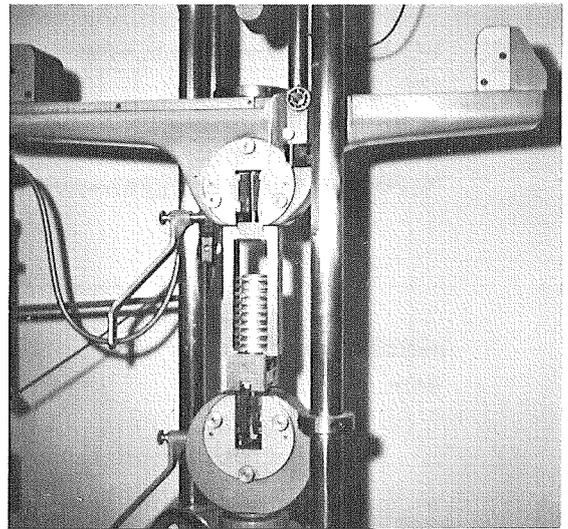
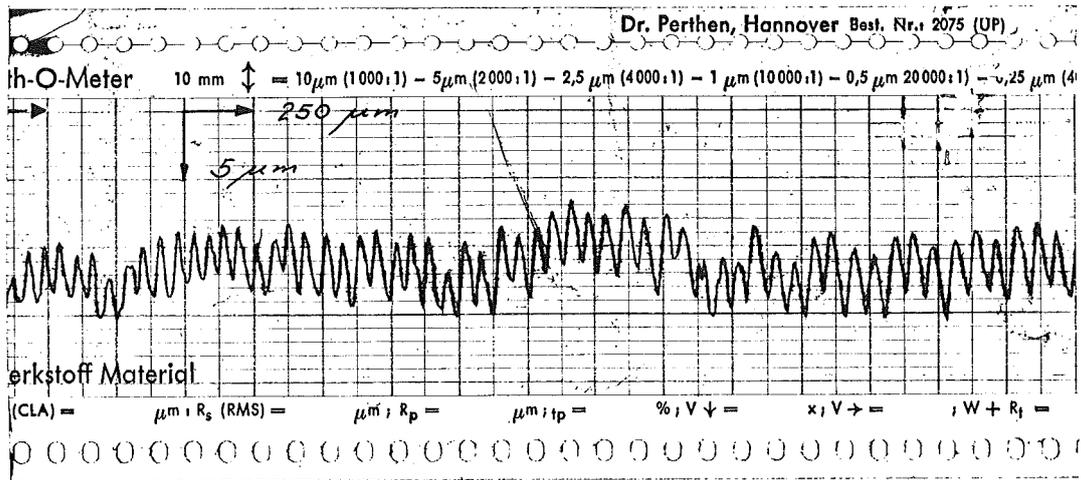
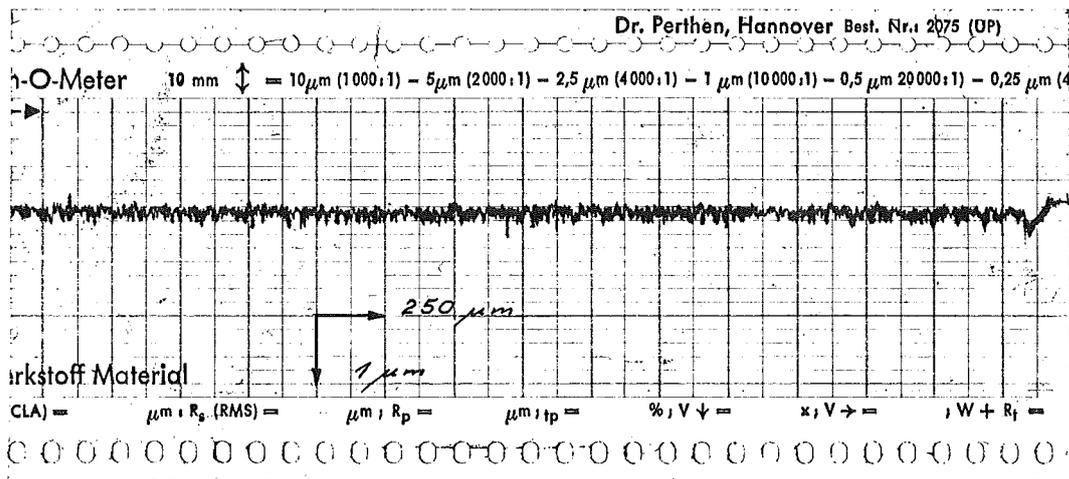


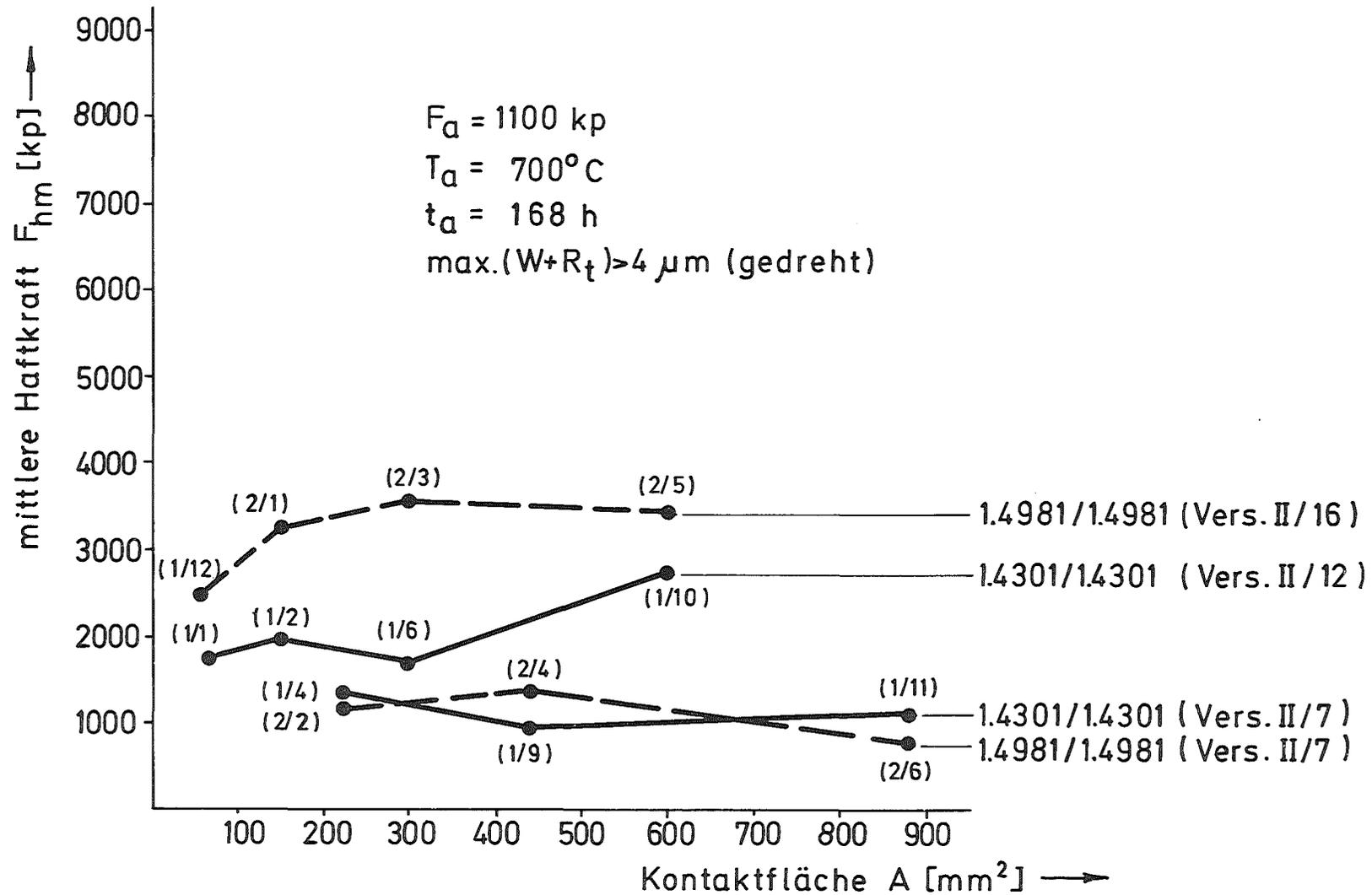
Bild 4: Zerreißvorgang einer Paarung aus einem Säulenstück mit einer Zerreißmaschine



gedrehte Fläche



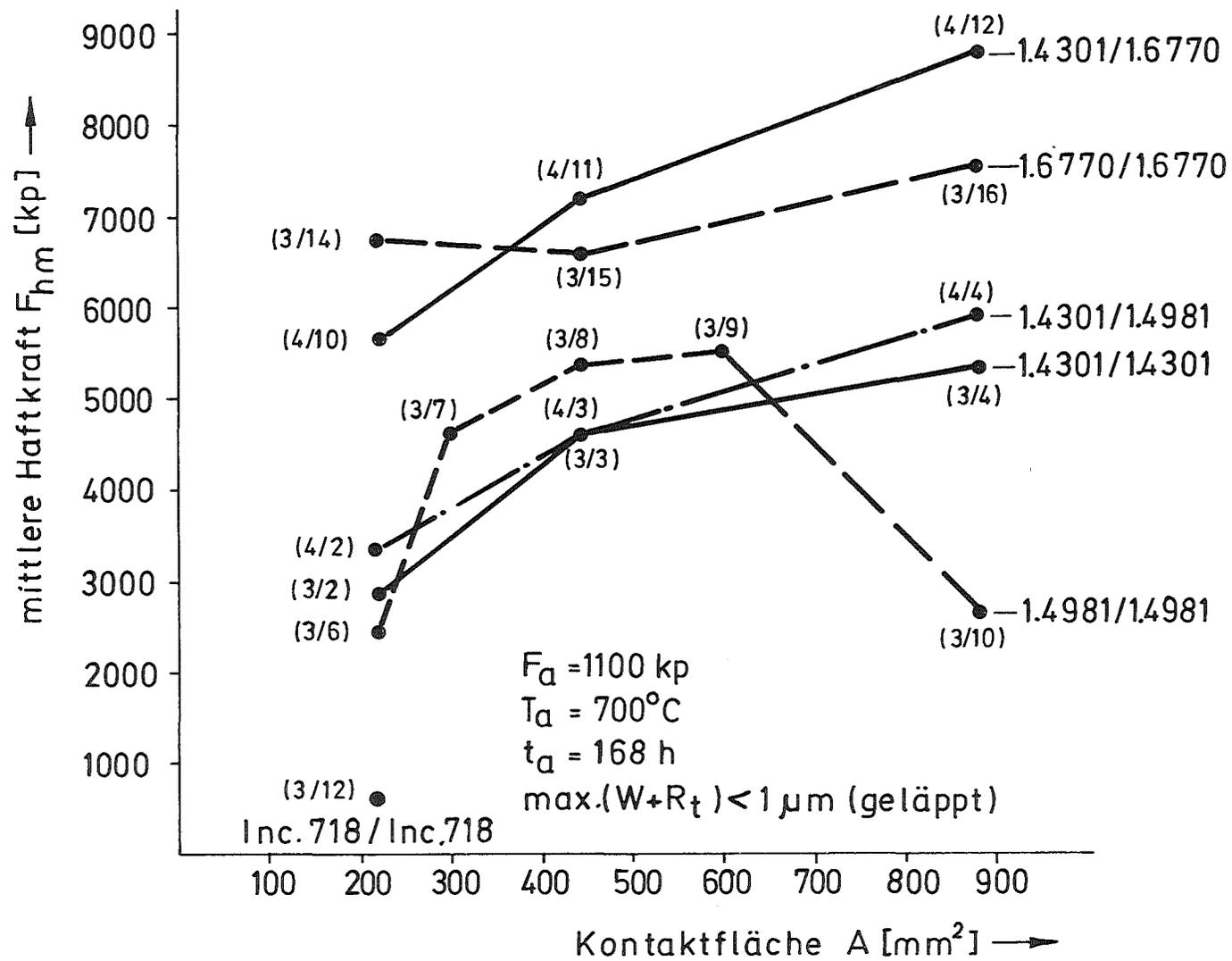
geläppte Fläche



GFK  
IRE

Untersuchungen zum Selbstverschweißen  
 Einfluß der Kontaktfläche  
 gedrehter Proben auf die Haftkraft

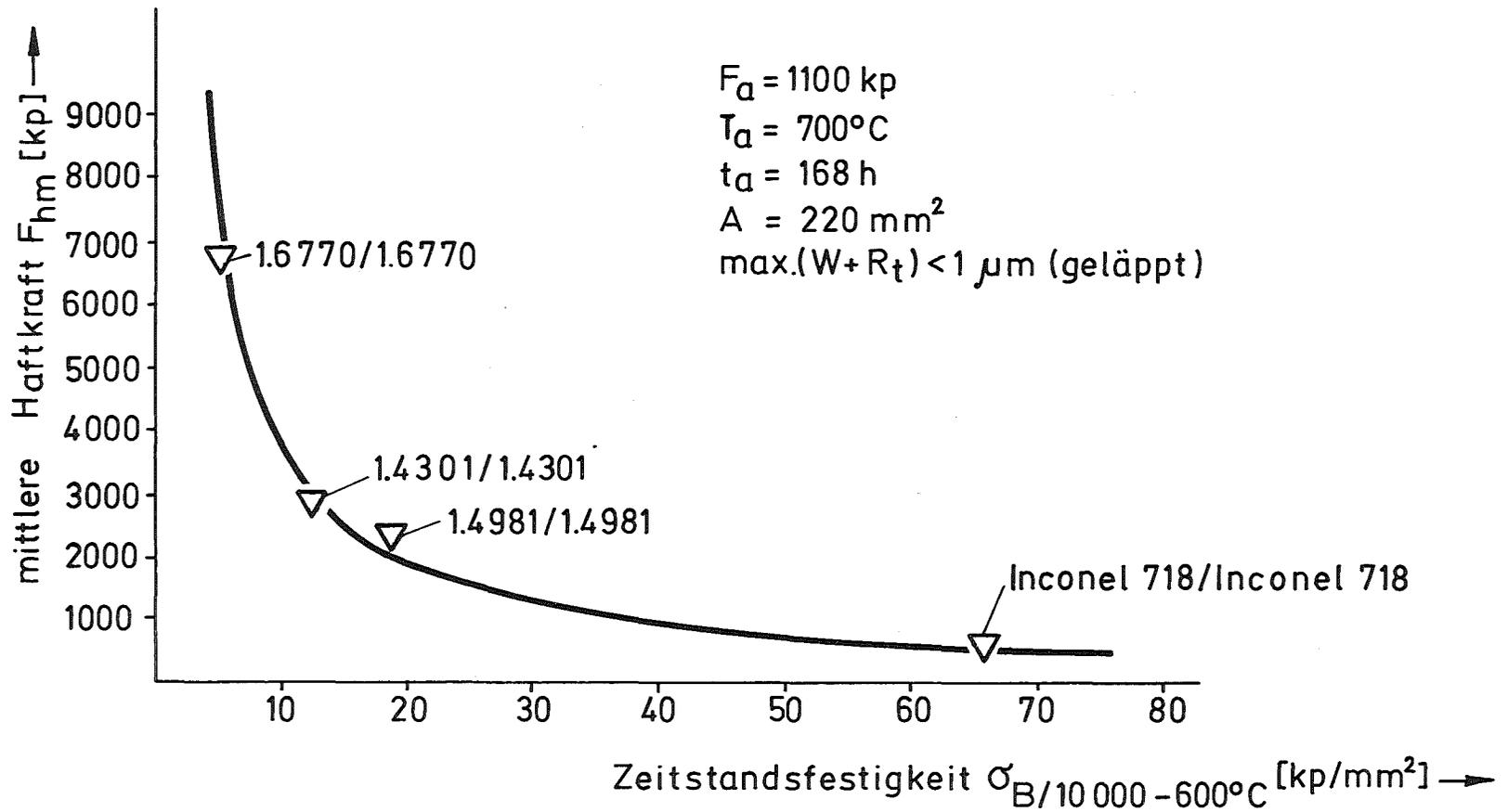
Abb.7



GFK  
IRE

Untersuchungen zum Selbstverschweißen  
Einfluß der Kontaktfläche geläppter  
Proben auf die Haftkraft

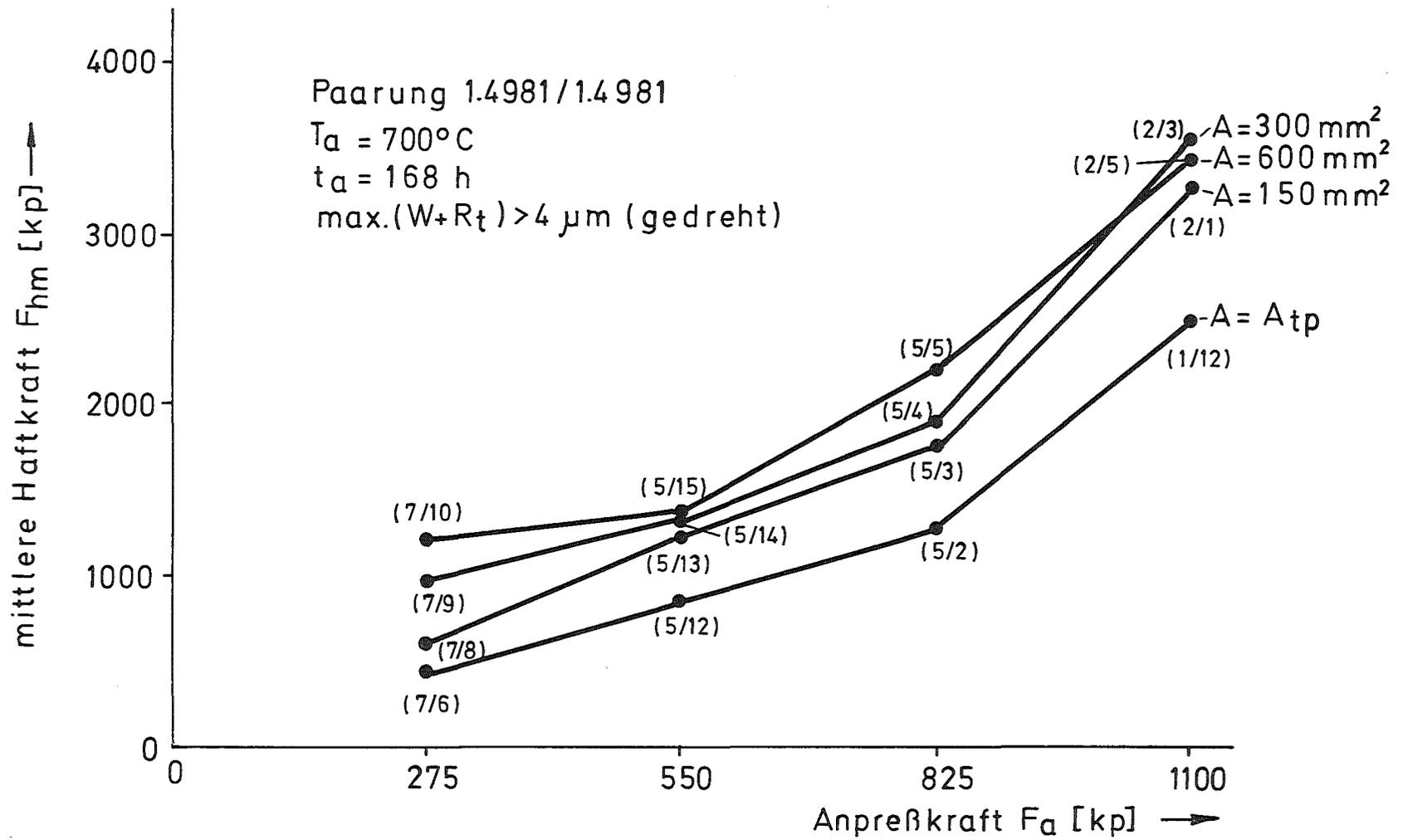
Abb. 8



GFK  
IRE

Untersuchungen zum Selbstverschweißen  
 Vergleich zwischen Haftkraft und  
 einer repräsentativen Festigkeit

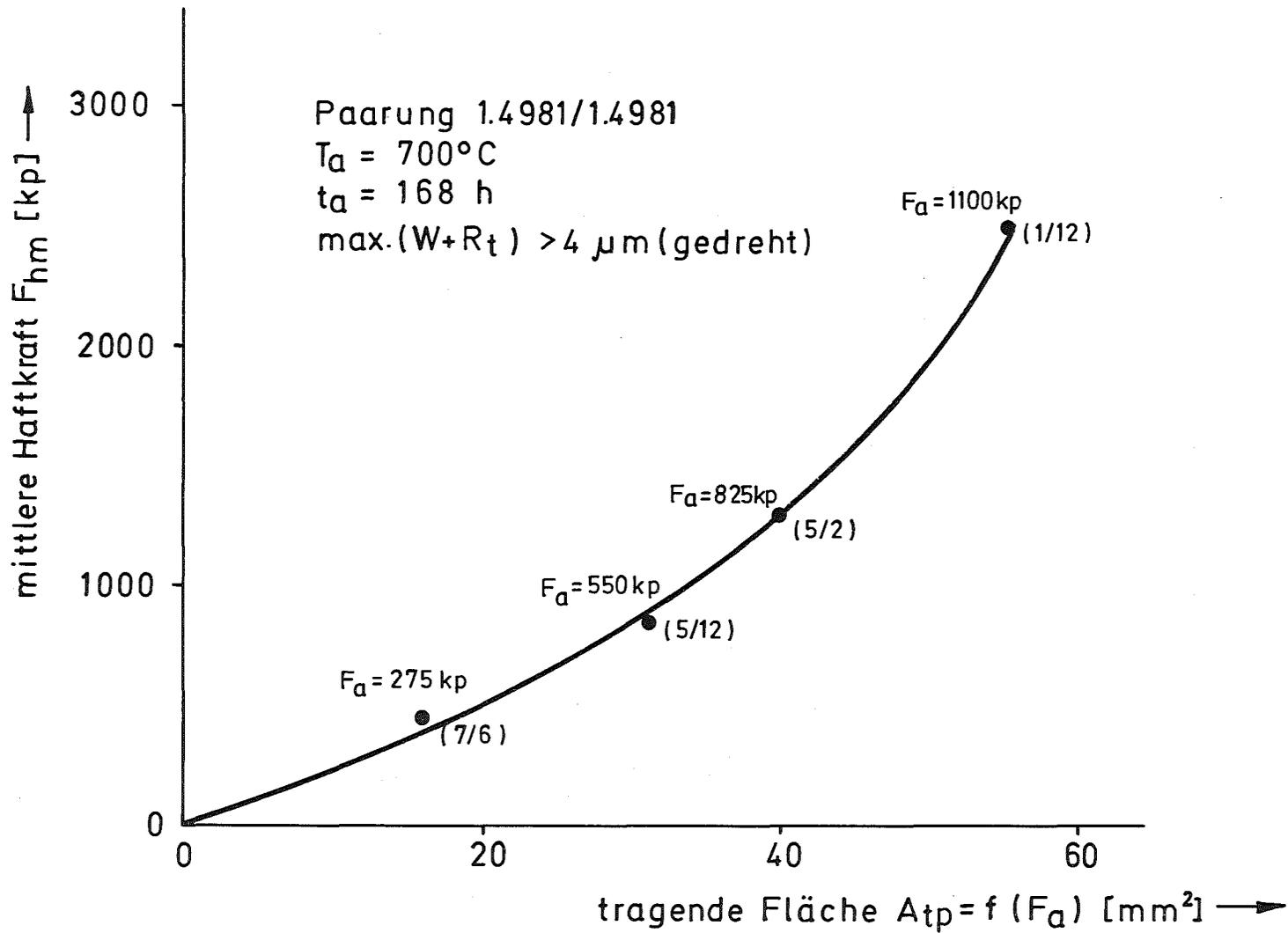
Abb. 9



GFK  
IRE

Untersuchungen zum Selbstverschweißen  
 Einfluß der Anpreßkraft auf  
 die Haftkraft

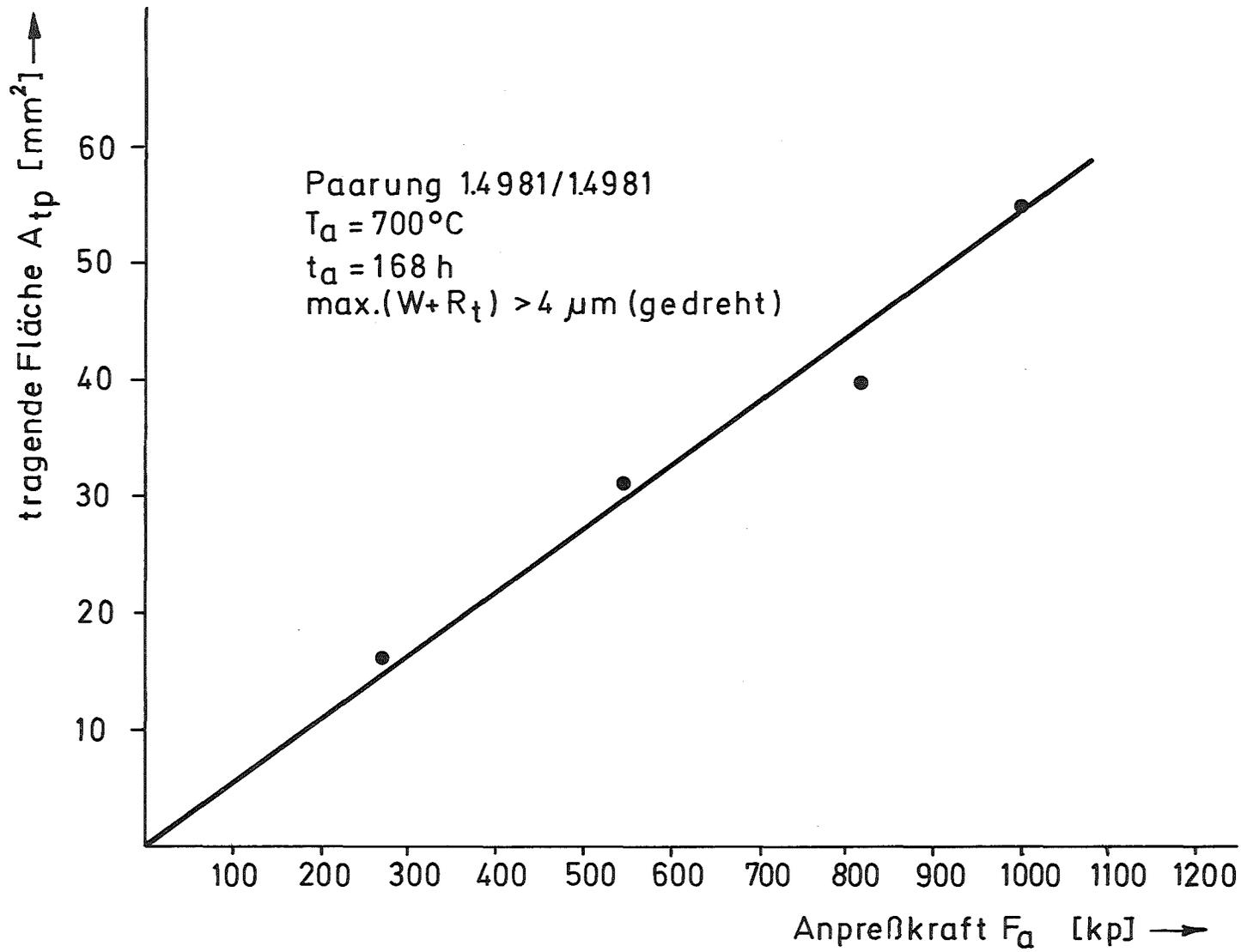
Abb. 10



GFK  
IRE

Untersuchungen zum Selbstverschweißen  
 Einfluß der tragenden Fläche  $A_{tp}(F_a)$   
 auf die Haftkraft

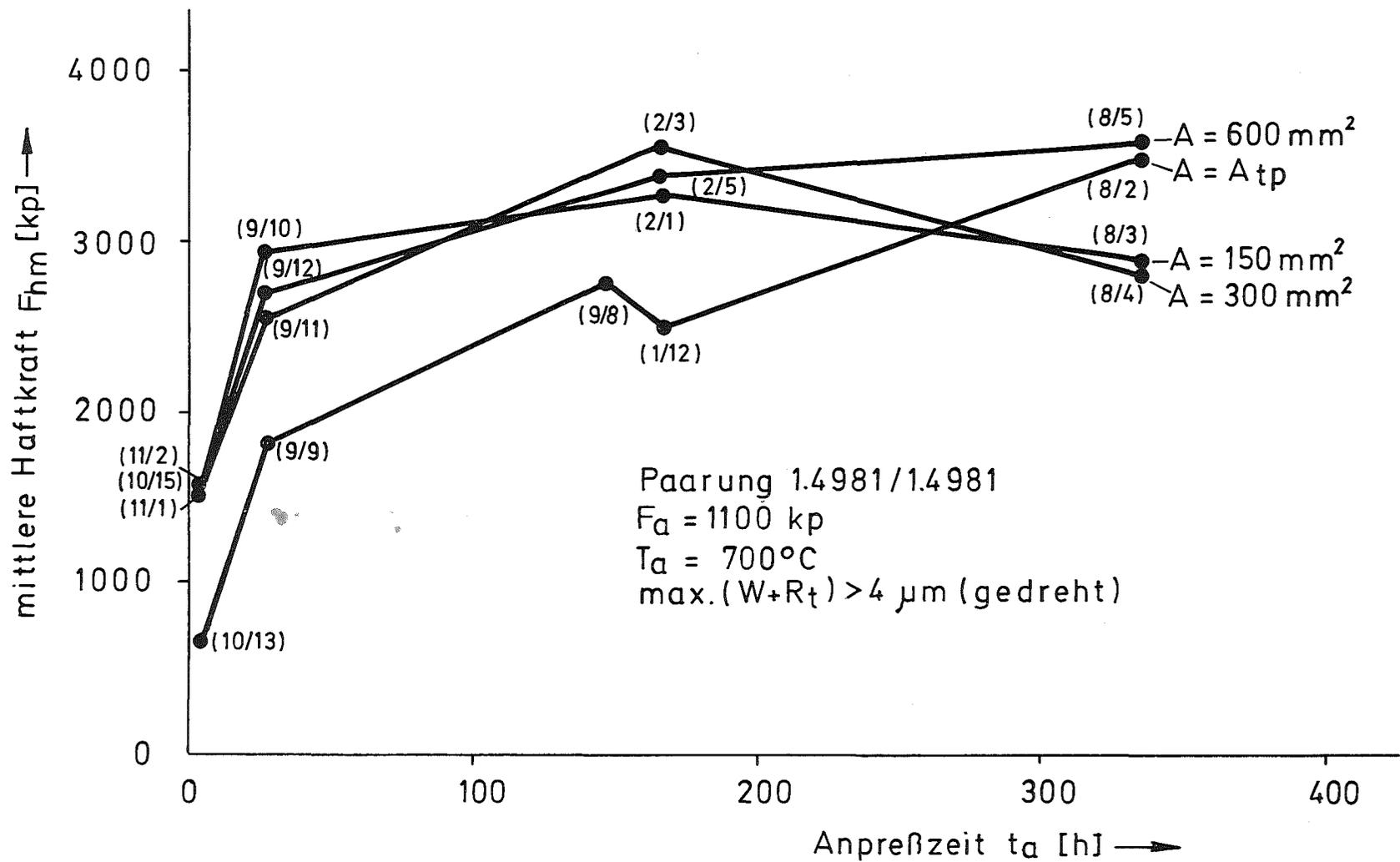
Abb. 11



GFK  
IRE

Untersuchungen zum Selbstverschweißen  
 Einfluß der Anpreßkraft  
 auf die tragende Fläche

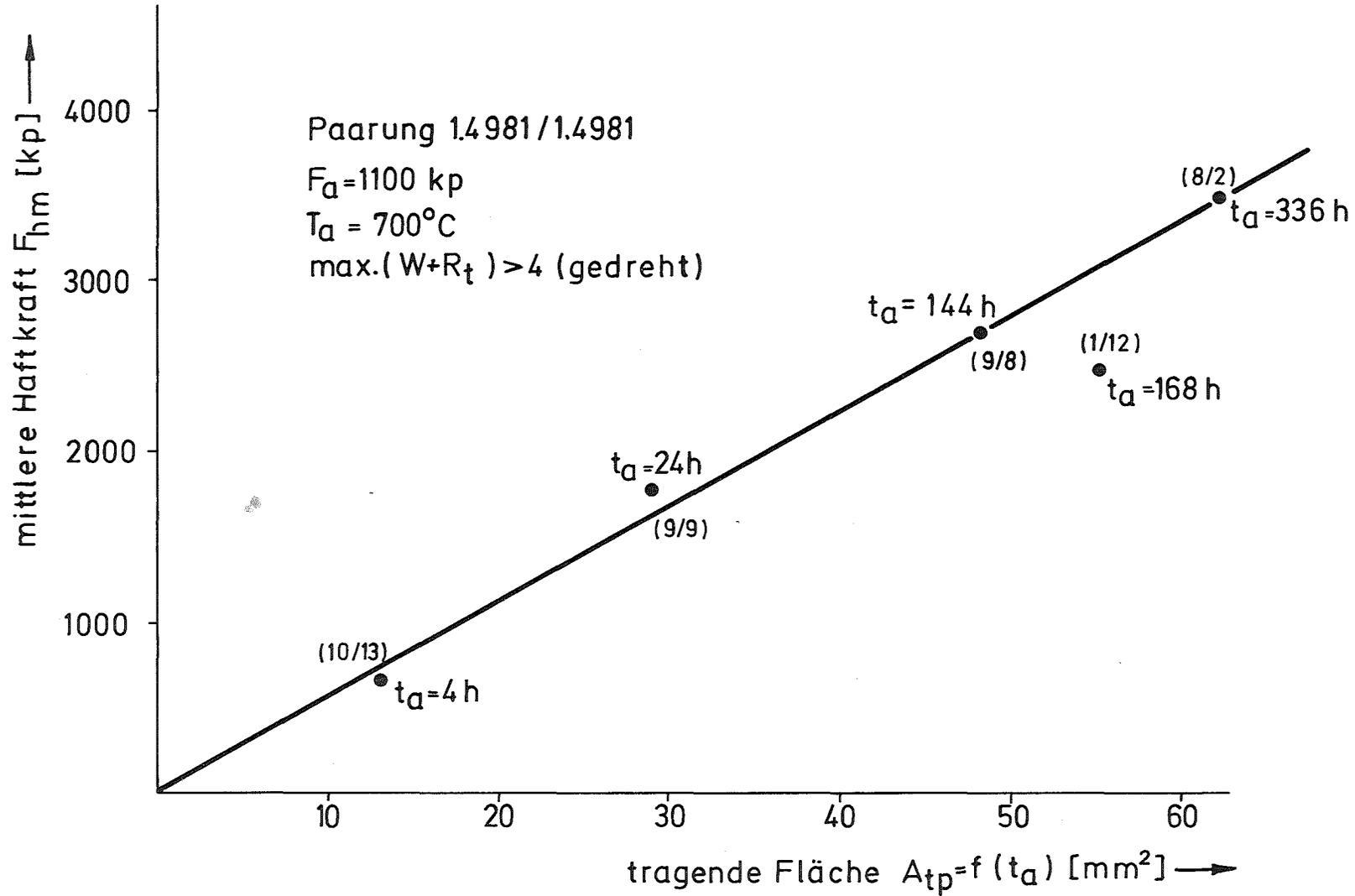
Abb. 12



GFK  
IRE

Untersuchungen zum Selbstverschweißen  
Einfluß der Anpreßzeit auf  
die Haftkraft

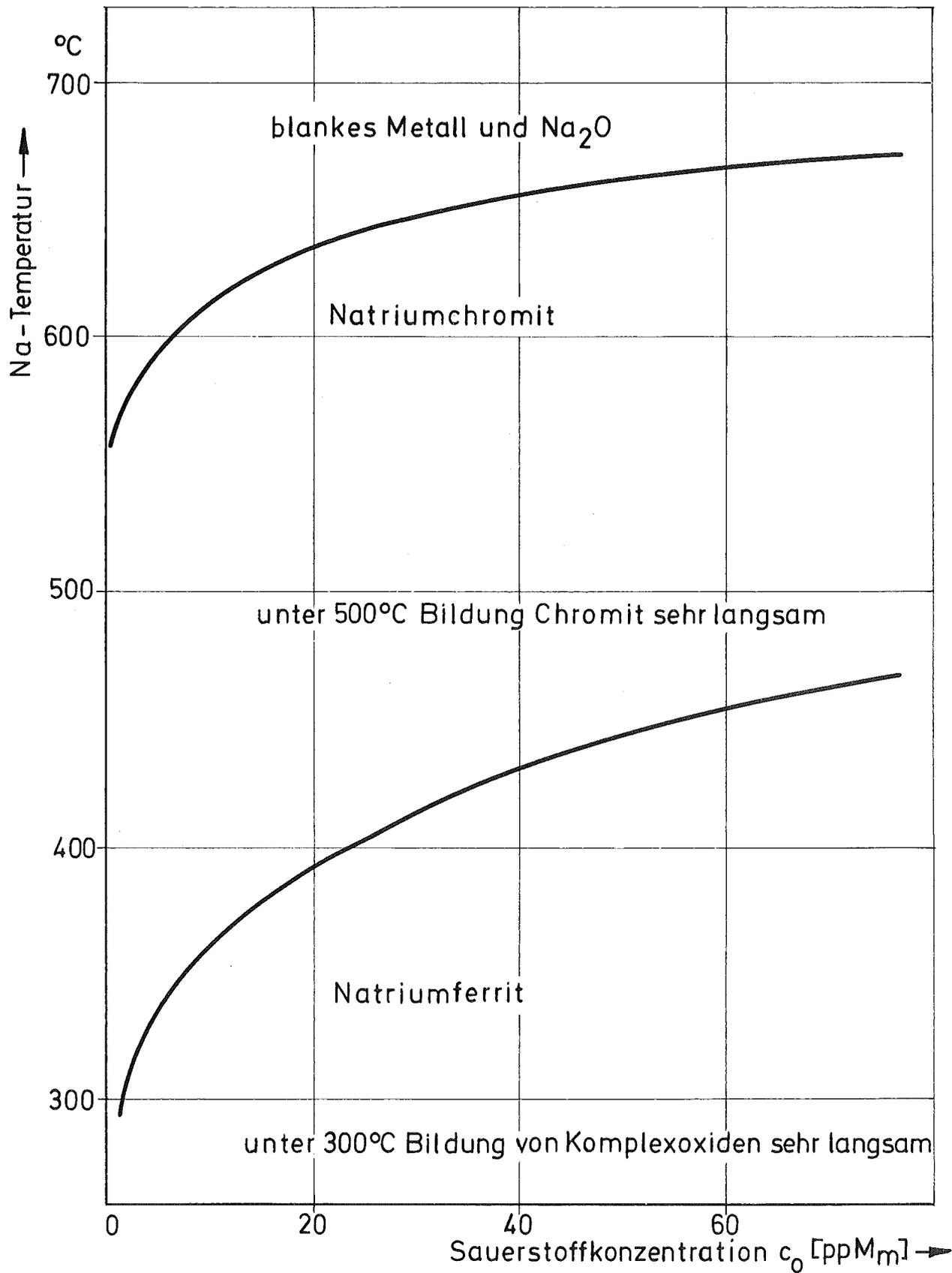
Abb. 13



GFK  
IRE

Untersuchungen zum Selbstverschweißen  
 Einfluß der tragenden Fläche  $A_{tp}(t_a)$   
 auf die Haftkraft

Abb.14

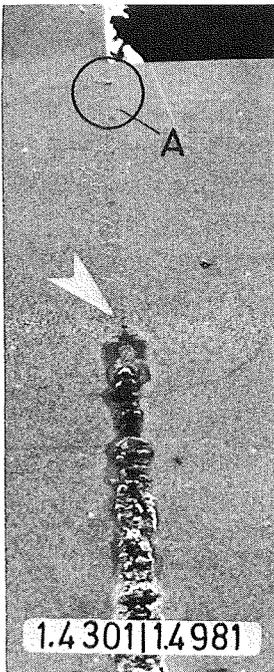


GFK  
IRE

Existenzbereiche der Komplexoxide als  
Funktion der Temperatur und Sauerstoff-  
konzentration im Natrium [ 5 ]

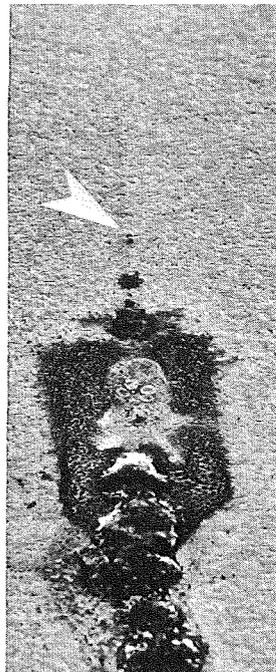
Abb. 15

Bild 1



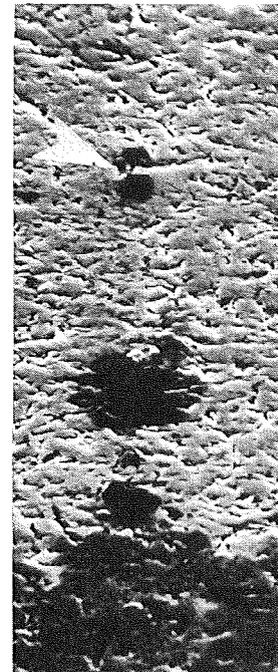
57:1

Bild 2



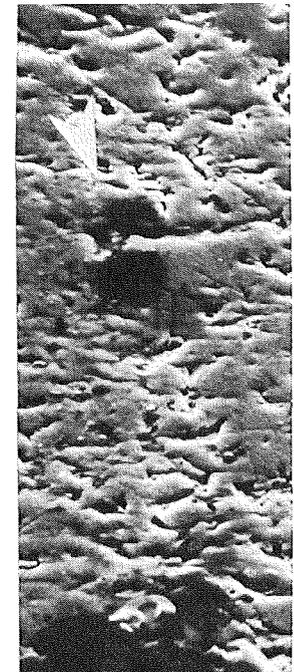
225:1

Bild 3



1050:1

Bild 4



2250:1

Bild 5



500:1

Bild 1-4 mit einem Elektronen-  
rastermikroskop auf-  
genommen.

Bild 5 Schliffbild der Stelle „A“  
(spiegelverkehrt)

Paarung 1.4301/1.4981

$T_a = 700^\circ\text{C}$

$t_a = 168 \text{ h}$

$F_a = 1100 \text{ kp}$

$A = 800 \text{ mm}^2$

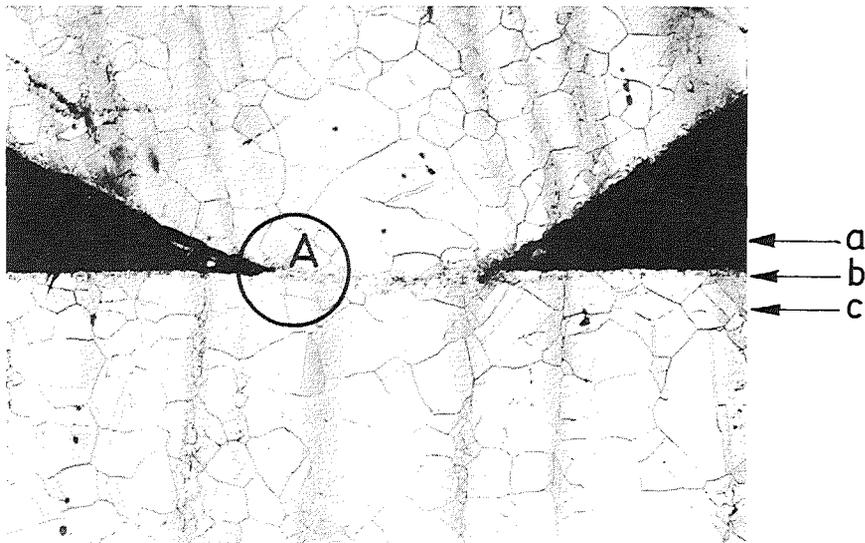
$\text{max. } (W + R_t) < 1 \mu\text{m (geläppt)}$

$F_h > 8500 \text{ kp}$

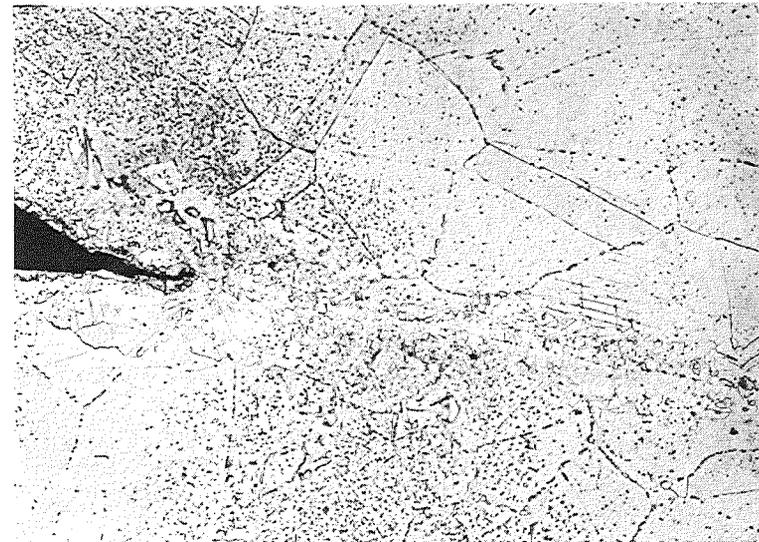
GFK  
IRE

Untersuchungen zum Selbstverschweißen  
Aufnahmen einer  
verschweißten Kontaktstelle

Abb.16



100fach



Ausschnitt "A"

500fach

mittlere Mikrohärtigkeit  $HV_{0,025}$ , gemessen  
im Bereich der Kontaktstelle  
in Verlängerung der Linien a; b und c

a . . . . 184

b . . . . 247

c . . . . 196

Paarung 1.4981/1.4981

$T_d = 700^\circ\text{C}$

$t_d = 336\text{ h}$

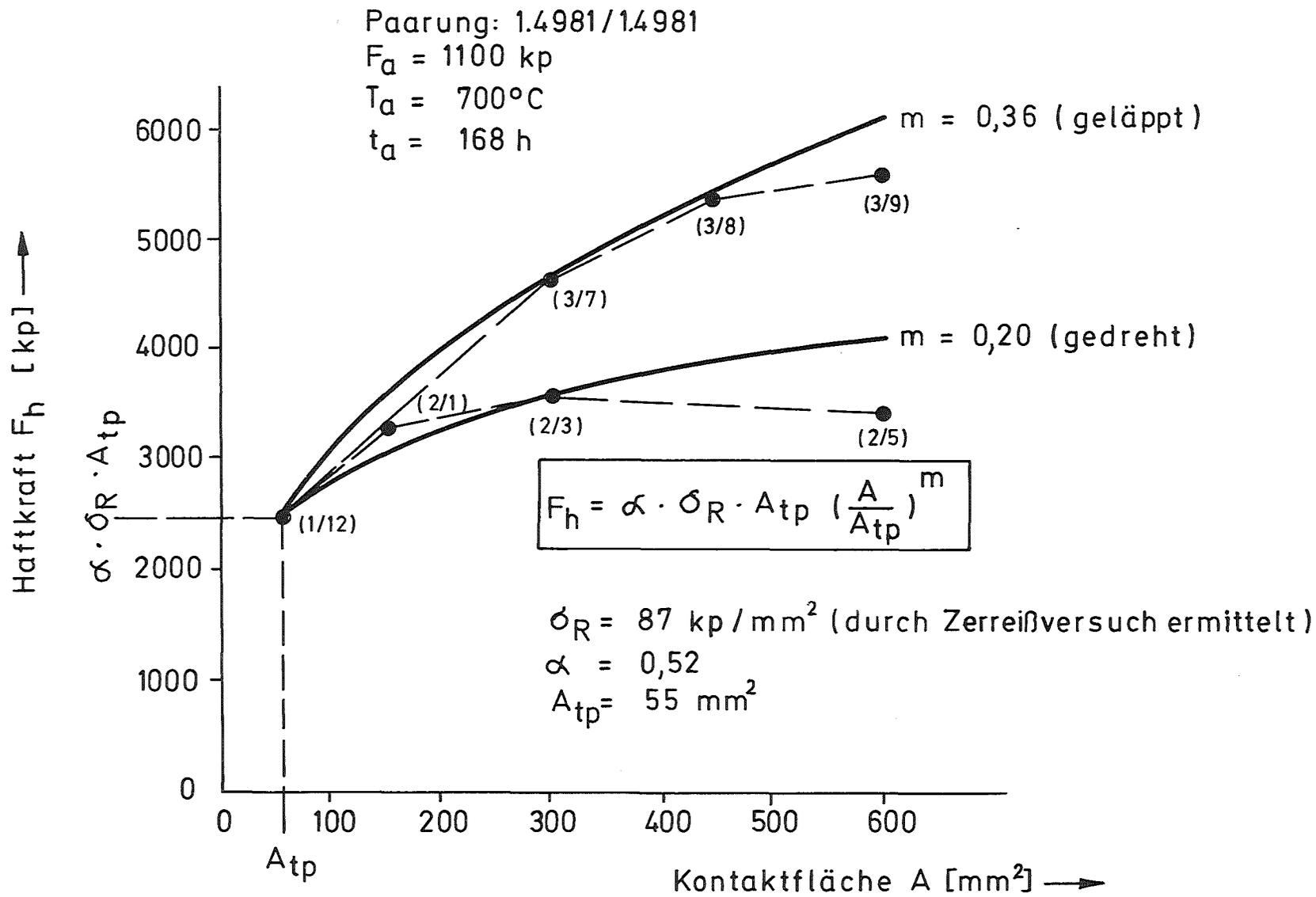
$F_d = 550\text{ kp}$

$\max.(W+R_t) > 4\ \mu\text{m}$  (gedreht)

**GFK  
IRE**

Untersuchungen zum Selbstverschweißen  
**Metallografie einer verschweißten Paarung**  
(Kontaktkante/Gegenfläche)

**Abb. 17**



GFK  
IRE

Untersuchungen zum Selbstverschweißen  
 Haftkraft als Funktion der  
 Kontaktfläche

Abb. 18