

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM  
KARLSRUHE**

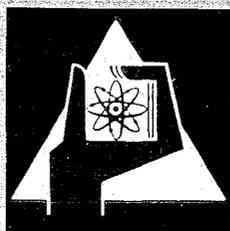
April 1969

KFK 973  
EUR 4174 d

Institut für Reaktorbauelemente

Das Verschleißverhalten von Stählen und Legierungen  
in flüssigem Natrium

E. Wild, K. Mack, H. Hoffmann



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.  
KARLSRUHE



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

April 1969

KFK 973

EUR 4174 d

Institut für Reaktorbauelemente

Das Verschleißverhalten von Stählen und  
Legierungen in flüssigem Natrium.

von

E. Wild

K. Mack

H. Hoffmann

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG MBH., KARLSRUHE

---

Diese Arbeit wurde im Rahmen der Assoziation zwischen der Europäischen Atomgemeinschaft und der Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe auf dem Gebiet der schnellen Reaktoren durchgeführt.



Inhalt:

Die Auswahl von Materialien für Lager und Führungen von Bauelementen natriumgekühlter Reaktoren setzt die Kenntnis des Verschleißverhaltens der Materialpaarungen voraus. Dieses wurde in der vorliegenden Arbeit für 36 verschiedene Materialkombinationen bei gleichen Betriebsbedingungen untersucht. Als Modellgeometrie dienten drei zylindrische Proben, die auf einer Ringscheibe oszillierende Bewegungen ausführten. Die Untersuchungen wurden in einem Prüfstand mit kontinuierlicher Natriumströmung durchgeführt. Die favorisierten Werkstoffpaarungen werden in weitergehenden Parameteruntersuchungen getestet, wobei dem Einfluß von Temperatur, Belastung, Gleitgeschwindigkeit und Oxidgehalt des Natriums besondere Aufmerksamkeit geschenkt wird.

Inhaltsverzeichnis:

1. Einleitung
2. Aufgabenstellung
3. Werkstoffauswahl
4. Versuchseinrichtung
  - 4.1 Versorgungs- und Reinigungs-  
kreislauf
  - 4.2 Teststrecke für oszillierende  
Bewegungsart
  - 4.3 Geometrie der Gleitpaarung
5. Meßverfahren und -Einrichtungen
  - 5.1 Verschleißrate
  - 5.2 Längenänderung der Proben
  - 5.3 Oberflächenbeschaffenheit
  - 5.4 Natrium-Temperatur im Testbehälter
  - 5.5 Oxidgehalt im Natrium
6. Übersicht und Diskussion der Versuchsergebnisse
7. Zusammenfassung
8. Schlußfolgerungen
9. Literaturnachweis

Verzeichnis der Tabellen und Abbildungen:

- Tab. 1: Die Werkstoffgruppierungen der Versuchsreihen 1 - 36.
- Tab. 2: Die Werkstoffgruppierungen der Versuchsreihen 1 - 36 zur Untersuchung des Geometrieinflusses.
- Tab. 3: Legierungsbestandteile der untersuchten Werkstoffe.
- Tab. 4 - 6: Ergebnisse der Verschleißuntersuchungen im Natrium bei 600° C.
- 
- Bild 1: Natrium-Verschleißprüfstand I (Kreislaufschema)
- Bild 2: Natrium-Verschleißprüfstand (Photographische Darstellung)
- Bild 3: Testteil I für rotierende und oszillierende Bewegung (Schnittzeichnung)
- Bild 4: Testteil I Einsatz (Explosivdarstellung)
- Bild 5 - 6: Graphische Darstellung des Oberflächenabtrages als Funktion der Werkstoffkombinationen.
- Bild 7 - 28: Oberflächenbeschaffenheit der Werkstoffproben aus den Versuchsreihen 1 - 36
- Bild 29-38: Charakteristische Gleitbahnprofile an Werkstoffproben aus den Versuchsreihen 1 - 36.

## 1. Einleitung

Das betriebssichere Verhalten eines mit Natrium gekühlten Schnellen Brutreaktors wird vom zuverlässigen Arbeiten seiner Komponenten und Sicherheitseinrichtungen bestimmt. Dies gilt insbesondere für alle Bauelemente, die sich relativ zueinander bewegen und dabei voll in Natrium eingetaucht sind oder durch dieses benetzt werden können. Kommt es hierbei nicht zur Ausbildung eines stabilen, die beweglichen Teile trennenden Schmierfilmes, so ist mit metallischer Berührung und folglich mit dem Auftreten örtlicher Verschleißerscheinungen zu rechnen. Die Werkstoffauswahl für derartige Bauelemente erfordert die besondere Beachtung ihres Gleit- und Verschleißverhaltens.

Im folgenden werden Verschleißuntersuchungen für Regelstabführungen und Halterungen beschrieben, welche die Vorauswahl geeigneter Werkstoffpaarungen ermöglichen sollten. Hierfür wurde eine Versuchsanlage mit kontinuierlichem Natriumdurchfluß erstellt, womit der Einfluß der das Verschleißverhalten bestimmenden Parameter erfaßt werden kann.

## 2. Aufgabenstellung

Die Materialauswahl und die konstruktive Ausbildung von Führungen, Lagern und Halterungen für Bauelemente natriumgekühlter Reaktoren ist wesentlich mit der Frage des vorliegenden Schmierzustandes verknüpft. Für die vorgesehenen Anwendungen kommt Voll- oder Grenzschmierung infrage. Im Falle der Vollschrnierung ist genügend Schmiermittel vorhanden, so daß die aufeinander gleitenden Teile durch den Schmierfilm getrennt sind und nicht in metallischen Kontakt kommen können. Für das Verhalten einer Werkstoffpaarung sind hierbei im wesentlichen die Stoffwerte des Schmiermittels von Interesse. Im Falle der Grenzschrnierung ist ein metallischer Kontakt zweier aufeinander gleitenden Werkstoffe möglich, so daß das Abriebverhalten im wesentlichen durch die Eigenschaften der Werkstoffe selbst bestimmt wird. Für eine geeignete Auswahl der Werkstoffe ist daher der Grenzschrnierfall zu beachten.

In den Halterungen und Führungen der Regelstäbe im Core ist mit Betriebstemperaturen bis zu  $600^{\circ}$  C zu rechnen. Arbeiten diese Teile unter Natrium, so ist aufgrund der geringen Gleitgeschwindigkeiten die Ausbildung eines hydrodynamischen Schmierfilms nicht möglich. Liegen die Halterungen und Führungen im Inertgasraum, so muß u.U. Trockenreibung erwartet werden, falls durch Adhäsion die Gleitflächen nicht mit Natrium benetzt werden können. In beiden Fällen ist darüberhinaus während des z.T. längeren Verweilens der Regelstäbe in einer Stellung mit Kaltverschweißungen zu rechnen. Diese Probleme sollen für die infragekommenden Betriebszustände studiert werden.

Aus der Art des vorgesehenen Einsatzes der zu untersuchenden Werkstoffpaarungen ergeben sich die Modellgeometrien und die Versuchsparameter. Die diskontinuierlichen Bewegungen eines Regelstabes können durch eine oszillierende Bewegung der Gleitpartner simuliert werden. Dabei sollte die Geometrie der Probekörper bei der herrschenden Gleitgeschwindigkeit die Ausbildung eines Schmierfilmes verhindern, wodurch die Beeinflussung des Verschleißvorganges durch das Flüssigmetall auf den Adsorptionseffekt und die chemische Reaktion an der Gleitfläche beschränkt bleibt. Ein möglicher Geometrieinfluß der Gleitpaarung auf das Verschleißverhalten soll aufgezeigt werden, d.h. es soll nachgewiesen werden, inwieweit die Werkstoffe einer Gleitpaarung miteinander vertauscht werden können.

Eine Aussage über die Eignung zweier Werkstoffe als Gleitpartner in Lagern und Regelstabführungen ist nicht allein aufgrund der ermittelten Verschleißrate möglich. Vielmehr müssen gleichzeitig die nur qualitativ darzustellenden Vorgänge, wie plastische Verformung und Werkstofftransplantation infolge Kaltverschweißung berücksichtigt werden. So ergibt beispielsweise die Feststellung der Längenänderung einer auf einer Ringscheibe gleitenden zylindrischen Probe nicht in jedem Falle eine Aussage über ihren Verschleißwiderstand. In manchen Fällen führt ein ursprünglicher Abrieb durch spätere Aufschweißung aus dem Gegenwerkstoff zu einer Verlängerung des Probekörpers. An den Ringscheiben entstehen nur selten glatte Einsenkungen der Laufbahnen, deren Tiefen mit einfachen Mitteln meßbar sind. Selbst dann aber bereitet die Bestimmung des Verschleißvolumens immer noch erhebliche Schwierigkeiten, weil die beschädigte Gleitfläche, hervorgerufen durch die wechselseitige Beschleunigung und Verzögerung der zylindrischen Proben im oszillierenden Betrieb, keine einheitliche Tiefe über ihre ganze Länge aufweist. Nicht minder problematisch wird eine Bewertung des Verschleißvorganges bei relativ weichen, also plastisch verformbaren Materialien.

Naturgemäß hängt das Verschleißverhalten eines Probekörpers immer auch von den Gegenwerkstoffen ab. Hieraus folgt, daß die Beurteilung des Verschleißwiderstandes eines Werkstoffes allein, d.h. ohne gleichzeitige Nennung des Gleitpartners nur sehr bedingt möglich ist, allenfalls bei Verwendung beider Teile aus dem selben Material.

### 3. Werkstoffauswahl<sup>+</sup>

Das auf seine Verschleißfestigkeit zu untersuchende Werkstoffsortiment kann in 4 Werkstoffgruppen eingeteilt werden. Soweit bereits bekannt, entschieden Korrosionsresistenz und Warmfestigkeit über die Nominierung der einzelnen Werkstoffe in der Vorauswahl.

Gruppe 1 enthält austenitische Werkstoffe und Nickelbasislegierungen, die in Korrosionsuntersuchungen eine sehr gute Resistenz gegenüber Natrium gezeigt haben.

Gruppe 2 enthält Werkstoffe, die vorwiegend zur Oberflächenbeschichtung im Spritzschweißverfahren Verwendung finden und als Partner neuentwickelter Gegenwerkstoffe getestet werden sollen.

Gruppe 3 umfaßt diejenigen Qualitäten der Werkstoffreihe 'Ferro TiC', die, zunächst aufgrund ihrer Richtanalysen, ausreichende Korrosionsresistenz in Natrium versprechen. Unter den Cermets und Hartmetallen zeichnet sich Ferro TiC vor allem durch seine normale Bearbeitbarkeit nach entsprechender Wärmebehandlung aus [1,2].

---

<sup>+</sup>) Ein Teil der Werkstoffe wurde auf Wunsch des Firmenkonsortiums Siemens-Interatom in das Versuchsprogramm aufgenommen.

Gruppe 4 enthält Sonderwerkstoffe, die aufgrund Ihrer Zusammensetzung ein gutes Verschleißverhalten erwarten lassen.

Diese Werkstoffe sind in Tab. 1 und 2 entsprechend ihrer Versuchskombination zusammengefaßt und lassen sich wie folgt zuordnen:

Gruppe 1: 1.4981; Inconel 718; Hastelloy C

Gruppe 2: Fe Cr 50; Stellite 6H

Gruppe 3: Ferro TiC U; Ferro TiC T;

Gruppe 4: TZM, Tantal

Die Legierungsbestandteile dieser Werkstoffe sind in Tabelle 3 wiedergegeben.

#### 4. Versuchseinrichtung

Für die Vorauswahl verschleißfester Materialpaarungen interessieren primär die Abriebvolumina sowie die Oberflächenbeschaffenheiten der Gleitpartner nach dem Versuch.

Zu diesem Zweck wurde ein Prüfstand gebaut, der im wesentlichen aus zwei Anlageteilen besteht, nämlich einem Natrium-Versorgungs- und Reinigungskreislauf sowie der Teststrecke. Die Art der Teststrecke ist entsprechend der Aufgabenstellung gestaltet.

Um eine schnelle Vorauswahl der diskutablen Werkstoffpaarungen für Regelstabführungen zu ermöglichen, werden die Versuche zunächst bei folgenden Betriebsbedingungen durchgeführt:

spez. Anpreßdruck der Proben	12 kp/cm <sup>2</sup>
mittl. Gleitgeschwindigkeit	7 cm/s
Betriebstemperatur des Natriums	600 °C $\pm$ 10° C
Oxidgehalt des Natriums	5 - 15 ppm
Kühlfallentemperatur	125 - 130 °C
Laufzeit je Versuch	25 bzw. 50 h

Die sich aus diesen Versuchsreihen ergebenden, verschleißgünstigsten Materialpaarungen werden in weiterführenden, speziellen Parameterstudien bei verschiedenen Gleitgeschwindigkeiten, Anpreßdrucken, Temperaturen und Na-Oxidgehalten getestet werden, wobei die Erfassung des Gleitkoeffizienten mit berücksichtigt wird.

Im folgenden soll die Versuchsanlage im einzelnen beschrieben werden.

#### 4.1 Versorgungs- und Reinigungskreislauf

Mittelpunkt der Versuchsanlage ist der Versorgungs- und Reinigungskreislauf, an den je nach Bedarf verschiedene Teststrecken angeschlossen werden können. Er ist in Bild 1 schematisch und in Bild 2 fotografisch dargestellt. Im Unterschied zu Versuchseinrichtungen an anderen Stellen [3,4] kann hiermit, ähnlich der in [5] besprochenen Anlage, ein kontinuierlich fließender Natriumstrom von 250 l/h aufrechterhalten werden, der die Ausspülung von Metallabriebstoffen aus den Gleitzonen der Probekörper bewirkt.

Der Versorgungs- und Reinigungskreislauf besteht aus:

- Sumpftank, Inhalt: 30 Liter
- EM-Pumpe: Fördermenge =  $0,3 \text{ m}^3/\text{h}$   
Förderhöhe = 3 m FS
- Rekuperativ-Wärmetauscher
- Erhitzer, max. Leistung = 12 kW
- Kühlfalle
- Luftkühler
- Ausdehnungsbehälter
- Oxidmeßgerät

Das Natrium fließt im Hauptkreis von der Pumpe durch den Rekuperativ-Wärmetauscher und Erhitzer zur Teststrecke und von dieser auf der Sekundärseite des Wärmetauschers durch den Luftkühler zur Pumpe zurück. Durch Verwendung des Rekuperativ-Wärmetauschers Na-Na ist es möglich, mit einer relativ kleinen Heiz- bzw. Kühlleistung das Temperaturniveau von  $400^\circ \text{C}$  an der Pumpe auf etwa  $700^\circ \text{C}$  im Testteil anzuheben.

Die Natriumreinigung erfolgt mittels Kühlfalle, durch die ständig etwa 10 % des Gesamtdurchsatzes strömen. Als Oxidmeßeinrichtung ist ein Pluggingmeter-Ventil vorhanden, dessen Kegel mit Längsschlitz versehen ist.

Die Vorheizung des Rohr- und Behältersystems bis zum Einfüllen des Natriums wird durch Monette-Heizkabel erreicht, die während des eigentlichen Versuchsbetriebes abgeschaltet werden.

Das Natriumniveau im Testbehälter wird mit Hilfe einer Tauchelektrode im Ausdehnungsbehälter während des Füllens der Anlage eingestellt. Die Niveauänderungen infolge Erwärmung des Kreislaufes auf Betriebstemperatur werden durch die relativ große Oberfläche im Ausdehnungsbehälter gering gehalten.

Über den Na-Oberflächen im Test- und im Ausdehnungsbehälter befindet sich Argon mit einem Überdruck von maximal ca. 2 m WS. Der Verlust von Argon an der Stopfbüchse des Testteils ist minimal. Im Gasausgleichssystem sind Natrium-Abscheider eingebaut, die ein Austreten von heißem Natrium in den äußeren Gaskreis verhindern sollen. Der gesamte Kreislauf ist durch ein Überdruckventil abgesichert, das bei 1,2 atü anspricht.

#### 4.2 Teststrecke für oszillierende Bewegungsart

Die Teststrecke (Bild 3 und 4) besteht im wesentlichen aus der Probenhalterung, der gekühlten Wellendurchführung durch den Deckelflansch, sowie dem Antriebsmotor mit Umlenkgetriebe. Der Behälter a enthält die Probenhalterung und in seinem Außenraum eine 3 kW Zusatzheizung. Der Probeneinsatz b ist am Flansch mit Aufbau c fest verschraubt und kann mit diesem als Ganzes ein- bzw. ausgebaut werden. Auf der Bodenplatte d ist die Ringscheibe e aus dem jeweiligen Probenwerkstoff fixiert.

Auf ihr gleiten oszillierend drei in einer ringförmigen Halterung mit  $120^\circ$  Versatz, vertikal angeordnete zylindrische Probekörper g. Der Drehwinkel beträgt ca.  $90^\circ$ ,

wodurch sich auf der Ringscheibe auf einem mittleren Durchmesser von 60 mm drei getrennte Gleitbahnen von 47 mm Länge ergeben. Das Gewicht G steht mit einer Spitze im Zentrum der sich drehenden Probenhalterung und wird nur lose auf dem unteren Wellenende w geführt. Hierdurch wird eine weitgehend symmetrische Belastung aller drei zylindrischen Proben gewährleistet. Die Übertragung der Drehkraft erfolgt von der Welle über die Glocke h, in deren untere Ausschnitte i die Nocken k der Probenhalterung lose hineinragen. Zur Abdichtung des Flansches werden einfache Weicheisenringe l von 4 mm Stärke verwendet. Als Wellendichtung dienen zwei Teflon-Simmeringe m, zwischen denen sich im Raum R ein Sperrgas (Argon) mit leichtem Überdruck (gegenüber dem übrigen Schutzgasraum) befindet, das über die Rückschlagklappe n zugeführt wird. Durch die äußeren Kühlrippen K sowie den zentralen Welleneinsatz kann die Temperatur im Bereich der Simmerringe durch Luftkühlung auf 150° C gehalten werden, wodurch über lange Zeit ein hoher Dichtheitsgrad erreicht wird.

#### 4.3 Geometrie der Gleitpaarung

Über die Formgebung der Probekörper bei Verschleißversuchen in Flüssigmetallen finden sich in der Literatur stark divergierende Theoreien: Sie werden als gekreuzte Zylinder [5], Kugeln [4,6] oder Kuben [3] ausgebildet mit dem Ziel, die Ausbildung eines Schmierfilmes zu verhindern bzw. eine zunächst sehr hohe Flächenpressung zu gewährleisten oder die Geometrie eines Gleitlagers zu simulieren.

Im Gegensatz hierzu wurde im vorliegenden Fall das 'Pin-and-disk' -System mit flacher Berührungsebene zwischen den Prüfkörpern gewählt. Es hat den Vorteil, daß während der Versuchszeit die Flächenpressung konstant bleibt. (Eine ähnliche Versuchsanlage wurde vor kurzem in [7] beschrieben).

Aus den verschiedenen zu untersuchenden Werkstoffen werden pro Einsatz drei zylindrische Probekörper (Pins) von ca. 6 mm Durchmesser hergestellt, deren als Gleitfläche vorgesehene Stirnfläche auf 3 mm Durchmesser reduziert wird. Die Länge des Pins beträgt ca. 15 mm. Der Gegenwerkstoff wird als Ringscheibe mit den Maßen 75  $\emptyset$  x 50  $\emptyset$  x 8 mm gefertigt. Bei der Bearbeitung aller Gleitflächen muß auf größtmögliche Planparallelität geachtet werden, um konstante spezifische Flächenpressung zu gewährleisten und den Einfluß der Probenform auf die Verschleißrate über den Versuchsablauf so gering wie möglich zu halten.

Als Voraussetzung vergleichbarer Ergebnisse wird vor Versuchsbeginn mittels verschiedener Bearbeitungsmethoden eine weitgehend gleiche Oberflächenqualität der zylindrischen Proben und der Ringscheibe angestrebt. Versuchszeit, Belastung, Gleitweg und Gleitgeschwindigkeit sowie Reinheit und Temperatur des Natriums werden konstant gehalten.

## 5. Meßverfahren und -Einrichtungen

Um die geometrischen Veränderungen der Werkstoffpaarungen nach dem Verschleißversuch möglichst weitgehend erfassen und bestimmen zu können, bedarf es des Einsatzes hochempfindlicher Meßgeräte.

### 5.1 Verschleißrate

Alle Probekörper werden vor und nach dem Versuchslauf auf der Mikrowaage gewogen. Die Aussagekraft einer festgestellten Gewichtsänderung muß aber im Bereich  $\Delta G \leq 1 \text{ mg}$  eingeschränkt bleiben, da durch mögliche Aufschweißvorgänge an dem Gegenwerkstoff oder aber durch chemische Reaktionen an den Probenoberflächen (besonders an den großflächigen Ringscheiben) ein etwa festgestellter Gewichtsverlust nicht unbedingt mit der effektiven Verschleißrate identisch sein muß.

### 5.2 Längenänderung der Proben

Mittels Feinstmikrometer erfolgt die Längemessung der zylindrischen Prüfkörper. Hierbei ist in Fällen mit starken Materialtransplantationen die tatsächliche Längenänderung des Prüflings, getrennt von der aufgetragenen Schichtdicke des Gegenwerkstoffes, nur auf metallographischem Wege möglich.

### 5.3 Oberflächenbeschaffenheit

Grobe Beschädigungen der Werkstoffoberflächen können mittels Lichtschnittmikroskop gut erfaßt werden. Vor allem läßt sich eine rampenartige Ausbildung der Gleitbahn hiermit exakter nachweisen, als dies mittels mechanischer Geräte mit kegelförmigen Tastsystemen möglich wäre. Liegen die Eindringtiefen im Bereich  $\leq 10 \text{ }\mu\text{m}$ , so werden sie mittels eines Mikrotastsystems mit einer vom Werkstück unabhängig einstellbaren Bezugsebene bis zu einer Größenordnung von  $0,1 \text{ }\mu\text{m}$  aufgezeichnet.

Besonders charakteristische Oberflächen sowohl der zylindrischen Probekörper als auch der Ringscheiben werden nach den Verschleißversuchen photographiert und in verschiedenen Vergrößerungen wiedergegeben. Teilweise gewährt diese Art der Darstellung bereits einen weitgehenden Einblick in das Verhalten eines Werkstoffes unter den gegebenen Belastungsarten. Am augenfälligsten erscheint dies bei Gratbildungen an den zylindrischen Probekörpern.

#### 5.4 Natrium-Temperatur im Testbehälter

Die Temperatur im Testbehälter wird mittels Thermoelement erfaßt und mit dem Sollwert automatisch verglichen. Bei Abweichungen schaltet ein Regeler den Erhitzer im Hauptkreis je nach Bedarf zu oder ab.

#### 5.5 Oxidgehalt im Natrium

Bei allen Verschleißversuchen, bei denen die Einhaltung des Oxidgehaltes im Natrium mit  $\pm 10$  ppm ausreichend genau erscheint und gleichzeitig keine Reinheit  $< 20$  ppm gefordert wird, erfolgt die Messung des Oxidgehaltes mittels Pluggingmeter. Hierzu dient ein Durchgangsventil, an dessen Kegelumfang 12 Längsschlitze mit je ca.  $1 \text{ mm}^2$  Querschnitt angebracht sind. Ein in das Ventilgehäuse eingelötetes Thermoelement, das sehr nahe an den Ventilsitz heranreicht, erfaßt die Na-Temperatur. Der Meßwert wird zusammen mit der gleichzeitigen Durchflußmessung auf einem Zweipunktschreiber aufgezeichnet.

Um eine bessere Kontrolle und Konstanthaltung der Natrium-Reinheit und gleichzeitig eine geringere Abweichung vom Sollwert zu erzielen, als dies mit Hilfe eines Pluggingmeters möglich ist, ist der Einbau eines kontinuierlich registrierenden Sauerstoffmeßgerätes vorgesehen, das sich zur Zeit noch in Erprobung befindet.

## 6. Übersicht und Diskussion der Versuchsergebnisse

In Tab. 1 sind die untersuchten Werkstoffe paarweise so aufgeführt, wie sie in der Versuchsreihe unter fortlaufender Numerierung eingesetzt waren. Um den Einfluß der Geometrie der Gleitpaarung auf den Verschleiß zu ermitteln, werden in einigen charakteristischen Werkstoffkombinationen die Werkstoffe der Gleitpartner vertauscht, so daß der Probenwerkstoff des erstgenannten Versuches im beigeordneten Versuch für die Ringscheibe verwandt wurde. Diese Werkstoffgruppierungen sind in Tab. 2 aufgeführt.

Die quantitativen Ergebnisse der Versuche 1 - 36 sind in Tab. 4, 5 und 6 wiedergegeben, wobei die Längenänderungen der zylindrischen Probekörper, die Gewichtsänderungen der Probekörper und Ringscheiben, sowie die Oberflächenrauigkeiten der Ringscheibe vor und nach dem Versuch angegeben sind. Des besseren Vergleiches wegen sind die Längenänderungen der zylindrischen Proben sowie die Eindringtiefen in die Ringscheiben als Funktion der Werkstoffgruppierung und der Berührungsstelle zu Beginn des Versuches (theoretische Gleitfläche) graphisch in den Bildern 5 und 6 dargestellt. Diese Ergebnisse lassen sich in Abhängigkeit von den Werkstoffpaarungen wie folgt beschreiben.

### 6.1 Ferro-TiC-U (Pin) gegen Ferro-TiC-U (Ringscheibe)

Mit dieser Werkstoffpaarung wurden insgesamt 5 Testreihen gefahren (Versuche Nr. 1, 6, 16, 21), wobei die Kombination Nr. 1 einen erstaunlich hohen Abnutzungsgrad ergab. Die maximale Rauhtiefe auf der Ringscheibe betrug nach dem Versuch etwa 190  $\mu\text{m}$ . Die Oberflächenstruktur ist borkenartig ausgebildet, ihre Spitzen hochblank poliert (Bild 7). Art und Form dieser rauhen Oberfläche deuten auf häufige plastische

Verformung im Zusammenhang mit wechselseitiger Materialübertragung hin. Für diese Annahme spricht die Längenzunahme einer der drei zylindrischen Proben um ca. 70  $\mu\text{m}$  (Bild 5). Der Grund für dieses wenig befriedigende Ergebnis dürfte im Warmverhalten der austenitischen Matrix zu suchen sein.

In den Versuchen Nr. 6 und 16 wurde daher die gleiche Materialpaarung erneut getestet. Mit einer durchschnittlichen negativen Längenänderung von 6,7  $\mu\text{m}$  an den sechs zylindrischen Probekörpern sowie einer maximalen Rauhtiefe von 5  $\mu\text{m}$  an den Gleitbahnen der beiden Ringscheiben lagen hierbei die Oberflächenabtragungen erheblich günstiger als bei Versuch Nr. 1.

Zur Absicherung dieser Ergebnisse wurde ein weiterer Versuch mit einer Laufzeit von 50 h als zweckmäßig erachtet (Versuch Nr. 21). Hierbei ergab sich eine Längenänderung der zylindrischen Proben von durchschnittlich 30  $\mu\text{m}$ , womit die Ergebnisse der vorausgegangenen Tests bestätigt wurden. Die größte Rauhtiefe der Laufrillen an der Ringscheibe ist mit ca. 6  $\mu\text{m}$  nicht unerwartet hoch. Die Gleitbahnen erscheinen metallisch hell in deutlichem Gegensatz zu den übrigen, nur vom Natrium benetzten Oberflächen, welche einen mattgrauen Belag aufweisen (Bild 8).

## 6.2 Ferro-TiC-U (Pin) gegen Stellite 6H (Ringscheibe)

Versuche Nr. 3, 12

Gegenüber Ferro-TiC-U als Ringscheibenwerkstoff, weist Stellite 6H in Versuch Nr. 3 an allen drei zylindrischen Proben eine positive Längenänderung von durchschnittlich 45  $\mu\text{m}$  auf (Bild 9). Hierbei handelt es sich um gut nachweisbare Materialauftragungen aus dem Gegenwerkstoff. Die Laufrillen der Ringscheibe waren etwa 4 - 5  $\mu\text{m}$  tief.

An einem zylindrischen Probekörper der Werkstoffpaarung Nr. 12 wurde nach dem Versuch eine Verkürzung von 8  $\mu\text{m}$  festgestellt. Die übrigen beiden zeigten keine meßbaren Änderungen. Die gleitenden, kreisrunden Stirnflächen der Pins wiesen jedoch neben Riefen deutlich Auftrageffekte aus dem Gegenwerkstoff auf, wofür ein anfänglicher Abrieb mit nachfolgender Kaltaufschweißung die Ursache sein dürfte.

Die maximale Rauhtiefe der Laufspuren auf der Stellite-Ringscheibe von ca. 3 - 4  $\mu\text{m}$  bestätigt ziemlich genau die Ergebnisse von Versuch Nr. 3.

### 6.3 Ferro-TiC-U (Pin) gegen 1.4981 (Ringscheibe)

Versuche Nr. 4, 9

Von besonderem Interesse ist die Kombination dieser beiden austenitischen Werkstoffe. Ihr wesentlicher Unterschied ist der Gehalt von ca. 35 % TiC in der austenitischen Grundmasse des Ferro-TiC-U, wodurch sein höherer Verschleißwiderstand erreicht wurde. Dies bestätigt das Versuchsergebnis, nach dem die Verschleißwirkung an den zylindrischen Ferro-TiC-U-Proben im Vergleich zu der Ringscheibe erheblich gemindert ist. Bild 11 zeigt die Gleitflächen der drei zylindrischen Proben mit Anzeichen von Kaltaufschweißungen aus dem Gegenwerkstoff. An der in Bild 12 dargestellten Gleitbahn ist, neben dem relativ hohen Zerstörungsgrad, deutlich die unterschiedliche Tiefe der Laufrille erkennbar, wie sie als Folge der sich dauernd ändernden Gleitgeschwindigkeit auftritt.

Versuch Nr. 9 wurde als Wiederholung von Versuch Nr. 4 durchgeführt und ergab ähnlich negative Werte für die Ringscheibe.

#### 6.4 Ferro-TiC-T (Pin) gegen 1.4981 (Ringscheibe)

Versuch Nr. 5, 17, 22, 23

Diese Werkstoffpaarung wurde in 4 Testreihen erprobt, wobei die Ringscheibe aus dem Material der vorgenannten Versuche bestand. In Versuch Nr. 5 wiesen die zylindrischen Probekörper aus Ferro-TiC-T bei sehr gut erhaltenen Gleitflächen nur geringe Längenabnahmen auf. An einem Pin ist ein 15  $\mu\text{m}$  dicker partieller Auftrag des Gegenwerkstoffes deutlich erkennbar (Bild 13), während er im übrigen keine Längenänderung gegenüber dem Ausgangszustand aufweist.

Die Gleitspuren der Ringscheibe sind durchschnittlich 30 - 35  $\mu\text{m}$  tief und zeigen Materialaufwerfungen an den Randzonen, was aus dem gemessenen Querschnittsprofil (Bild 33) besonders deutlich zu ersehen ist.

Die Ergebnisse der Versuche Nr. 22 und 7 bestätigten jene von Versuch Nr. 5 weitgehend.

Ein weiterführender Versuch (Nr. 23) mit einer Laufzeit von 50 h, erbrachte zusätzliche Werte, die sich von den Ergebnissen der 25 h-Versuche kaum unterscheiden. Hieraus ergibt sich, nach einem ausgeprägten Einlaufvorgang, ein günstiges Gleitverhalten mit einer tragbaren Verschleißrate.

6.5 Ferro-TiC-U (Pin) gegen Hastelloy C (Ringscheibe)

Versuch Nr. 14

Ferro-TiC-T (Pin) gegen Hastelloy C (Ringscheibe)

Versuch Nr. 15

Mit einer Ausnahme liegen bei diesen Versuchen die Längenänderungen der Pins bei durchschnittlich  $-30 \mu\text{m}$ . Während die Maximaltiefen der Laufrillen in Versuch Nr. 14:  $65/70/43 \mu\text{m}$  betragen, ergeben sich bei Versuch Nr. 15 beachtlich niedrigere Werte (Vergl. die Bilder 14a, 31 mit 14b, 32). Hierfür sind die unterschiedlichen Zusammensetzungen der Ferro-TiC-Werkstoffe maßgebend (Tab. 3).

Analog zu den unterschiedlichen Gleitbahnoberflächen der Ringscheiben erscheinen auch die Pin-Gleitflächen mit starken Zerstörungen bei Ferro-TiC-U bzw. relativ glatt bei Ferro-TiC-T.

6.6 1.4981 (Pin) gegen Fe Cr 50 (Ringscheibe)

Versuch Nr. 7

Die zylindrischen Probekörper neigen bei dieser Materialpaarung zu starker Kaltverschweißung und plastischer Verformung, was aus Bild 16 und 17 zu ersehen ist. Mit ca.  $115 \mu\text{m}$  Eindringtiefe sind die Laufspuren auf der Fe Cr 50 - Ringscheibe sehr tief.

6.7 Inconel 718 (Pin) gegen Inconel 718 (Ringscheibe)

Versuch Nr. 24

Bei relativ glatten Oberflächen wurde eine durchschnittliche Längenabnahme der zylindrischen Probekörper von  $40 \mu\text{m}$  und eine Eindringtiefe auf der Ringscheibe von ca.  $6 \mu\text{m}$  gemessen (Bild 15 und 34). Dabei

zeigt sich, daß zwischen diesen Werten einerseits und dem Flächenverhältnis der kreisrunden Stirnfläche des Pins zur Fläche der erzeugten Gleitbahn andererseits keine Proportionalität besteht.

6.8 Stellite 6H (Pin) gegen Inconel 718 (Ringscheibe)

Versuch Nr. 25

Der Inconel-Ring hat mit Gleitspurtiefen von 2,5 bis 4,5  $\mu\text{m}$  auch bei dieser Kombination einmal mehr sein günstiges Verschleißverhalten bewiesen, wobei die durchschnittliche negative Längenänderung der Stelliteproben 11  $\mu\text{m}$  betrug.

6.9 Ferro-TiC-T (Pin) gegen Inconel 718 (Ringscheibe)

Versuch Nr. 28

Über die in Bild 5 wiedergegebenen quantitativen Veränderungen hinaus fallen auch bei diesem Versuch die besonders glatten Laufflächen an beiden Teilen der Werkstoffpaarung auf.

6.10 Inconel 718 (Pin) gegen Ferro-TiC-U (Ringscheibe)

Versuch Nr. 31

Wie in Versuch Nr. 13 wurde auch hier eine positive Längenänderung an den zylindrischen Probekörpern, die gegen einen Ferro-TiC-U-Ring liefen, festgestellt. Diese Materialübertragung trat nur bei einem Drittel der mit Ferro-TiC-U - Ringen durchgeführten Versuche auf. Dabei sprechen die Oberflächendiagramme (Bild 35a, b) für einen sehr unterschiedlichen Ablauf des Verschleißprozesses. Während in Bild 35a eindeutig eine Einsenkung der Oberfläche bei gleichzeitiger Glättung nachzuweisen

ist, deutet Bild 35b auf einen Abtrag des weicheren Matrixwerkstoffes unter Umgehung der harten Titan-karbide hin (Waschbetoneffekt).

#### 6.11 Tantal (Pin) gegen 1.4981 (Ringscheibe)

Versuch Nr. 11

Einem an sich mäßigen Beschädigungsgrad der 1.4981 - Ringscheibe mit ca. 12  $\mu\text{m}$  steht eine auffallend starke Verkürzung der zylindrischen Probekörper gegenüber. Dabei handelt es sich vorwiegend um plastische Verformung, die zu einer erheblichen Gratbildung führte (Bild 18, 19). Die drei Gleitbahnen erscheinen, trotz relativ geringer Eindringtiefe, ausgesprochen rau (Bild 20).

#### 6.12 Tantal (Pin) gegen Ferro-TiC-U (Ringscheibe)

Versuche Nr. 13, 36

Diese beiden Ergebnisse widersprechen sich so wesentlich, daß eine Beurteilung zunächst nicht möglich ist. Unter gleichen Versuchsbedingungen weisen die zylindrischen Proben in einem Falle eine Verkürzung von durchschnittlich 10  $\mu\text{m}$  auf, während der zweite Versuch eine Verlängerung derselben um 15 - 23  $\mu\text{m}$  infolge Werkstoffübertragung erbrachte. Mit 1,4  $\mu\text{m}$  ist die maximale Oberflächenrauigkeit der Ringscheibe im Versuch Nr. 36 nur unwesentlich größer als im vergleichbaren Versuch Nr. 13. Das überraschend ungünstige Verhalten der Tantalproben gegen die relativ weiche Ringscheibe aus 1.4981 in Versuch Nr. 11, sowie die vorliegenden Ergebnisse lassen eine Wiederholung dieser Versuche vor einer endgültigen Beurteilung zweckmäßig erscheinen.

6.13 TZM (Pin) gegen TZM (Ringscheibe)

Versuch Nr. 34

Grat- und Riefenbildung an beiden Probekörpern, starke negative Längenänderungen der Pins sowie große Eindringtiefen der Laufspuren lassen die TZM-TZM-Kombination für den Einsatz unter Natrium wenig geeignet erscheinen.

Folgende Werkstoffpaarungen sind gruppenweise nach den Gesichtspunkten der Geometrie zusammengefaßt. Damit soll das Gleit- und Verschleißverhalten als Funktion der Probenform sowie des Größenunterschiedes der Gleitflächen bei an sich gleichen Werkstoffpaarungen dargestellt werden.

6.14 1.4981 (Pin) gegen TZM (Ringscheibe)

Versuch Nr. 20

TZM (Pin) gegen 1.4981 (Ringscheibe)

Versuch Nr. 33

In beiden Versuchen erfuhren die zylindrischen Probekörper eine nahezu gleichstarke Verkürzung von 80 bzw. 90  $\mu\text{m}$ . Die damit einhergehende Gratbildung infolge plastischer Verformung ist bei beiden Pin-Werkstoffen ähnlich stark ausgeprägt (Bild 21). Auch die Eindringtiefen der Laufspuren sind mit 20/20/20  $\mu\text{m}$  auf der TZM-Scheibe sehr ähnlich denjenigen der 1.4981-Scheibe mit 26/28/31  $\mu\text{m}$ . Letztere zeigt außerdem eine stark wellige Gleitbahnoberfläche, als deutliches Merkmal ungünstigen Gleitverhaltens.

6.15 Stellit 6H (Pin) gegen 1.4981 (Ringscheibe)

Versuch Nr. 18

1.4981 (Pin) gegen Stellit 6H (Ringscheibe)

Versuch Nr. 19

Auffälligster Unterschied dieser beiden Versuchsergebnisse ist die Gratbildung an den zylindrischen Probekörpern aus 1.4981 (Bild 22) verbundenen mit einer entsprechenden, unzulässig großen Längenabnahme. Auch an der Ringscheibe aus 1.4981 sind die Eindringtiefen um einen Faktor 5 größer als bei dem Stellit-Ring.

Trotz der verhältnismäßig geringen Rauhtiefe von 2 - 4  $\mu\text{m}$  zeigen die Gleitflächen am Stellitmaterial einen ausgesprochenen Riefencharakter, der erfahrungsgemäß nicht als Symptom guten Gleitverhaltens gewertet wird (Bild 36).

6.16 1.4981 (Pin) gegen Inconel 718 (Ringscheibe)

Versuch Nr. 26

Inconel 718 (Pin) gegen 1.4981 (Ringscheibe)

Versuch Nr. 29

Die starke Tendenz zu plastischer Verformung des Werkstoffes 1.4981 führte auch in Versuch Nr. 26 zu erheblichen Gratbildungen an den Rändern der zylindrischen Proben (Bild 23). Die damit verbundene Längenabnahme ist mit 101/103/120  $\mu\text{m}$  ca. doppelt so groß wie an den Inconel 718-Pins in Versuch Nr. 29. Auch die Eindringtiefen der Laufspuren in der Ringscheibe aus 1.4981 (Bild 37) in Versuch Nr. 29 sind erheblich größer als diejenigen an der Inconel-Scheibe. Insgesamt zeigen diese beiden Versuche den deutlich höheren Verschleißwiderstand des Inconel 718 neben dem wenig befriedigenden Gleitverhalten des hochwarmfesten 1.4981.

6.17 Ferro-TiC-U (Pin) gegen Stellite 6H (Ringscheibe)

Versuch Nr. 3, 12

Stellite 6H (Pin) gegen Ferro-TiC-U (Ringscheibe)

Versuch Nr. 8

Die Ergebnisse der Versuche 3 und 12 sind unter 6.2 bereits näher beschrieben. Ein Vergleich mit Versuch Nr. 8 zeigt eine geringfügig höhere Verschleißresistenz der Ferro-TiC-U-Qualität (Bild 10).

6.18 Ferro-TiC-U (Pin) gegen Inconel 718 (Ringscheibe)

Versuch Nr. 27

Inconel 718 (Pin) gegen Ferro-TiC-U (Ringscheibe)

Versuch Nr. 31

Einer Verkürzung der Ferro-TiC-U -Pins (in Versuch Nr. 27) um ca. 70  $\mu\text{m}$  steht eine Längenzunahme von 1 bis 3  $\mu\text{m}$  an den Inconel-Pins gegenüber. Von der Größenordnung abgesehen, handelt es sich in beiden Fällen um eine Werkstofftransplantation vom Ferro-TiC-U -Probekörper zum Inconelpartner, oder aber um einen stärkeren Abrieb auf der Ferro-TiC-U-Seite. Auch die Mechanik des Verschleißvorganges scheint in beiden Fällen sehr ähnlich. Ferro-TiC-U-Ringscheibe (Bild 35a) und Ferro-TiC-U-Pins (Bild 24a) behielten trotz partiellen Stellite-Auftrages eine sehr glatte Oberfläche, wogegen an ihren Inconel-Gleitpartnern (Bild 38 und 24b) eine gewisse Riefenbildung zu erkennen ist. Ob der quantitative Unterschied der gemessenen Verschleißraten eine Funktion der vertauschten Geometrien darstellt, müßte durch weitere Versuche bewiesen werden.

6.19 Fe Cr 50 (Pin) gegen Ferro-TiC-U (Ringscheibe)

Versuche Nr. 2, 32

Ferro-TiC-U (Pin) gegen Fe Cr 50 (Ringscheibe)

Versuch Nr. 10

Das außerordentlich ungünstige Ergebnis des Versuchs Nr. 2, bei dem es zu starker Materialübertragung (Kaltverschweißung) kam, konnte nicht eindeutig begründet werden. Der Versuch wurde daher wiederholt (Nr. 32), wonach sich die quantitativen Veränderungen an der Ringscheibe wie an den Pins ganz erheblich verringerten. Qualitativ sind sich die Erscheinungsformen des Verschleißvorganges hier sehr ähnlich. An einer Lauffläche der Ferro-TiC-U -Scheibe ergibt sich die gemessene, uneinheitliche Rauhtiefe mit  $1,6 \mu\text{m}$  nachweisbar aus einem Aufschmieren von Fe Cr 50 über eine zuvor erfolgte Abtragung.

In Versuch Nr. 10 liefen Ferro-TiC-U -Proben (Bild 25) gegen eine Scheibe aus Fe Cr 50 (Bild 26). Das Ergebnis, ein gut nachweisbarer, starker Auftrag von Ringscheibenwerkstoff auf den FTU-Proben bestätigt das schlechte Gleitverhalten dieser Kombination.

6.20 Inconel 718 (Pin) gegen TZM (Ringscheibe)

Versuch Nr. 30

TZM (Pin) gegen Inconel 718 (Ringscheibe)

Versuch Nr. 35

Eine stark unterschiedliche Längenänderung der zylindrischen Proben in diesen beiden Versuchen, vor allem aber die große Eindringtiefe der Gleitspuren auf der TZM-Scheibe mit auffällig zerrissenen Randaufwerfungen

(Bild 28), weisen diese Werkstoffkombination als ungeeignet aus. Zwischen den konkaven Partien der zerfurchten Inconel-Pin-Gleitflächen (Bild 27) befinden sich erhebliche TZM-Auftragungen.

## 7. Zusammenfassung

Die Einordnung der Versuchsergebnisse in eine abgestufte Reihe zwischen der besten und der schlechtesten Materialpaarung ist nur bedingt möglich. Im folgenden soll vielmehr eine Beurteilung nach Versuchsgruppen vorgenommen werden, bei welchen jeweils verschiedene Werkstoffe gegen den gleichen Gleitpartner eingesetzt waren. Da ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Geometrie der Gleitpaarung und der Verschleißrate bisher nicht nachgewiesen werden konnte, beziehen sich die folgenden Aussagen nur auf die Materialkombinationen:

### 1.4981

Dieser warmfeste austenitische Stahl zeigte gegenüber Tantal und Stellit 6H die geringste Verschleißwirkung. Allerdings geht damit eine starke plastische Verformung des Tantalpartners einher, so daß diese Kombination insgesamt negativ beurteilt werden muß. Etwas günstiger verhielten sich die Stellitproben, deren Gleitflächen jedoch ausgeprägte Riefen aufweisen. Ähnlich verhält sich die 1.4981-Ringscheibe. Die Kombination mit Inconel 718 ergab mittlere Abriebwerte und sollte, wegen des sonst guten Verschleißverhaltens von Inconel, im weiteren Versuchsprogramm beibehalten werden.

Ausgesprochen unbefriedigend erwies sich das Gleitverhalten von 1.4981 gegen Ferro-TiC-U. Starke Austenit-Übertragungen auf die zylindrischen Proben aus Hartwerkstoff führten zu unzulässig tiefen Laufspuren auf der Ringscheibe.

Demgegenüber hat sich Ferro-TiC-T wesentlich günstiger verhalten. Aus vier gleichartigen Versuchen ergab sich eine durchschnittliche Eindringtiefe der Laufspuren in

der 1.4981-Ringscheibe von 23  $\mu\text{m}$ , der als Mittelwert eine Verkürzung der zylindrischen Proben um nur 10  $\mu\text{m}$  gegenübersteht.

Unter Vertauschung der Geometrie waren zylindrische Proben aus 1.4981 gegen Ringscheiben verschiedener Qualitäten (s.o.) eingesetzt. Hierbei wurden keine von den vorangegangenen Bewertungen abweichenden Ergebnisse erzielt.

Als günstigste Gleitpartner von 1.4981 erwiesen sich Stellite 6H und Ferro-TiC-T.

#### Ferro-TiC-U

Der Hartwerkstoff Ferro-TiC-U war als Gleitpartner verschiedener Materialien in insgesamt 17 Versuchen eingesetzt. Sein Gleitverhalten, sowohl als Ringscheibe, wie auch als zylindrischer Probekörper, war sehr uneinheitlich. Der Verschleißwiderstand dieses Titankarbid-Sinterwerkstoffes ist zwar relativ hoch, hat aber in vielen Fällen stark zerstörende Wirkung auf den Gleitpartner zur Folge. Hier waren auch die häufigsten Materialtransplantationen aus den weicheren Qualitäten zum Hartwerkstoff festzustellen. In einigen wenigen Fällen (Vers. 13/31) konnten Materialübertragungen von Ferro-TiC-U auf den Gegenwerkstoff nachgewiesen werden. Hierfür gibt es, vor allem die Kombination mit dem weichen Titanpartner betreffend, noch keine eindeutige Erklärung.

Wenig Verschleiß zeigten die 'Hart-gegen hart' -Paarungen Ferro-TiC-U gegen Ferro-TiC-U sowie in drei Versuchsläufen eine Kombination mit Stellite 6H.

### Ferro-TiC-T

Bei einem etwas geringeren Verschleißwiderstand gegenüber Ferro-TiC-U zeigt die Ferro-TiC-T-Qualität einen deutlich günstigeren Einfluß auf das Gleit- und Verschleißverhalten des Gegenwerkstoffes. Bei einer etwas stärkeren, negativen Längenänderung der Ferro-TiC-T -Pins bleiben die Zerstörungen an den Gleitpartnern erheblich unter jenen, wie sie durch Ferro-TiC-U hervorgerufen werden. Ferro-TiC-T kann als verschleißfester Werkstoff mit guten Gleiteigenschaften eingestuft und im zukünftigen Arbeitsprogramm unter variierten Parametern weiter untersucht werden.

### Inconel 718

Neben den Hartwerkstoffen ergab diese Nickelbasislegierung in allen untersuchten Paarungen die günstigsten Resultate. Besonders gegen Stellit 6H und Ferro-TiC-T liegen die Verschleißraten beider Partner sehr niedrig. Außerdem bestätigen die relativ glatten Laufspuren sowohl auf den Inconel-Proben als auch auf den verschiedenen Gegenwerkstoffen ein überdurchschnittliches Gleitverhalten.

### TZM

Dieser schwach legierte Molybdänwerkstoff zeigte gegen alle eingesetzten Gleitpartner einheitlich negative Ergebnisse. Seine Beibehaltung im zukünftigen Arbeitsprogramm ist daher nicht vorgesehen.

### Stellit 6H

Sowohl gegen Ferro-TiC-U als auch gegen 1.4981 und Inconel 718 ergab sich ein gutes Gleit- und Verschleißverhalten. Eine gewisse Riefenbildung in der Stellit-scheibe (Vers.Nr. 19) mag ihre Ursache in der relativ hohen plastischen Verformbarkeit des austenitischen Gleitpartners haben.

### Fe Cr 50

Früher, unter weniger scharfen Bedingungen erzielte Versuchsergebnisse wurden mit der erneuten Kombination dieses Aufschweißwerkstoffes mit 1.4981 und Ferro-TiC-U bestätigt. Ein für Fe Cr 50 spezifischer Kaltschweißeffekt führte zu unzulässig starken Verschleißerscheinungen gegen den Hartwerkstoff. Selbst gegenüber 1.4981 war das Ergebnis unbefriedigend, weshalb eine Beibehaltung dieses Werkstoffes im weiteren Versuchsprogramm nicht zweckmäßig erscheint.

### Tantal

Wie Fe Cr 50 und Stellit 6H wurde auch Tantal als Gleitpartner von Ferro-TiC-U sowie 1.4981 eingesetzt. Dabei zeigte die Hartwerkstoffkombination eine wesentlich geringere Verschleißrate als das austenitische Material. Die Ergebnisse zweier Versuche mit 1.4981 unterscheiden sich so stark, daß, ohne weitere Untersuchungen, keine Bewertung möglich ist.

### Hastelloy C

Gegen die beiden Hartwerkstoffe Ferro-TiC-T und Ferro-TiC-U war nur ein unterdurchschnittlicher Verschleißwiderstand

feststellbar, wobei das Ergebnis bei der T-Qualität wiederum erheblich günstiger lag. Eine Fortführung der Versuche mit Hastelloy C ist nicht beabsichtigt.

## 8. Schlußfolgerungen

Die vorliegenden Untersuchungen ergaben einen ersten Einblick in das Verschleißverhalten verschiedener Werkstoffpaarungen für Lager und Führungen von Bauteilen natriumgekühlter Reaktoren. Diese Versuche werden in vier parallel arbeitenden Teststrecken durch Parameteruntersuchungen an den bisher favorisierten Materialpaarungen ergänzt, wobei der Einfluß von Temperatur, Gleitgeschwindigkeit und Belastung sowie des Oxidgehaltes im Na auf Gleitkoeffizient und Verschleißrate interessiert.

Besondere Aufmerksamkeit wird dabei weiterhin der Geometrie der Materialpaarung geschenkt und die Übertragbarkeit der Ergebnisse aus Modellversuchen auf das Original-Bauteil geprüft. Hierzu werden in einer separaten Teststrecke Modell und Original unter gleichen Bedingungen untersucht und der Übertragungsfaktor der Versuchsergebnisse bestimmt. Die bisherige Versuchsdauer von 25 und 50 Stunden wird dabei bis zu 200 h erhöht.

9. Literaturnachweis

- 1 F. Frehn: 'Die Wärmebehandlung des einzigen härtbaren Hartwerkstoffes Ferro-TiC-C-Spezial.'  
Sonderdruck aus 'TZ für praktische Metallbearbeitung', 61, 1967
- 2 F. Frehn; H. Doberitzsch;  
'Wirtschaftl. Schleifen mit Diamantscheiben der bearbeitbaren und härtbaren Hartstoffe FERRO-TiC.'  
Diamond Review, 3/1968
- 3 D.F. Elliott; E. Holland; K.A. Tombin:  
'Some preliminary tests on bearing materials to operate under liquid sodium.'  
AERE R/R 1891, Juni 1957
- 4 A.W.J. de Gee; E.G. Chirer; A.J. Bogers:  
'Equipment for the study of wear under conditions of oscillatory relative motion in liquid sodium.'  
Metaalinstituut TNO, Delft 1967
- 5 W.H. Roberts: 'Friction and wear behaviour of possible bearing materials in high-purity liquid sodium at temperatures up to 500° C.'  
AED-Conf. 1962, 042-5 1962
- 6 Bezborod'ko; Vinogradov: 'On the anti-wear properties of lubricants and the effect of various factors on the anti-wear properties of petroleum oils.'  
Izvestija Akad. Nauk SSSR OTN, 1958
- 7 W.J. Freede; L. Newcomb; R.S. Kennedy: 'Static and sliding contact behavior of materials in sodium environments at elevated temperatures.'  
NAA - SR - 12446 1968
- 8 F.A. Smith; E.S. Sowa; E.L. Kimont; C.R. Sutton:  
'Symposium on alkali metal coolants-corrosion studies and system operating experience. SM - 85/22, Wien, Nov. 66

Versuch - Nr.	Werkstoffpaarung	
	Zylind. Probekörper	Ringscheibe
1	Ferro-TiC-U	Ferro-TiC-U
2	Fe Cr 50	Ferro-TiC-U
3	Ferro-TiC-U	Stellit 6H
4	Ferro-TiC-U	1.4981
5	Ferro-TiC-T	1.4981
6	Ferro-TiC-U	Ferro-TiC--U
7	1.4981	Fe Cr 50
8	Stellit 6H	Ferro-TiC-U
9	Ferro-TiC-U	1.4981
10	Ferro-TiC-U	Fe Cr 50
11	Tantal	1.4981
12	Ferro-TiC-U	Stellit 6H
13	Tantal	Ferro-TiC-U
14	Ferro-TiC-U	Hastelloy C
15	Ferro-TiC-T	Hastelloy C
16	Ferro-TiC-U	Ferro-TiC-U
17	Ferro-TiC-T	1.4981
18	Stellit 6H	1.4981
19	1.4981	Stellit 6H
20	1.4981	TZM
21	Ferro-TiC-U	Ferro-TiC-U
22	Ferro-TiC-T	1.4981
23	Ferro-TiC-T	1.4981
24	Inconel 718	Inconel 718
25	Stellit 6H	Inconel 718
26	1.4981	Inconel 718
27	Ferro-TiC-U	Inconel 718
28	Ferro-TiC-T	Inconel 718
29	Inconel 718	1.4981
30	Inconel 718	TZM
31	Inconel 718	Ferro-TiC-U
32	Fe Cr 50	Ferro-TiC-U
33	TZM	1.4981
34	TZM	TZM
35	TZM	Inconel 718
36	Tantal	Ferro-TiC-U

**Tab. 1:** Die Werkstoffgruppierungen der Versuchsreihen 1 – 36

Versuch - Nr.	Werkstoffpaarungen	
	Zylind. Probekörper	Ringscheibe
20	1.4981	TZM
33	TZM	1.4981
26	1.4981	Inconel 718
29	Inconel 718	1.4981
18	Stellit 6H	1.4981
19	1.4981	Stellit 6H
27	Ferro-TiC-U	Inconel 718
31	Inconel 718	Ferro-TiC-U
3	Ferro-TiC-U	Stellit 6H
12	Ferro-TiC-U	Stellit 6H
8	Stellit 6H	Ferro-TiC-U
2	Fe Cr 50	Ferro-TiC-U
32	Fe Cr 50	Ferro-TiC-U
10	Ferro-TiC-U	Fe Cr 50
30	Inconel 718	TZM
35	TZM	Inconel 718

**Tab. 2:** Die Werkstoffgruppierungen aus den Versuchsreihen 1-36 zur Untersuchung des Geometrieinflusses.

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	B	Nb	W	V	Fe	Ti	TiC	Cu	Co	Zr
Ferro-TiC U	0,06					17,5	2,2	11,5						Rest	0,5	32,5			
Ferro-TiC T						14,0	14,0	Rest				3,5				16,5	0,5		
Hastelloy C	0,038	0,6	0,48			16,35	16,15	Rest				4,02	0,22	4,6					
Inconel 718	0,05	0,03	<0,01	<0,005	0,003	18,85	3,06	53,1	0,72	0,006	5,45			18,85	1,13				
1. 4981	0,08	0,05	1,24	0,018	0,006	16,5	1,66	16,6			0,8			Rest					
Fe Cr 50	2,6	2,0				27,0								Rest					
Stellit 6H	1,0					27,0						4,5						Rest	
TZM							Rest								0,5				0,08
Tantal		unlegiert																	

Tab.: 3

Legierungsbestandteile der untersuchten Werkstoffe

Versuch Nr.:	Werkstoffpaarungen		Laufzeit h	Längenänderung der zyl. Proben [ $\mu\text{m}$ ]	Oberflächen-Rauhigkeit $R_1$ der Ringscheibe [ $\mu\text{m}$ ]		Gewichtsänderung	
	Zyl. Probe	Ringscheibe			vor	nach Versuch	Zyl. Proben [ mg ]	Ringscheibe [ mg ]
1	Ferro-TiC U	Ferro-TiC U	25	-100 / -145 / +70	0,7	125 / 150 / 195	- 82	- 207
2	Fe Cr 50	Ferro-TiC U	25	-1630 / -1650 / -1800				
3	Ferro-TiC U	Stellit 6H	25	+33 / +25 / +75	0,5	4 / 4,2 / 5	- 83,7	- 15
4	Ferro-TiC U	1. 4981	25	+100 / +125 / +140	0,35	250 / 280 / 265	+ 76	- 142
5	Ferro-TiC T	1. 4981	25	-23 / $\pm 0$ / -5	0,8	30 / 35 / 33	- 148	- 28,5
6	Ferro-TiC U	Ferro-TiC U	25	-8 / -10 / -5	1,0	1,5 / 1,6 / 1,3	- 6,5	- 65
7	1. 4981	Fe Cr 50	25	-310 / -890 / -820	0,85	118 / 115 / 116	- 32	- 155
8	Stellit 6H	Ferro-TiC U	25	-25 / $\pm 0$ / -1	0,4	1,2 / <1 / 1	- 3,5	- 62
9	Ferro-TiC U	1. 4981	25	+17 / -75 / +166	0,25	250 / 190 / 155	- 93	- 209
10	Ferro-TiC U	Fe Cr 50	25	+26 / +24 / +37	1,3	37 / 28 / 31	+ 51	- 82
11	Tantal	1. 4981	25	-81 / -31 / -96	0,9	12 / 10 / 11	- 289	- 110
12	Ferro-TiC U	Stellit 6H	25	$\pm 0$ / -8 / $\pm 0$	1,2	3,5 / 3,2 / 4	- 13,2	- 18,8

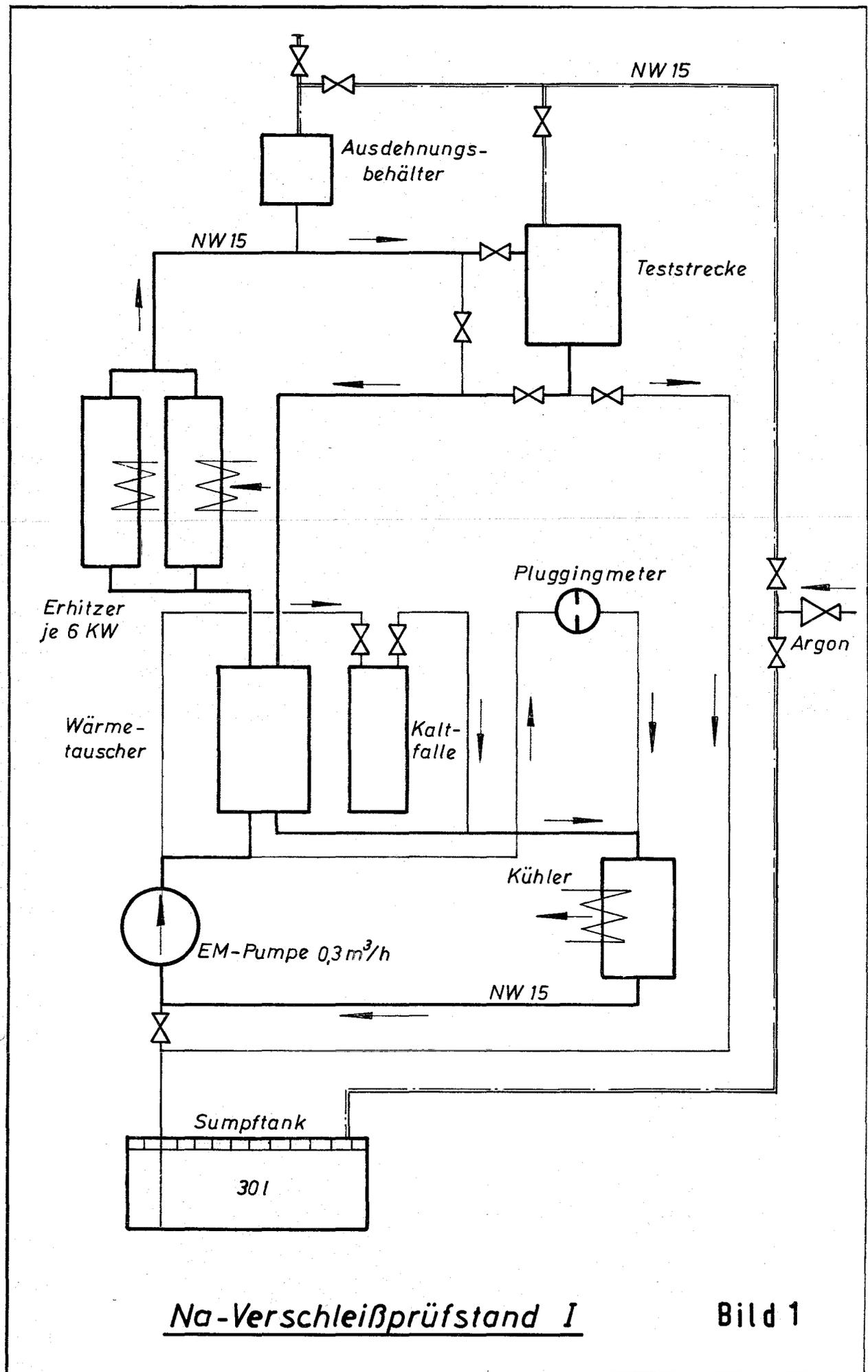
Tab.: 4 Ergebnisse aus Verschleißuntersuchungen in Natrium bei 600°C

Versuch Nr.:	Werkstoffpaarungen		Laufzeit h	Längenänderung der zyl. Proben [ $\mu\text{m}$ ]	Oberflächen-Rauhigkeit $R_t$ der Ringscheibe [ $\mu\text{m}$ ]		Gewichtsänderung	
	Zyl. Probe	Ringscheibe			vor	nach Versuch	Zyl. Proben [ mg ]	Ringscheibe [ mg ]
13	Tantal	Ferro-TiC U	2 5	+ 23 / + 25 / + 15	0,4	< 1 / < 1 / < 1	+	-
14	Ferro-TiC U	Hastelloy C	2 5	+ 38 / $\pm$ 0 / + 34	1,2	65 / 70 / 43	+ 113	- 2 67
15	Ferro-TiC T	Hastelloy C	2 5	- 31 / - 22 / - 33	0,8	13 / 10 / 11	- 65,8	- 6
16	Ferro-TiC U	Ferro-TiC U	2 5	- 7 / - 2 / - 8	0,85	3 / 5 / 4	- 7,2	- 1,4
17	Ferro-TiC T	1. 4981	2 5	- 7 / - 15 / - 9	1,0	23 / 16 / 19	- 8	- 12,5
18	Stellit 6H	1. 4981	2 5	- 26 / - 9 / - 11	2,2	12,5 / 10 / 15	- 70	- 14,4
19	1. 4981	Stellit 6H	2 5	- 149 / - 234 / - 117	0,25	3 / 2 / 4	- 17	- 28,4
20	1 4981	T Z M	2 5	- 50 / - 64 / - 128	1,4	20 / 20 / 20	- 40	- 5,5
21	Ferro-TiC U	Ferro-TiC U	50	- 21 / - 42 / - 26	2,0	4,6 / 6 / 3,8	- 20	< 1
22	Ferro-TiC T	1. 4981	2 5	- 8 / - 10 / - 5	1,4	18 / 25 / 13	- 15	- 15
23	Ferro-TiC T	1. 4981	50	- 9 / - 12 / - 18	0,2	18 / 27 / 21	- 12	- 16
24	Inconel 718	Inconel 718	2 5	- 51 / - 31 / - 39	1,25	6 / 5 / 6,5	- 10,3	- 41,5

Tab.: 5 Ergebnisse aus Verschleißuntersuchungen in Natrium bei 600° C

Versuch Nr.:	Werkstoffpaarungen		Laufzeit h	Längenänderung der zyl. Proben [ $\mu$ m ]	Oberflächen-Rauhigkeit $R_t$ der Ringscheibe [ $\mu$ m ]		Gewichtsänderung	
	Zyl. Probe	Ringscheibe			vor	nach Versuch	Zyl. Proben [ mg ]	Ringscheibe [ mg ]
25	Stellit 6 H	Inconel 718	25	- 13 / - 9 / - 11	3,0	3 / 4.5 / 2.5	- 17	- 54
26	1. 4981	Inconel 718	25	- 101 / - 103 / - 120	1,37	7 / 4 / 5	- 15	- 54.4
27	Ferro-TiC U	Inconel 718	25	- 70 / - 69 / - 64	2,0	10 / 15 / 11	- 148	- 31
28	Ferro-TiC T	Inconel 718	25	- 9 / - 14 / - 21	3,1	4 / 7 / 5	- 117	- 43
29	Inconel 718	1. 4981	25	- 43 / - 77 / - 48	2,2	30 / 27 / 30	- 19	- 12.3
30	Inconel 718	TZM	25	+ 10 / + 8 / + 13	1,75	83 / 70 / 90	- 15.3	- 180
31	Inconel 718	Ferro-TiC U	25	+ 2 / + 3 / + 1	2,5	2.5 / 1.3 / 1.8	+ 2.1	- 2.5
32	Fe Cr 50	Ferro-TiC U	25	- 8 / - 10 / - 9	0,7	2 / 1.6 / 5	- 14	- 9,6
33	TZM	1. 4981	25	- 100 / - 87 / - 82	1,4	26 / 28 / 31	- 82	- 28
34	TZM	TZM	25	- 91 / - 60 / - 81	0,6	70 / 70 / 70	- 78	- 24,5
35	TZM	Inconel 718	25	- 138 / - 133 / - 197	1,2	6.5 / 8 / 5	- 143	- 19
36	Tantal	Ferro-TiC U	25	- 7 / - 13 / - 11	0,7	1 / 1.2 / 1,4	- 71	- 5.7

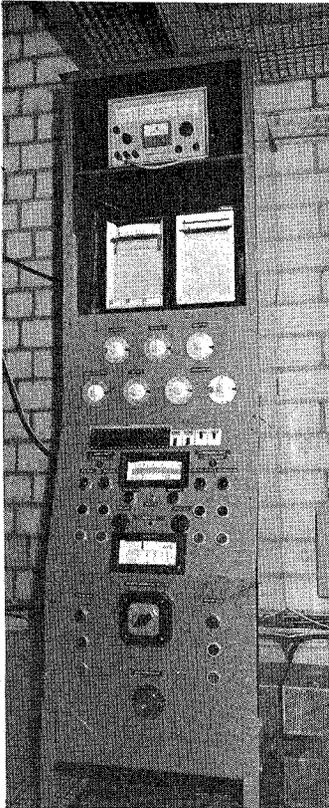
Tab.: 6 Ergebnisse aus Verschleißuntersuchungen in Natrium bei 600° C



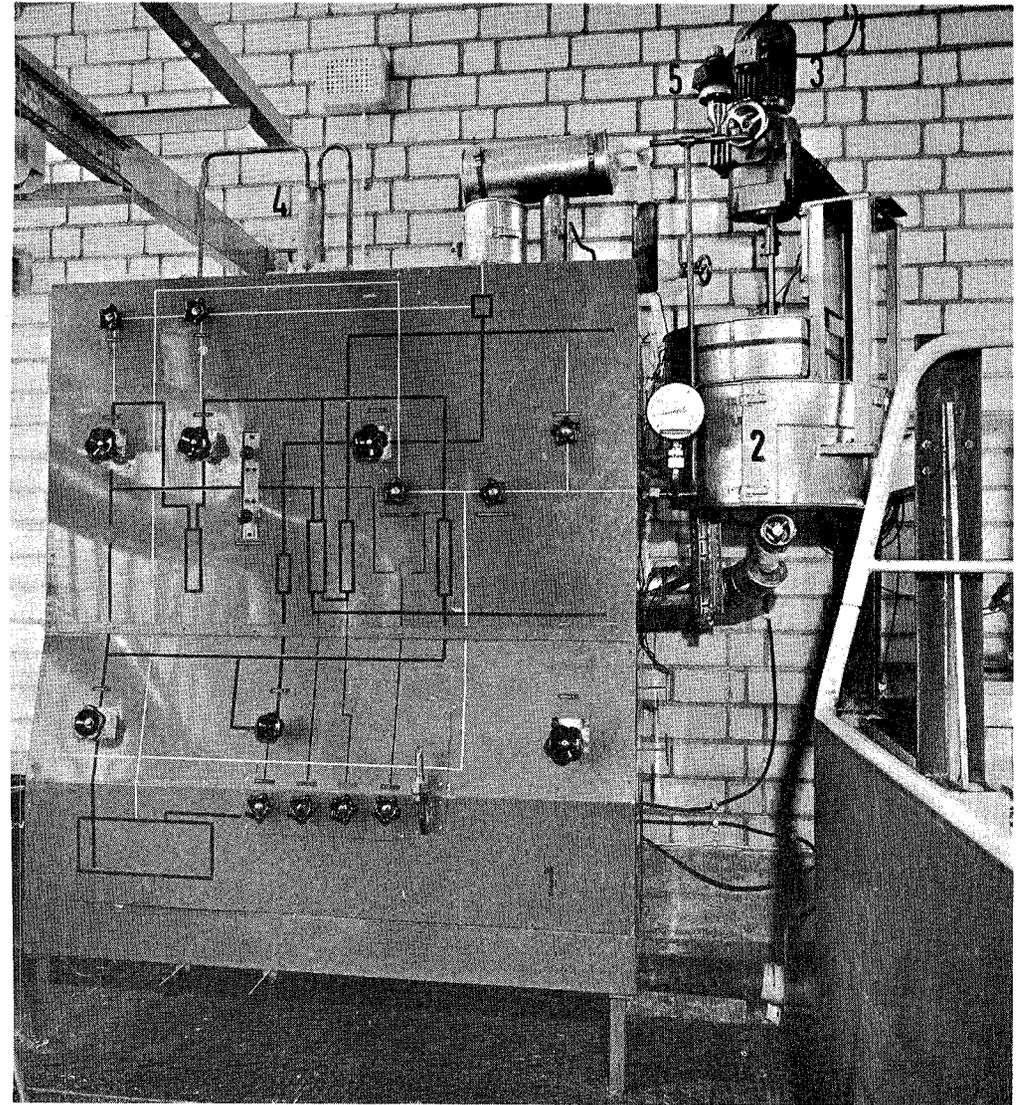
Na-Verschleißprüfstand I

Bild 1

# Schaltschrank

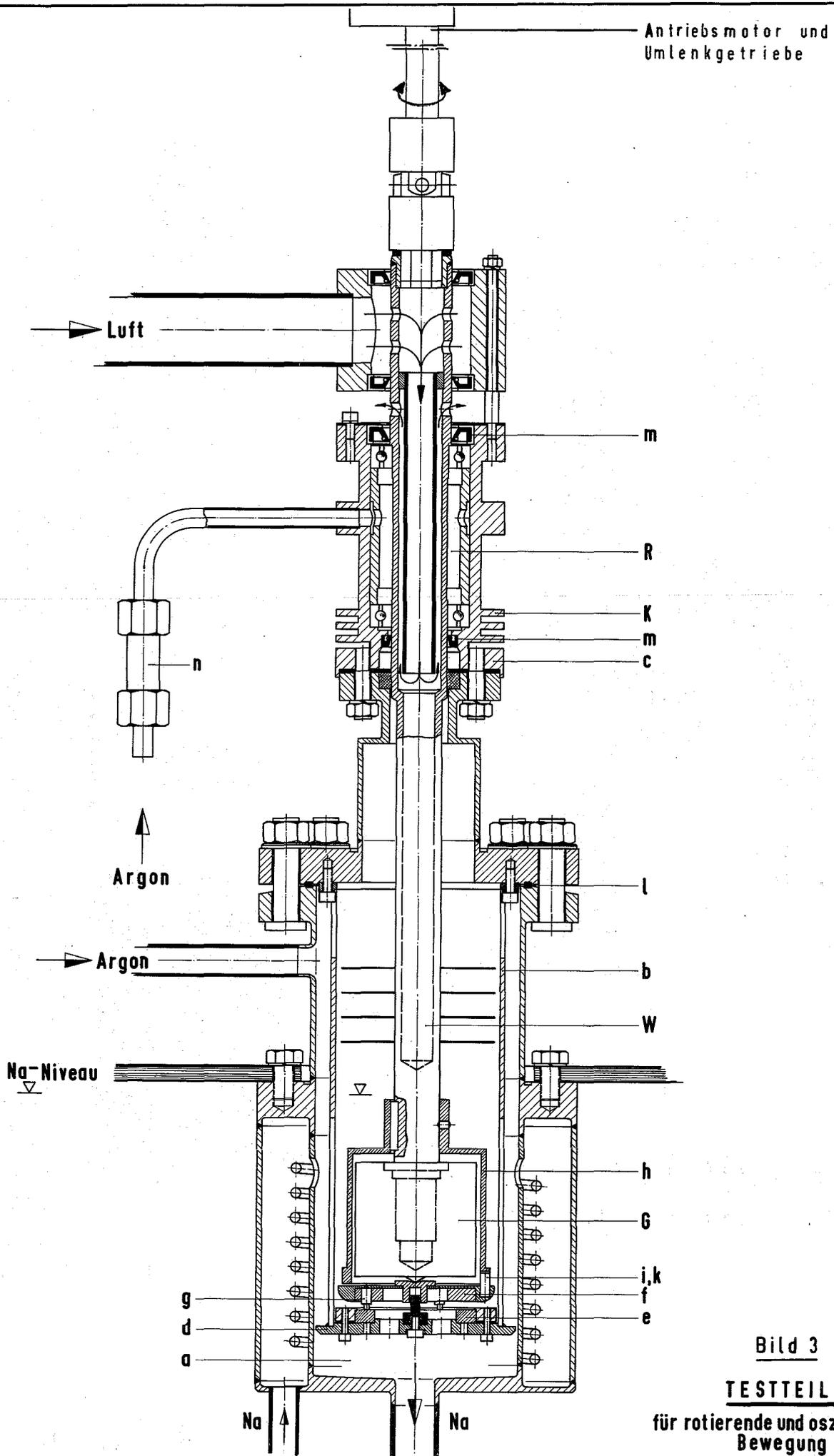


- 1 Versorgungs - und  
Reinigungskreislauf
- 2 Testteil
- 3 Getriebemotor
- 4 Na - Abscheider
- 5 Sicherheitsventil



**Bild 2**

**Na - Verschleißprüfstand**



Antriebsmotor und Umlenkgetriebe

Luft

Argon

Argon

Na-Niveau

Na

Na

Bild 3

**TESTTEIL I**

für rotierende und oszillierende Bewegung  
(verl. Ausführung)

Luft - Ein- u. Austritt  
für Wellenkühlung

Kugelrückschlag -  
Ventil

Gewicht

Probenhalterung

Zyl. Proben (Pin)

Ringscheibe

# Testteil I Einsatz

(Einzelteile)

Bild 4

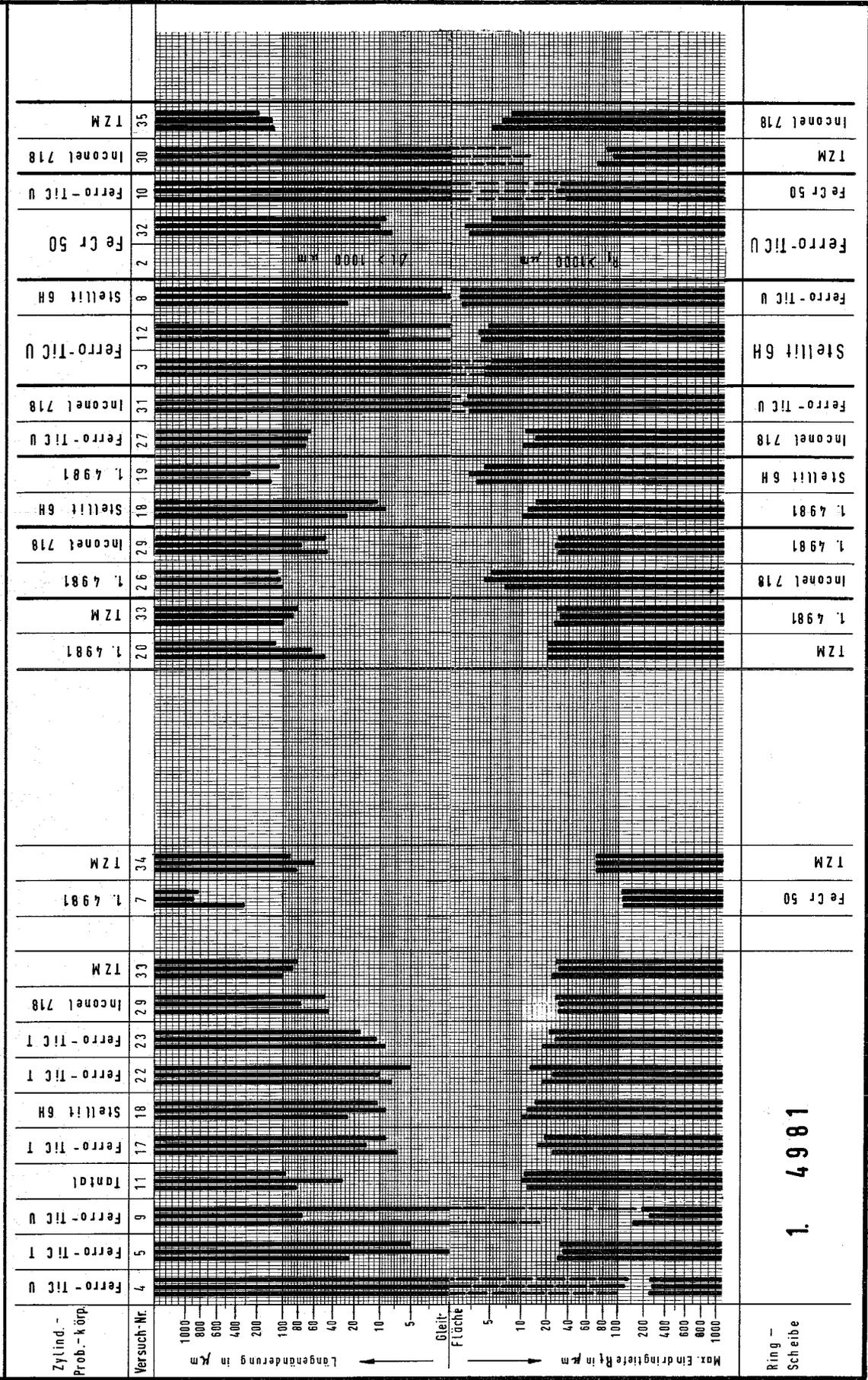


# Übersicht

(Fortsetzung)

über das Verschleißverhalten der  
Werkstoffkombinationen in Tabelle 1

# Bild 6



1. 4981

Ring -  
Scheibe

Zylind.-  
Prob.-körper

Versuch-Nr.

1000  
800  
600  
400  
200  
100  
80  
60  
40  
20  
10  
5  
Gleit-  
Fläche

Max. Eindringtiefe Rt in Km  
1000  
800  
600  
400  
200  
100  
80  
60  
40  
20  
10  
5

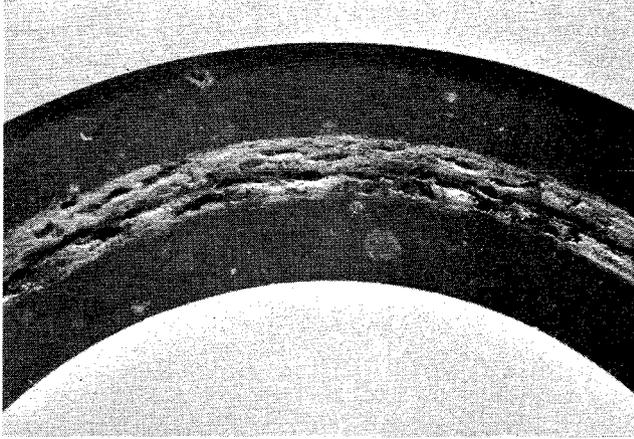


Bild 7  
Borkenartige Gleitfläche  
auf Ferro-TiC-U - Ring

Vers.Nr.1

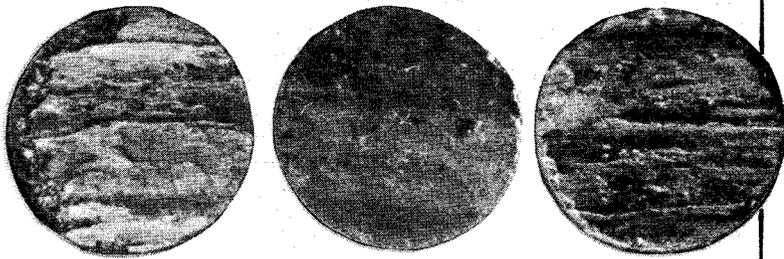


Bild 9

Ferro-TiC-U - Proben mit Stelliteauftrag

Vers.Nr.3

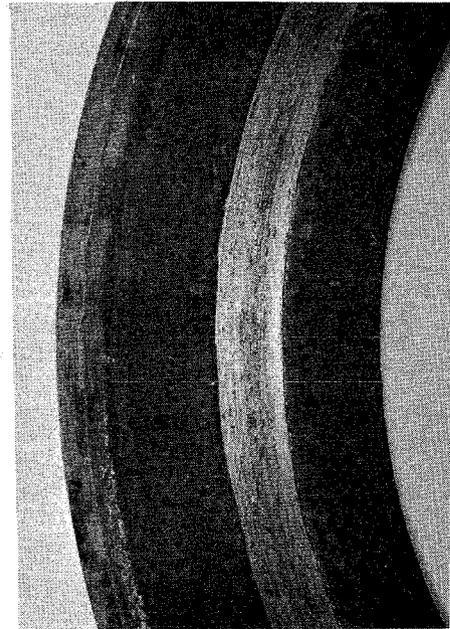


Bild 8

Metallisch helle Gleit-  
bahn neben mattgrauem  
Belag auf der Ferro-TiC-U  
Ringscheibe in Vers.Nr.21

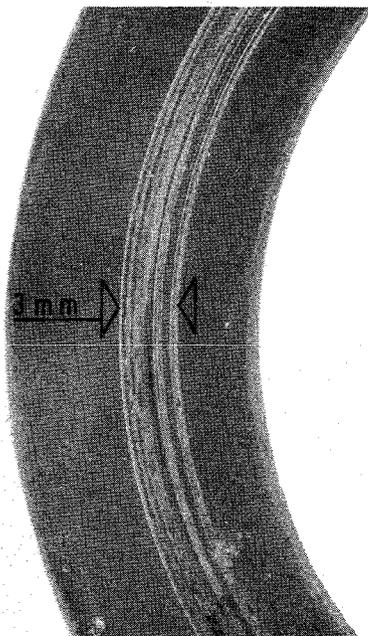


Bild 10

Geringfügige Laufspuren auf F-T-U  
unter Stellit 6H Versuch Nr. 8

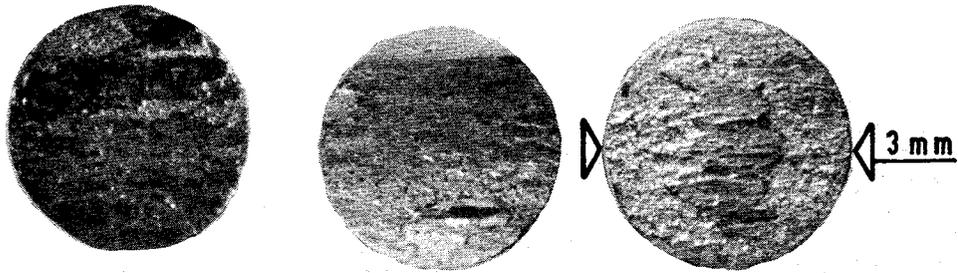


Bild 11  
 Ferro-TiC-U - Proben mit Aufschweißungen aus 1.4981  
 Vers.Nr.4

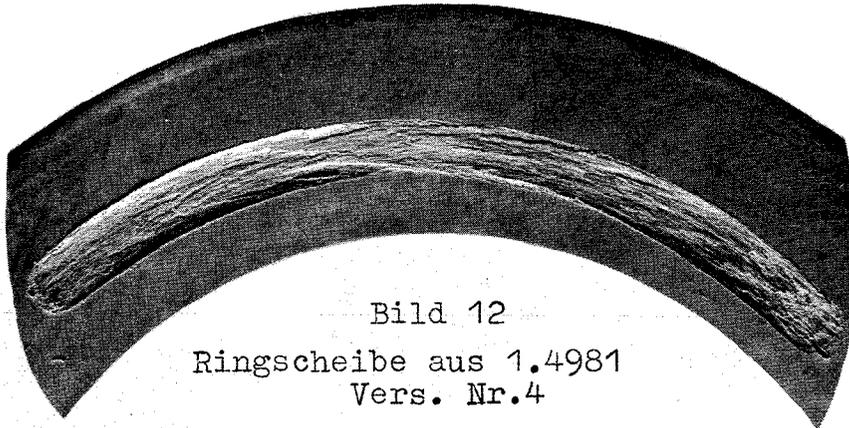


Bild 12  
 Ringscheibe aus 1.4981  
 Vers. Nr.4

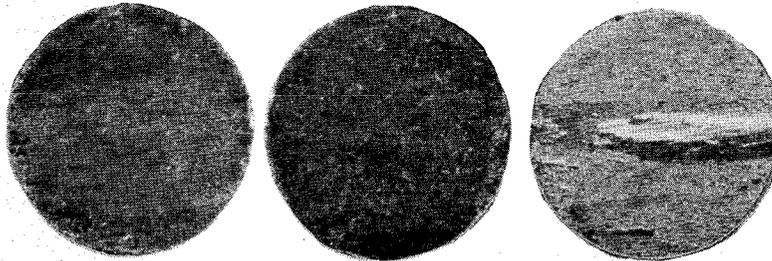


Bild 13  
 Gut erhaltene F-T-U - Gleitflächen mit part.  
 Auftrag aus 1.4981 Versuch Nr. 5

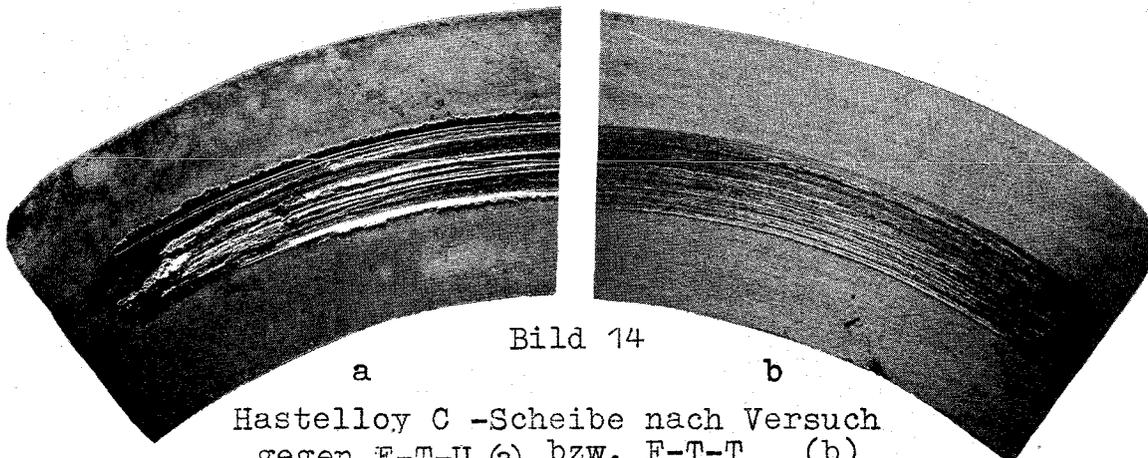


Bild 14  
 a b  
 Hastelloy C -Scheibe nach Versuch  
 gegen F-T-U (a) bzw. F-T-T (b)  
 Vers.Nr.14 Vers.Nr.15

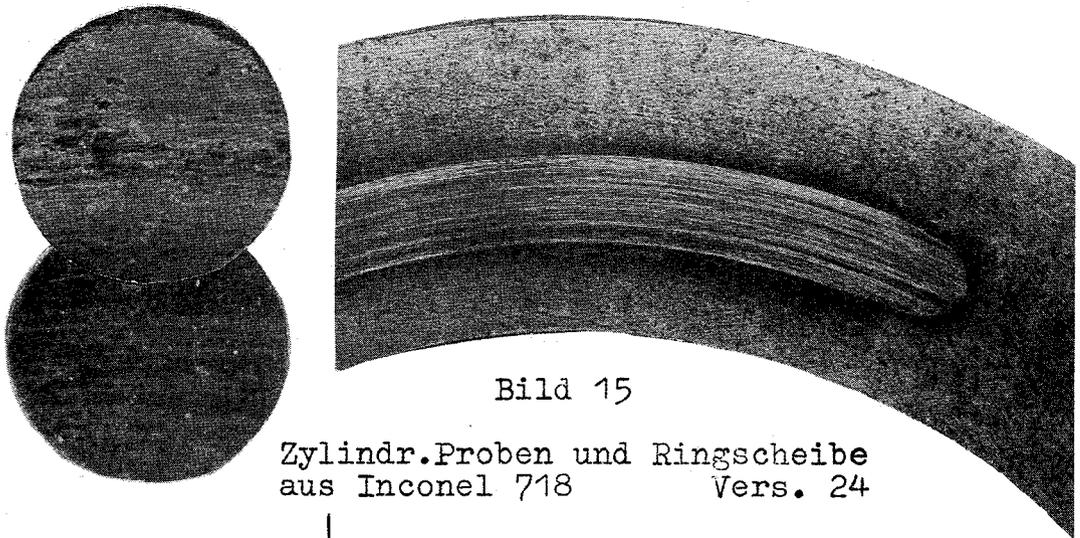
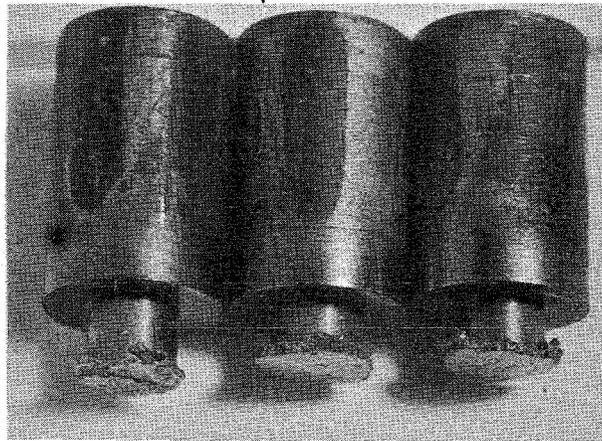


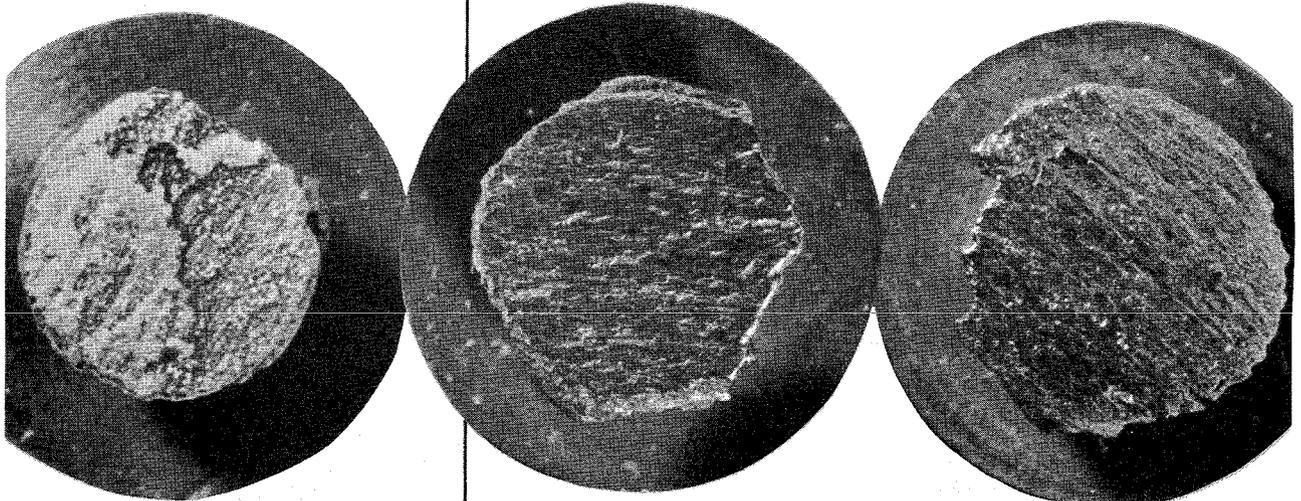
Bild 15

Zylindr.Proben und Ringscheibe  
aus Inconel 718                      Vers. 24



◁ Bild 16

Bild 17



Zylindrische Proben aus 1.4981 mit starken Verformungen  
und Aufschweißungen aus FeCr 50                      Versuch Nr. 7

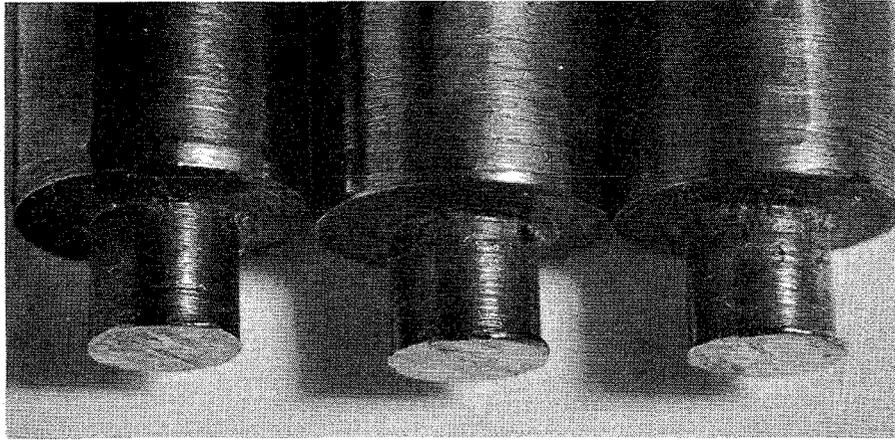


Bild 18  
Tantal-Proben mit Randgratbildung in Vers.Nr11  
gegen 1.4981

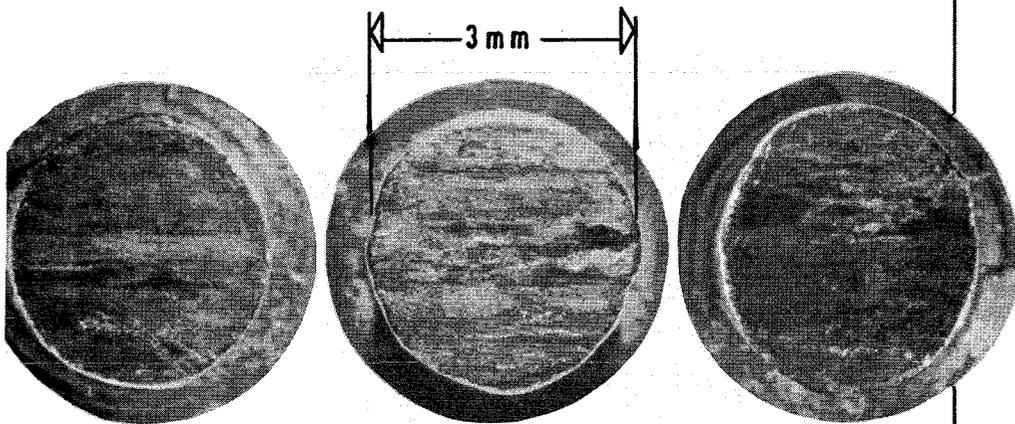


Bild 19  
Gleitflächen der Tantal-Proben  
Vers.Nr.11

Ringscheibe aus 1.4981 mit Spuren  
starker Kaltverschweißung  
Versuch Nr.11



Bild 20

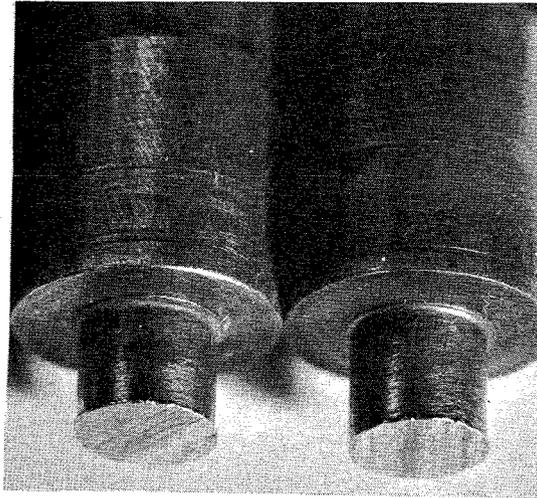


Bild 21

Proben aus TZM (l) und 1.4981 (r) mit  
ähnlich starker Gratbildung Vers.Nr.20/33

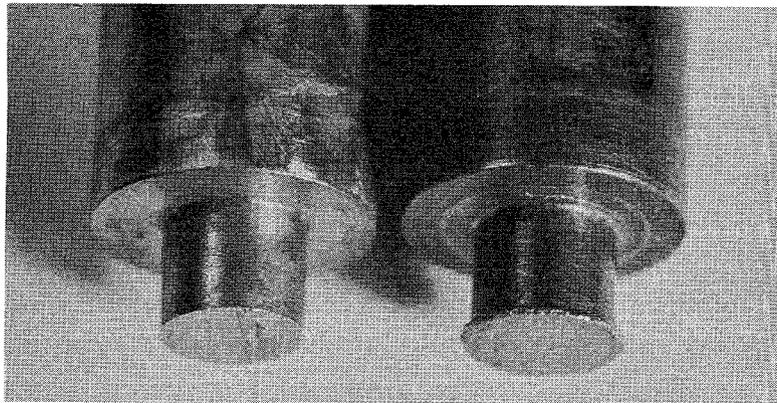


Bild 22

Unterschiedliche Verschleißwirkung an  
Proben aus Stellite 6H (l) und 1.4981 (r)  
Vers.Nr. 18/19

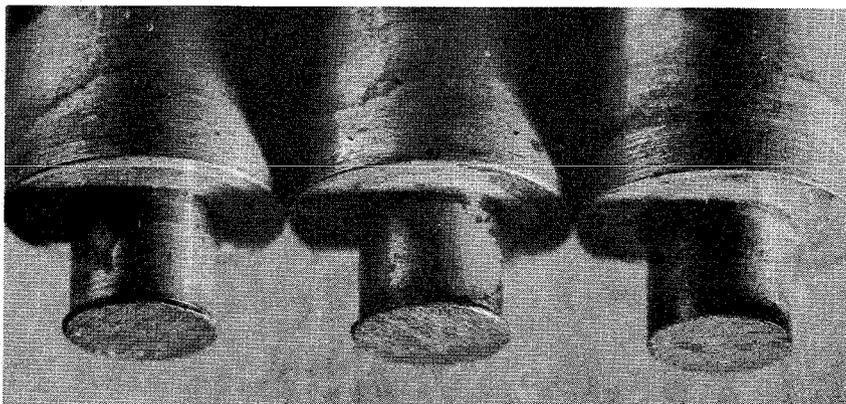


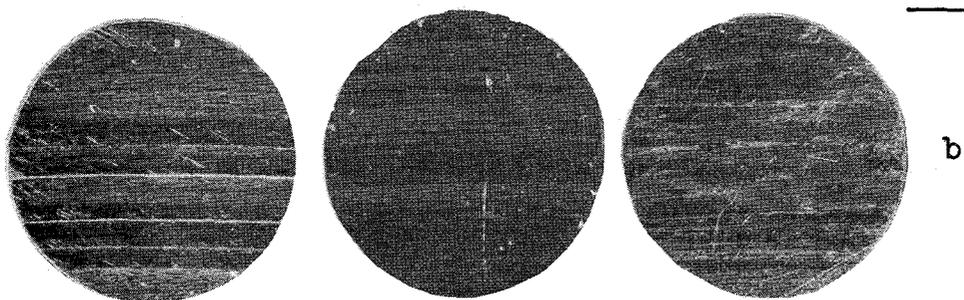
Bild 23

1.4981-Proben nach Versuch gegen Inconel 718  
Vers.Nr 26



Glatte F-T-U - Gleitflächen gegen Inconel 718  
Versuch Nr. 27

Bild 24



Riefenbildung auf Inconel-Proben (geg. F-T-U)  
Versuch Nr. 31

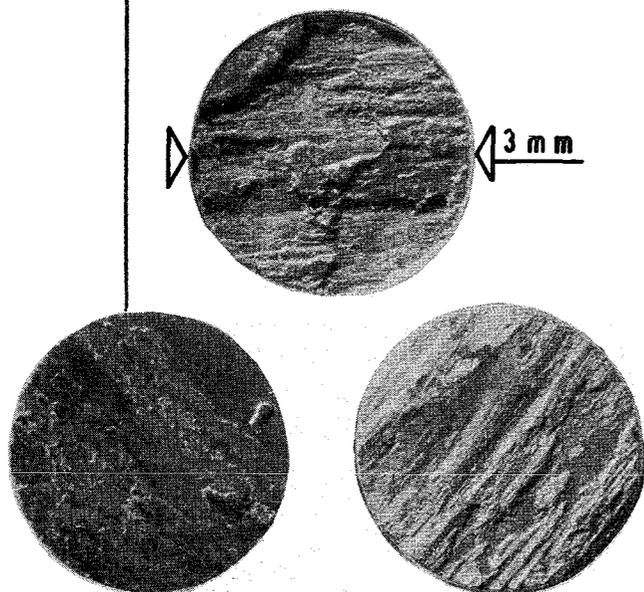


Bild 25  
FeCr 50 -Auftrag  
auf Ferro-TiC-U - Proben  
Vers.Nr.10

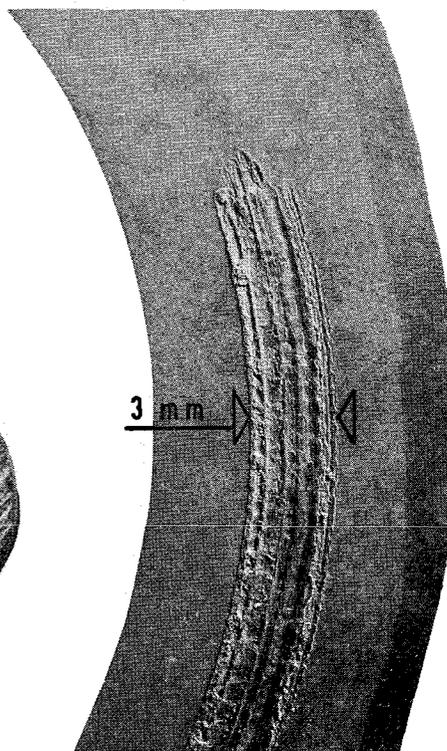


Bild 26  
FeCr 50 - Ringscheibe  
nach stark abrasivem  
Verschleiß Vers. 10



Bild 27  
Inconel-Proben Vers.Nr.30

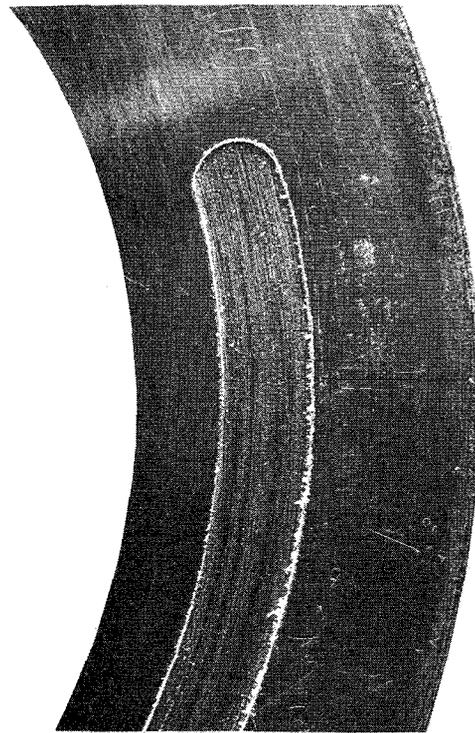
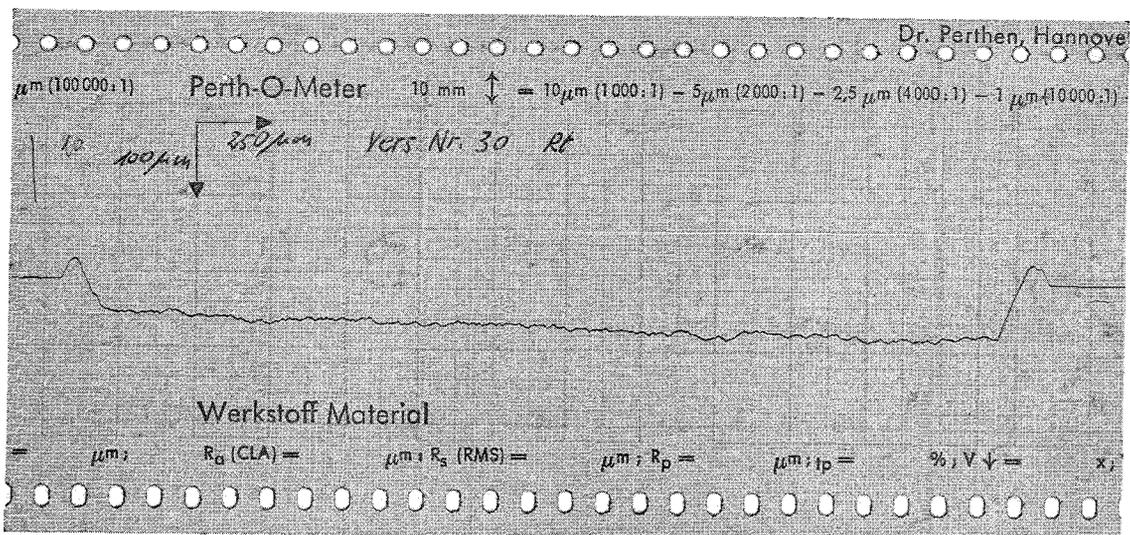


Bild 28  
TZM-Scheibe mit spröden  
Randaufwerfungen und  
großer Eindringtiefe  
Vers.Nr.30

Bild 29 Gleichmäßig starke Gleitbahneinsenkung  
in TZM-Scheibe Versuch 30



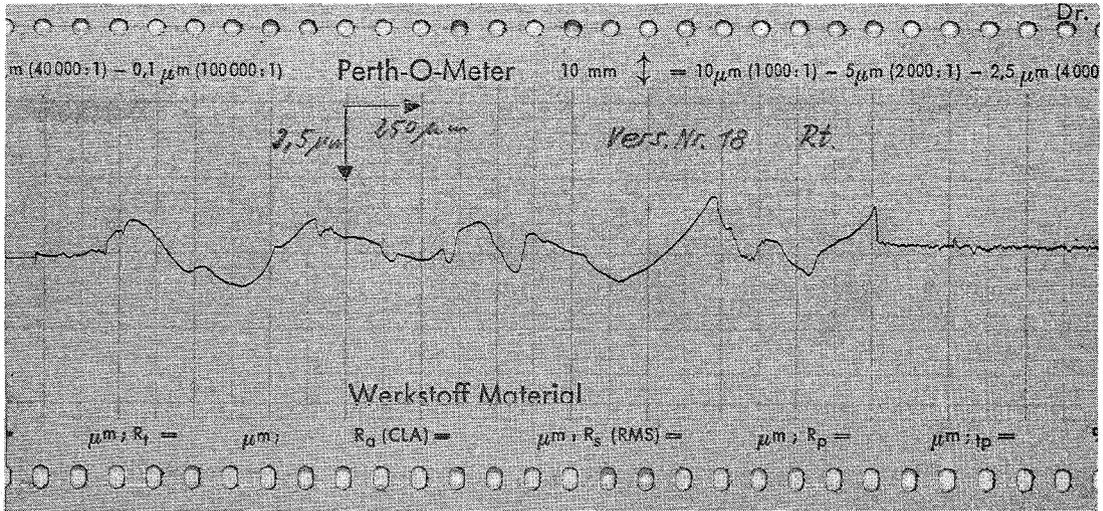


Bild 30

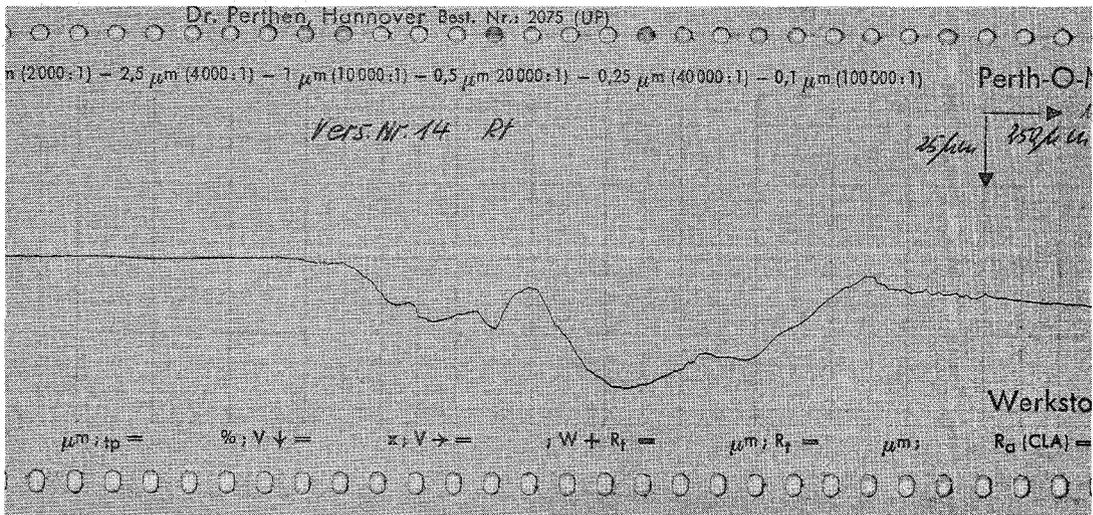


Bild 31

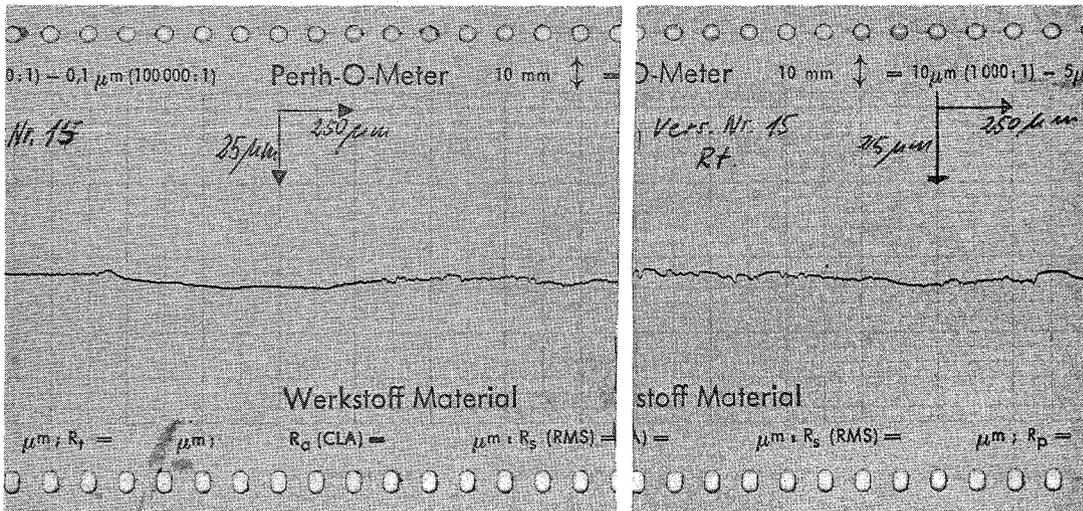


Bild 32

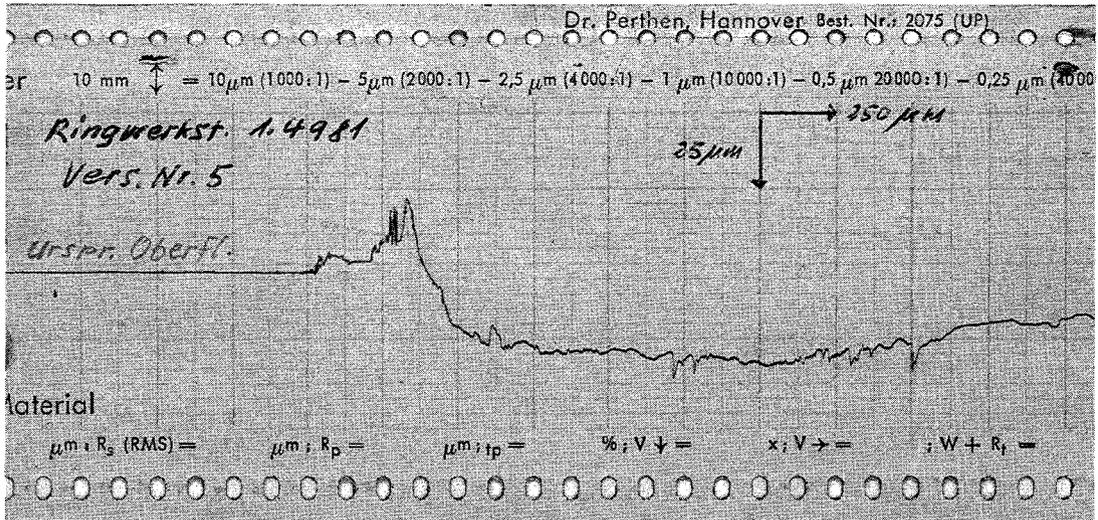


Bild 33

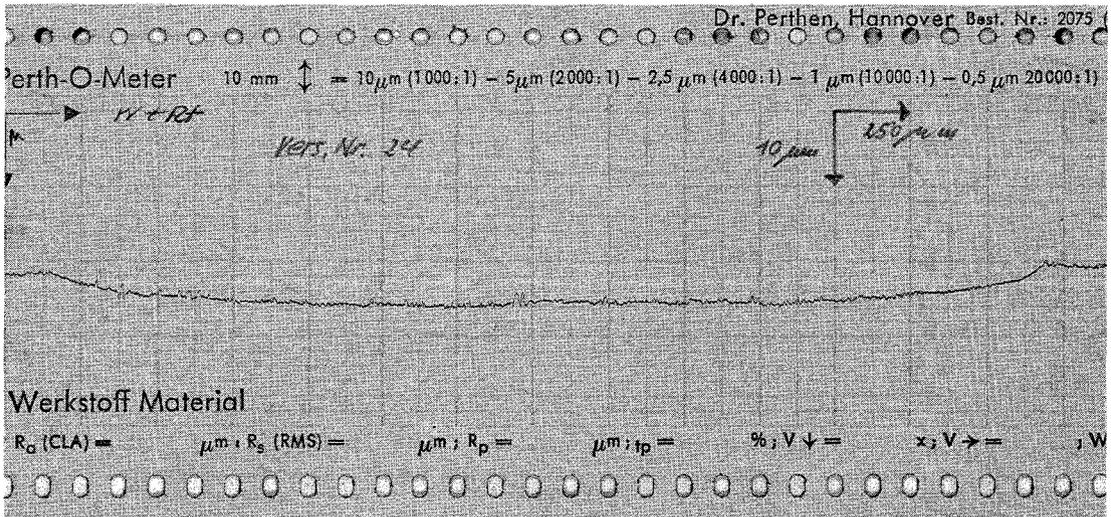
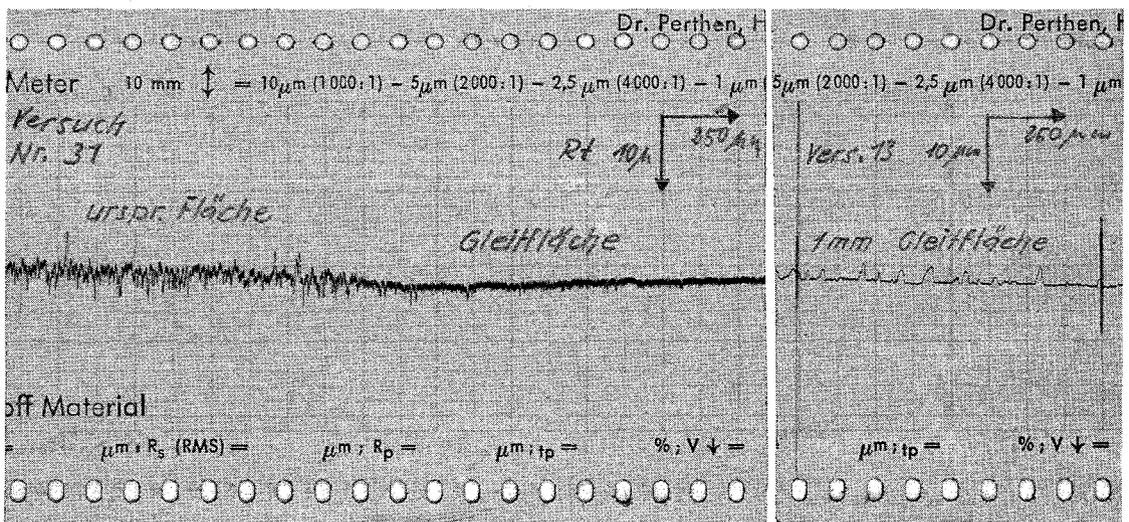


Bild 34



a

b

Bild 35

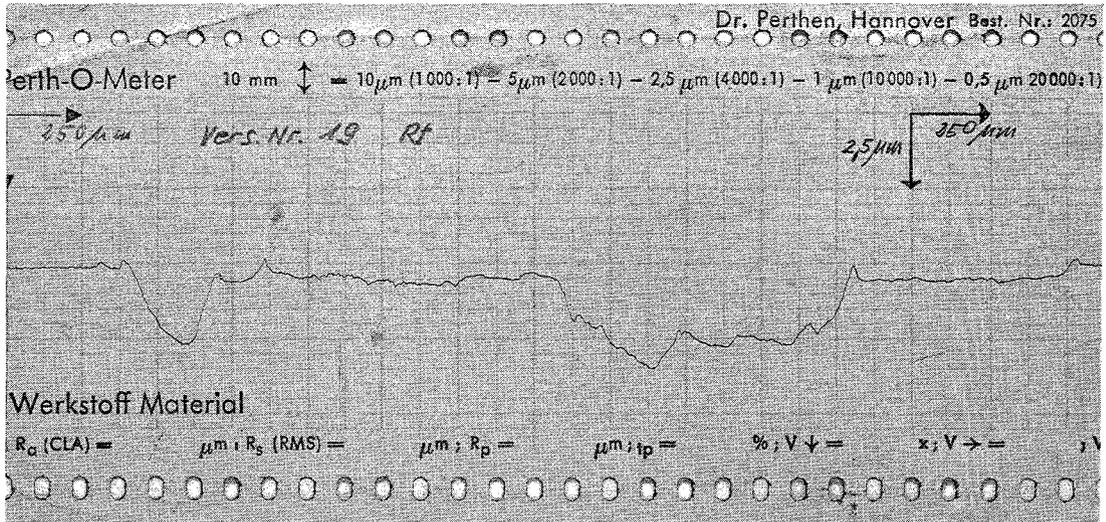


Bild 36

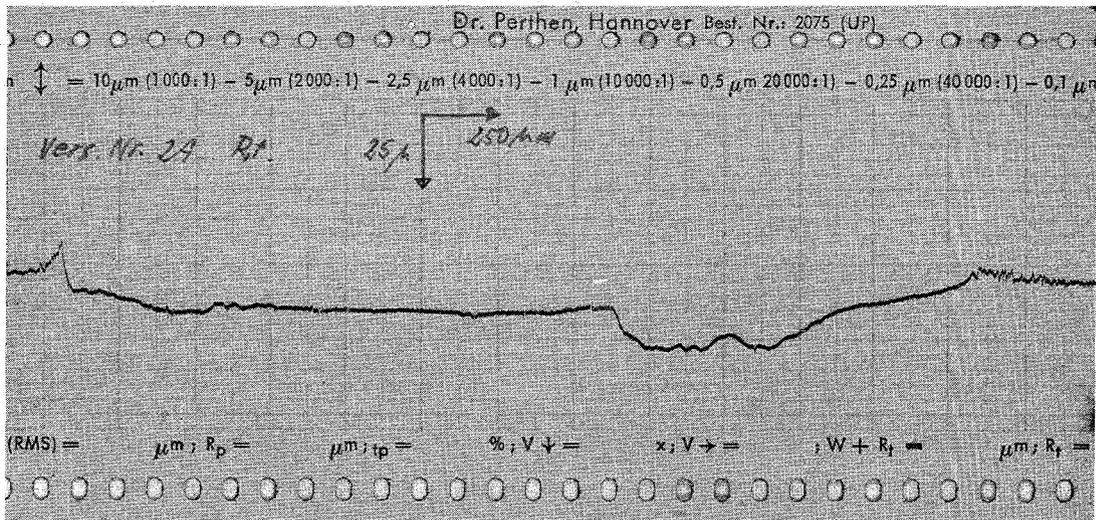


Bild 37

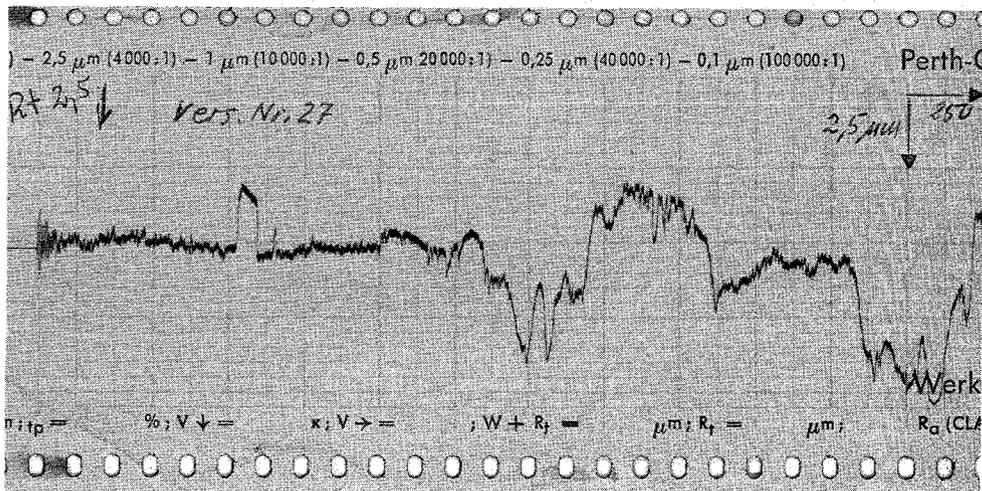


Bild 38