

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

November 1972

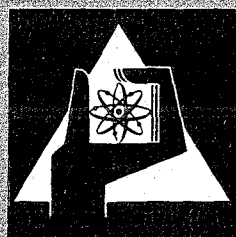
KFK 1659

Institut für Reaktorbauelemente
Projekt Schneller Brüter

**Das Verschleißverhalten von Werkstoffkombinationen in flüssigem
Natrium**

Versuchseinrichtungen und experimentelle Ergebnisse

E. Wild, K.J. Mack, G. Drechsler



**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 1659

Institut für Reaktorbauelemente

Projekt Schneller Brüter

Das Verschleissverhalten von Werkstoffkombina-
tionen in flüssigem Natrium

Versuchseinrichtungen und experimentelle Er-
gebnisse

von

E. Wild

K.J. Mack

G. Drechsler

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M.B.H., KARLSRUHE

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	1
2. Versuchseinrichtungen	2
2.1 Komponenten	4
2.2 Messtechnische Ausrüstung	11
2.2.1 Betriebsmessungen	11
2.2.2 Versuchsdatenerfassung	12
2.3 Zentrale Versorgung, Registration und Kontrolle	16
2.4 Versuchsbetrieb	18
2.5 Auswertung	19
3. Problemstellung und Versuchsergebnisse	20
3.1 Vorauswahlversuche	21
3.2 Parameteruntersuchungen	26
3.2.1 Einfluss der chemischen Reaktion des Na	26
3.2.2 Einfluss apparativer Grössen	28
4. Reibungsbeiwerte	29
5. Zusammenfassung	31
6. Literatur	33
Abbildungen	

Inhalt

Für die Durchführung gezielter Verschleißuntersuchungen sind Versuchsanlagen erforderlich, welche die Simulation von Betriebsbedingungen ermöglichen, wie sie in den Komponenten Na-gekühlter Reaktoranlagen auftreten. Parameter wie der Oxidgehalt des Flüssigmetalls oder die Strömungsgeschwindigkeit lassen sich nur in Modellkreisläufen mit einem hohen Anteil meß- und regeltechnischer Einrichtungen darstellen. Für die Erfassung der z.T. nur geringen, durch Verschleißwirkung auftretenden Gestaltsänderung der Werkstoffproben werden hochempfindliche Meßgeräte eingesetzt.

Der vorliegende Bericht beschreibt Versuchsanlagen sowie Meß- und Sicherheitseinrichtungen für die Durchführung von Verschleißversuchen in Natrium bei Temperaturen bis zu 600 °C. Ferner werden gewonnene Versuchsergebnisse diskutiert und tabellarisch aufgeführt.

Contents

Specific investigations into the wear behavior call for experimental facilities which allow to simulate operating conditions existing in the components of sodium-cooled reactor facilities. Parameters such as the oxide content of the liquid metal or the flow velocity can be produced only in mock-up loops equipped with a significant amount of measuring and control instruments. Highly sensitive instruments are used to measure the sometimes minor changes of shape of material specimens caused by wear.

In this report an experimental facility is described as well as measuring and safety devices for carrying out wear tests in sodium up to 600°C. Besides, experimental results obtained until June 1972 are discussed and tabulated.

1. The first part of the document discusses the importance of maintaining accurate records of all transactions. This is essential for ensuring the integrity of the financial statements and for providing a clear audit trail.

2. The second part of the document outlines the various methods used to collect and analyze data. These methods include interviews, surveys, and focus groups, each of which has its own strengths and limitations.

3. The third part of the document describes the process of data analysis, which involves identifying patterns, trends, and relationships within the data. This process is often aided by statistical software and other analytical tools.

4. The fourth part of the document discusses the importance of reporting the results of the research. This involves presenting the findings in a clear and concise manner, using appropriate visual aids such as charts and graphs.

5. The fifth part of the document concludes by emphasizing the need for transparency and accountability in the research process. This includes providing a detailed account of the methods used and the results obtained, as well as being open to criticism and feedback.

6. The sixth part of the document discusses the ethical considerations that must be taken into account when conducting research. This includes issues such as informed consent, confidentiality, and the potential for harm to participants.

7. The seventh part of the document provides a summary of the key findings and conclusions of the research. This is followed by a list of references and a list of appendices.

8. The eighth part of the document discusses the implications of the research for practice and policy. This involves identifying the key areas where the research findings can be applied and the potential benefits of these applications.

9. The ninth part of the document provides a list of recommendations for further research. This includes identifying the key areas where more research is needed and the methods that should be used to conduct this research.

10. The tenth part of the document concludes by thanking the participants and the funding agencies that supported the research. This is followed by a list of acknowledgments and a list of contact information for the authors.

1. Einleitung

Die besondere Beanspruchung von Lagern, Führungen und Halterungen in den Komponenten von Kernkraftanlagen mit Natriumkühlung erfordert den Einsatz verschleissfester Werkstoffpaarungen. Hierzu geeignete Gleitpartner können nur in umfangreichen Versuchsreihen an Modellgeometrien ermittelt werden. Die Versuchsbedingungen sind dabei den Betriebsverhältnissen des Einsatzbereiches anzupassen. Die Versuchseinrichtungen sollen Experimente in Natrium, Natrium-Inertgas-Atmosphäre oder reinem Inertgas ermöglichen. Bei der grossen Zahl von Materialpaarungen sollen Versuchsaufwand und zeitlicher Ablauf gut überschaubar bleiben.

Die Versuchseinrichtungen sollen die Untersuchungen der den Metallabtrag durch Verschleiss bestimmenden Parameter ermöglichen. Diese sind hauptsächlich:

Gleitweg
Belastung
Temperatur
Oxidgehalt im Natrium
atmosphärische Bedingungen
Bewegungsart
Eintauchzeit

Die gezielte Untersuchung dieser Parameter erfordert umfangreiche apparative Einrichtungen, nämlich:

Natriumkreisläufe, die eine geforderte Durchsatzmenge, einen variablen zulässigen Oxidpegel im Natrium, sowie die Betriebstemperatur in den Teststrecken von 600 bzw. 650 °C über ausreichend lange Versuchszeiten gewährleisten;

Teststrecken, in welchen die Werkstoffproben unter Natrium oder Natrium-Gasatmosphäre den gewünschten Versuchsbedingungen ausgesetzt werden können;

Messgeräte und Einrichtungen zur Erfassung der an den Werkstoffproben durch Verschleiss eintretenden Gestaltsänderungen.

In den unter 2. beschriebenen Anlagen wurden bisher ca. 250 Einzelversuche durchgeführt. Die Aufgabenstellung hierfür war durch die Entwicklungsarbeiten für den Schnellen Na-gekühlten Reaktor SNR 300 vorgegeben.

Im ersten Schritt wurden Vorauswahlversuche unter Standardparametern durchgeführt [1], [2]. Dazu wurden aus der Vielzahl der von den Herstellerfirmen angebotenen Werkstoffe diejenigen herangezogen, deren physikalische, chemische und mechanische Eigenschaften eine hohe Verschleiss- und Korrosionsresistenz in flüssigem Natrium erwarten liessen. Mit den dabei ermittelten, günstigsten Gleitpaarungen wurden im zweiten Schritt weiterführende Versuche durchgeführt, bei denen der Einfluss der Bewegungsart, der Probengeometrie und der chemischen Reaktion des Na auf das Verschleissverhalten der Werkstoffe interessierten.

Der vorliegende Bericht beschreibt die Versuchsanlage; die zum Einsatz gelangenden Teststrecken, die für die Versuchsauswertung eingesetzten Messgeräte und gibt einen Überblick über die bisher erzielten Versuchsergebnisse.

2. Versuchseinrichtungen

Für die Durchführung eines variablen Versuchsprogramms wurden 2 Prüfanlagen erstellt. Sie bilden selbständige Einheiten mit eigenen Natrium-Versorgungs- und Reinigungsstrecken. Hierdurch wird eine kontinuierliche Reinigung des Flüssigmetalls durch die effektive Filter-Kaltfalle ermöglicht. Das in der Teststrecke befindliche Natrium wird fortlaufend ausgetauscht und die durch Verschleiss an den Werkstoffproben anfallenden Abriebstoffe damit in den Reinigungskreis transportiert.

Der Natrium-Verschleissprüfstand NVP I besitzt 1 Teststrecke und ist seit 1968 in Betrieb. Im Januar 1971 wurde ein weiterer Prüfstand NVP II angefahren. Er besitzt vier Teststrecken und eine 10-fach grössere Na-Durchsatzmenge als NVP I. Der Grundaufbau beider Anlagen ist identisch und schematisch in Abb. 1 und 2 dargestellt. Beide Kreisläufe sind als 8er-Schleife mit Zwischenwärmetauscher (Rekuperator) aufgebaut. Die kennzeichnenden Abmessungen und Betriebsdaten der beiden Kreisläufe sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Da sich die beiden Na-Kreisläufe wesentlich nur durch die Zahl der Teststrecken unterscheiden, werden Betrieb und Funktionsweise, Aufbau und Komponenten im Folgenden für NVP II beschrieben.

Im Hauptkreis wird das Flüssigmetall von der Pumpe (Temperatur ca. 500 °C) über die Primärseite des Wärmetauschers zum Erhitzer gefördert. In dem Rekuperativ-Wärmetauscher erfolgt eine Aufheizung des Natriums durch den sekundärseitigen heisseren Gegenstrom auf 570 °C. Im Erhitzer wird die geforderte Betriebstemperatur von 600 °C (650 °C) erreicht. Das Natrium verlässt den Erhitzer und gelangt in die Testbehälter. Der Rücklauf erfolgt über die Sekundärseite des Wärmetauschers und von dort über den Kühler zurück zur Pumpe.

Das in NW 25 bzw. NW 50 ausgeführte Rohrleitungssystem ist wärmeisoliert und während des Betriebes mit einer Spritzschutzverkleidung umgeben, die Teststrecken sind ausserhalb der Verkleidung, frei zugänglich angeordnet (Abb. 3, 4). Die Testbehälter sind so gestaltet, dass in sie wahlweise Einbauten mit verschiedenen Bewegungsmechanismen eingebracht werden können.

Das die Komponenten verbindende Rohrsystem wurde so ausgelegt, dass zwischen definierten Fixpunkten eine ausreichende Elastizität und freie thermische Ausdehnung gewährleistet ist. Sämtliche Rohrleitungen wurden mit einem Gefälle von 3 bis 5 Grad in Schweisskonstruktion verlegt. Als Material wurde der Werkstoff 1.4571 verwendet.

Die Betriebstemperaturen des Natriums in den Teststrecken betragen 600 bzw. 650 °C, im Kreislaufstrang mit Pumpe und Armaturen höchstens 500 °C.

Die separaten Natrium-Einfüll- und Ablassleitungen stellen Direktverbindungen zwischen den Testbehältern und dem Auffangbehälter (Sumpftank) dar. Parallel zu Pumpenaustritt und -Eintritt liegen der Kaltfallkreis und die Oxid-Messkreise. Über den freien Na-Oberflächen in den diversen Behältern des Kreislaufes ist ein kommunizierendes Schutzgas-Rohrsystem NW 20 angeordnet. Zwischen dem Gasverteiler und den Testbehältern befinden sich Na-Abscheider mit je ca. 5 l Inhalt. Diese sind wiederum durch Ablassleitungen NW 15 mit dem Natrium-Hauptkreis verbunden. Alle Behälter und Rohrleitungen sind mit einer thermischen Isolierung aus Mineralwolle versehen. Die Schichtstärke beträgt, je nach Behälter- bzw. Rohrdurchmesser und Temperatur, 40 bis 80 mm.

Über allen freien Na-Oberflächen im Kreislauf befindet sich eine Argonatmosphäre bei einem Druck von 0,2 bis 0,3 atü. Ein Gas-Sicherheitsventil, das bei 0,4 atü öffnet, schützt die Anlage vor unzulässig hohem Druckanstieg.

Unter dem gesamten Prüfstand - mit Ausnahme des Sumpftanks - wurde eine Bodenfreiheit von ca. 1 m belassen. Die von der Bühnenkonstruktion überbaute Fläche ist mit flachen Auffangwannen ausgelegt. Diese sind gut zugänglich und können zur Reinigung leicht herausgenommen werden (Abb. 5).

2.1 Komponenten

- Teststrecke für rotierende und oszillierende Bewegung
- Wesentlichste Komponente der Versuchseinrichtungen ist der in sechsfacher Ausführung vorhandene Teststreckeneinsatz. In ihm werden die zu untersuchenden Werkstoffproben möglichst betriebsnahen Bedingungen unterworfen.

Dabei ist die Simulation der verschiedenartigen, zwischen gleitenden Teilen in Reaktorkomponenten auftretenden Relativbewegungen möglich.

Wichtigster Teil ist daher der Bewegungsmechanismus mit der Probenhalterung. Für die Probenanordnung wurde das "Stift-Scheibe"-System gewählt, bei dem sich eine flache Ringscheibe kontinuierlich oder mit beliebigen Haltezeiten rotierend oder oszillierend über 3 zylindrische Proben bewegt (Bild 6a). Diese Anordnung wurde in einer Reihe von Entwicklungsschritten erarbeitet. Die gleiche Probenanordnung hatte sich zeitlich parallel hierzu, beim Liquid Metal Engineering Center (AI) in USA ebenfalls bewährt [3], [4]. Durch die Ähnlichkeit der Versuchsgeometrien ist die Möglichkeit zum Vergleich der Ergebnisse gegeben. Die zylindrischen Proben werden so ausgeführt, dass sie bei allen Versuchen, bei denen die Geometrie nicht als Parameter betrachtet wird, mit planparalleler Berührungsfläche auf der Ringscheibe gleiten. Damit soll die Bildung eines hydrodynamischen Schmierfilms verhindert werden und das Natrium den Verschleissvorgang nur über chemische Reaktionen beeinflussen.

Mit der Veränderung des Stift-Durchmessers lässt sich die spezifische Belastung in bestimmten Grenzen variieren. Die durch den Verschleissvorgang auftretenden Längenänderungen an den zylindrischen Stiften, sowie die Eindringprofile der Laufspuren auf den Scheiben sind messtechnisch relativ sicher zu erfassen.

Bei oszillierendem Betrieb, mit einem Drehwinkel von ca. 90° um die Behälterachse, sowie bei rotierendem Betrieb und unterschiedlichen Achsabständen r der Proben, ergeben sich getrennte Gleitbahnen (Abb. 6 b und 6 c). Dadurch können je Versuchslauf drei Einzelergebnisse ausgewertet werden. Die sich durch die unterschiedlichen Achsabstände, r , r' und r'' ergebenden verschiedenen Flächenpressungen an den Proben, werden bei der Auswertung berücksichtigt.

Bei Versuchen unter oszillierender Relativbewegung wird die Probenhalterung H mit den zylindrischen Proben am Boden des Probenhalterkäfigs B fixiert (Abb. 7). Für den rotierenden Betrieb wird sie auf der oberen Hälfte der als Axial-Kugellager ausgebildeten Basis lose drehbar befestigt. Haltering und oberer Lagerteil werden während des Betriebs durch den im Deckelflansch fest verschraubten Biegebalken S an der Raste R gehalten. Ein durch Reibkraft entstehendes Drehmoment bewirkt eine Auslenkung der Stabspitze, entsprechend dem jeweiligen Reibungskoeffizienten.

Die Übertragung der Drehkraft erfolgt von einem über der Teststrecke angebrachten Getriebemotor über die vertikale Welle W und die Krone K auf die Mitnehmerbolzen M an der beweglichen Probenhalterung. Die Wellendurchführung im oberen Teil des Versuchseinsatzes ist durch Simmerringe abgedichtet. Für die verwendeten Perbunan-Simmerringe wurde die Kühlung der umgebenden Teile sowie der Welle notwendig. Hierfür wurde der Aussenteil mit Kühlrippen versehen. Die Wellenkühlung erfolgt durch den innenliegenden konzentrischen Luftkanal und gewährleistet eine maximale Temperatur von 190°C an der Berührungsstelle zwischen Welle und Simmerring. Diese Teststrecke ist nach Aufbau und Funktion - mit geringen Abweichungen im Flanschdurchmesser - die gleiche für alle vorhandenen Versuchsanlagen.

- Natriumpumpe

Um in den Teststrecken eine ausreichende Strömungsgeschwindigkeit zu erreichen, die das Ausspülen der Abriebstoffe aus den Gleitbahnen der Werkstoffproben ermöglicht, wurde eine Pumpe mit einer Fördermenge von 3000 l/h bei $\Delta p = 45 \text{ m FS}$ eingebaut (Abb. 8). Sie ist als flache, lineare Induktions- oder "Wanderfeld"-Pumpe ausgelegt. Der Pumpkanal hat einen rechteckigen Querschnitt von 5 mm Breite und ca. 60 mm Höhe und ist horizontal angeordnet. Die Übergangsstücke von diesem auf den kreisrunden Querschnitt der Anschlussflansche sind relativ lang gehalten,

um eindeutige Strömungsverhältnisse zu gewährleisten. Saug- und Druckstutzen sind so gestaltet, dass sowohl eine vollständige Entleerung als auch eine zuverlässige Entlüftung des Pumpkanals möglich sind. Die Statorwicklungen der Pumpe werden durch zwei Luftgebläse gekühlt und so vor Überhitzung geschützt.

- Erhitzer

Die Aufheizung des Natriums auf die geforderte Betriebstemperatur von bis zu 650°C erfolgt in einem Durchlauf-erhitzer. Dieser besteht aus zwei vertikalen, parallel angeordneten Heizstrecken mit 110 mm Aussendurchmesser und einer Länge von 1200 mm. Durch den Einbau eines konzentrischen Verdrängers ergibt sich ein Ringraum, in welchem je 6 haarnadelförmige Rohrheizkörper angeordnet sind. Diese bilden mit den Deckelflanschen und Verdrängern eine Einheit und können im Bedarfsfall ausgetauscht werden.

Die haarnadelförmigen Rohrheizkörper haben einen Aussendurchmesser von 10 mm und bei einer gesamten beheizten Länge von 24 m einen Widerstand von $2,56\ \Omega$. Bei einer Spannung von 220 V ergibt sich so eine Leistung von etwa 18 kW. Zusätzlich sind an den Aussenseiten der beiden Erhitzergehäuse weitere 8 mm-Rohrheizkörper mit einer Leistung von ca. 10 kW aufgebracht.

- Rekuperativ-Wärmetauscher

Das mit 500°C aus der Pumpe kommende Natrium wird im Zwischenwärmetauscher auf 570 bzw. 600°C aufgeheizt. Der Wärmetauscher ist in einfacher Doppelrohrbauweise gefertigt (Aussenrohr $45 \times 2,5$ mm \varnothing , Innenrohr $28 \times 2,5$ mm \varnothing). Mit einer Gesamtlänge von 6 m, in S-Form angeordnet, ergibt sich eine Wärmeaustauschfläche von $F = 0,56\ \text{m}^2$. Das aus der Teststrecke kommende heisse Natrium strömt im Innenrohr und gibt einen Teil seiner Wärme an das im Ringraum strömende, von der Pumpe kommende kältere Natrium ab.

Bei einem vorgegebenen mittleren Temperaturgefälle $\Delta t_m = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ zwischen Primär- und Sekundärseite, beträgt die Erhitzerleistung bei Nenndurchsatz etwa 85 kW.

- Natrium-Luft-Wärmetauscher

Der eingebaute Na-Luft-Wärmetauscher (Abb. 9) entspricht einer Konzeption, die sich seit Jahren bewährt hat. Er besteht aus 12 parallel von Natrium durchströmten Rohren in Haarnadelform. Diese Rohre sind in die senkrecht angebrachten Verteiler und Sammler eingeschweisst.

Die haarnadelförmigen Kühlrohre können sich frei ausdehnen. Damit werden die an Verteiler und Sammler liegenden Schweissnähte auch bei schnellen Temperaturänderungen nur unwesentlich belastet.

Das Kühlgitter bildet mit dem vorgeschalteten Gebläse eine Einheit. Das Gebläse besitzt einen Flügelraddurchmesser von 500 mm. Bei 1400 U/min hat es eine Luft-Förderleistung von $194 \text{ m}^3/\text{min}$. Das Gebläse ist während des Betriebes nicht regelbar.

Die Regelung der Kühlleistung erfolgt über Drosselschieber im Kühlkanal vor und hinter dem Kühlgitter. Diese Schieber sind 50 mm dick und als thermische Isolierplatten ausgebildet. In voll eingeschobener Position bilden sie, zusammen mit dem ebenfalls thermisch-isolierten Mantel des Kühlkanals einen abgeschlossenen Raum um das Kühlgitter. Zwei darin fest eingebaute Strahlheizkörper mit einer Leistung von 5 kW ermöglichen eine ausreichende Beheizung des Kühlers bis ca. $300 \text{ }^\circ\text{C}$ vor Einfüllen des Na in den Kreislauf.

- Ausdehnungsbehälter

Mit ca. 70 l Inhalt, bei 400 mm Durchmesser, wurde der Ausdehnungsbehälter relativ gross ausgelegt. Dadurch soll verhindert werden, dass bei unbeabsichtigtem, hohem Füllstand Natrium in die Schutzgasleitungen gelangt. Mit einem

Deckelflansch versehen dient er als weiterer Versuchsbehälter mit grösserem Innenraum.

- Kaltfalle

Zur Reinigung des Natriums dient eine Kaltfalle mit ca. 30 l Gesamtvolumen (Abb. 10). Sie ist so ausgeführt, dass etwa je 1/3 des Volumens als Kühlstrecke, als Kristallisierungszone und als Filterzone wirken.

Das in einem vorgeschalteten Zwischenwärmetauscher auf ca. 160 °C vorgekühlte Natrium tritt oben in die Kaltfalle ein und durchströmt die mit Luft gekühlte Zone R im äusseren Ringraum von oben nach unten. Ausfällungen mit einem spezifischen Gewicht $> \gamma_{\text{Na}}$ bleiben im Absetzraum, am Boden der Kaltfalle zurück, während die übrigen Dispersionen bei der Aufwärtsströmung im darüber liegenden Filterpaket zurückgehalten werden. Dieses besteht aus ca. 40 Lagen flachem und ebenso vielen Lagen gewelltem VA-Gewebe mit einer Drahtstärke von 0,02 mm und einer Maschenweite von 0,015 mm.

Die Na-Durchsatzmenge wird auf 2 - 2,5 l/min geregelt, womit sich eine Verweilzeit des Natriums in der Kristallisierungszone von ca. 5 Minuten ergibt [5]. Dieser Teilstrom entspricht ca. 5 % des maximalen Gesamtdurchsatzes im Hauptkreis.

- Sumpftank

Das Volumen des Behälters beträgt ca. 130 l. Wegen der thermischen Ausdehnung des Natriums beim Abfüllen vor Versuchsbeginn beträgt die eingefüllte Natrium-Menge höchstens 110 l. Der Behälter besitzt 2 Steigrohre, durch die das Natrium mittels Gasdruck in den Kreislauf gefüllt wird und ein Fallrohr mit grossem Querschnitt, für den Schnellablass.

- Armaturen

Die wichtigste Armatur ist das Schnellablassventil NW 50 mit Servo-Motor, das den Hauptkreis vom Sumpftank trennt. Es kann entweder von Hand bedient oder für Schnellablass über ein Magnet-Ventil aus der Schaltwarte ferngesteuert werden.

Die 4 Vorlaufventile im Hauptkreis vor den Testbehältern sowie die Ventile vor der Kaltfalle und vor dem Pluggingmeter sind mit Drosselkegeln ausgestattet und erlauben eine ausreichend genaue Regelung der Durchflussmenge.

Alle übrigen Ventile im Natrium- und Schutzgassystem sind Absperrventile der Nennweiten 25 und 20. Sie sind mit Faltenbalgdichtungen versehen und (ohne Flansche) in die Rohrleitungen verschweisst.

- Antriebsmotoren und Gebläse

Zum Antrieb der Bewegungsmechanismen sind über den Teststrecken Drehstrom-Getriebemotoren mit einer Leistung von ca. 1 kW montiert. Sie sind von 20 bis 200 U/min stufenlos regelbar.

Am Na-Luft-Wärmetauscher, an den Wellendurchführungen der Teststrecken, an den Wicklungen der Wanderfeldpumpe und am Pluggingmeter sind 6 Kühlgebläse mit Förderleistungen von 12 bis 195 m³/min eingebaut, die im dauernden oder zeitweiligen Betrieb für die Einhaltung vorgegebener Maximaltemperaturen an den betreffenden Positionen sorgen.

- Rohr-Aussenheizung

Die für die Vorbeheizung des Prüfstandes installierte elektrische Anlage stellt nach Funktion und Aufwand einen wesentlichen Bestandteil der Gesamtanlage dar. Rohrleitungen, Ventile und Behälter sind mit ca. 360 m Monette-Heizkabel umwickelt, die bei Vollast eine Heizleistung

von ca. 31 kW erbringen. Ihre Regelung erfolgt auf 45 Einzelstrecken, wobei 24 stufenlos über Drehtransformatoren, der Rest durch Pitric-Regler geschaltet werden.

2.2 Messtechnische Ausrüstung

2.2.1 Betriebsmessungen

- Vorheiz- und Betriebstemperaturen

Vor Einfüllen des Natriums in den Kreislauf muss das System gleichmässig auf etwa 150 °C vorgeheizt werden. Zur Überwachung dieser Temperaturen wurden etwa 60 Thermoelemente installiert. Jeder der 24, über Drehtransformatoren geschalteten Heizstrecken ist eine Temperaturmessstelle zugeordnet, welche etwa in der Mitte der durch das jeweilige Kabel beheizten Strecke an die Rohr- bzw. Behälteraussenseite angeschweisst wurde. Weiterhin befindet sich je ein Thermoelement an den 24 verschiedenen Ventilen, an den Na-Abscheidern im Gassystem und an weiteren kritischen Stellen im Kreislauf. Sie sind über Ausgleichskabel und 3 Messstellen-Umschalter auf 3 Anzeigergeräte geschaltet.

Für die Erfassung und Überwachung der wichtigsten Betriebstemperaturen sind in alle Behälter und Komponenten isolierte Thermoelemente von 3,5 mm Aussendurchmesser eingebaut. Zur Abdichtung wurden spezielle Thermoelement-Verschraubungen mit Schneidringkonen verwendet. Von 12 nach Abb. 2 angeordneten Messstellen T werden die Messwerte auf einem 12-Punktendrucker ausgedruckt.

- Durchflussmessung

Im Hauptkreis nach dem Kühleraustritt, vor jeder der vier Teststrecken, sowie vor der Kaltfalle und dem Pluggingmeter sind permanentmagnetische Durchflussmesser eingebaut. Jede dieser Messeinheiten besteht

im wesentlichen aus einem Alnico-Hufeisen-Magneten, dessen Pole das Na-führende Rohr umfassen. Damit ist sowohl der gesamte Na-Durchsatz im Kreislauf wie auch der Teststreckendurchsatz feststellbar.

- Höhenstandsmessung

Die Kontrolle der Natrium-Höhenstände im Vorratsbehälter, Ausdehnungsbehälter sowie den vier Testteilen wird mit Tauchsonden überwacht, die bei Berührung mit Natrium ansprechen (Zündkerzenprinzip). Weiterhin erfolgt die Messung der Höhenstände mittels Thermoelementen, wobei der Temperaturunterschied zwischen Natrium und Schutzgasatmosphäre ausgenutzt wird.

- Schutzgas-Druckmessung

Zur Überwachung des Argon-Schutzgases sind zwei Manometer mit Ferngeber und Kontaktvorrichtung montiert, je einer kontrolliert den Gasdruck im Vorratsbehälter und im Kreislauf. Sie dienen auch gleichzeitig der Druckkontrolle beim Füllen des Kreislaufes. Die angebauten Ferngeber liefern einen eingepprägten Strom von 0 ... 20 mA bei 0 ... 10 kp/cm² Druck. Dieser Wert wird mittels 6-Punktendrucker registriert.

2.2.2 Versuchsdatenerfassung

- Sauerstoffmessung mit Pluggingmeter

Für die Ermittlung des Na₂O-Gehaltes im Natrium wird ein Pluggingmeter mit Lochplatte nach Abb. 11 verwendet. Er ist im O₂-Messkreis eingebaut, der darüber hinaus aus Kühler und Durchflussmesser besteht. Im Gegensatz zu früher gebräuchlichen Pluggingmeterventilen besitzt die hier verwendete Lochplatte nur ein sehr geringes Material-Volumen und damit eine niedrige Wärmekapazität. Temperaturschwankungen des Natriums können dadurch in der im Plattenzentrum angeordneten Messstelle schneller erfasst werden.

Damit wird eine genauere Zuordnung von Plugging-Temperatur und Durchsatzreduktion möglich.

Um die Rohrstrecke a befindet sich der Kühlkanal K. Die Regelung des Luftstromes aus dem angeflanschten Gebläse erfolgt in der Umlenkklappe b.

- Kontinuierliche Sauerstoffmessung mit elektrochemischer Sonde

Neben dem Pluggingmeter ist eine kontinuierlich anzeigende Sauerstoffmess-Sonde (Prinzip United Nuclear Co.) eingebaut. Die Sonde S mit einem keramischen Festelektrolyten ist im Messfühlergehäuse M verschraubt (Abb. 12). Innerhalb des Hilfskreises der durch zwei Conoseal-Flansche lösbar mit dem Hauptkreis verbunden ist, schützen ein Luftkühler und ein geregelter Erhitzer die Messstelle vor unzulässigen Temperaturschwankungen.

Die Messwerte werden auf ein zentrales Anzeigegerät geleitet, das zusammen mit dem Schreiber des Elektrometerausganges und den Geräten zur Regelung und Überwachung in einem Messschrank untergebracht ist [6].

- Natrium-Probenahme

Eine diskontinuierliche Überprüfung der Verunreinigung des Strömungsmediums erfolgt auf analytische Weise nach Entnahme kleiner, definierter Mengen festen Natriums in Nickeltiegeln. Zur Entnahme dient die in Abb. 13 dargestellte Einrichtung.

Im Behälter z sind 4 Nickeltiegel mit je 10 cm^3 Inhalt vertikal übereinander angeordnet.

Um eine repräsentative Na-Menge des Kreislaufes zu erhalten, wird bei geöffneten Anschlussventilen a der Behälter z 4 - 5 Stunden vom Natrium aus dem Hauptkreis

durchströmt. Sodann werden diese Ventile geschlossen, das Ventil b geöffnet und das sich ausserhalb der Tiegel befindende Natrium aus dem Behälter z mittels Unterdruck in den Auffangbehälter k gefördert.

Die Anlage wird abgekühlt, wobei das Na in den Syffonabschlüssen erkaltet und einen sicheren Schutz gegen das Eindringen von Sauerstoff bildet. Sie wird nunmehr an den Anschlussflanschen gelöst und als Ganzes zur Entnahme der mit Natrium gefüllten Nickeltiegel in einen Handschuhkasten gebracht. Hieran schliesst sich die analytische Sauerstoffbestimmung an.

- Temperaturmessungen

Für das Verschleissverhalten von Werkstoffen stellt die Temperatur einen wesentlichen Parameter dar. Es ist daher erforderlich, die Teststreckentemperaturen über den gesamten Versuchsablauf möglichst genau zu erfassen, zu regeln und zu registrieren. Hierfür sind in jedem Teststreckeneinsatz mehrere Thermolemente eingebaut, deren Messstellen in der Nähe der Werkstoffproben liegen. Die Messwertübertragung erfolgt über Ausgleichsleitungen auf den 12-Punktendrucker und den thyristorgesteuerten Regler.

- Reibkraftmessung

Zwischen aufeinander gleitenden Körpern entstehen Tangentialkräfte in den Gleitebenen. Ihre Grösse steht in einem bestimmten Verhältnis zu den angelegten Normalkräften. Dieses Verhältnis, der sog. Reibungskoeffizient, wird von mehreren werkstoffspezifischen Werten bestimmt und stellt eine wichtige Messgrösse dar.

Zu ihrer Erfassung werden bei den Verschleissuntersuchungen in Natrium und Inertgas zwei verschiedene Methoden angewandt:

- Biegebalken mit Dehnungs-Mess-Streifen (DMS)

Ein einseitig im Deckelflansch fest eingespannter Biegestab (Bild 14a) erfährt durch die an seinem freien Ende angreifende (Reib)-Kraft P eine Auslenkung f . Das Profil des Stabes ist so gewählt, dass er auf der ganzen Strecke gleiche Biegefestigkeit besitzt, d.h. dass die maximalen Randspannungen $\max. \sigma \leq \sigma_{zul}$ in jedem Querschnitt den gleichen Wert haben. Das Zwischenstück z mit kreisringförmigem Querschnitt nimmt aufgrund seines geringeren Widerstandsmomentes ca. 70 % der Gesamtausbiegung des Stabes auf. In dieser Biegezone sind diametral gegenüberliegend zwei Freigitter-DMS und ein Thermoelement angebracht. Das Aussenrohr A dient als Abschirmung der Messgitter gegen Berührung mit Natrium. Die vier Anschlüsse der DMS sowie 2 Thermoelementanschlüsse werden durch den Kühlkanal K nach aussen geführt und an den Stützkontakten S mit den weiterführenden Messleitungen verbunden. Durch das Zentralrohr wird Kühlluft eingeblasen, die an den DMS-Kontaktflächen eine maximale Temperatur von 450°C sicherstellt.

- Biegebalken mit induktivem Wegaufnehmer

Diese Ausführung unterscheidet sich von der zuvor beschriebenen nur unwesentlich. Auch hier entfällt der grösste Teil der Durchbiegung auf die Biegezone z . (Abb. 14b)

Der biegesteife Stab ist hier durch die Biegezone hindurch nach oben verlängert. Bei Auslenkung des Stabes ergibt sich jetzt für das starre System ein Drehpunkt D in der Biegezone und eine proportionale Auslenkung f' des oberen Stabendes. Diese, einige μm betragende Messgrösse, wird durch einen induktiven Wegaufnehmer W im Bereich geringer Temperaturen verhältnismässig problemlos erfasst. Die Messwerte beider Systeme werden über

einen Messstellenumschalter mit Nullpunktspeicherung auf einen Trägerfrequenz-Messverstärker geschaltet und dort angezeigt. An den Ausgang der Messbrücke können Linienschreiber angeschlossen werden, die eine fortlaufende Aufzeichnung der Reibungswerte ermöglichen.

- Gleitwegmessung

Die Untersuchung des Verschleissverhaltens von Werkstoffen erfordert die genaue Erfassung des relativen Reib- oder Gleitweges zwischen den Gleitpaarungen.

Daher wurden mit Vorwählsystemen ausgerüstete Umdrehungszähler in die Versuchsanlage eingebaut. Nach Erreichen einer festgelegten Zahl von Umdrehungen (Gleitweg) schalten sie das Antriebssystem ab.

2.3 Zentrale Versorgung, Registration und Kontrolle

- Energieversorgung

Für den gleichzeitigen Betrieb aller im Verschleisslabor vorhandenen Teststrecken wurde eine erforderliche Anschlussleistung von ca. 50 kW errechnet. Die Einspeisung erfolgt vom 1000 kW-Hauptverteiler (für das gesamte Na-Labor) über ein Kabel NYY3 x 95/50 mm² zum Verteiler für das Verschleisslabor. In diesem Verteiler sind alle Abgänge durch Selbstschalter abgesichert. Die Anschlüsse zu den Heizwiderständen sind mit Fehlerstromschaltern (Fi), diejenigen zu allen Motoren mit Schützen und Motorschutzschaltern ausgestattet (Abb. 15).

- Registration

Die Geberelemente der mess- und regeltechnischen Anlage, (Thermoelemente, Druckmessgeräte, Umdrehungszähler u.a.) sind unter Abs. 2.2 näher beschrieben. Die zugehörigen

Umschalter, Drucker, Schreiber und Anzeigeeinstrumente sind in einer Schaltwand im Kontrollraum so angeordnet, dass der Mittelteil einen Durchblick zum Laborraum und damit auf die Kreisläufe gestattet (Abb. 16). Die Rückseite der 19"-Schränke zur Laborseite sind frei zugänglich und durch zusätzliche Abdeckbleche gegen evtl. Verschmutzung und Beschädigung geschützt.

Die Schränke I, II und III enthalten alle Geräte für den Prüfstand NVP II, Schrank IV diejenigen für Prüfstand NVP I.

In dem unteren Teil der Schränke sind je 9 Regeltrafos untergebracht. Sie dienen zur Regelung der Rohrbegleitheizung und sind von 0 ... 220 V stufenlos regelbar. Die Kontrolle der Vorheiztemperaturen erfolgt über drei 24-polige Messstellenumschalter (a), die mit je einem Anzeigegerät (b) verbunden sind.

Die für den Betrieb der Anlage und die Versuchsdurchführung wichtigen Temperaturmesswerte werden auf 12-Punkte-Druckern (c) ausgedruckt.

Eine an den Elektroden der Durchflussmesser abgenommene EMK wird in Verstärkern in einen eingepprägten Strom umgewandelt und auf einem 6-Punktendrucker (d) bzw. Linienschreiber (e) aufgezeichnet.

Im oberen Mittelfeld sind die Vorwahl-Zählwerke für die Umdrehungszählung in den Teststrecken angeordnet, links daneben, im Aussenfeld die Glimmlampen der optischen Alarmanlage.

- Überwachung

Eine Reihe von Sicherheitsschaltungen gewährleistet einen weitgehend automatischen Betrieb der Versuchsanlagen.

Störungen, die in Heizungs- oder Antriebselementen, zu örtlichem Überhitzen oder Einfrieren, oder zum Abbruch des Flüssigmetallumlaufes führen können, werden in einer Alarmanlage optisch und akustisch signalisiert. In besonderen Fällen erfolgt der automatische Schnellablass, sowie die Abschaltung der Erhitzer.

Zur weiteren kontinuierlichen Überwachung der Prüfstände sind in den einzelnen Laborräumen TV-Kameras installiert. Die aufgenommenen Bilder können auf einem zentralen Monitor im Hauptkontrollraum empfangen werden.

Eine zentrale Rauchspüranlage mit Sensoren über den einzelnen Kreisläufen sorgt im Falle eines Natriumbrandes für schnelle Alarmierung des Bedienungspersonals.

2.4 Versuchsbetrieb

Vor Einfüllen des Natriums in den Kreislauf, wird das im Sumpftank befindliche Flüssigmetall, sowie das mit Schutzgas (Ar) gefüllte Rohrsystem mit allen Komponenten bis ca. 150 °C vorbeheizt. Das Na wird dann mittels Gasdruck über die Einfülleitung in den Kreislauf gefördert. Sobald die Kontrollampen der mittleren Höhenstandselektroden in den vier Teststrecken sowie im Ausdehnungsbehälter aufleuchten, wird der Zustrom gestoppt und die Pumpe eingeschaltet. Der gewünschte Na-Durchsatz wird eingeregelt. Durch Zuschalten des Haupterhitzers wird nach ca. 1 h die Betriebstemperatur von 600 °C in den Teststrecken erreicht. Gleichzeitig wird durch Luftkühlung die Kaltfallentemperatur bei 125 - 130 °C stabilisiert. In Abständen von ca. 5 h wird im diskontinuierlichen Fluggversuch der Oxidpegel des Natriums kontrolliert. Nach Erreichen bzw. Unterschreiten des vorgeschriebenen Maximalwertes von 5 - 10 ppm ist die Anlage für den Versuchsbetrieb bereit. Diese kontinuierliche Betriebsbereitschaft der Anlage kann dadurch aufrechterhalten werden, dass jede der vier Teststrecken separat vom

Hauptdurchfluss abgetrennt, entleert und nach Abkühlung geöffnet werden kann. Der Ein- und Ausbau der Teststrecken mit den Werkstoffproben erfolgt unter Schutzgasabschirmung. Die eigentliche Öffnungszeit der Deckelflansche beträgt dabei nur ca. 1 - 2 Minuten.

Nach dem erfolgten Einbau eines Probensatzes und der Wiedereinschaltung der Teststrecke in den Hauptkreislauf verbleiben die Werkstoffpaarungen ca. 15 h zur Oberflächenvorbehandlung im Na-Strom bei 600 °C. Mit dem Start des über der Teststrecke angeordneten Getriebemotors beginnt anschliessend der eigentliche Versuch mit variabler Versuchszeit. Eine Zählautomatik sorgt für die Abschaltung des Bewegungssystems nach einer vorgewählten Anzahl von Umdrehungen. An jeden Versuchslauf schliesst sich die Reinigung des Teststreckeneinsatzes in Isopropanol und H₂O an. Abschliessend erfolgt die sorgfältige Vermessung der ausgebauten Werkstoff-Probekörper.

2.5 Auswertung

Durch Verschleisswirkung auftretende Veränderungen an den Werkstoff-Probekörpern sind im wesentlichen

- die Längenänderung der zylindrischen Stifte,
- die Oberflächenaufrauung der Ringscheibe,
- die Gewichtsänderung beider Gleitpartner.

Positive oder negative Längenänderungen der Stifte werden durch Verwendung von Feinstmikrometern erfasst.

Eine Mikrowaage ermöglicht Gewichtsanalysen mit ausreichender Genauigkeit bis zum Bereich von 0,1 mg.

Für die Erfassung der Oberflächenbeschaffenheit der Ringscheibe vor und nach dem Versuch steht ein Oberflächenprüfgerät zur Verfügung. Damit werden Aufrauungen bis

ca. 5 μm oder - im Falle stärkerer Verschleisswirkung - die Einsenkung der Gleitbahn als Diagramm aufgezeichnet.

Im Frühstadium eines Einlaufvorganges macht sich Verschleiss häufig nur dadurch bemerkbar, dass ein Teil der die Probenoberfläche charakterisierenden Mikrospitzen abgetragen wird. Dieser Abtrag wird über den Profiltraganteil in verschiedenen Schnittlinientiefen ermittelt.

Neben diesen quantitativ bestimmbaren Vorgängen treten teilweise Formänderungen oder wechselseitige Werkstoffübertragungen ohne eigentliche Volumen - oder Gewichtsänderung auf. Diese, für die Beurteilung der Werkstoffpaarungen nicht minder wichtigen, qualitativen Werte werden bei Betrachtung der Oberfläche durch fotografische Aufnahmen festgehalten.

3. Problemstellung und Versuchsergebnisse

Seitens der Industrie wird davon ausgegangen, dass ein wesentlicher Teil der Komponenten eines Natrium-gekühlten Reaktors und deren Einzelteile aus den z. Zt. als Strukturwerkstoffe favorisierten, hochwarmfesten austenitischen Werkstoffen bestehen werde. Gerade diese Werkstoffe besitzen jedoch eine geringe Verschleissresistenz sowie eine hohe Neigung zu Kaltverschweissung. Sie werden daher an zahlreichen Stellen, an denen es zu Relativbewegung zwischen sich berührenden Teilen kommt, entweder durch verschleissresistentere Nickelbasislegierungen zu ersetzen sein oder mittels ein- oder beidseitiger Aufschweissung gepanzert werden müssen. Wo in anderen Fällen mit extrem hohen Flächenpressungen gerechnet werden muss, denen durch konstruktive Mittel nicht ausreichend begegnet werden kann, wird die Anwendung von Hartwerkstoffen diskutiert. Hierbei muss zwischen der Forderung nach hoher Verschleissresistenz und noch einigermassen wirtschaftlicher Bearbeitbarkeit optimiert werden.

Diese vorwiegend durch den Einsatz geeigneter Werkstoffe zu lösende Aufgabe bestimmt im wesentlichen das Versuchsprogramm.

3.1 Vorauswahlversuche

Aus einer Anzahl von Werkstoffen über deren Korrosionsverhalten in Natrium bereits positive Ergebnisse vorlagen, oder deren Eigenschaften eine hohe Verschleissresistenz erwarten liessen, wurde bisher versucht in Vorauswahluntersuchungen die günstigsten Gleitpaarungen zu ermitteln.

Die ersten 76 Versuchsergebnisse sind in [1], [2] zusammengefasst. Dem vorliegenden Bericht liegen die Werte aus 40 Versuchen unter Standardbedingungen zugrunde.

- Austenitische Stähle

Es ist allgemein bekannt, dass sich im Verschleissverhalten zwischen 1.4961 und 1.4981 keine signifikanten Unterschiede ergeben haben. Daher wurden die Vorauswahlversuche mit den jeweils vorhandenen Probekörpern aus beiden Qualitäten durchgeführt. Die so gewonnenen Ergebnisse erscheinen vergleichbar und repräsentativ für die Gruppe der warmfesten Austenite.

Nickelbasislegierungen

Inconel 718, Inconel 750, Nimonic 80a

Für diese Materialien lagen z.T. Versuchsergebnisse von anderen Forschungsstellen vor [3], [4]. Der Einfluss individueller apparativer Kriterien auf die Versuchsergebnisse ist jedoch noch weitgehend unbekannt. Es war deshalb notwendig, diese Werkstoffe auch in der hier beschriebenen Anlage in Vorauswahlversuchen zu klassifizieren.

Aufschweisswerkstoffe

Stellit 6H und Colmonoy 6

Der Einsatz dieser Werkstoffe geht auf eine Empfehlung des Reaktorherstellers zurück. Die Auswahl richtete sich im wesentlichen nach den Gesichtspunkten der Aufbringung und Bearbeitung.

- Hart- und Sonderwerkstoffe

Um eine Rangordnung bilden zu können wurden zum Vergleich auch die Hart- und Sonderwerkstoffe K1 und TZM untersucht.

Als Versuchsparameter wurden bei allen Vorauswahluntersuchungen folgende Standardwerte eingehalten:

Na-Temperatur	600 °C
Oxidgehalt des Na	< 10 ppm
Spez. Belastung	12 (6) kp/cm ²
Gleitgeschwindigkeit	11 cm/sek
Gleitweg	10 ⁶ cm
Bewegungsart	kontin. rotierend

Alle Versuche wurden erst 15 h nach Einfüllung des Na in die Teststrecke gestartet.*

Versuchsergebnisse

In der hier besprochenen Versuchsreihe wurden zunächst Paarungen aus unterschiedlichen Werkstoffen untersucht, da aus der konventionellen Tribologie bekannt war, dass die Adhäsionsneigung zweier Werkstoffe und damit letztlich auch ihr Verschleissverhalten stark von ihrem elektrochemischen Potential und ihren möglichst verschiedenen Gitterparametern abhängt (Tab. 3).

Zum Vergleich wurden anschliessend Versuche mit Paarungen aus gleichen Werkstoffen durchgeführt (Tab. 4).

* Siehe auch Parameteruntersuchungen

Paarungen aus unterschiedlichen Werkstoffen:

Austenitische Stähle 1.4961 und 1.4981
gegen Aufschweislegierungen und Nickelbasislegierungen

Gegen warmfesten, austenitischen Stahl (1.4961 oder 1.4981) waren die Aufschweiswerkstoffe Stellite 6H, Stellite 1 und Colmonoy 6 eingesetzt.

Bei einer Flächenpressung von nur 6 kg/cm^2 kam es bei allen drei Paarungen zu unbefriedigenden Ergebnissen. Zwischen den Paarungen mit Stellite 1 und Colmonoy 6 zeigten sich beachtliche Austenitaufschweissungen aus der Ringscheibe auf den härteren zylindrischen Probekörpern. Die Gleitspuren im Austenitpartner erschienen rau und riefig (Abb. 17 und 18). Die Kombination 1.4961 mit Stellite 6H ergab eine ausserordentlich hohe Verschleissrate. In mehreren Versuchen mit sehr ähnlichen quantitativen Resultaten zeigten die Gleitbahnen auf den Austenitscheiben borkige Oberflächen mit unregelmässig deformierten Rändern (Abb. 19 und 20).

Gegen die Nickelbasislegierungen Inconel 718 und Inconel 750 erwiesen die austenitischen Partner ein etwas günstigeres Gleitverhalten als gegen die Aufschweislegierungen. Sowohl auf den Ringscheiben als auch auf den zylindrischen Proben erschienen die Laufflächen glatt bis leicht riefig (Abb. 21). Die Verschleissresistenz von Inconel 750 liegt etwas unter derjenigen von Inconel 718.

Stellite 6H gegen Inconel 718
Colmonoy 6 gegen Inconel 718

In der Rangfolge nach ihrer Verschleissresistenz liegen Aufschweislegierungen gegen Inconel 718 erheblich günstiger, als solche Paarungen, an denen ein unbeschichteter Austenit beteiligt ist.

Die beiden untersuchten Werkstoffkombinationen unterscheiden sich dadurch, dass die spezifische Verschleissrate der Stellite 6H-Panzerung auf den zylindrischen Proben merklich höher liegt als diejenige von Colmonoy 6. Im letzteren Fall geht die Verschleisswirkung hauptsächlich zu Lasten des Inconel-Partners, wobei jedoch das Gesamt-Verschleissvolumen der Paarung ziemlich dem der Stellite-Inconel-Paarung entspricht. Die Rauhtiefe der Inconel 718-Gleitbahn unter dem Stellite-Partner betrug $W + R_t \approx 3 \mu\text{m}$, wobei die genaue Bestimmung dieser Verschleissrate nicht mehr möglich war. Unter dem Colmonoy-Partner dagegen ergab sich eine Absenkung der Gleitbahn mit einer geringeren, gleichmässigen Rauigkeit $W + R_t \approx 0,4 \mu\text{m}$ (Abb. 22).

Stellite 6H gegen TZM

Colmonoy 6 gegen TZM

Zum Vergleich mit den zuletzt beschriebenen Ergebnissen wurden die beiden Aufschweislegierungen gegen den Sonderwerkstoff TZM eingesetzt. Wegen der z.T. bereits bekannten geringeren Verschleissresistenz der Molybdän-Legierung wurde die Flächenpressung dabei auf 6 kp/cm^2 verringert. Die für beide Paarungen ermittelten Verschleissraten liegen relativ hoch und unterscheiden sich nur unwesentlich von früheren Ergebnissen.

Nimonic 80 gegen Colmonoy 6

wurde in zwei Versuchen eingesetzt. Hier war die flache Ringscheibe (Grundmaterial 4541) mit dem Aufschweiswerkstoff Colmonoy 6 beschichtet.

Das Verschleissverhalten dieser Paarung war wesentlich günstiger als bei einer anschliessend zum Vergleich untersuchten Kombination Nimonic 80 gegen Nimonic 80.

Ein direkter Vergleich der für den Aufschweisswerkstoff ermittelten Verschleissrate mit den Werten der zuvor beschriebenen Versuche ist jedoch nicht möglich, weil dort die Beschichtung auf die zylindrischen Proben aufgebracht war. (In letzter Zeit wurde bei anderen Versuchen ein starker Einfluss der Probengeometrie auf die Ergebnisse bei Verschleissversuchen festgestellt.)

Gleitpaarungen aus gleichen Werkstoffen

Inconel 718 gegen Inconel 718

Mit einer Oberflächenrauigkeit von $W + R_t \approx 2,5$ bis $3 \mu\text{m}$ zeigt diese Paarung in mehreren Versuchen ein gutes Gleitverhalten (Abb. 23). Im Hinblick auf diese geringe Oberflächendeterioration erscheint der aus mehreren Versuchen ermittelte, durchschnittliche Reibungsbeiwert mit $\mu = 0,5$ noch relativ hoch.

RGT3 gegen RGT3 (Nimonic 80a)

Alternativ zu den Inconel-Qualitäten wurde diese weitere Nickelbasislegierung untersucht. Das Ergebnis war insofern negativ als sich (bei mehreren Versuchen in gleicher Weise) starke Materialbewegungen zwischen den gleichartigen Gleitpartnern ergaben.

Auf den flachen Ringscheiben entstanden ungewöhnlich riefige Gleitbahnen. Auf allen Gleitflächen der zylindrischen Proben finden sich partielle Anhäufungen nicht abgeführten Abriebmaterials (Abb. 24). Der Reibungsbeiwert nahm schon bald nach Versuchsbeginn Extremwerte an, die nicht mehr gemessen werden konnten. Ein weiterer Versuch unter konstanten Parametern in einer leicht modifizierten Teststrecke ergab nahezu die gleiche Verschleisswirkung. Es kam jedoch nicht zu wesentlichen Aufschweissungen. Der Reibungsbeiwert lag wenig über 0,5.

TZM gegen TZM

Die Verschleissrate dieser Molybdänlegierung ist auch in der Kombination "gleich gegen gleich" relativ hoch. Materialübertragungen und gegenseitige Aufschweissungen konnten auf den Probenoberflächen nicht nachgewiesen werden. Eine offensichtlich geringe Kaltschweisneigung dieses Werkstoffes gestattet eine gute Abführung der durch Abrasion gelösten Partikel, ohne grössere plastische Randverformungen (Abb. 25).

Stellit 6H gegen Stellit 6H

Bei 2 Versuchen ergab sich auf den Ringscheiben eine riefige Gleitspur mit einer mittleren Eindringtiefe von ca. 15 bis 18 μm (Abb. 26).

Die zylindrischen Proben zeigen spiegelbildlich das gleiche Profil. Auf einer dieser kreisförmigen Gleitflächen fand sich eine partielle Aufschweissung mit einer Schichtdicke von ca. 10 μm .

3.2 Parameteruntersuchungen

3.2.1 Einfluss der chemischen Reaktion des Na

Dieses Thema wurde bei der besprochenen Versuchsanlage aufgrund einer Betriebsstörung relevant. Bei Versuchen, deren Start sich betriebsbedingt verzögerte, so dass die Werkstoffproben vorher unterschiedlich lange im Na bei Betriebstemperatur verweilten, ergaben sich merkliche Unterschiede in den Ergebnissen. Daraufhin zunächst durchgeführte Literaturstudien zeigten, dass dieses Problem bereits auch an anderen Stellen experimentell untersucht wurde. Fontaine [7] fand einen Einfluss der Voreintauchzeit, variiert von 0 bis 12 h, auf die Reibungszahl und die Verschleissrate an verschiedenen Werkstoffkombinationen. Ebenso erscheint danach die Streuung der Versuchsergebnisse geringer, wenn die Werkstoffproben einer vorherigen

Behandlung über die kritische Zeit von 8 - 10 h im Natrium ausgesetzt waren. Nach Roberts [8] lagen die Versuchsergebnisse einer Stellite-3-Paarung innerhalb des natürlichen Streubereiches nachdem die Voreintauchzeit der Proben 4 bzw. 7 und 14 Tage betrug. Beide Aussagen scheinen jedoch von begrenzter Allgemeingültigkeit. Im ersten Fall betrug die eigentliche Versuchszeit nur 1 h. Damit ist die messbare, unter der angelegten niedrigen Pressung erzielte, Verschleissmenge sehr gering. Die von Roberts verwendete Versuchsgeometrie, "Gekreuzte Zylinder", bedingt für den Anlaufzeitraum örtlich so hohe Pressungen, dass ein durch Vorkorrosion entstandener Oberflächenzustand mit grosser Wahrscheinlichkeit sofort verändert bzw. zerstört wird.

Um derartige Einflüsse zu eliminieren wurden mit der unter 2. beschriebenen Probenkonfiguration weitere Versuche mit der Voreintauchzeit (VeZ) als Parameter durchgeführt. Hierzu wurde die Werkstoffpaarung

Inconel 750 gegen 1.4981 und zum Vergleich
Stellite 6H gegen 1.4961

herangezogen.

Die Versuche wurden unter Standardbedingungen durchgeführt. Variiert wurde die Voreintauchzeit, die bei der ersten Kombination bis 50, bei der zweiten bis zu 30 h betrug. Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigt Abb. 27. Hier ist die Verschleissrate (Abrieb-Volumen bezogen auf Belastung und Gleitweg) für die Stifte nach oben, für den Ring nach unten, über der Voreintauchzeit in h aufgetragen. Für den austenitischen Stahl wie auch für die Nickellegierung ist bei einem Versuchsbeginn nach 4 - 5 h ein deutliches Minimum der Verschleissrate zu erkennen. Offenbar ist dieser Zeitraum für die Reduktion einer vorhandenen, die metallischen Oberflächen schützenden Oxidschicht erforderlich, während bis dahin eine eigentliche, selektive Korrosion noch nicht wirksam werden konnte. Nach einer längeren Voreintauchzeit der Proben von über 20 bis 40 h

ist dann eine gewisse Stabilisierung des Kurvenverlaufes zu erkennen. Dieses Ergebnis und ähnliche mit anderen Werkstoffen haben im wesentlichen die Entscheidung beeinflusst, alle künftigen Versuche erst nach einer Voreintauchzeit von 20 h zu starten.

3.2.2 Einfluss apparativer Grössen

Zwischen den relativ zueinander gleitenden Teilen der Komponenten einer Reaktoranlage ergeben sich sehr verschiedene Bewegungsarten. Entsprechend unterschiedlich sind die Reibbelastungen und die sich daraus ergebenden Verschleissgrössen. Über Zuordnung und Gesetzmässigkeiten in diesem Zusammenhang besteht noch weitgehend Unklarheit. Des weiteren sind es die unterschiedlichen Versuchseinrichtungen an den bekannten Forschungsstätten, die den Vergleich von Ergebnissen in Frage stellen.

In einer kleineren Versuchsreihe mit den Werkstoffen Inconel 718 und Hastelloy C wurden deshalb zunächst einmal die Parameter

Bewegungsart und
Probengeometrie

variiert.

- Die Bewegungsart war zunächst oszillierend, dann rotierend gewählt. Ergebnisse aus diesen Versuchen sind in Abb. 28 wiedergegeben.* Man erkennt, dass die Beanspruchung der Gleitpartner im kontinuierlichen rotierenden Betrieb um einiges geringer ist, als im oszillierenden Betrieb. Dies hat sich vor allem bei den Versuchen mit Inconel 718 gezeigt, während die Ergebnisse bei Hastelloy C stark streuten und nicht als Funktion der Bewegungsart erkennbar waren.

* Die vertikalen Balken symbolisieren die durch Verschleiss bewirkte Formänderung der Werkstoffproben

- Die Variation der Probengeometrie bezog sich auf die Geometrie der Stifte, die einmal kugelförmig und einmal flach gegen die ebene Scheibe liefen (Abb. 29). Diese Geometrien wurden gewählt, weil sie z.T. an anderen Forschungsstellen verwendet werden und eine Vergleichsmöglichkeit angestrebt wurde.

Bei den ersten Versuchen mit Paarungen "gleich gegen gleich" aus Inconel 718 und Hastelloy C ergab sich sowohl an den Proben mit flachen, als auch an denen mit kugeligen Enden, eine erheblich geringere Verschleisswirkung als an den Ringscheiben. Das Verschleissvolumen bei den Paarungen mit kugeligen Proben lag bei Inconel 718 um den Faktor 1,15 und bei Hastelloy C um den Faktor 1,21 höher als bei den Paarungen mit flachen Gleitflächen (Tab.6).

4. Reibungsbeiwerte

Bei der Durchführung experimenteller Untersuchungen sollen grundsätzlich alle erfassbaren Messgrößen registriert und ausgewertet werden, soweit der erforderliche Aufwand und der Ausgabewert der Ergebnisse in einem vertretbaren Verhältnis stehen. Da der Reibungsbeiwert keine Proportionalität zur Verschleissrate aufweist, und folglich von der einen Größe auf die andere nicht, oder nur in Ausnahmefällen geschlossen werden kann, wurde dieser Wert in den Vorauswahlversuchen zunächst nicht erfasst.

Vor dem Hintergrund der Probleme der Kernverspannung kommt jedoch in letzter Zeit dem Reibungskoeffizienten (hauptsächlich dem statischen, μ_0) besondere Bedeutung zu. Im wesentlichen interessieren hier Werkstoffpaarungen bei denen dieser Wert deutlich unter 0,5 liegt.

Für die z. Zt. für die Belange des Na-gekühlten Schnellen Reaktors SNR 300 meistdiskutierten Werkstoff-Kombinationen

Stellit 6H - Stellit 6H
Inconel 718 - Inconel 718
Hastelloy C - Hastelloy C
Stellit 6H - 1.4961
TZM - TZM

wurden zunächst in Kurzzeitversuchen über rund 6 h Dauer unter Standardbedingungen der Reibungsbeiwert ermittelt. Typische Ergebnisse dieser Versuche sind in Abb. 30 dargestellt, wobei μ als Funktion des Gleitweges registriert wurde. Die Resultate zeigen in keinem Fall einen Maximalwert, d.h. einen deutlich erkennbaren Übergang von der statischen zur kinetischen Reibung. Nach einem Gleitweg von ca. 2 bis 5 m stellte sich allgemein ein konstanter Wert ein, der sich nur in Einzelfällen über die Versuchszeit leicht veränderte. Die für die verschiedenen Werkstoffpaarungen ermittelten Reibungszahlen sind in Tab. 3 und 4 wiedergegeben. Die niedrigsten Werte wurden für die Paarung Hastelloy C gegen Hastelloy C gemessen. Bei Inconel 718 gegen Inconel 718 ergibt sich aus drei Versuchen ein Durchschnitt von 0,53, was vor allem im Hinblick auf die relativ glatten Laufflächen hoch erscheint. Reibungszahlen $\mu \geq 1$, für diejenigen Werkstoffkombinationen an denen ein austenitischer Stahl beteiligt war, oder auch bei RGT 3 gegen RGT3, entsprechen mehr dem riefigen oder borigen Oberflächenbild das sich bei diesen Paarungen nach dem Versuchslauf zeigte (Abb. 20 und 24).

5. Zusammenfassung

Zur Untersuchung des Verschleissverhaltens von Werkstoffen für Bauteile Na-gekühlter Reaktoren wurde eine Versuchsanlage erstellt, welche die Reaktorbedingungen betriebsmässig zu simulieren gestattet. Sie arbeitet zufriedenstellend und alle geforderten Betriebsbedingungen konnten gefahren werden. Die Möglichkeit, die 4 Teststrecken der Anlage einzeln oder zusammen stillzulegen ohne eigentliche Unterbrechung des Betriebes im Hauptversorgungs- und Reinigungskreis gewährleistet einen hohen Grad von Verfügbarkeit. Durch die Installation von drei Oxid-Messeinheiten (Pluggingmeter, Probeentnahme und Sauerstoffmess-Sonde) ist eine gute Überwachung und Kontrolle der Natriumreinheit gegeben.

Nach den in dieser Versuchsanlage erzielten Ergebnissen wurde in der Paarung

Inconel 750 gegen 1.4961

ein relativ günstiger Gleitpartner für einen austenitischen Stahl gefunden. Zwar ist die Verschleissresistenz von Inconel 750 etwas geringer als jene von Inconel 718. Wenn aber der Anteil des austenitischen Stahls an der Gesamtverschleissrate möglichst niedrig gehalten werden soll, erscheint der Einsatz von Inconel 750 etwas günstiger.

Der Versuch, aus den Ergebnissen aller übrigen Paarungen im Rahmen der bisherigen Versuche, eine Rangfolge zu bilden, erscheint problematisch, sofern man nicht nur die Gesamtverschleissrate betrachtet, unabhängig davon, wie sich der Abrieb anteilmässig auf die beiden Gleitpartner verteilt. Für eine relative Bewertung müssten hierzu auch alle übrigen Gesichtspunkte, wie Anwendungsart, Bearbeitungsmöglichkeit, mechanische und physikalische Eigenschaften, Verfügbarkeit, Preis usw. berücksichtigt werden. Für Versuche mit Gleitpartnern aus gleichen Werkstoffen erscheint die Einordnung der Werkstoffe nach zunehmender Verschleissresistenz möglich (Tab. 5).

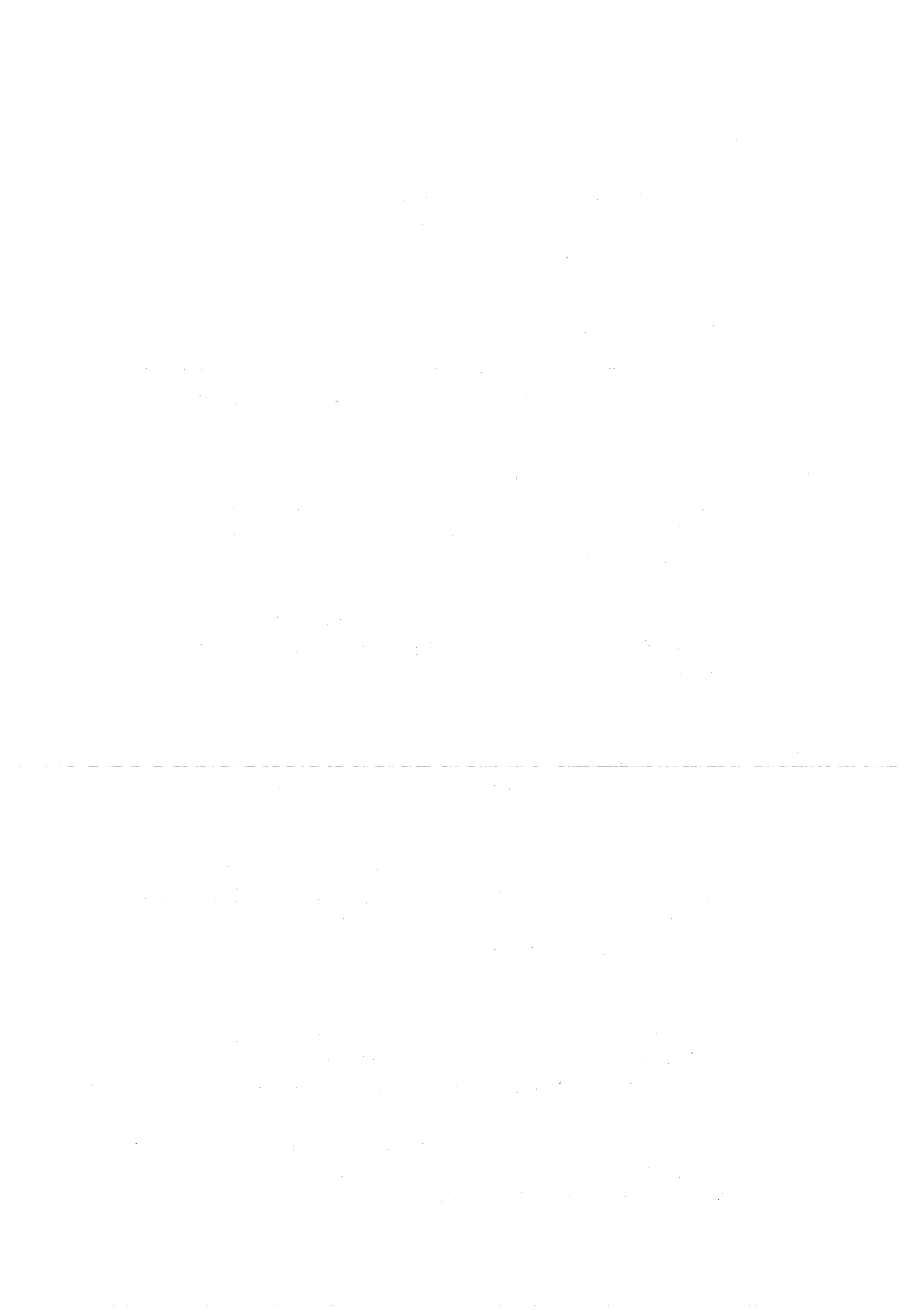
Der Einfluss einer Oberflächenveränderung infolge chemischer Reaktion wurde nachgewiesen. Als Konsequenz daraus werden alle künftigen Versuche erst nach einer Voreintauchzeit von 20 h gestartet. Zur Klärung der Werkstoffabhängigkeit werden später hierzu noch umfangreichere Parameteruntersuchungen durchzuführen sein.

Bemühungen, den Einfluss apparativer Grössen, insbesondere der Bewegungsart und der Probengeometrie, auf das Verschleissverhalten von Werkstoffpaarungen zu ermitteln, zeigten, dass beide Parameter von wesentlicher Bedeutung sein können. Um jedoch das gesamte Spektrum der hierzu anstehenden Fragen zu klären, ist eine grosse Zahl weiterer Einzelversuche erforderlich.

Als wesentliche Erkenntnis aus den durchgeführten Versuchen bleibt die Feststellung, dass relative Bewertungen zwischen Werkstoffpaarungen nur dann möglich sind, wenn die Versuche in ein und derselben Versuchsstrecke durchgeführt wurden. Ein Vergleich mit Ergebnissen, die, zwar unter sonst gleichen Parametern, in einer anderen Anlage gewonnen wurden, scheint weiterhin nicht möglich.

6. Literatur

- [1] E. Wild, K.J. Mack, H.Hoffmann
Das Verschleissverhalten von Stählen und Legie-
rungen in flüssigem Natrium
KFK 973/EUR 4174d (1969)
- [2] E. Wild, K.J. Mack, H. Hoffmann
Experimentelle Untersuchung des Verschleissverhaltens
von Stählen und Legierungen in flüssigem Natrium
KFK 1251 (1970)
- [3] W.J. Freede, L. Newcomb, R.S. Kennedy
Static and Sliding Contact Behavior of Materials in
Sodium Environments at Elevated Temperatures
NAA-SR-12446 (1967)
- [4] N.J. Hoffmann, D.E. Goggin, I.J. Droher
Friction and Wear Screening Tests of Materials in
Sodium
LMEC-70-10 (1970)
- [5] W.H. Bruggeman
Purity Control in Sodiumcooled Reactors
A.J.Ch. E Journal 6/56
- [6] H.U. Borgstedt, A. Marin, Z. Perić, G. Wittig
Zur Messung von Sättigungskonzentrationen des Sauer-
stoffs in Natrium mit der EMK-Methode
Atom-Wirtschaft Jahrg. 17 - Heft 7 / 361
- [7] J.P. Fontaine
Quelques aspects des phenomenes de frottement et de
fretting-corrosion en liquid sodium,
Corrosion,Traitements,Protection, Finition 19 (1971)Nr.7
- [8] W.H. Roberts
Friction and Wear Behaviour of sliding Bearing Materials
in Sodium Environments at Temperatures up to 600 °C
TRG-Report 1269 (R) (1968)



	NVP I	NVP II
Rohrleitungen	NW 15/25	NW 25/50
Pumpentyp	Wechselstrom-Konduktionspumpe	Lineare Induktionspumpe
Fördermenge	0,3 m ³ /h bei 45 m FS	3 m ³ /h bei 45 FS
Anzahl der Teststrecken	1	4
Heizleistung (Erhitzer)	12 kW	28 kW
Bewegungsmechanismen	rotierend	variabel
Na-Reinheitskontrolle	Pluggingmeter	Pluggingmeter, Probenahme Sauerstoffsonde

Tabelle 1

Kennzeichnende Daten der Prüfstände

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	B	Nb	W	Fe	Ti	Co	Härte bei 650°C
1.4961	0,08	0,4	1,25	0,008	0,013	16,0		13,0			10X%C		Rest		0,015	HR _B 40 - 50
1.4981	0,08	0,05	1,24	0,018	0,006	16,5	1,66	16,6			0,8		Rest			
Inconel 718	0,05	0,03	0,01	0,005	0,003	18,85	3,06	53,1	0,72	0,0061	5,45		18,85	1,13		
Inconel 750	0,55	0,23	0,10	0,008	0,005	14,3			0,68	0,0045	0,76		8,20	2,62	0,82	HR _C 28 - 30
RGT 3	0,06					20,0		Rest	1,4				5,0	2,4		HR _C 37 - 40
Hastelloy C	0,08	0,03	1,0	0,04		14,5	15-17	54,0				4,0	6,2		2,5	HR _B 87 - 90
TZM	0,025						99,4	0,002					0,01	0,50		HR _B 95 - 97
Armco-Eisen	U n l e g i e r t															
Stellit 1	2,5					30,0						12,0			Rest	HR _C 40 - 42
Stellit 6H	1,0					27,0						4,5			Rest	HR _C 27 - 30
Colmonoy 6	2,6					16,5		70,0		3,75		Fe + Si + C 10 % max				HR _C 43 - 45
Akrit Co 50						27,0							Rest			HR _C 40 - 42
Hartmet. K1	WC - Ni															

Tab. 2 Legierungsbestandteile und Warmhärte der untersuchten Werkstoffe

Werkstoffpaarung		Spez. Verschleissrate ^Δ		Reibungs- beiwert
3 zyl. Proben	Ringscheibe	3 Proben	Ringscheibe	
Armco Eisen	Akrit Co 50	5,17	===	
Akrit Co 50	Akrit Co 50	0,16	1,5	
Colmonoy 6	Inconel 718	0,038	0,79	
Stellit 6H	Inconel 718	0,55	3,46	
Armco Eisen	Akrit Co 50	5,54	===	
Akrit Co 50	Akrit Co 50	0,162	1,2	
Colmonoy 6	Inconel 718	+++	0,644	
Stellit 6H	Inconel 718	0,77	1,475	
Stellit 6H	1.4961	35,0	237	0,95-1,20
Stellit 6H	1.4961	32,0	230	1,10 - 1,0
Stellit 1	1.4961	===	225	
Colmonoy 6	1.4961	===	228	
Inconel 718	1.4961	13,3	250	
Inconel 750	1.4961	30,5	202	0,58
Stellit 6H	Inconel 718	28,0	3*	
Colmonoy 6	Inconel 718	0,17	10,2	
Stellit 6H	TZM	17,12	220	
Colmonoy 6	TZM	12,25	280	0,62
Nimonic 80a	Colmonoy 6	0,79	9,65	
Inconel 750	1.4981	25,0	200	0,70
Inconel 750	1.4961	32,0	210	0,68
Inconel 750	1.4981	36,5	226,0	0,76
Inconel 750	1.4981	36,0	137,0	0,73

* Oberflächenrauh. $W + R_t$ [μm]

= Aufschweissung

$\Delta \times 10^{-10}$ [$\text{cm}^3/\text{cm} - \text{kp}$]

Tab. 3 Ergebnisse aus Vorauswahl-Versuchen mit Paarungen unterschiedlicher Werkstoffe

Werkstoffpaarung		Spez. Verschleissrate ^Δ			Reibungs- beiwert
3 zyl. Proben	Ringscheibe	3 Proben	Ringsch.	gesamt	
Stellit 6H	Stellit 6H	2,83	30	32,83	0,63
Stellit 6H	Stellit 6H	===	46,7		0,71-0,73
1.4961	1.4961				1,1-0,95
TZM	TZM	11,0	180	191	0,68
TZM	TZM	11,1	240	251	0,65
Nimonic 80	Nimonic 80	===	150		>1
Nimonic 80	Nimonic 80	===	190		>1
Inconel 718	Inconel 718	0,27	2,48	2,75	0,47
Inconel 718	Inconel 718	0,634	2,02	2,654	0,60
Inconel 718	Inconel 718	0,353	4,63	4,983	0,53
Hastelloy C	Hastelloy C	0,4	1,68	2,08	0,38-0,5
Hastelloy C	Hastelloy C	0,9	1,36	2,26	0,4
Nimonic 80	Nimonic 80	14,7	98,3	113	0,52-0,48
Inconel 750	Inconel 750	2,33	2,72	5,05	0,57
Inconel 750	Inconel 750	2,68	1,88		
Inconel 718	Inconel 718				0,52

= Aufschweissung

$\Delta \times 10^{-10}$ [cm³/cm-kp]

Tab. 4 Ergebnisse aus Vorauswahl-Versuchen mit Paarungen gleicher Werkstoffe

Hartwerkstoff (WC-Ni)	0,03	$\times 10^{-9}$ cm ³ /cm-kp
Hastelloy C	0,217	"
Inconel 718	0,265	"
Inconel 750	0,505	"
Stellit 6	3,289	"
RGT 3	11,3	"
TZM	22,10	"
1.4981	43,8	"
1.4961	44,47	"

Tab. 5

Gesamtverschleissraten von Paarungen
aus gleichen Werkstoffen bei 600 °C
(Durchschnittswerte aus mehreren Vers.)

Handwritten text, likely bleed-through from the reverse side of the page. The text is mostly illegible due to fading and bleed-through.

Handwritten text, likely bleed-through from the reverse side of the page. The text is mostly illegible due to fading and bleed-through.

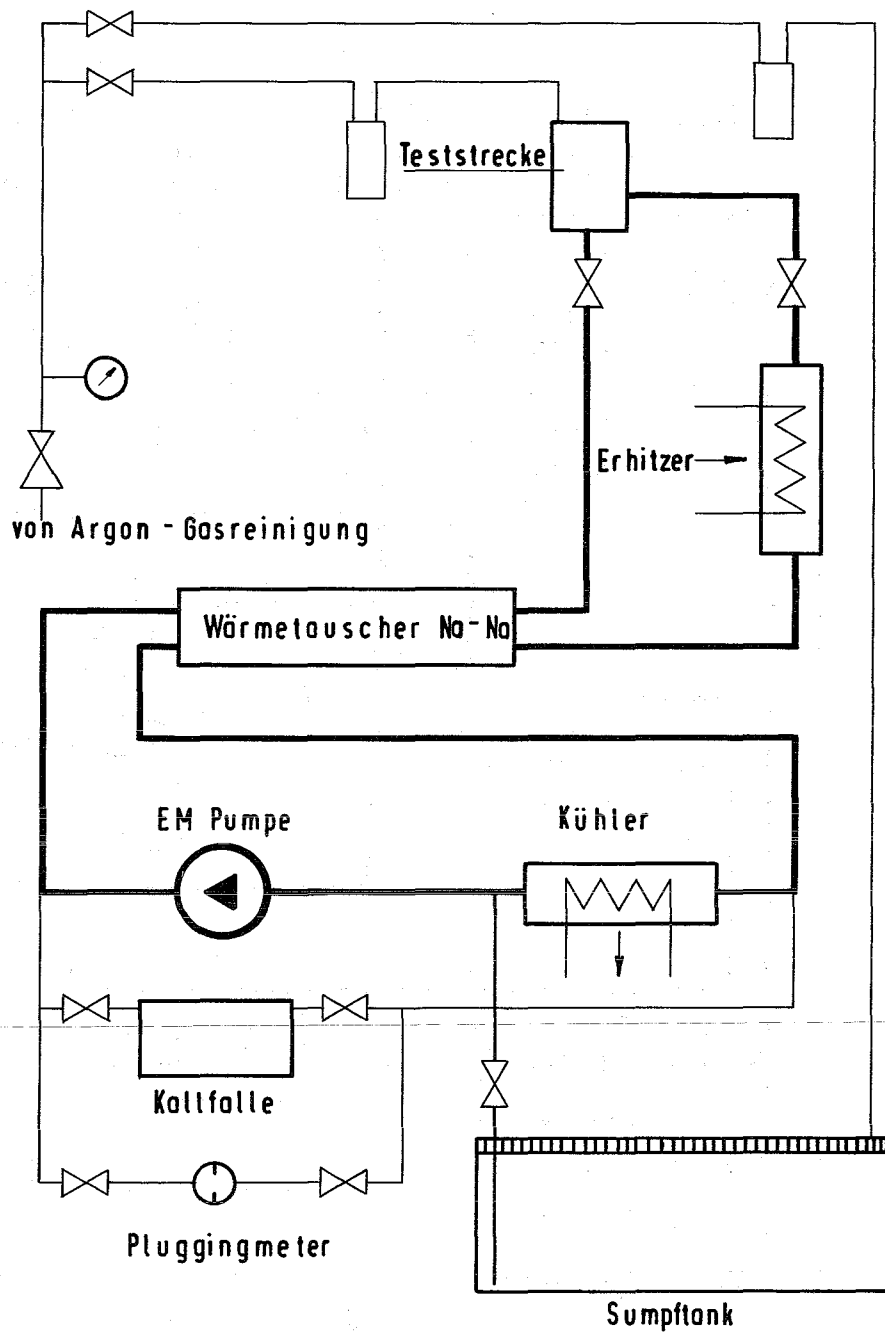


Abb. 1 Na-Verschleißprüfstand NVP I
mit einer Teststrecke

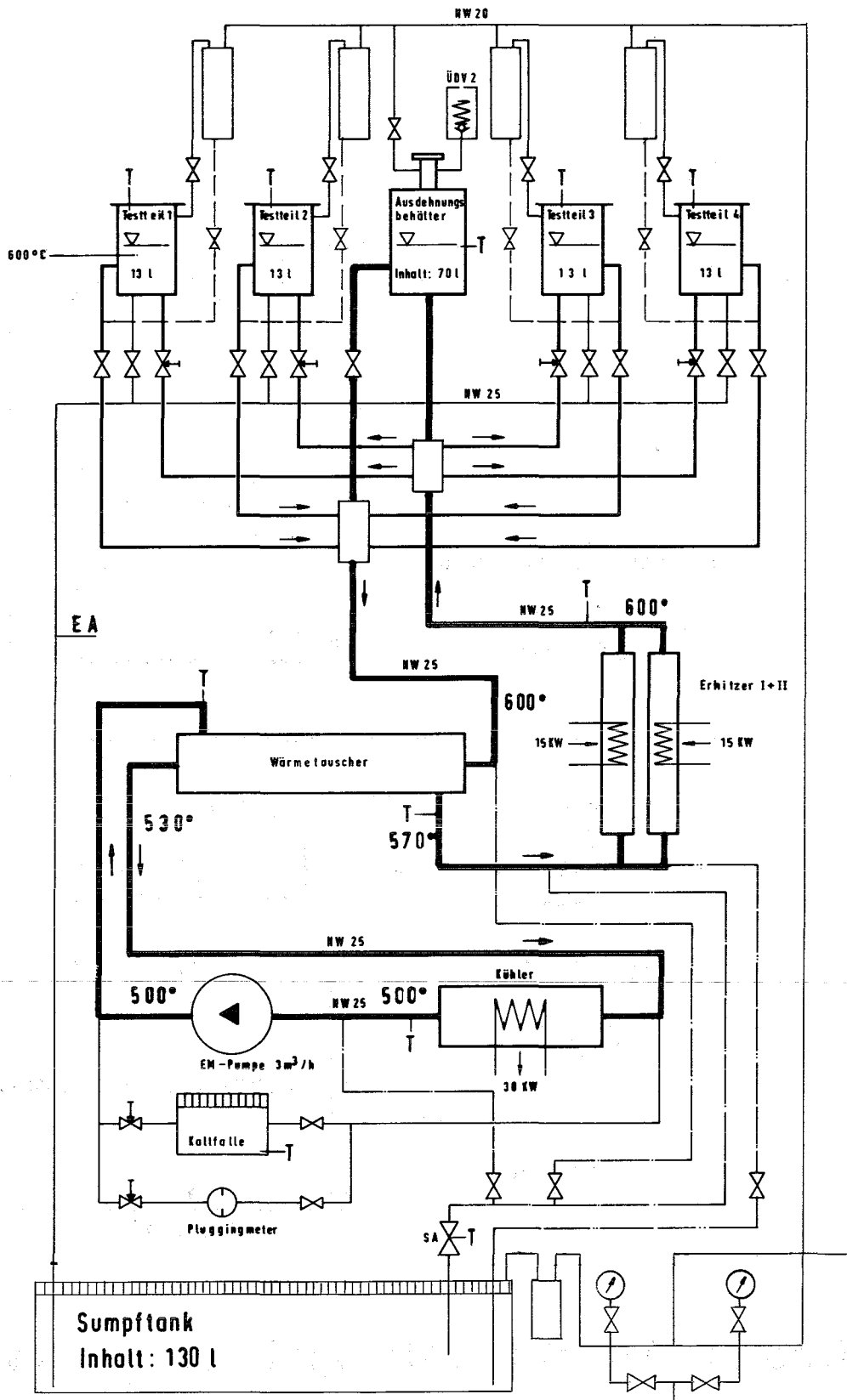


Abb. 2 Na-Verschleißprüfstand NVP II
mit vier Teststrecken

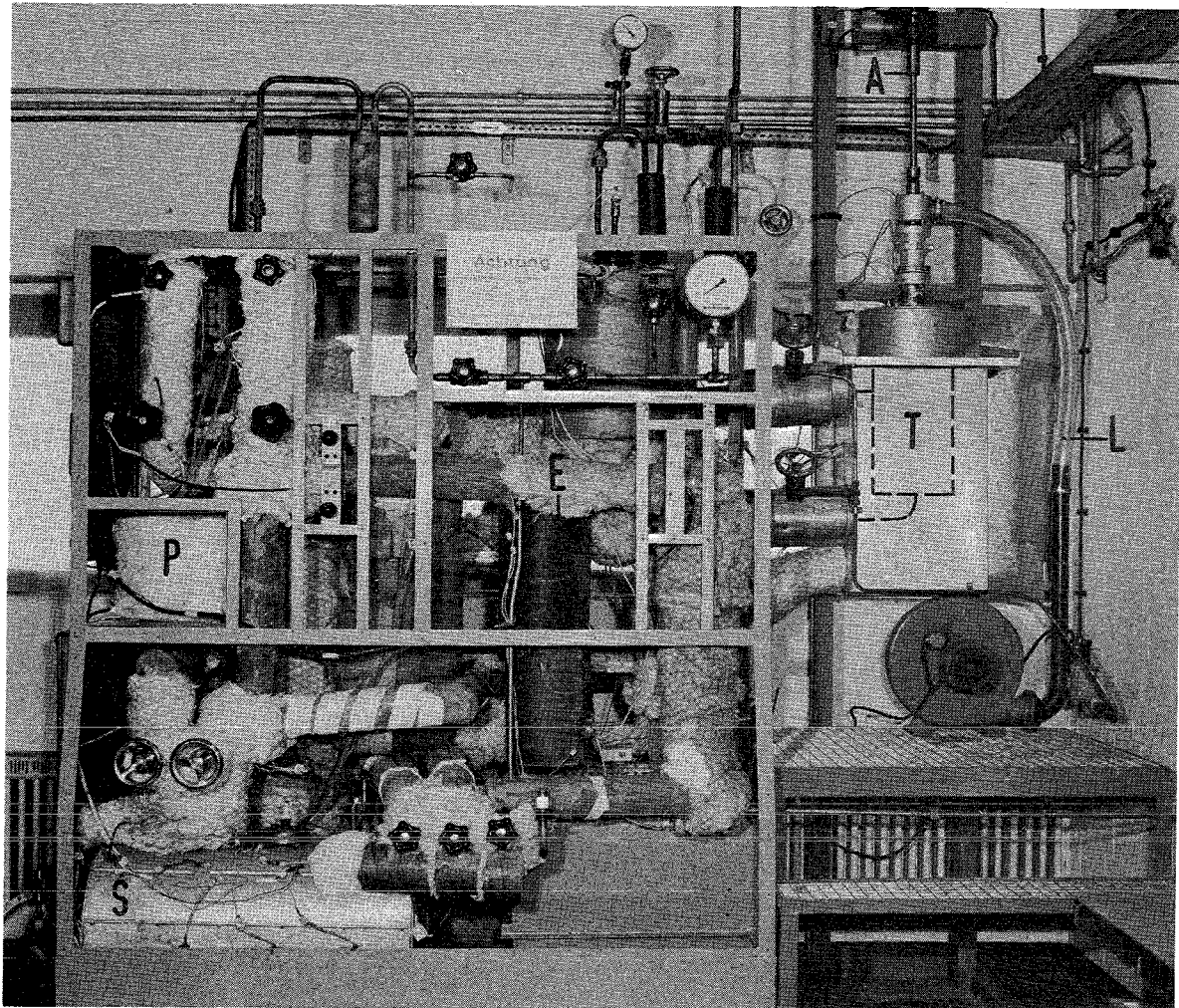


Abb. 3 Na-Verschleißprüfstand NVP I

A - Antriebswelle
E - Erhitzer
L - Lüfteranlage für Wellenkühlung

P - EM-Pumpe
S - Sumpftank
T - Teststrecke

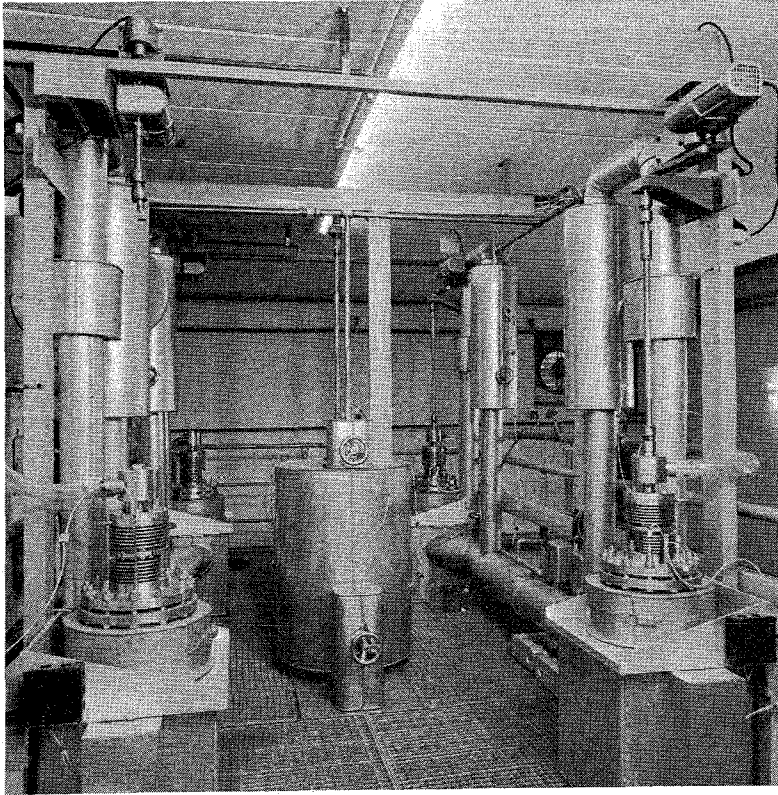


Abb. 4 Na - Verschleißprüfstand NVP II

Arbeitsbühne mit vier Teststrecken

AN 2534-2205

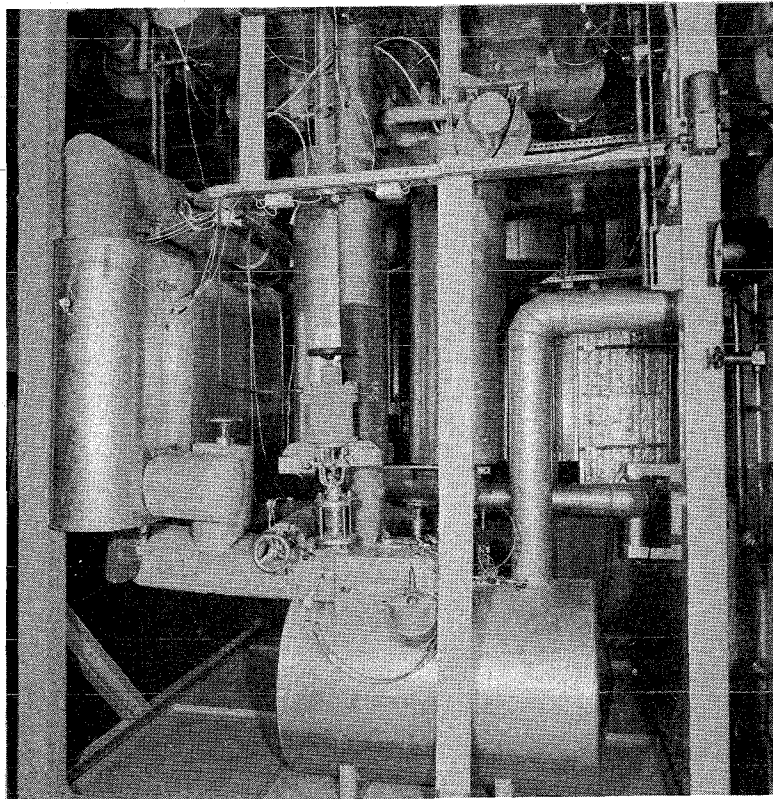


Abb. 5

NVP II

AN 2534-2101

Reinigungs - und Versorgungskreis

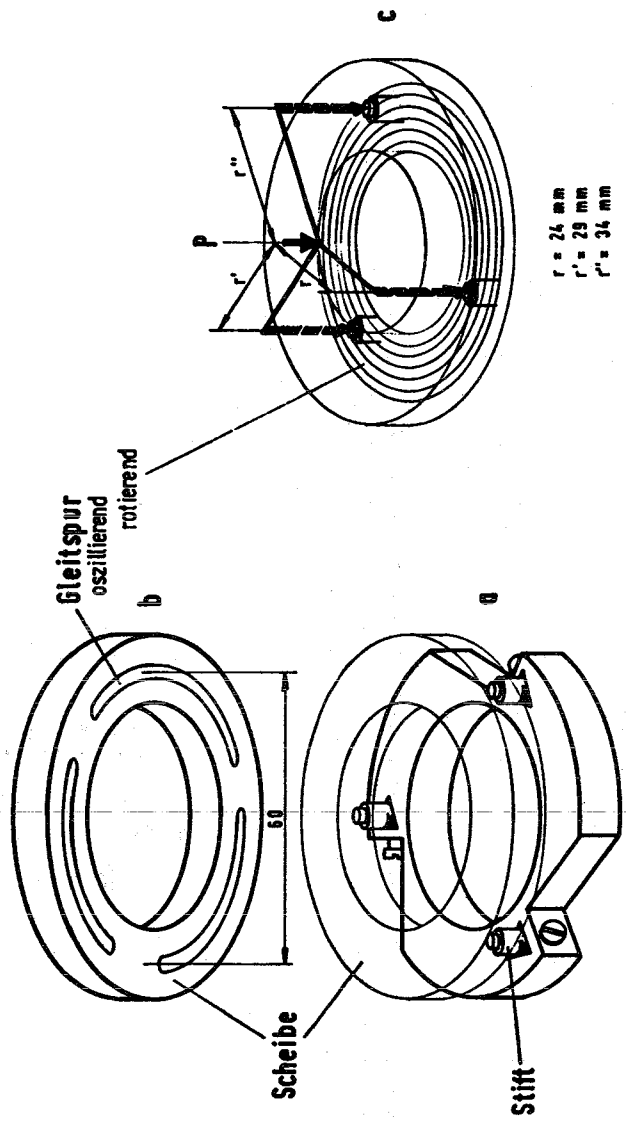


Abb. 6 Anordnung der Werkstoffproben

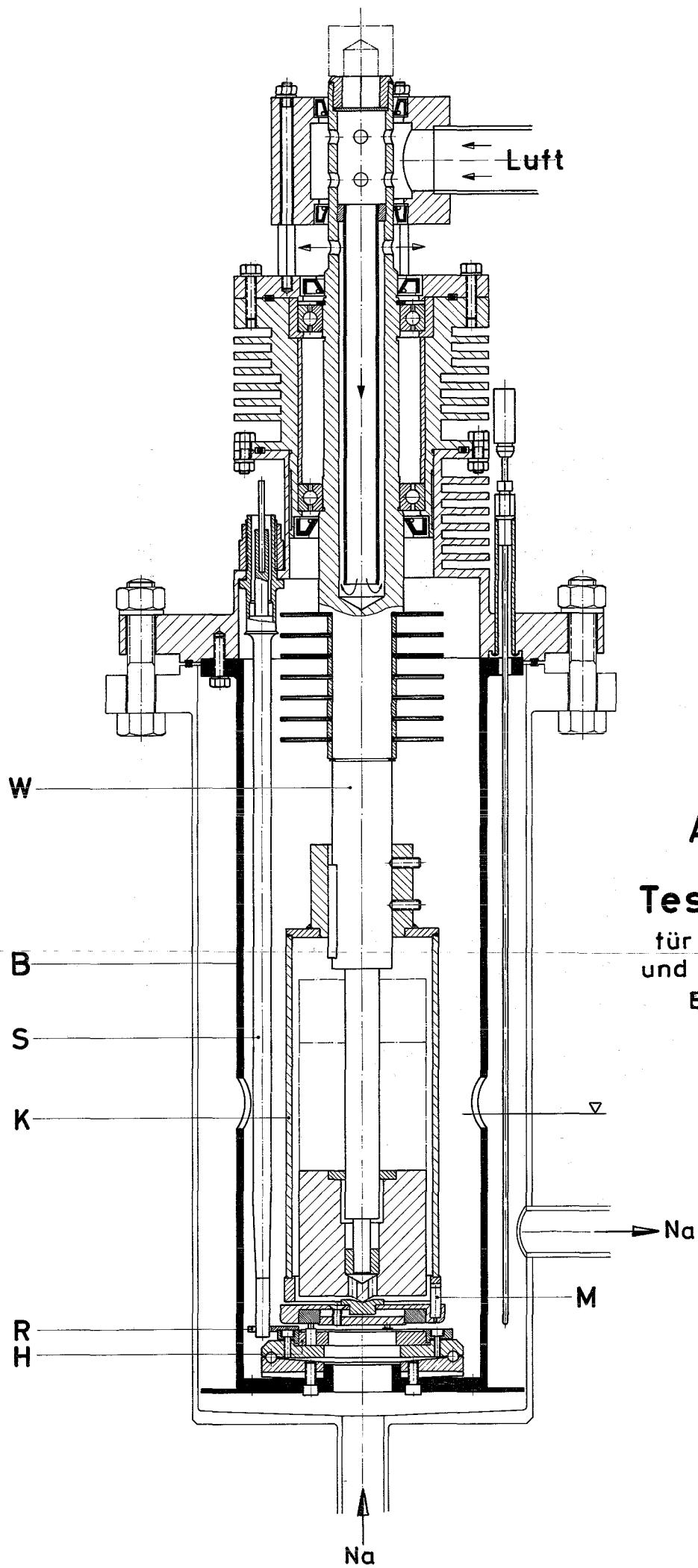


Abb. 7
Teststrecke
 für rotierende
 und oszillierende
 Bewegung

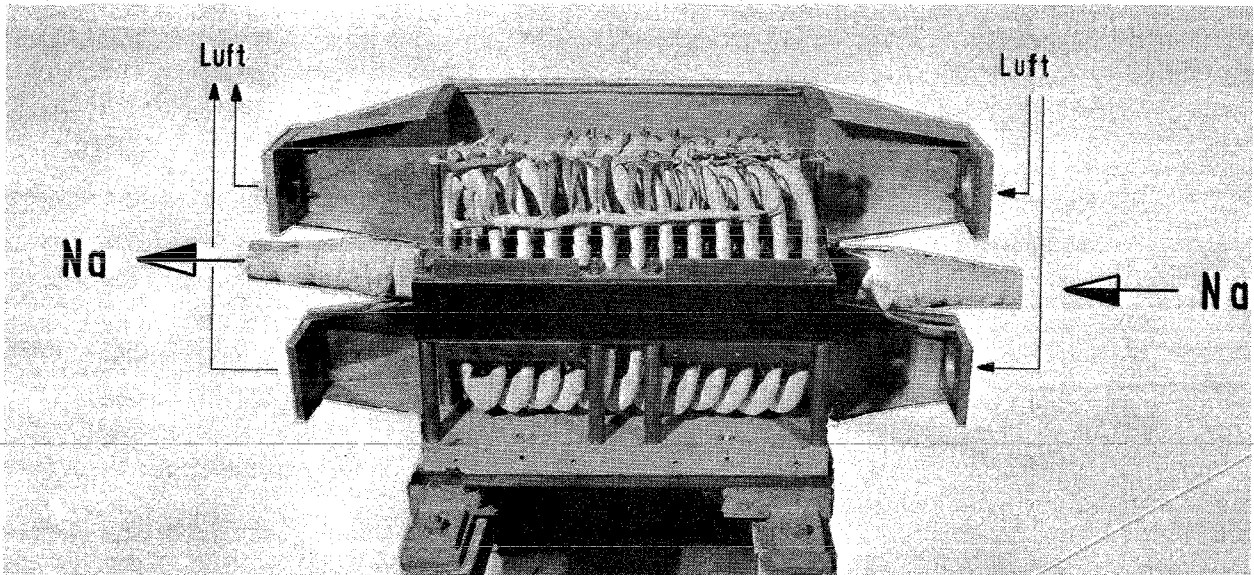
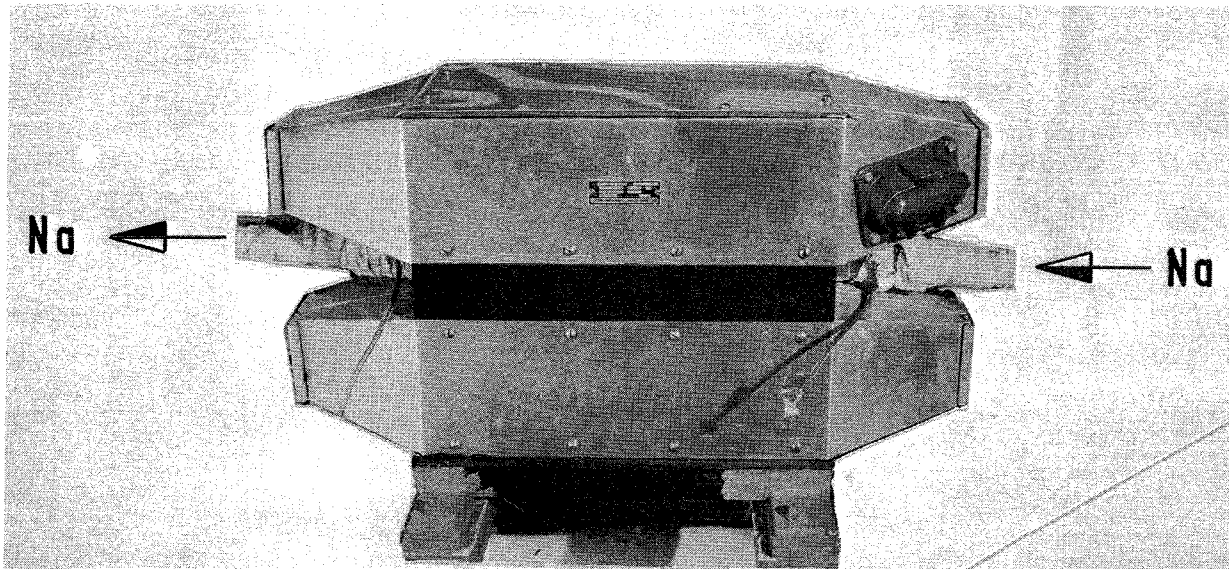


Abb. 8 Wandertfeld-Induktionspumpe
für 3000 l/h bei $\Delta p = 45 \text{ mFS}$

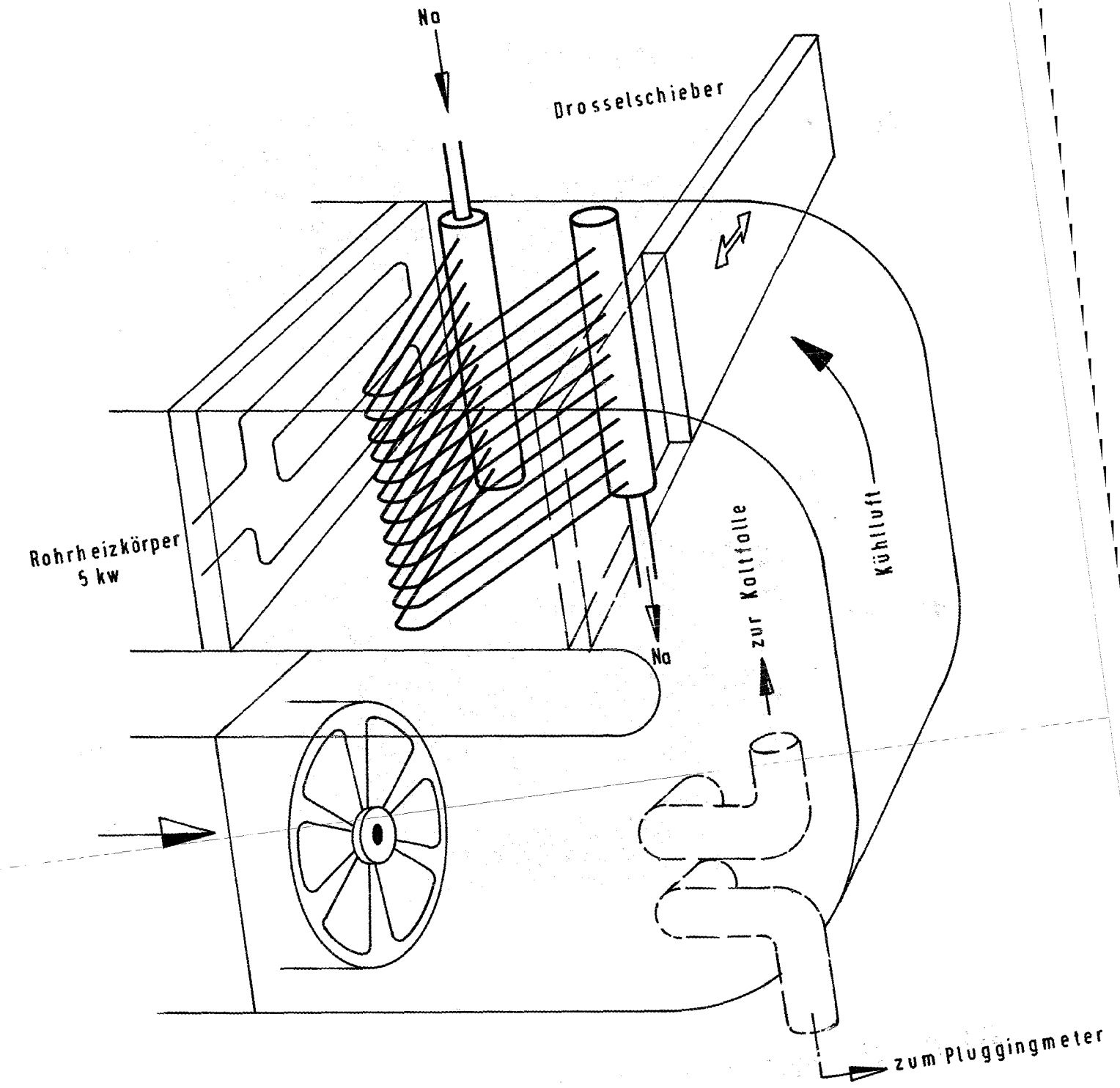


Abb. 9 Na - Luft - Wärmetauscher

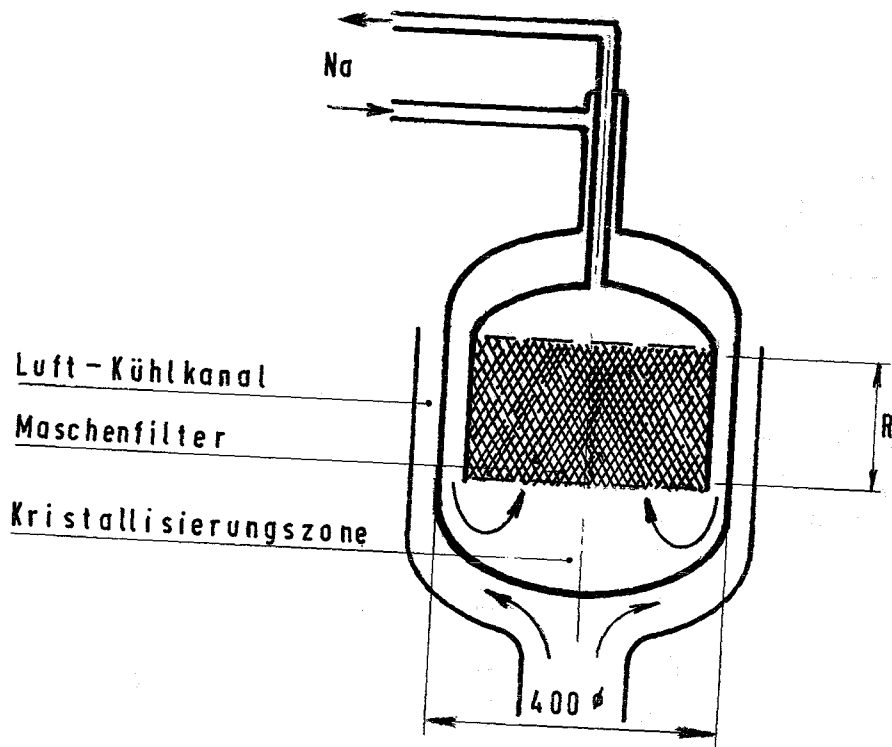


Abb. 10

Kaltfalle

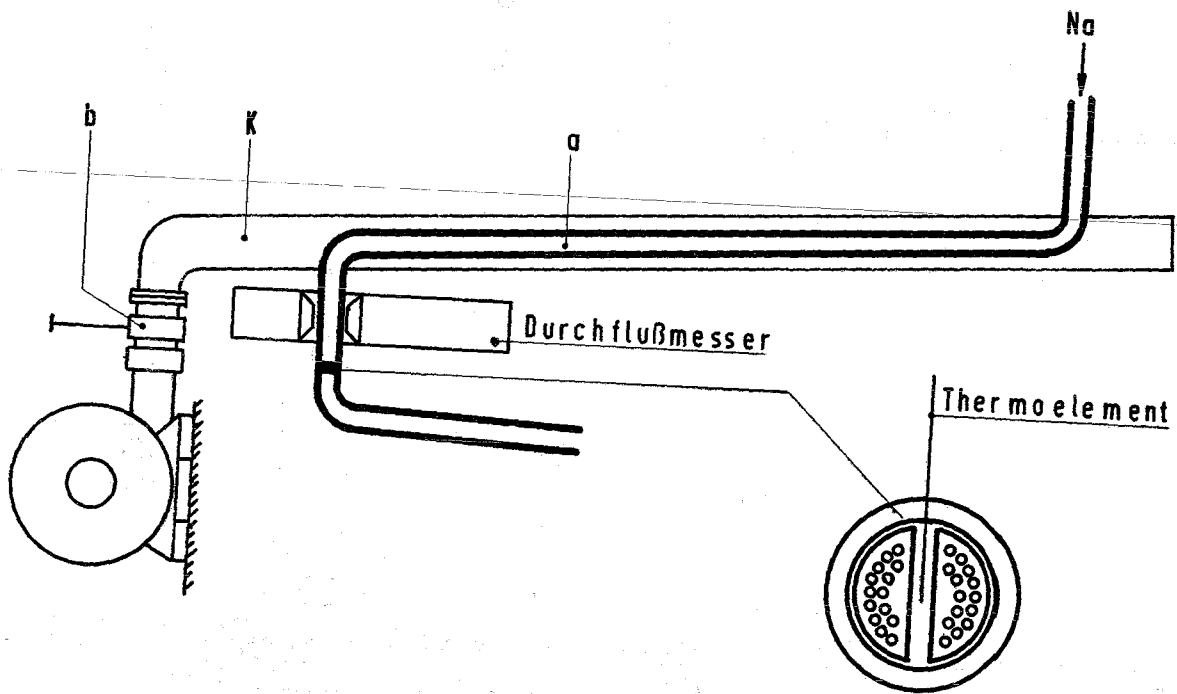


Abb. 11

Plugging meter

PM - Düse M1:1

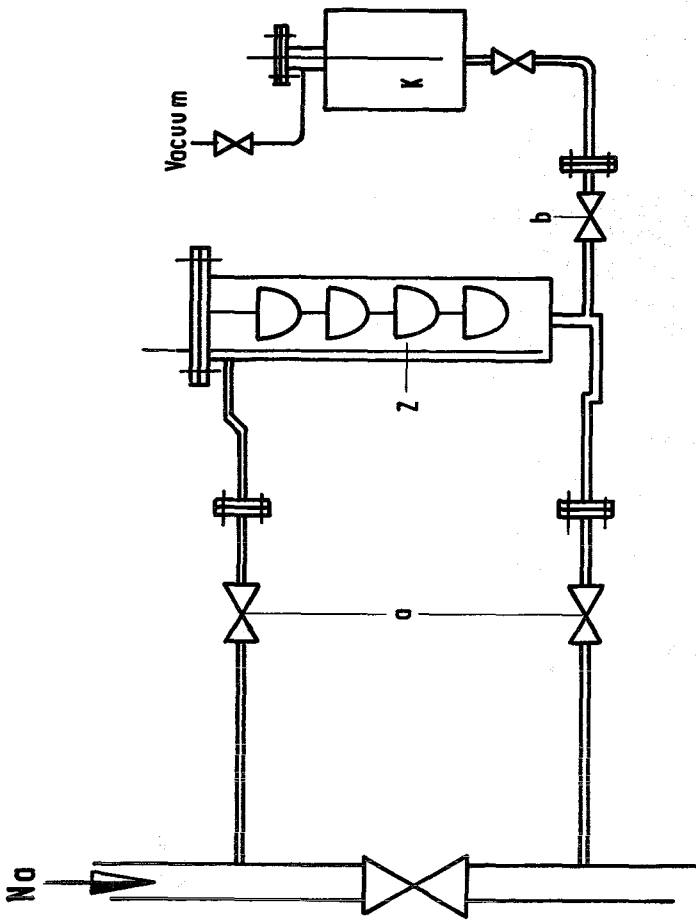


Abb. 13 Proben - Entnahme

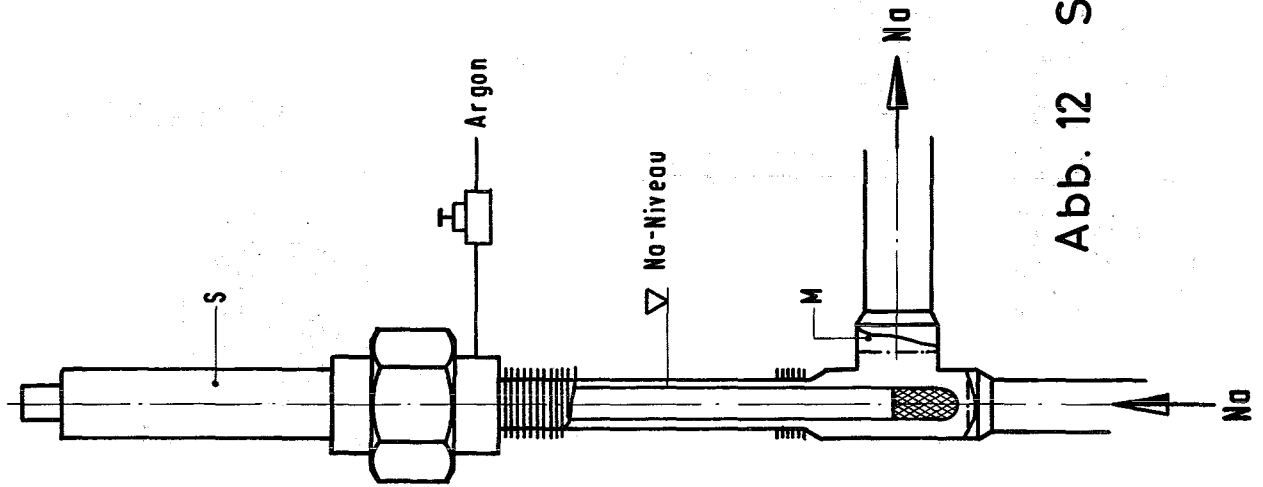


Abb. 12 Sauerstoff - Meßsonde

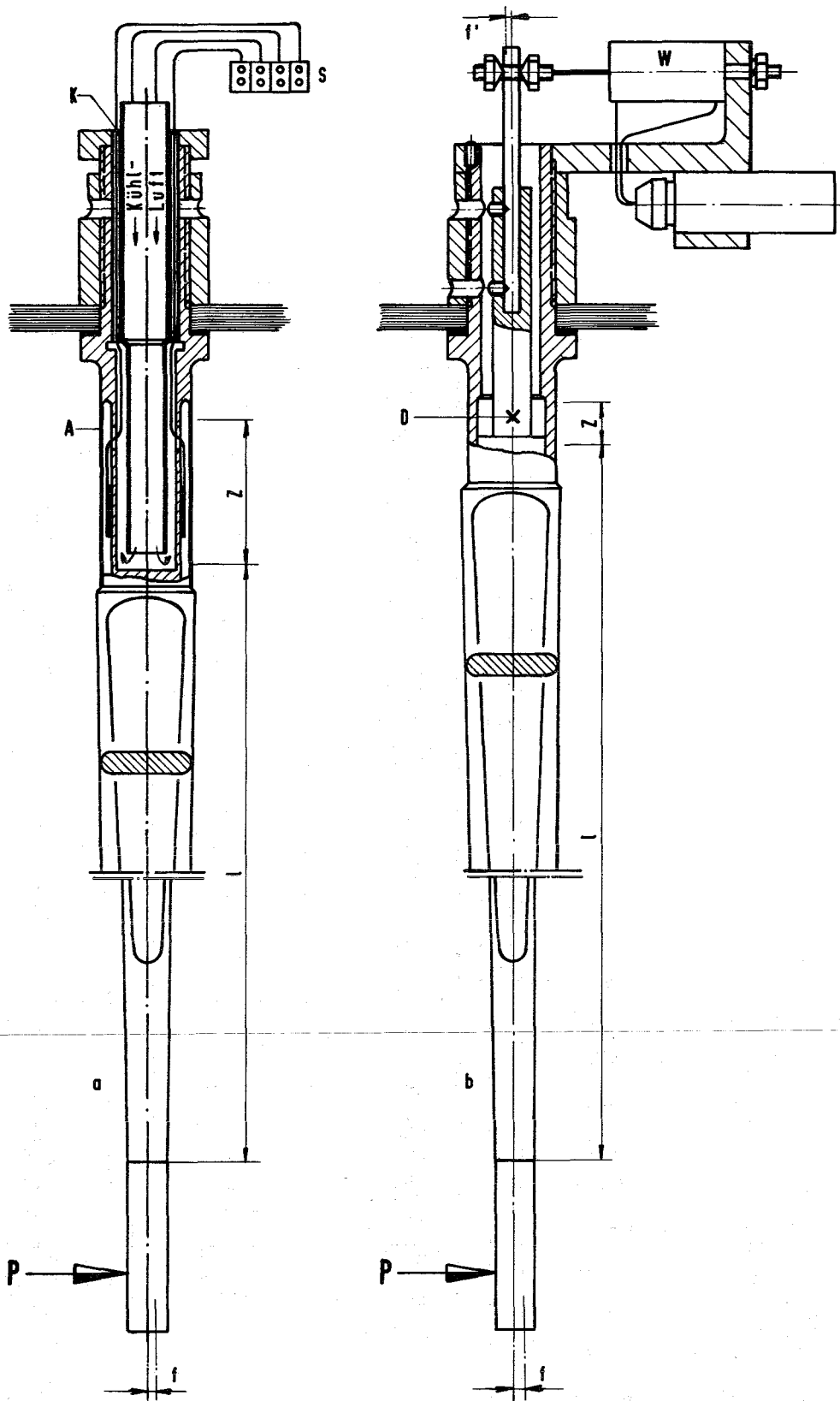
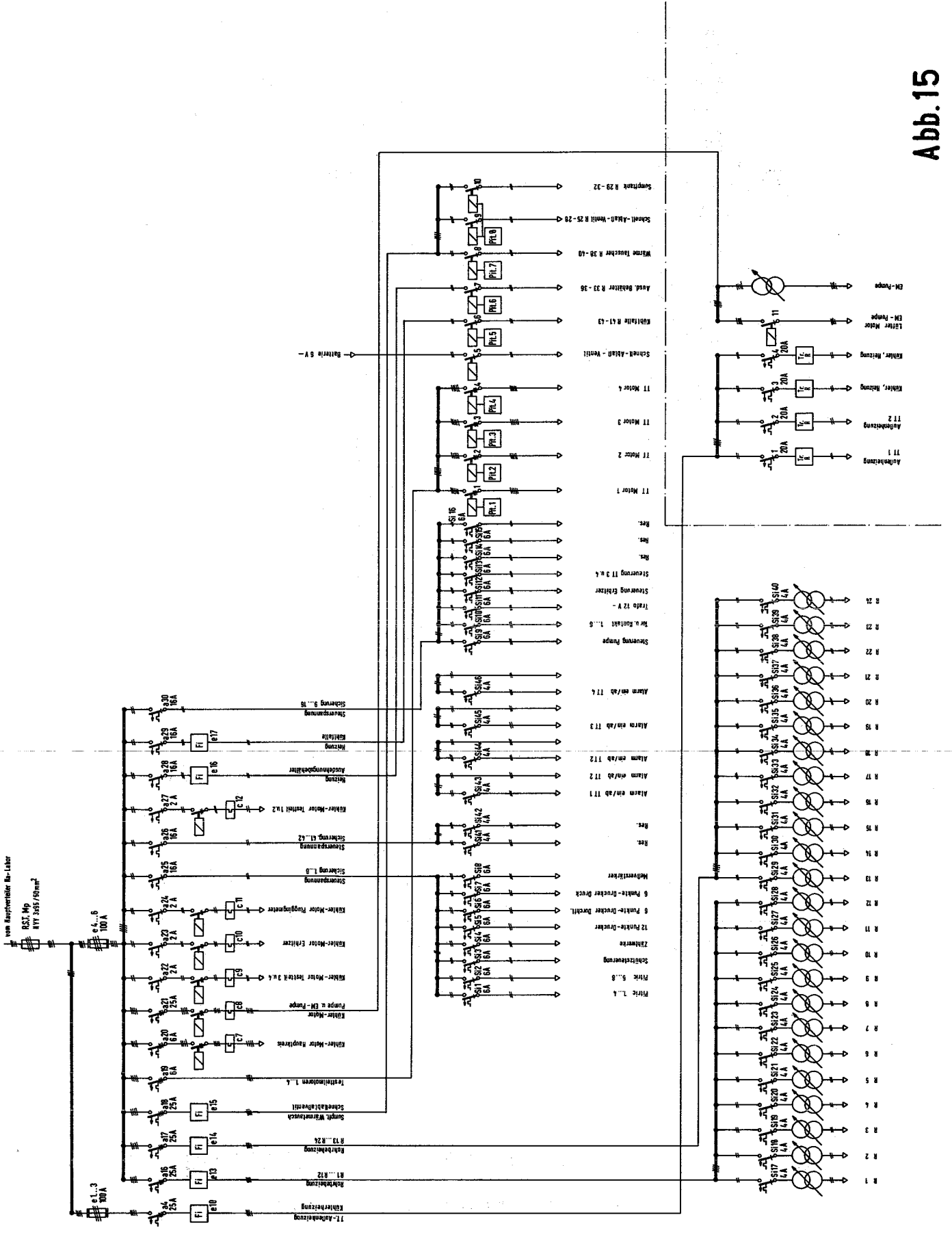


Abb.14 Biegestab für Reibkraftmessung

a mit Dehnungsmeßstreifen

b mit indukt. Wegaufnehmer

Abb. 15



12 Punktedrucker c

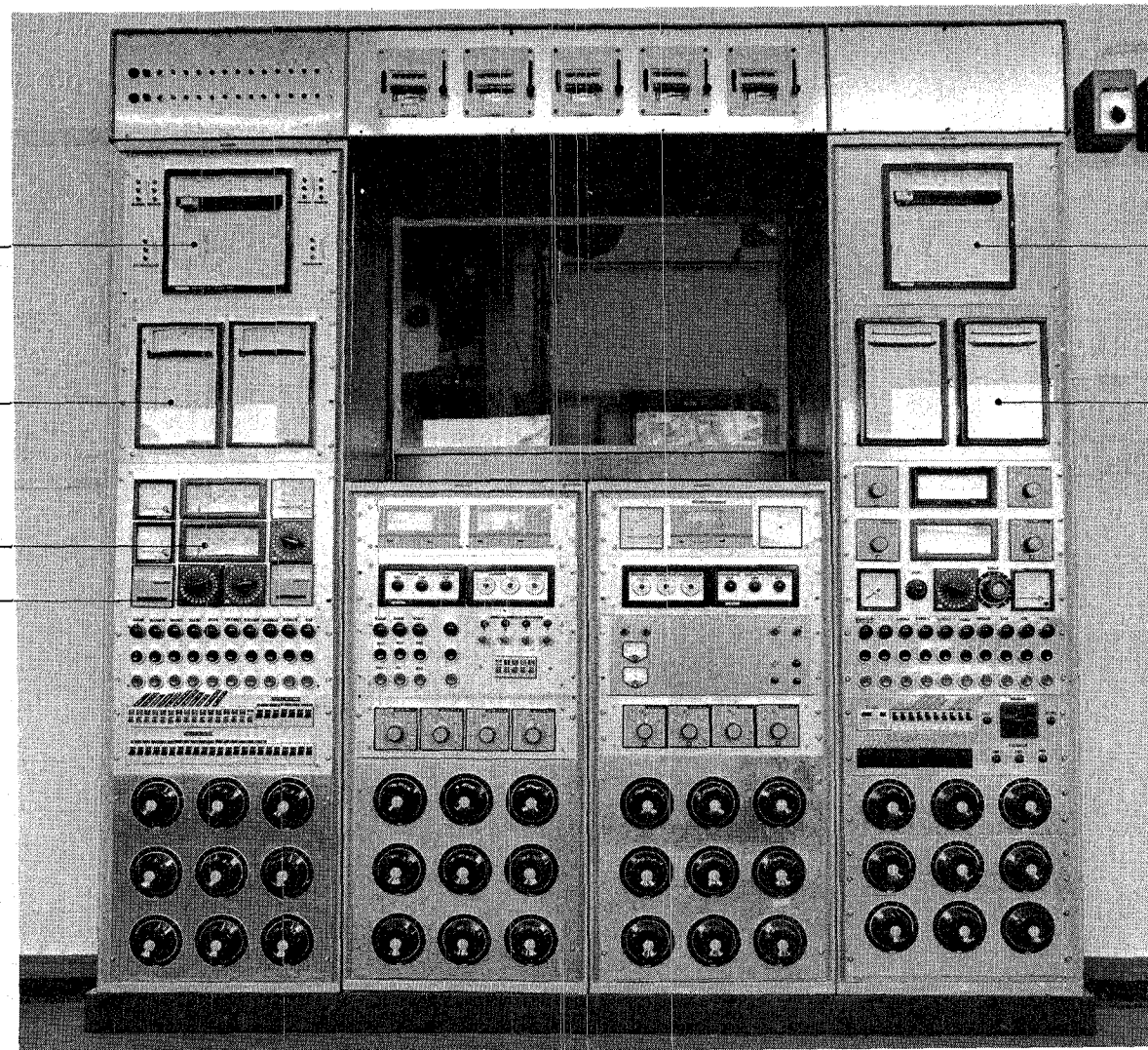
6 Punkte drucker d

Anzeigegeräte b

Meßst.-Umschalter a

c

Linien-schreiber e



I

II

III

IV

Abb. 16 Schaltwand für NVP I und NVP II

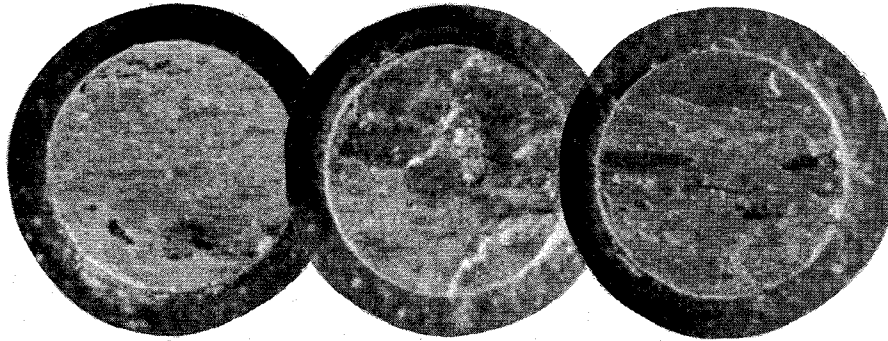


Abb. 17 Stellit 1-, Stellit 6H- und Colmonoy 6-Proben mit Austenitaufschweißungen

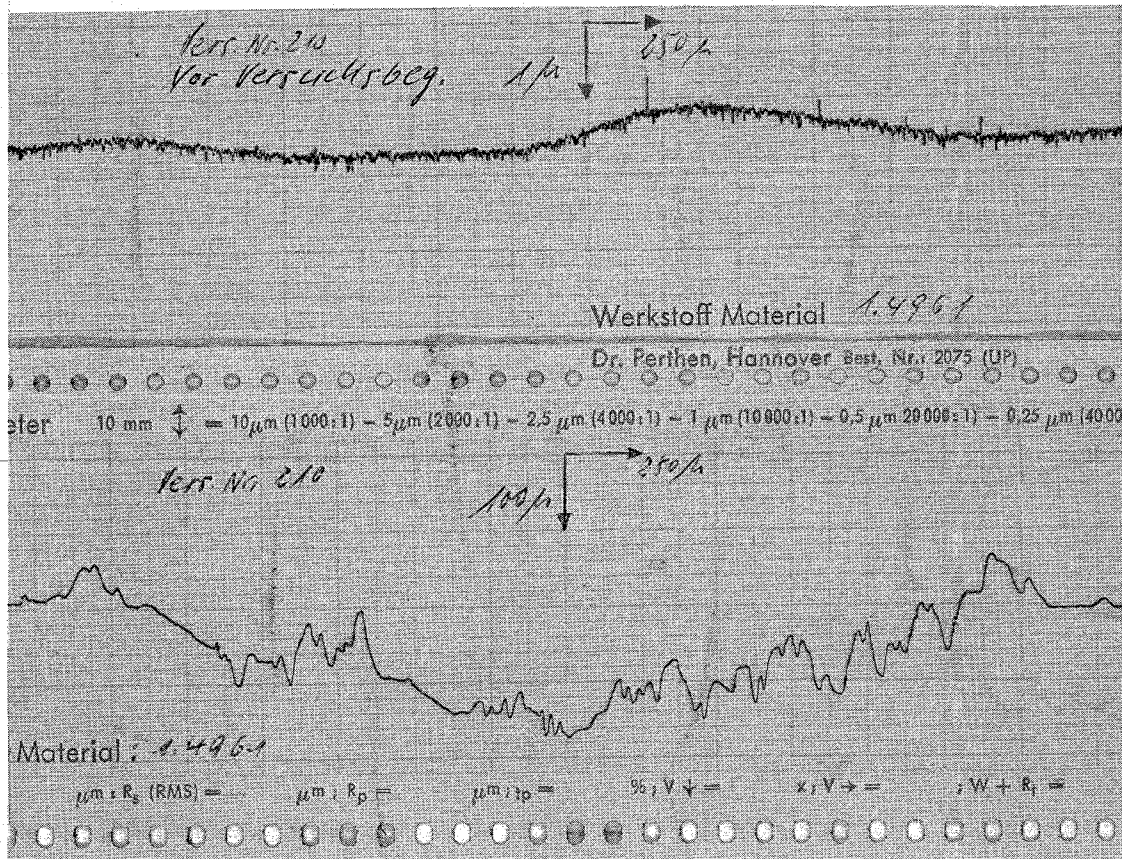


Abb. 18 Gleitflächenprofil auf Austenitscheibe

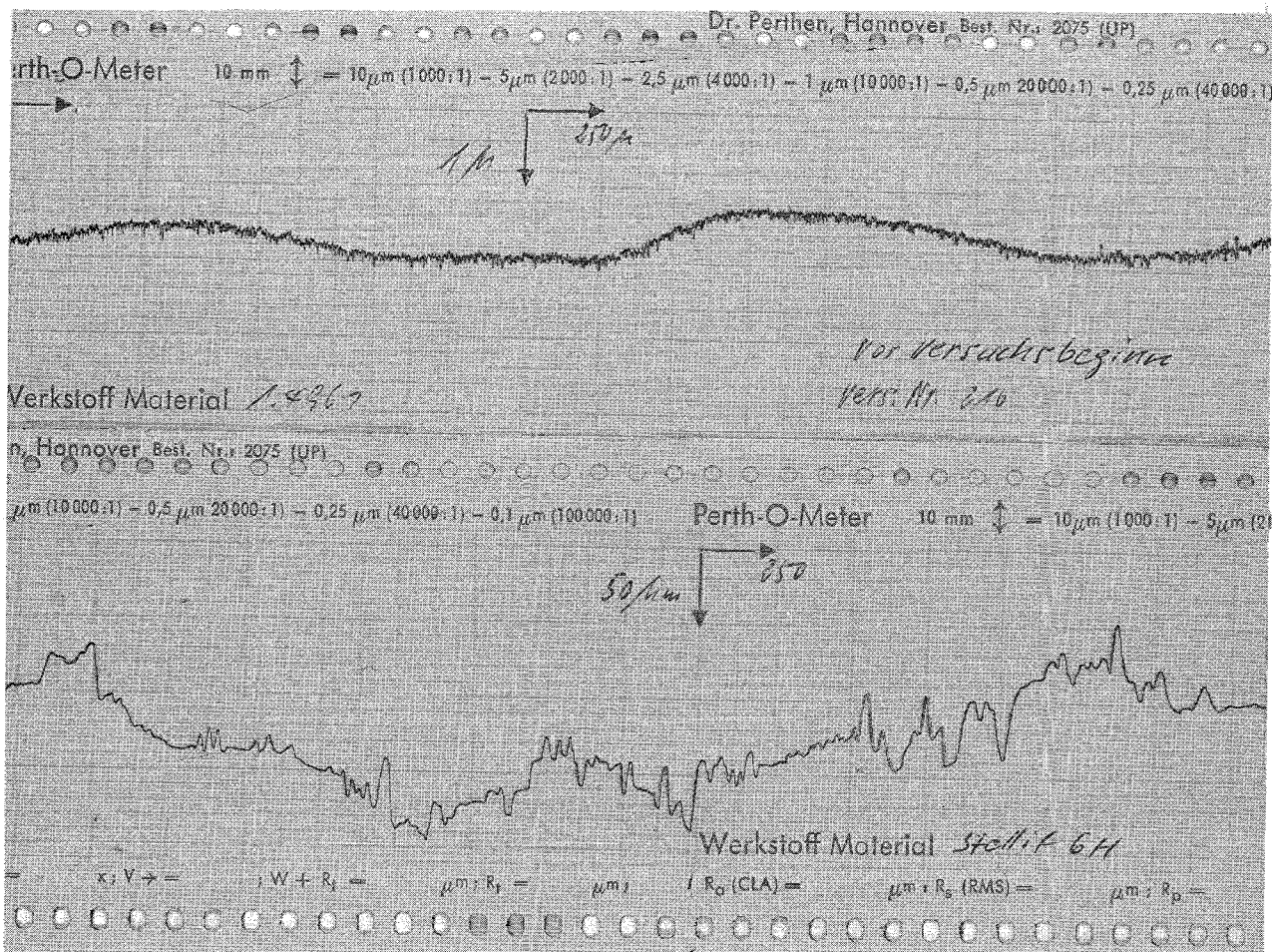


Abb. 19 Austenit-Gleitfläche unter Stellite 6H-Proben vor und nach dem Versuchslauf

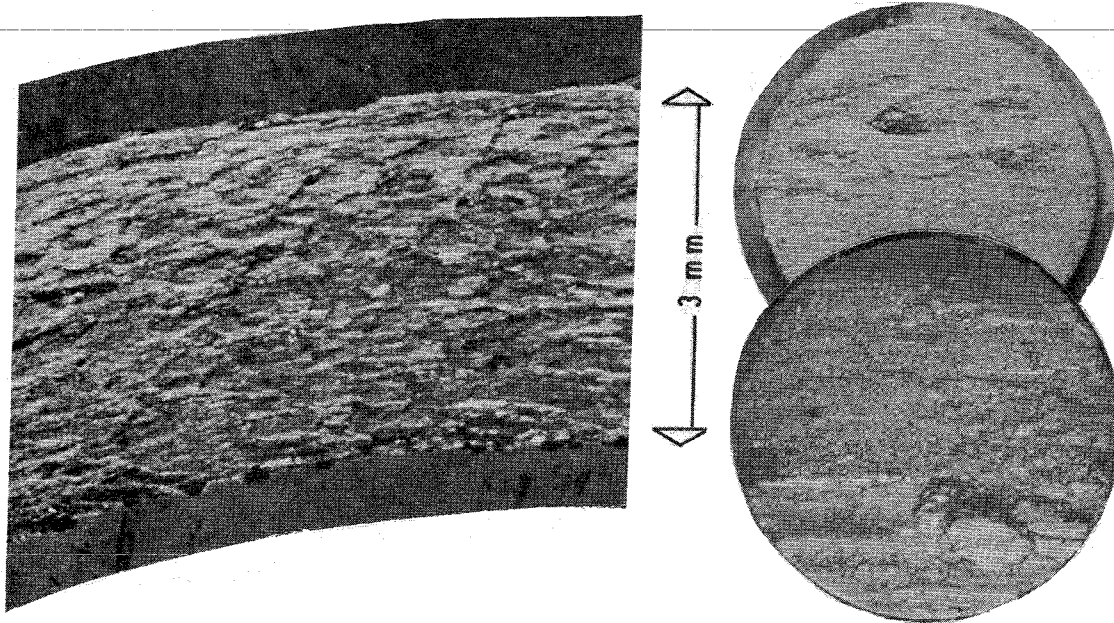


Abb. 20 Borkige Gleitfläche auf Austenitscheibe gegen zyl. Proben aus Stellite 6H

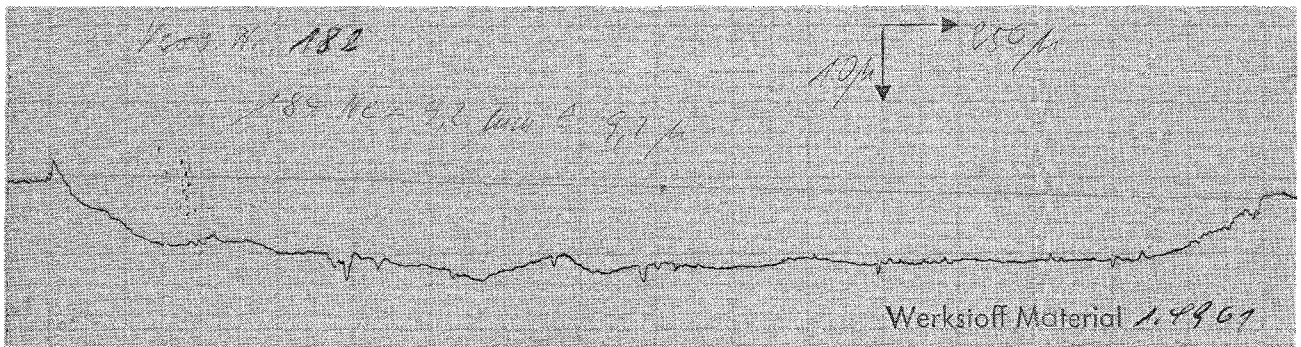
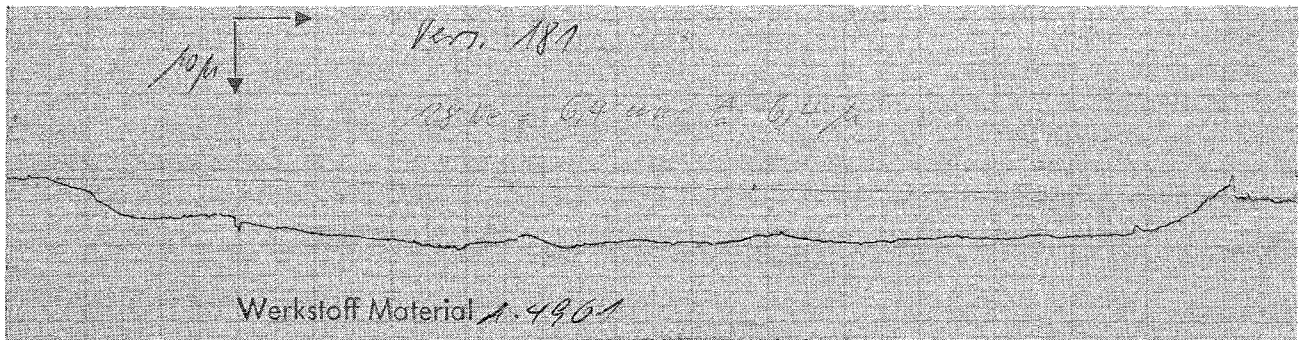


Abb. 21
 Gleitflächenprofile auf Austenitscheiben (1.4961) unter
 Proben aus a) Inconel 750 und b) Inconel 718

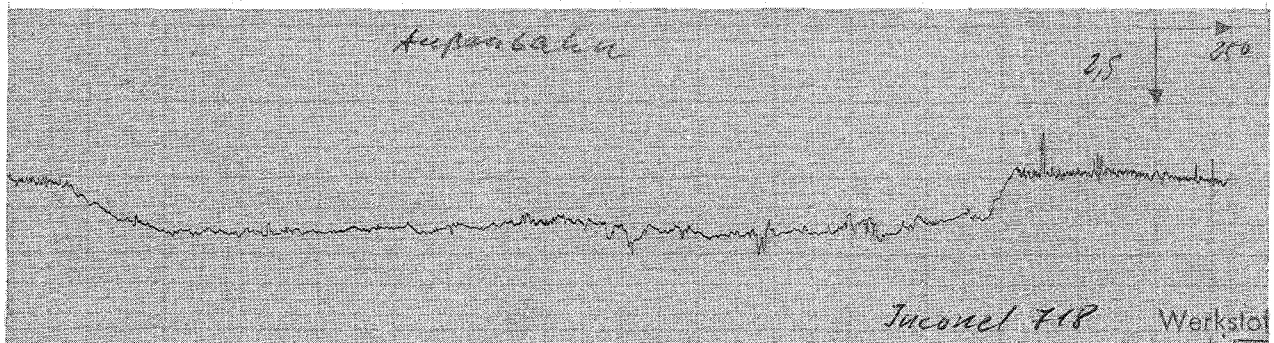
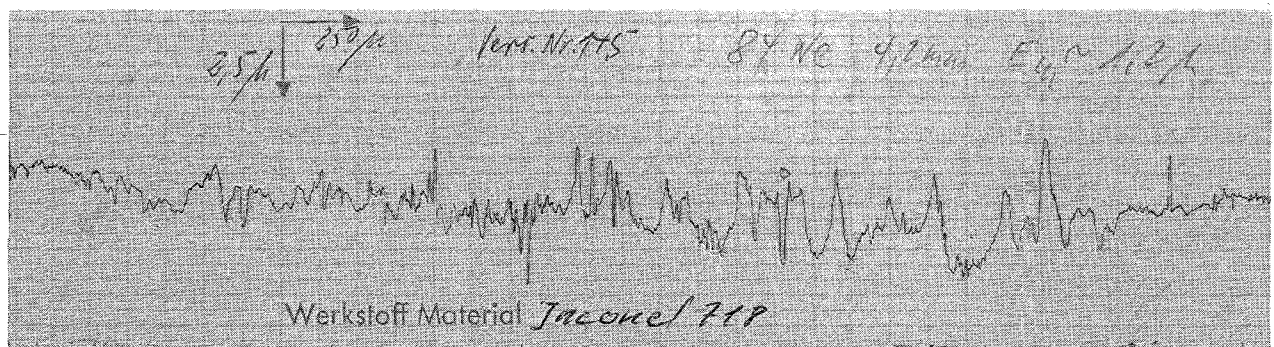


Abb. 22
 Gleitflächenprofile auf Inconel 718, a) unter Stellite 6
 und b) unter Colmonoy 6

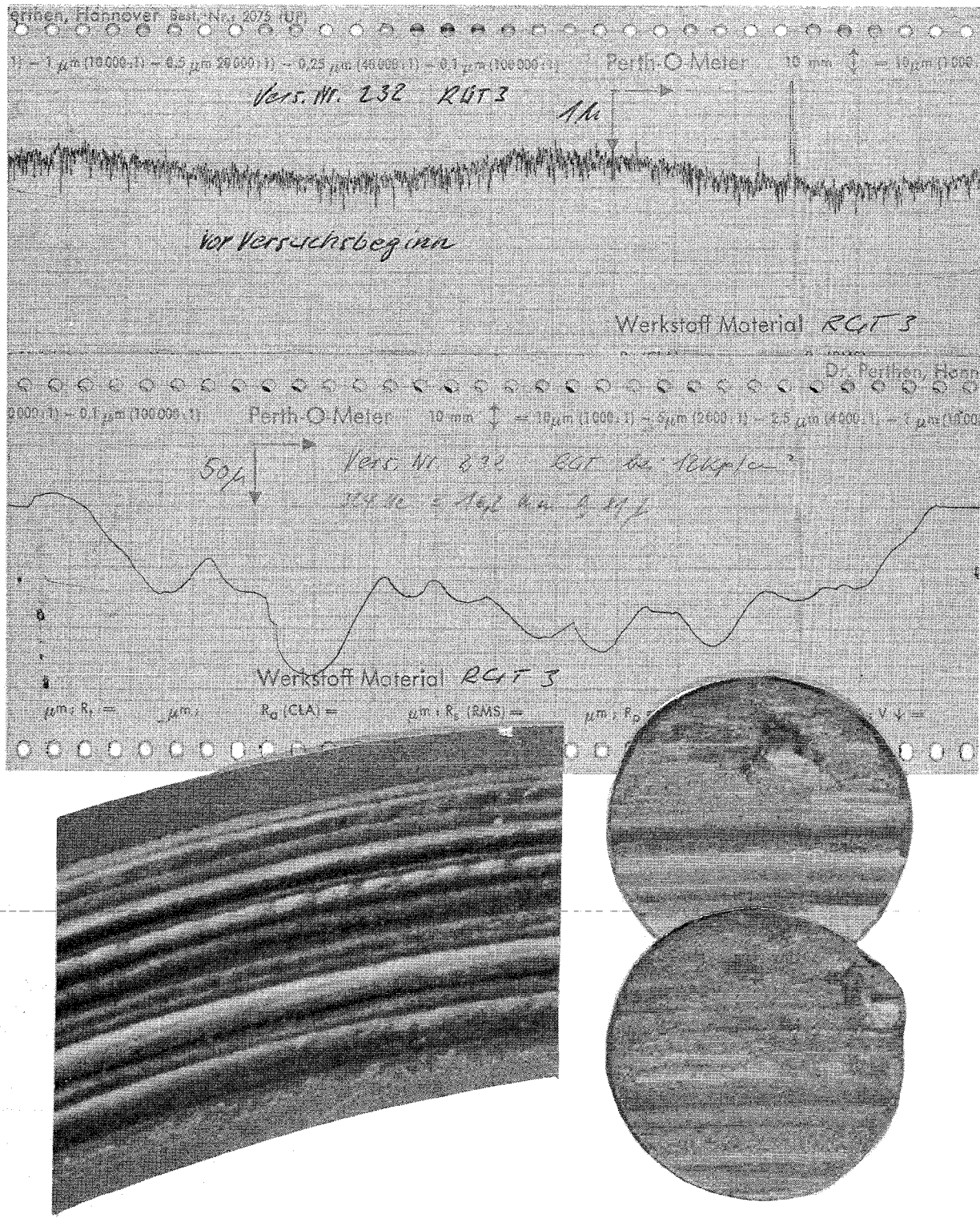


Abb. 24 Typische Riefenbildung auf den Gleitbahnen der Werkst.-Paarung RGT 3 gegen RGT 3 (Nimonic 80)

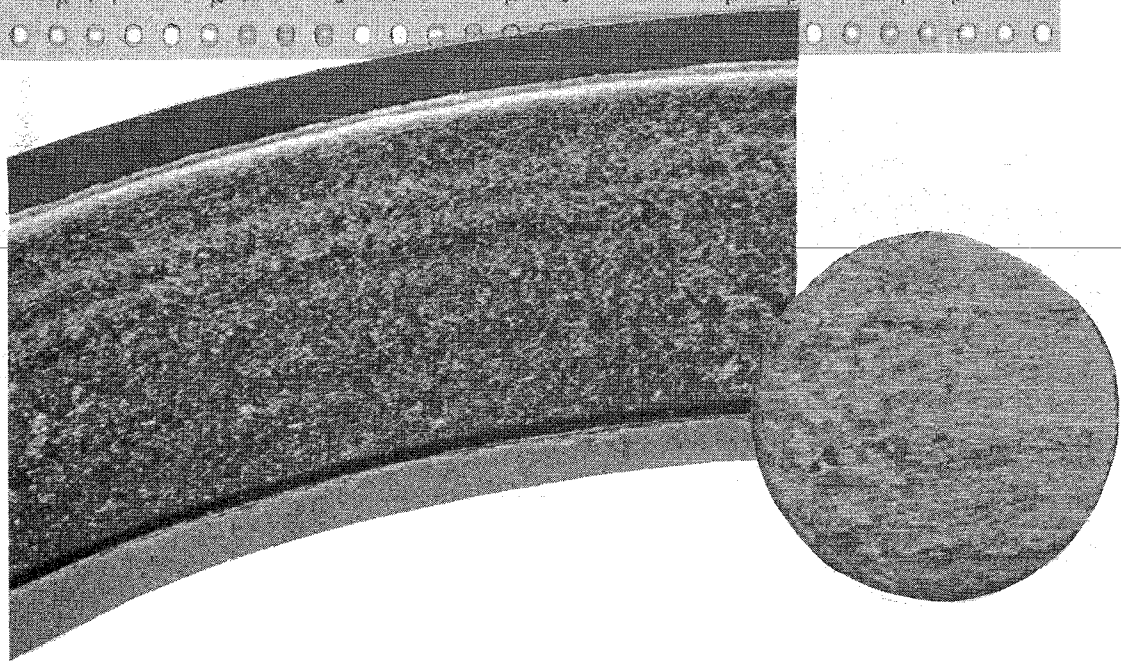
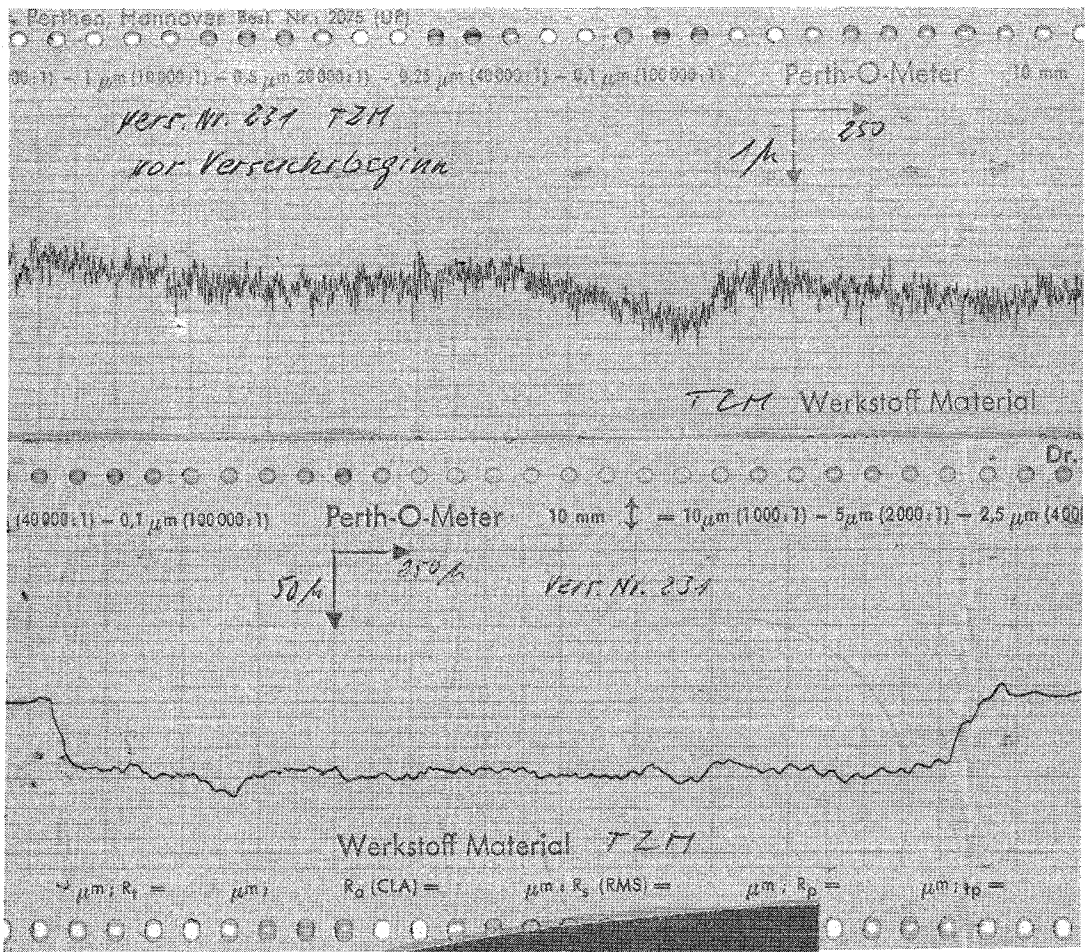


Abb. 25 - Gleichmäßige Gleitbahnabsenkung bei der Werkstoffpaarung TZM gegen TZM

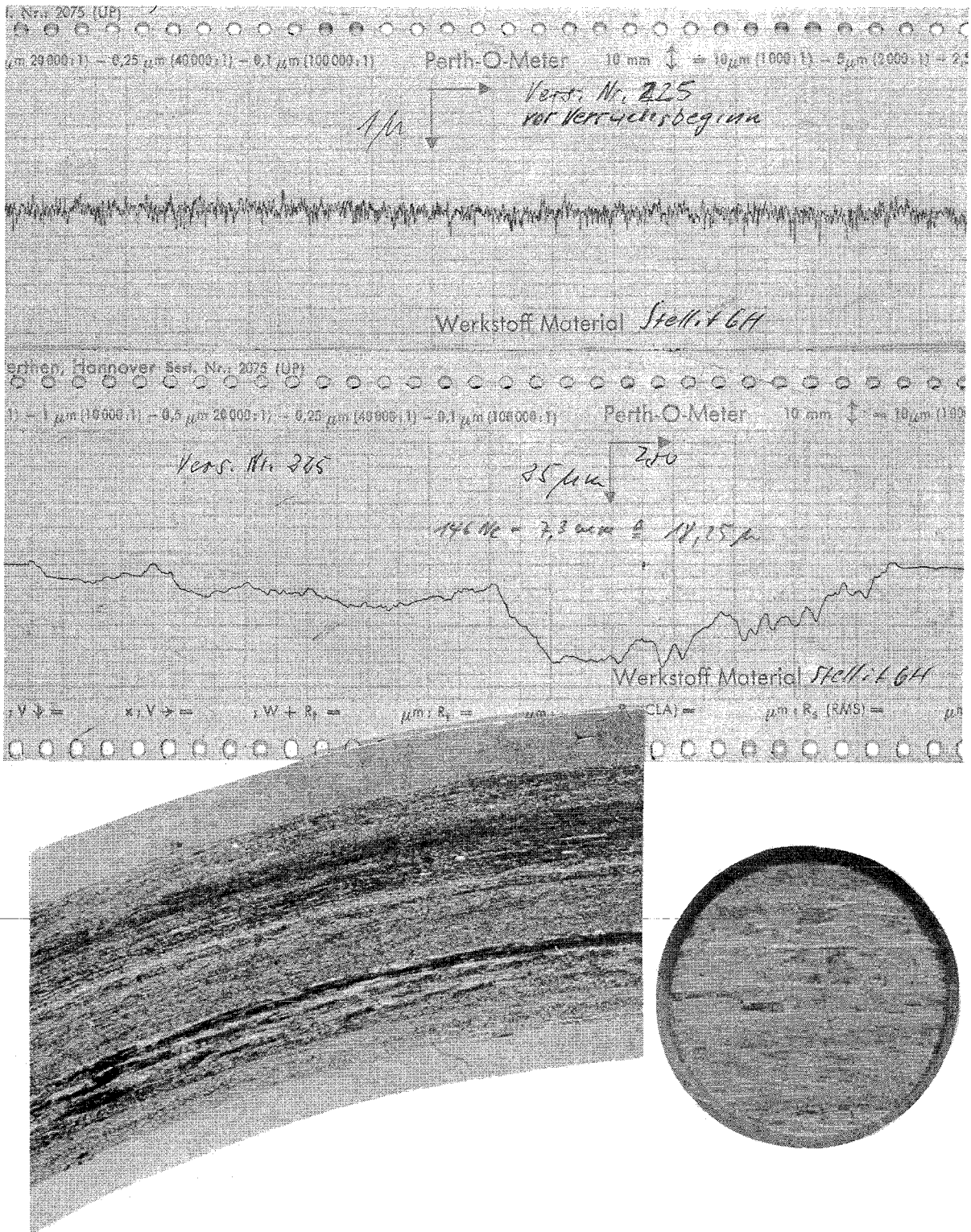


Abb. 26 Gleitfläche einer Werkstoffpaarung
 Stellite 6H gegen Stellite 6H

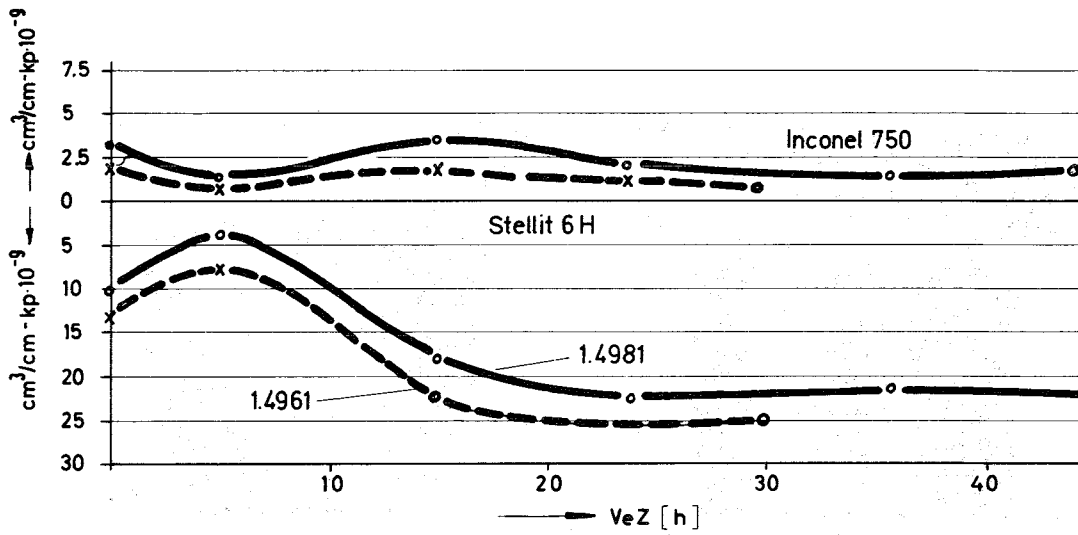


Abb. 27 Verschleißrate als Funktion der Voreintauchzeit (VeZ)

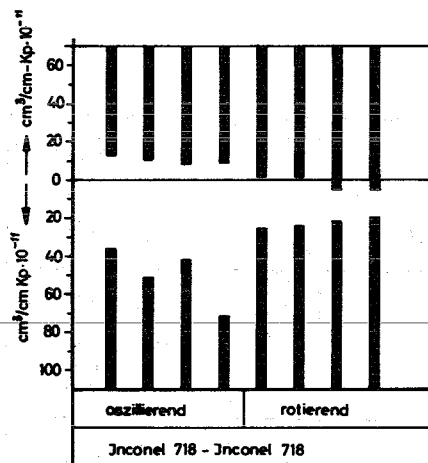


Abb. 28 Verschleißrate als Funktion der Relativbewegung

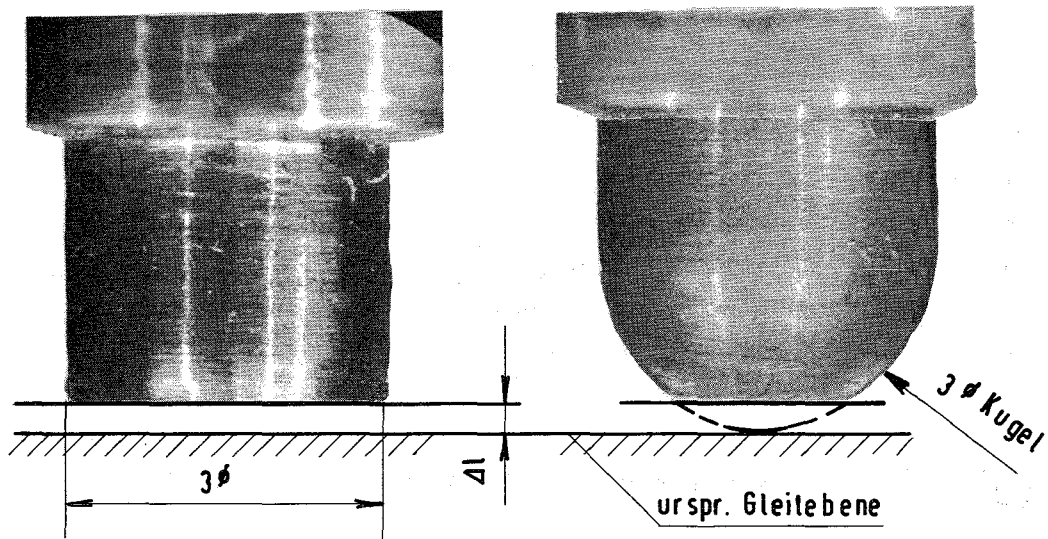


Abb. 29 Zylindrische Werkstoffproben
mit flacher und kugeliger Gleitzone

Hastelloy C	Stift	U	6,88	19,08
	Scheibe		12,20	
Hastelloy C	Stift	□	1,30	15,70
	Scheibe		14,40	
Inconel 718	Stift	U	5,46	19,46
	Scheibe		14,00	
Inconel 718	Stift	□	3,80	16,90
	Scheibe		13,10	

Tab. 6 Die spez. Verschleißrate [$\text{cm}^3/\text{cm-kp}$]
als Funktion der Probengeometrie

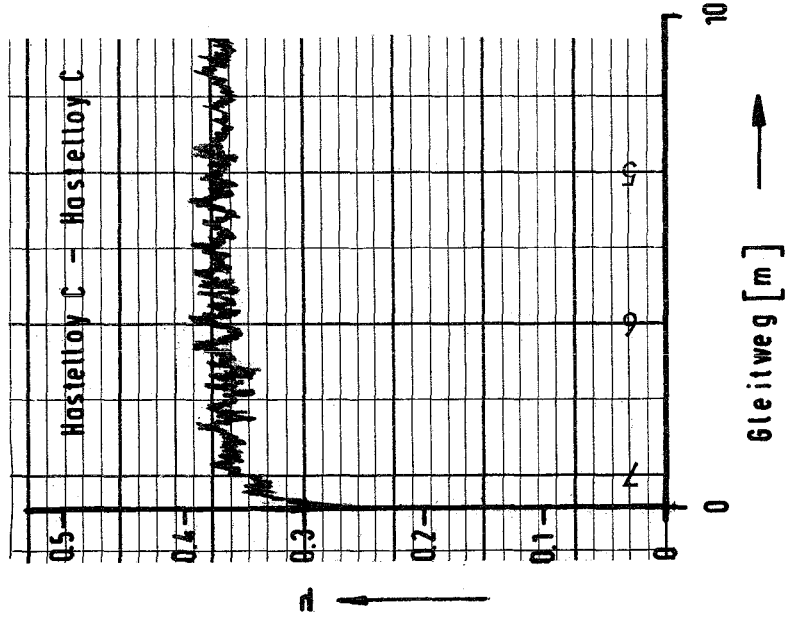
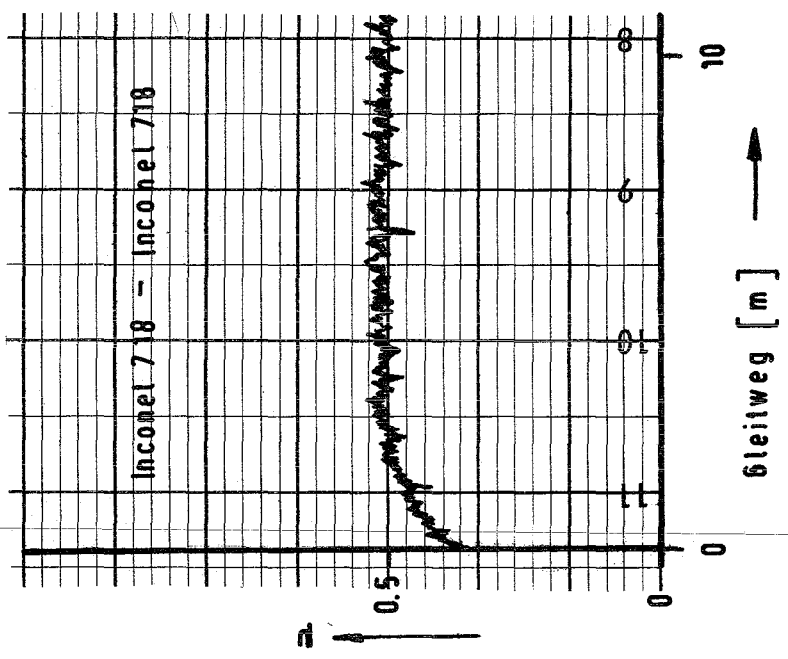
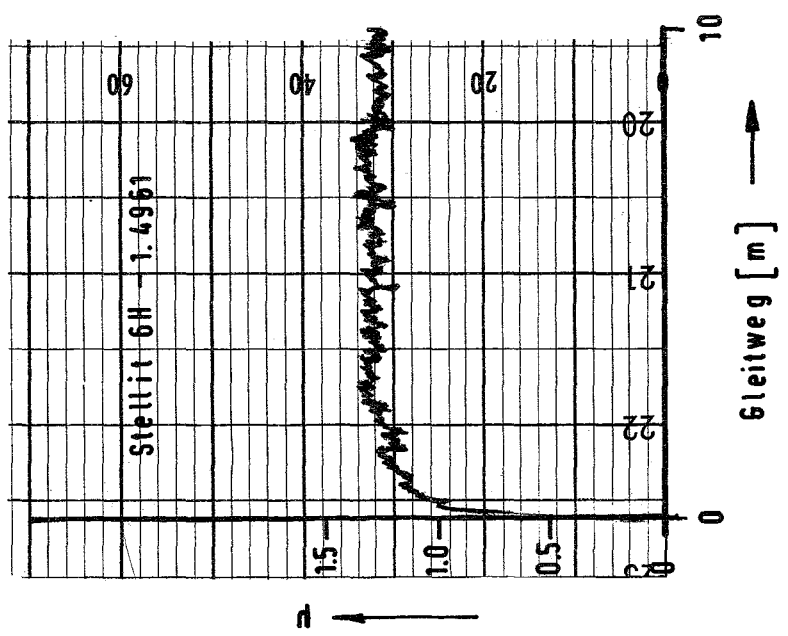


Abb. 30 Entwicklung des Reibungsbeiwertes μ während der Startphase

