

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

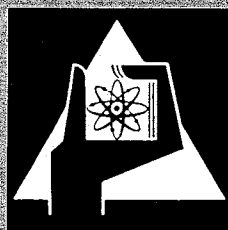
August 1970

KFK 1251

Institut für Reaktorbauelemente

Experimentelle Untersuchungen des Verschleißverhaltens
von Stählen und Legierungen in flüssigem Natrium

E. Wild, K. Mack, H. Hoffmann



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

August 1970

KFK 1251

INSTITUT FÜR REAKTORBAUELEMENTE

Experimentelle Untersuchungen des Verschleissverhaltens von Stählen und Legierungen in flüssigem Natrium

von

E. Wild

K. Mack

H. Hoffmann

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG MBH., KARLSRUHE

THE UNIVERSITY OF CHICAGO

PHYSICS DEPARTMENT

PHYSICS 439

LECTURE 10: QUANTUM MECHANICS OF PARTICLES IN POTENTIALS

10.1

10.2

Inhalt

Der betriebsbedingte Verschleiss an Lagern, Führungen, Abstützungen und Halterungen von Bauteilen natriumgekühlter Reaktoren lässt sich durch die Wahl geeigneter Werkstoffpaarungen weitgehend unterbinden bzw. auf ein erträgliches Mass reduzieren. Hierzu bedarf es der Kenntnis des Gleit- und Verschleissverhaltens möglichst vieler Werkstoffkombinationen, die sich aus Strukturwerkstoffen, Aufschweislegierungen und Hartmetallen zusammenstellen lassen und deren Verträglichkeit mit dem Betriebsmedium nachgewiesen ist.

In der vorliegenden Arbeit werden die aus der Problemstellung als notwendig erkennbare Art der Verschleissuntersuchungen, die damit verbundene Werkstofffrage, sowie die verwendete Versuchsanlage beschrieben. Im Mittelpunkt stehen die hierbei bis heute gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse.

Wir danken Herrn J. Michael für seine Mitarbeit

Abstract

The wear due to operation of bearings, guides, supports, and holders of components of sodium cooled reactors can be limited to a large extent or reduced to a bearable minimum by the choice of suitable material combinations. This requires knowledge of the sliding and wear behavior of a maximum number of material combinations which can be set up from structural materials, hard facing alloys and hard metals and whose compatibility with the operating medium has been proved.

The present work described the type of wear investigations deemed to be useful in view of the problem points the related questions of materials and the experimental facility used. The report centers around the results and the knowledge gained up to now.

We wish to thank Mr. I. Michael for his collaboration.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	1
2. Aufgabenstellung	2
3. Versuchseinrichtungen	4
3.1 Versorgungskreislauf	4
3.2 Teststrecke für oszillierende Bewegungsart	5
3.3 Geometrie der Gleitpaarung	5
4. Messverfahren und Einrichtungen	6
4.1 Längenänderung der zylindrischen Proben	6
4.2 Oberflächenbeschaffenheit	6
4.3 Verschleissrate	7
4.4 Natrium-Temperatur im Testbehälter	7
4.5 Oxidgehalt des Natriums	8
5. Übersicht und Diskussion der Versuchsergebnisse	8
5.1 Unbeschichtete Strukturwerkstoffe gegen gleiche Gleitpartner	9
5.2 Schweissauftrags-Legierungen gegen unbeschichtete Strukturwerkstoffe	10
5.3 Schweissauftrags-Legierungen gegen Hartwerkstoffe	13
5.4 Parameteruntersuchungen	14
6. Zusammenfassung	16
6.1 Unbeschichtete Strukturwerkstoffe gegen gleiche Gleitpartner	16
6.2 Schweissauftrags-Legierungen gegen unbeschichtete Strukturwerkstoffe	16
6.3 Schweissauftrags-Legierungen gegen Hartwerkstoffe	17
6.4 Parameteruntersuchungen	18
7. Schlussfolgerung	19
8. Literaturverzeichnis	20

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100

1. Einleitung

In nahezu allen von flüssigem Natrium durchströmten Komponenten einer Kernkraftanlage kommt es zu mehr oder weniger betriebsbedingten, stetigen oder intermittierenden Relativbewegungen zwischen sich berührenden Teilen. Die verschiedenartigen Bewegungsabläufe und die damit verbundenen unterschiedlichen Reibungsbelastungen kann man einteilen in:

- Kontinuierlich rotierende Bewegungen,
- Diskontinuierliche Drehbewegungen,
- Translatorische, intermittierende Bewegungen,
- Hämmernde oder oszillierende, hochfrequente Bewegungen,
- Kurze Hub-Drehbewegungen bei hoher Pressung,
- Kombinierte Relativbewegungen.

Nur in wenigen Fällen ist durch geeignete Formgebung und ausreichende Relativgeschwindigkeit die Ausbildung eines trennenden, dynamischen Schmierfilmes zwischen aufeinandergleitenden Teilen gewährleistet. Bei Drehrichtungswechseln, in An- und Auslaufphasen oder bei nicht betriebsbedingten Schwingungen in Halterungen und Führungen kommt es daher häufig zu direktem, metallischem Kontakt der einzelnen Bauteile. Dieser führt zu unerwünschten Veränderungen der Werkstückoberflächen und damit zu Verschleiss als mögliche Ursache für empfindliche Betriebsstörungen. Besonders unangenehm können sich derartige Störungen in Regel- und Sicherheitssystemen auswirken.

Aufbauend auf einer Serie von Auswahlversuchen an verschiedenen Materialpaarungen[1,2] sollen daher für die speziellen Bedürfnisse der Regelstabenentwicklung diese fortgesetzt und durch gezielte Parameteruntersuchungen ergänzt werden.

2. Aufgabenstellung

Im Hinblick auf die Regelstabentwicklung des Schnellen Na-gekühlten Reaktors (SNR) soll das Gleit- und Verschleissverhalten einer Reihe von Werkstoffen untersucht werden. Hierfür sind folgende Gesichtspunkte zu beachten:

- Es besteht ein direkter metallischer Kontakt zwischen den Bauteilen. In Ruhestellungen kann es zur Ausbildung von Kaltschweissbrücken kommen, die in der Bewegungsphase abreißen und erhebliche Beschädigungen an den Gleitflächen hervorrufen können. Nicht vom Kühlmittelstrom abgeführte, lose Werkstoffpartikel können in der Berührungszone der Gleitpaarung eine erhöhte Reibungsbelastung und damit eine Vergrößerung des Oberflächenverschleisses bewirken.
- Die Gestaltung der Versuchsanlage und die Wahl der Betriebsparameter richten sich nach der Art des Einsatzes der Bauelemente, für welche geeignete Werkstoffpaarungen zu bestimmen sind. Die Experimente sollen daher bei oszillierender Bewegungsart durchgeführt werden. Als Betriebszustände sind anzustreben:

Na-Temperatur:	600 °C
Na-Oxidgehalt:	≤ 10 ppm
spez. Flächenpressungen:	≤ 24 kp/cm ²
mittl. Gleitgeschwindigkeiten:	12 cm/sec

- Die Auswahl der Werkstoffe erfolgt nach ihren Festigkeitseigenschaften und ihrem Korrosionsverhalten unter Natrium. Sofern letzteres nicht bekannt ist, muss es in speziellen Versuchen festgestellt werden.

- Es ist davon auszugehen, dass wesentliche Teile des Kontrollstabsystems aus favorisierten Strukturwerkstoffen, nämlich den austenitischen Stählen 1.4961 und 1.4981 sowie der Nickelbasislegierung Inconel 718 gefertigt werden, die im Reaktorkern in (im Vergleich zur Stablänge) kleineren Führungselementen aus anderen Werkstoffen gleiten. Daraus erhebt sich die Forderung für diese drei Strukturwerkstoffe (zunächst in Auswahlversuchen) optimale Gleitpartner zu ermitteln.
- Als Gleitpartner der Strukturmaterialien werden Schweissauftragswerkstoffe mit unterschiedlichen Legierungsbestandteilen bevorzugt. Darüber hinaus sollen Hartmetalle und Sonderwerkstoffe in das Versuchsprogramm aufgenommen werden. Das Werkstoff-Sortiment setzt sich daher zusammen aus:

Strukturwerkstoffe: 1.4961,
 1.4981,
 Inconel 718.

Schweissauftragswerkstoffe: Akrit Fe Cr 50,
 Stellite 1,
 Stellite 6 H,
 Colmonoy 5,
 Colmonoy 6,
 Colmonoy 56.

Hartwerkstoffe: Ferro-TiC-T,
 Hartmetall 1.

Sonderwerkstoff: Tantal.

Diese 12 Materialien, deren Legierungsbestandteile in Tab. 1 wiedergegeben sind, wurden in 14 verschiedenen Kombinationen untersucht (Tab. 2).

- Als Parameter sollen für die aus den Auswahlversuchen resultierenden verschleissgünstigen Materialpaarungen variiert werden:

Belastung: 6, 12, 18, 24 kp/cm²
Gleitweg: 11, 22, 33 · 10³ m

3. Versuchseinrichtungen

Für die Durchführung des erforderlichen Versuchsprogrammes wurde ein Prüfstand verwendet, der im wesentlichen aus zwei Anlageteilen besteht, nämlich dem Versorgungskreislauf und der Teststrecke.

Der Prüfstand ist so ausgelegt, dass folgende Betriebsparameter eingehalten werden können:

spez. Anpressdruck der Proben:	3 bis 24 kp/cm ²
mittl. Gleitgeschwindigkeit:	12 cm/sec
Betriebstemperatur des Na:	600°C ± 10°C
Oxidgehalt des Natriums:	5 - 15 ppm
Kühlfallentemperatur:	125 - 130 °C

3.1 Versorgungskreislauf

In dem in Abb. 1 dargestellten Versorgungskreislauf werden stündlich 0,3 m³ Na gefördert. Ein Regelsystem sorgt für eine konstante Erhitzer-Austrittstemperatur von 600 °C. Elektro-Magnet-Pumpe, Kaltfalle und Pluggingmeter sind in einem Teil des Kreislaufes angeordnet, dessen Maximaltemperatur 400 °C beträgt. Ein Na-Teilstrom von ca. 10 % der gesamten Durchflussmenge wird durch die Kühlfalle geleitet, die bei einer Temperatur von 125 bis 130 °C und einer Verweilzeit des Na von ca. 5 Minuten sehr wirksam arbeitet. Als Schutzgas über den freien Natriumoberflächen wird Argon verwendet. Sein Überdruck beträgt 0,3 atü.

3.2 Teststrecke für oszillierende Bewegungsart

Der in Abb. 2 erkennbare Aufbau der Teststrecke ist im wesentlichen durch die Art der Probenhalterung gekennzeichnet. Das Gewicht belastet konzentrisch den beweglich angeordneten Teil C, der die drei zylindrischen Stempel S über die feste Ringscheibe R bewegt. Die Übertragung der Drehkraft erfolgt von einem über der Teststrecke angeordneten Elektromotor über die vertikale Welle W und die Glocke K auf den beweglichen Teil der Probenhalterung.

3.3 Geometrie der Gleitpaarung

Aus Gründen der Herstellung und Bearbeitung wurde, in Anlehnung an bekannte Systeme [3], eine einfache Geometrie der Probekörper gewählt. Sie ist in Abb. 3a dargestellt.

Drei zylindrische Stempel bewegen sich mit einem Drehwinkel von ca. 90° oszillierend über eine Ringscheibe. Dabei entstehen die in Abb. 3b dargestellten Gleitbahnen.

Mit der Veränderung des Stempeldurchmessers lässt sich die Flächenpressung variieren. Sie bleibt, ausser im Falle starker Materialverformung, über den ganzen Versuchsablauf konstant.

Durch die Planparallelität der Berührungsflächen soll die Bildung eines dynamischen Schmierfilms zwischen den gleitenden Teilen unterdrückt und damit der Einfluss des Natriums auf den Verschleissvorgang nur über Adhäsion, Adsorption und chemische Reaktion möglich werden [4, 5].

Eine durch Verschleiss bewirkte Gestaltsänderung an den Probekörpern (Längenänderung der Stempel und Eindringtiefe der Gleitflächen in die Ringscheibe) lassen sich messtechnisch gut erfassen.

Als Voraussetzung vergleichbarer Ergebnisse wird vor Versuchsbeginn durch verschiedene, z.T. aufwendige Arbeitsmethoden, eine weitgehend gleiche Oberflächenqualität der zylindrischen Proben und der Ringscheibe angestrebt.

4. Messverfahren und Einrichtungen

Die Gefährdung von Bauteilen durch Verschleiss wird im allgemeinen nach den ihnen zugeordneten betrieblichen Funktionen beurteilt. Eine Aussage über das Verhalten zweier Werkstoffe als Gleitpartner unter verschiedenen Reibungsbeanspruchungen ist daher nicht allein aufgrund einer experimentell ermittelten Verschleissrate möglich. Die Neigung eines Werkstoffes zu plastischer Verformung oder Materialtransplantation infolge Kaltverschweissung ist für seine Beurteilung nicht minder von Bedeutung. Darüber hinaus interessieren die Oberflächenrauigkeit, die maximale Eindringtiefe oder auch der arithmetische Mittenrauhwert (CLA).

Im vorliegenden Fall wurden für die Auswertung der Versuchsergebnisse folgende Messgrößen erfasst:

4.1 Längenänderung der zylindrischen Proben

Mit Hilfe eines Feinstmikrometers erfolgt die Längenmessung der zylindrischen Prüfkörper vor und nach dem Versuch. Aus der Differenz lässt sich der Abrieb oder Auftrag errechnen.

4.2 Oberflächenbeschaffenheit

Auf den Ringscheiben wird die mittlere Eindringtiefe E_m der Gleitflächen ermittelt. Das ist der

durchschnittliche, aus mehreren örtlich verschiedenen Messungen ermittelte Abstand zwischen dem Bezugsprofil des Werkstückes und der den arithmetischen Mittenrauhwert kennzeichnenden Ebene a in Abb. 19. Mittels eines Mikrotastsystems werden hierzu 5 Radialschnitte je Gleitbahn aufgezeichnet. Die im Einzelfall von dem Bezugsprofil (über die ursprüngliche Hüllfläche) und der aufgezeichneten Kurve begrenzte Fläche wird mit Hilfe eines Planimeters erfasst. Die Division des Flächeninhaltes durch die Gleitflächenbreite B ergibt das Mass E_m . Bei reinen Aufrauungen oder Glättungen der Oberflächen von $\leq 1 \mu\text{m}$ erfolgt die Messwertangabe als Oberflächenrauigkeit R_t gemeinsam mit dem arithmetischen Mittenrauhwert.

In vielen Fällen gewährt die fotografische Wiedergabe charakteristischer Werkstückoberflächen in geeigneter Vergrößerung einen weitgehenden Einblick in das Verhalten eines Werkstoffes unter den gegebenen Belastungsarten.

4.3 Verschleissrate

Das durch Abrieb entfernte Materialvolumen wird für jeden Gleitpartner aus seiner Gestaltsänderung rechnerisch ermittelt. Es wird auf Belastung und Gleitweg bezogen [$\text{cm}^3/\text{kp-cm}$].

4.4 Natrium-Temperatur im Testbehälter

Die Temperatur im Testbehälter wird mittels Thermoelement erfasst und mit dem Sollwert automatisch verglichen.

4.5 Oxidgehalt des Natriums

Die Reinheit des Natriums wird während des Versuchsablaufes durch ein Pluggingmeter gemessen.

Die Kühlfalltemperatur beträgt etwa 125 - 130 °C.

5. Übersicht und Diskussion der Versuchsergebnisse

Nach technologischen Gesichtspunkten unterscheiden sich die untersuchten Werkstoffkombinationen in drei Hauptgruppen:

- Unbeschichtete Strukturwerkstoffe mit ebensolchen Gleitpartnern;
- Schweissauftragslegierungen mit unbeschichteten Strukturwerkstoffen;
- Schweissauftragslegierungen mit Hartwerkstoffen.

Hieraus ergeben sich die in Tab. 2 zusammengestellten Versuchspaarungen.

Es wurden 40 Einzelversuche nach der in Tab. 3 dargestellten Reihenfolge durchgeführt. 26 Versuche mit einem konstanten Gleitweg von $11 \cdot 10^3$ m und einer spezifischen Belastung von 12 kp/cm^2 dienten der Ermittlung des jeweils optimalen Gleitpartners für die potentiellen Strukturwerkstoffe 1.4961, 1.4981 bzw. Inconel 718.

An weiteren Werkstoffpaarungen aus Schweissauftragslegierungen gegen Hartwerkstoffe wurde das Gleit- und Verschleissverhalten zunächst unter diesen Standardbedingungen untersucht.

Mit den Kombinationen Stellite 6H - Inconel 718, Colmonoy 6 - Inconel 718 und Stellite 1 - 1.4961 wurden in insgesamt 14 Parameterversuchen Gleitweg und Belastung variiert.

Die quantitativen Versuchsergebnisse sind in Tab. 4 bis 7 zusammengefasst, und in Abb. 4 - 13 graphisch wiedergegeben. Die vertikalen Balken symbolisieren die Probekörper. Im ersten, mit x bezeichneten Feld sind sie in ihrem Ausgangszustand dargestellt. Die durch Verschleisswirkung hervorgerufene Längenänderung der zylindrischen Stempel bzw. die Eindringtiefe derselben in die Ringscheibe ist von der die ursprüngliche Gleitebene andeutenden, mit 0 gekennzeichneten Mittellinie nach oben und unten sinngemäss wiedergegeben. Unterbrochene, über die Mittellinie nach unten weitergeführte Balken deuten eine Materialübertragung aus dem Gegenwerkstoff an.

5.1 Unbeschichtete Strukturwerkstoffe gegen gleiche Gleitpartner

Das relativ ungünstige Gleit- und Verschleissverhalten austenitischer Stähle ist aus der Praxis hinreichend bekannt. Mit derartigen Werkstoffkombinationen wurden daher nur wenige Versuche durchgeführt. Sie ermöglichen die Einordnung der Ergebnisse in eine Reihenfolge und den Vergleich mit den Inconel 718-Untersuchungen (Abb. 4).

Abb. 14 a, b zeigt die starke Zerstörung der Ringscheibenoberflächen sowohl bei 1.4961 wie bei 1.4981 mit örtlichen Einsenkungen bis 250 µm. Umfangreiche Verformungen der zugehörigen zylindrischen Proben (Abb. 15a, b) im Hergang mit häufiger

Werkstoffübertragung zwischen den beiden Gleitpartnern kennzeichnen die insgesamt unbefriedigende Verschleissresistenz.

Bei beiden Werkstoffpaarungen beträgt die Gewichtsänderung der Ringscheibe ein Vielfaches von derjenigen an den zylindrischen Proben, was dem Grössenverhältnis der sich gegenüberstehenden Gleitflächen widerspricht. Offensichtlich ist hierfür die Geometrie der Probekörper wesentlich verantwortlich. Weitaus resistenter gegen Verschleisswirkung in der Gruppe der Strukturwerkstoffe erwies sich die Nickelbasislegierung Inconel 718. Im Gegensatz zu den Stählen zeigen sich an den Inconel-Proben keine Werkstoffübertragungen. Die Oberflächen erscheinen leicht riffelig bei relativ geringem Gesamtabrieb. (Abb. 16a, b).

5.2 Schweissauftrags-Legierungen gegen unbeschichtete Strukturwerkstoffe

In 10 Variationen wurden Aufschweislegierungen gegen die beiden austenitischen Stähle 1.4961 und 1.4981 sowie gegen die Nickelbasislegierung Inconel 718 eingesetzt.

Die Stahl-Probekörper (Abb. 5), hier in allen vergleichbaren Fällen als Ringscheibe ausgebildet, zeigen gegen alle Gleitpartner eine ähnlich hohe Verschleisswirkung wie gegen unbeschichtete, gleichartige Probekörper (Abb. 4). Sehr beständig zeigten sich demgegenüber die zylindrischen Probekörper aus den diversen Aufschweissmaterialien. In Einzelfällen kam es bei diesen zu geringen Abriebeffekten, die meist von starken austenitischen Materialtransplantationen

überlagert waren. Den geringsten Verschleisswiderstand, allerdings auch die geringste Neigung zu Kaltverschweissung mit dem austenitischen Stahl, wies hier Stellite 6H auf. Abb. 17 ermöglicht den Vergleich der Gleitflächen von

- a) Stellite 6H-Proben nach vorwiegend abrasivem Verschleiss gegen 1.4981 (ohne Aufschweissung aus dem Gegenwerkstoff) mit
- b) Stellite 1-Proben, bei denen Materialübertragungen aus 1.4961 erkennbar sind.

Bei den Kombinationen der Aufschweislegierungen mit Inconel 718 (Abb. 6) ist eine sehr gute Verschleissresistenz der Nickelbasislegierung festzustellen. Materialübertragungen infolge Kaltverschweissung (Fressen) konnten bei diesen Paarungen nicht nachgewiesen werden. Selbst Akrit Fe Cr 50, das gegen Ferro-TiC [1] eine erhebliche Kaltschweisstendenz zeigte, erwies gegen Inconel 718 ein günstigeres Gleitverhalten.

In weiteren Versuchen wurden für die Werkstoffpaarungen Colmonoy 6 gegen unbeschichtete Strukturwerkstoffe, die Geometrie der Probekörper vertauscht. Dabei bewegten sich einmal zylindrische Proben aus Colmonoy 6 gegen Ringscheiben aus den drei Strukturwerkstoffen (Abb. 7a) und im anderen Falle Stahl- bzw. Inconel-Probekörper auf Colmonoy-Ringscheiben (Abb. 7b).

Die unter diesen verschiedenen Probenanordnungen erzielten Ergebnisse lassen insgesamt eine sehr ähnliche Tendenz erkennen. Die Verschleissresistenz von Inconel 718 ist auch gegen Colmonoy 6 deutlich höher

als diejenige der austenitischen Stähle. In einem Fall konnten partielle Colmonoy-Aufschweissungen in einer Stärke von 50 - 60 μm auf den Inconel-Proben festgestellt werden (Abb. 18).

Eine gewisse Einschränkung in der Vergleichbarkeit der Ergebnisse ist dadurch gegeben, dass die zylindrischen Colmonoy-Proben aus Gussmaterial im Anlieferungszustand gedreht wurden, während das für die Beschichtung der Ringscheiben verwendete Colmonoy durch den Schweissprozess möglicherweise eine Gefügeveränderung erfuhr, die sich geringfügig auf das Verschleissverhalten auswirken könnte.

Die zuletzt beschriebenen Versuche mit den Werkstoffpaarungen Colmonoy 6 gegen Strukturwerkstoffe wurden bei einer spezifischen Belastung von 6 kp/cm^2 durchgeführt. Eine Erhöhung der Flächenpressung auf 12 kp/cm^2 erbrachte in weiteren Versuchen die in Abb. 8a aufgetragenen Resultate. Auffällig erscheint hier die starke Aufschweissung von 1.4981 auf den Colmonoy 6-Stempeln.

Die Kombination Colmonoy 6 mit Inconel 718 zeigt unter dieser erhöhten Flächenpressung keine Materialübertragungen. (Im Vergleich zur gleichen Paarung unter 6 kp/cm^2 .) Offensichtlich ist die Stabilität der Kaltschweissverbindungen hier gerade so gross, dass die auf das Inconel aufgeschmierte Colmonoy-Schicht nur unter geringerer Reibbelastung festhält, jedoch schon bei 12 kp/cm^2 wieder abgetragen wird.

5.3 Schweissauftrags-Legierungen gegen Hartwerkstoffe

In der laufenden Versuchsreihe wurden auch die Aufschweisswerkstoffe Stellite 1 und Colmonoy 6 gegen das Hartmetall 1 untersucht. (Zum Vergleich ist in Abb. 8b das Versuchsergebnis der Kombination Stellite 6H - Ferro-TiC-U aus [1] aufgetragen.) An beiden Kombinationen waren nur geringe Gestaltsänderungen infolge Verschleisswirkung festzustellen. Die durch die Stellite 1-Proben erzeugten Gleitbahnen auf der Hartmetall-Ringscheibe sind relativ uneinheitlich mit einer Rauhtiefe zwischen 0,8 und 1,0 μm .

Für die Paarung Colmonoy 6 gegen Hartmetall 1 wurde eine Ringscheibe verwendet, deren Oberflächenrauigkeit vor dem Versuchslauf $R_t = 0,8 - 1 \mu\text{m}$ betrug.

Etwa 6 Stunden nach Versuchsbeginn machte sich in der Teststrecke ein hochfrequentes Rattern bemerkbar, was auf einen erheblichen Anstieg des Reibungswertes infolge einer starken Aufrauhung der Oberfläche hinwies. Dieser Vorgang verstärkte sich weiterhin, so dass in der 22. Stunde eine kurzzeitige Abschaltung zur Überprüfung der Versuchsanlage erforderlich wurde. Bei der späteren Vermessung der Probekörper zeigte sich jedoch, dass die zylindrischen Colmonoy-Proben auf der Ringscheibe spiegelartig geglättete Laufspuren hinterliessen, für die eine Rauhtiefe zwischen 0,18 und 0,15 μm nachgewiesen werden konnte. Diese Grössen liegen im Grenzbereich der Messgenauigkeit des verwendeten Oberflächentastsystems. Der Unterschied zwischen den geglätteten Gleitbahnoberflächen und der ursprünglich mit ca. 1 μm gemessenen Ringscheibenfläche ist in Abb. 21 gut erkennbar. (Links der Gleitbahnrand mit den Mikroerhebungen $\leq 1 \mu\text{m}$.)

Der mit $0,015 \mu\text{m}$ festgestellte, arithmetische Mittenrauhwert (CLA) deutet auf eine hohe Ebenmässigkeit der Oberflächen hin, die nach dem Diagramm in Abb. 20 zu urteilen, durch Einknetung von Colmonoy in die mikroskopisch feinen Poren in der Hartmetalloberfläche entstanden.

Hierfür spricht auch der in Abb. 22 wiedergegebene, örtliche Auftrag einer sehr dünnen Colmonoyschicht auf dem Hartmetall, die im zugehörigen Oberflächen-diagramm nicht mehr als Unebenheit erfasst werden konnte.

Das mit einer derartig hohen Oberflächenqualität einhergehende schlechte Gleitverhalten dieser Werkstoffkombination hat seine Ursache im Fehlen einer ausreichenden Zahl von Mikroerhebungen an den Berührungsflächen, zwischen denen sich separierendes Natrium einlagern kann. Barrau [6] nennt hierfür einen kritischen, arithmetischen Mittenrauhwert (CLA) von $0,30 \text{ microinches}$ ($0,075 \mu\text{m}$), was den im vorliegenden Fall ermittelten Daten durchaus entspricht.

5.4 Parameteruntersuchungen

Bei den Vorauswahlversuchen unter den vorliegenden Standardbedingungen (spez. Belastung 12 kp/cm^2 , Gleitweg $11 \cdot 10^3 \text{ m}$) erwiesen alle Werkstoffpaarungen mit austenitischen Stählen ein ungenügendes Verschleissverhalten. Es erschien daher interessant, zunächst an einer Kombination aus einem dieser Stähle mit einer Schweissauftragslegierung weitere Versuche unter stufenweiser Verringerung der Belastung durchzuführen. Mit der Paarung Stellite 1 gegen 1.4961 wurden in den Versuchen 26, 27 und 31 die in Abb. 9 aufgezeichneten Ergebnisse erzielt. Hierbei zeigte

sich, dass bereits bei einer Flächenpressung von 9 kp/cm^2 kein Materialtransport mehr stattfand und die mittlere Eindringtiefe der Gleitbahnen auf der Austenitscheibe sich von $250 \mu\text{m}$ auf ca. $95 \mu\text{m}$ verringerte. Bei mässigem, abrasivem Verschleiss an den Stellite 1-Proben war jedoch die Eindringtiefe auf der Ringscheibe aus 1.4961 auch bei einer Belastung von nur 3 kp/cm^2 noch unbefriedigend hoch.

Die Kombination des Strukturwerkstoffes Inconel 718 mit der Aufschweislegierung Stellite 6H bewies dagegen bei den Vorversuchen ein sehr positives Gleit- und Verschleissverhalten.

Hier konnte daher in weiterführenden Versuchen die Belastung auf 18 bzw. 24 kp/cm^2 erhöht werden. Je zwei Versuche wurden bei sonst gleichen Parametern unter Vertauschung der Probengeometrie durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abb. 10 und 11 wiedergegeben. Ein Vergleich dieser beiden Diagramme zeigt, dass der Verschleissprozess im wesentlichen, unabhängig von der Probengeometrie, auf Kosten des Stellite 6H-Partners verläuft. Eine Proportionalität der Verschleissrate zur Belastung ist nur bei den Inconel 718-Stempeln erkennbar.

Im Hinblick auf den späteren Einsatz der untersuchten Werkstoffe erscheint auch der Einfluss der Zeit bzw. des Gleitweges auf die Verschleissrate von wesentlicher Bedeutung. Mit der bereits unter Variation der Belastung untersuchten Materialpaarung Stellite 6H gegen Inconel 781 wurden daher weitere Versuche mit $22 \cdot 10^3$ bzw. $33 \cdot 10^3$ m Gleitweg durchgeführt. Zur Berücksichtigung des Geometrieinflusses wurden auch hier, bei je zwei Versuchen unter sonst gleichen Betriebsbedingungen die Probekörper vertauscht.

Zunächst ist für die Paarung Stellite 6H-Stempel gegen Inconel 718-Ringscheibe festzustellen, dass ein dreimal grösserer Gleitweg eine Verschleissrate in der gleichen Grössenordnung bewirkt, wie eine Verdoppelung der Flächenpressung (Vergl. Abb. 10 und 13). Die Vertauschung der Proben-Geometrie bewirkt auch unter dem Einfluss des Gleitweges eine wesentliche Verlagerung des Volumenverschleisses auf den Stellite 6H-Partner.

6. Zusammenfassung

Aus den vorliegenden Versuchsergebnissen können drei, auf grössere Werkstoffgruppen bezogene Rangfolgen gebildet werden.

6.1 Unbeschichtete Strukturwerkstoffe gegen gleiche Gleitpartner

In dieser Gruppe ist die Verschleissresistenz der beiden austenitischen Stähle 1.4961 und 1.4981 unbefriedigend. Die ihnen eigene, hohe Neigung zu Kaltverschweissung und Verformung lässt sie in unbeschichtetem Zustand innerhalb der vorliegenden Problemstellung weitgehend ungeeignet erscheinen. Erheblich günstiger liegen die Ergebnisse für Inconel 718.

6.2 Schweissauftrags-Legierungen gegen unbeschichtete Strukturwerkstoffe

Die Panzerung nur eines Gleitpartners bringt im Betrieb gegen einen unbeschichteten Strukturwerkstoff keine nennenswerten Vorteile.

In nahezu allen Versuchen, an welchen die austenitischen Stähle beteiligt waren, kam es zu beachtlichen Materialtransplantationen. Eine durch Verschleiss auftretende Wandstärkenschwächung oder Toleranzvergrösserung vollzieht sich bei derartigen Werkstoffpaarungen nahezu vollständig auf Kosten des weicheren unbeschichteten Gegenwerkstoffes.

Inconel 718 besitzt gegen die untersuchten Beschichtungswerkstoffe einen erheblich höheren Verschleisswiderstand als die austenitischen Stähle. Vor allem aber finden sich bei den Kombinationen mit dieser Nickelbasislegierung unter den hier angewandten, spezifischen Flächenpressungen nahezu keine Anzeichen für Kaltverschweissung. Diese Feststellung ist besonders für Regelstabsysteme mit unterschiedlich langen Verweilzeiten von Bedeutung.

Insgesamt konnte die Aufgabe der Ermittlung eines optimalen Gleitpartners für Strukturwerkstoffe für Inconel 718 im Bereich der 6 untersuchten Aufschweislegierungen gelöst werden.

6.3 Schweissauftrags-Legierungen gegen Hartwerkstoffe

Die gewonnenen Versuchsergebnisse verdeutlichen eine sehr hohe Verschleissresistenz dieser besonders als Lagerwerkstoffe geeigneten Materialpaarungen. Diese positive Aussage wird für die Paarung Colmonoy 6 - Hartmetall 1 dadurch gemindert, dass eine über den grössten Teil des Versuchszeitraumes festzustellende "raue Gangart" im Betriebsfall möglicherweise zu einer Quelle schädlicher Vibrationen werden kann [7].

6.4 Parameteruntersuchungen

Die durchgeführten Versuche unter Variation der spezifischen Belastung liessen erkennen, dass die austenitischen Stähle, sowohl gegen gleichartige wie auch gegen gepanzerte Gleitpartner bei Flächenpressungen bis etwa 9 kp/cm^2 einem mässigen bis starken abrasiven Verschleiss unterliegen. Höhere Belastungen - 12 kp/cm^2 - bewirken bereits starke Kaltschweisseffekte (Fressen) und Verformungen.

Die Paarung der Nickelbasislegierung Inconel 718 gegen Stellite 6H zeigte sowohl unter Variation der Belastung als auch des Gleitweges eine relativ geringe Verschleissrate auf der Inconelseite. Auch bei Vertauschung der Probengeometrie war die Verschleisswirkung an den Stellite 6H-Proben um ein Mehrfaches höher als an den Inconel-Partnern.

Bis zu der untersuchten spezifischen Belastung von 24 kp/cm^2 ergaben sich noch keine Symptome für Kaltverschweissung. Eine Verdoppelung der Flächenpressung bewirkte die gleiche absolute Erhöhung der Verschleissrate an den Inconel-Stempeln wie die Erhöhung des Gleitweges von $11 \cdot 10^3 \text{ m}$ auf $33 \cdot 10^3 \text{ m}$. Eine exakte Linearität zwischen dem Parameter Gleitweg und dem Abrieb konnte nur bedingt nachgewiesen werden. Der in Abb. 12 aufgetragene Wert für die Längenänderung der Stellite 6H-Proben bei $33 \cdot 10^3 \text{ m}$ stellt das Mittel aus drei weit streuenden Einzelergebnissen dar.

7. Schlussfolgerung

Mit den vorliegenden Versuchsergebnissen konnten weitere Erkenntnisse über das Verschleissverhalten verschiedener Werkstoffpaarungen in flüssigem Natrium gewonnen werden. In wesentlichen, mit den Arbeiten am SNR-Projekt eng verknüpften Fragen sind weitere Versuche erforderlich. Die Suche nach geeigneten Gleitpartnern für die austenitischen Stähle muss weitergeführt werden. Das zu untersuchende Werkstoffsortiment wird durch Nimonic 80/90, Inconel 750, SV = RGT 12 und 12 R 72 HV (Sandvik 15/15) erweitert.

Der bisher nur wenig berücksichtigte Einfluss von Probekörpergeometrie und Bewegungsart wird im weiteren Arbeitsprogramm einen breiteren Raum einnehmen.

Ferner ist im Rahmen der Parameteruntersuchungen, besonders bei Werkstoffkombinationen mit Hartmetallen, eine wesentliche Erhöhung von Belastung und Gleitweg vorgesehen. Zur Absicherung der Ergebnisse scheint es des weiteren unerlässlich, alle Versuche mindestens dreimal unter möglichst genau gleichen Bedingungen durchzuführen. Eine gute Möglichkeit hierzu bietet eine neue Versuchsanlage mit vier Teststrecken, die simultan aus dem gleichen Reinigungs- und Erhitzerkreislauf versorgt werden.

8. Literaturverzeichnis

- [1] E. Wild, K. Mack, H. Hoffmann:
Das Verschleissverhalten von Stählen und
Legierungen in flüssigem Natrium
KFK-Bericht Nr. 973, EUR 4174d, April 1969
- [2] E. Wild:
Experimentelle Untersuchung des Verschleiss-
verhaltens verschiedener Werkstoffpaarungen
in Natrium
Reaktortagung 1970 des Deutschen Atomforums,
Berlin; Sektion 2
- [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
- [4] F.P. Bowden, D. Tabor:
Reibung und Schmierung fester Körper
Springer-Verlag 1959
- [5] Ernest Rabinowicz:
Friction and Wear of Materials
John Wiley Inc. New York 1966
- [6] P. Barrau, I.P. Fontaine, B. Morin:
Friction and wear in liquid metals
DRP/Sentr./Cad., 68 R. 574 - PB/IPF/BM.CC
Classement 2291.13
- [7] P.H. Delves, W. Rodwell:
Mechanisms in Sodium-Symposium Monaco 3.1970
I.A.E.A. S.M. 130/14

Verzeichnis der Tabellen und Abbildungen

- Tab. 1: Legierungsbestandteile der untersuchten Werkstoffe
- Tab. 2: Untersuchte Werkstoffkombinationen
- Tab. 3: Übersichtsdarstellung der Versuchsreihen
- Tab. 4-7: Versuchsergebnisse
-
- Abb. 1: Na-Verschleissprüfstand I
- Abb. 2: Teststrecke für oszillierende Bewegung
- Abb. 3: Anordnung der Werkstoffproben
- Abb. 4 - 13: Graphische Darstellung der Versuchsergebnisse
- Abb. 14 - 20: Charakteristische Erscheinungsformen des Oberflächenverschleisses
- Abb. 21 u. 22: Gleitbahnoberflächen auf Hartmetall 1

QUESTION 1

1.1.1. The following table shows the number of people who visited the museum in each month from January to December. The total number of people who visited the museum in each month is given in the second column.

Month	Number of people
January	120
February	150
March	180
April	200
May	220
June	250
July	280
August	300
September	280
October	250
November	220
December	180

1.1.2. The following table shows the number of people who visited the museum in each month from January to December. The total number of people who visited the museum in each month is given in the second column.

Month	Number of people
January	120
February	150
March	180
April	200
May	220
June	250
July	280
August	300
September	280
October	250
November	220
December	180

1.1.3. The following table shows the number of people who visited the museum in each month from January to December. The total number of people who visited the museum in each month is given in the second column.

Month	Number of people
January	120
February	150
March	180
April	200
May	220
June	250
July	280
August	300
September	280
October	250
November	220
December	180

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	B	Nb	W	V	Fe	Ti	TiC	Co	WC	
1. 4961	0.08	0.4	1.25	0.008	0.013	16.0		13.0			>10x%C			Rest			0.015		
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					
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				
Stellit 6H	1.0					27.0						4.5						Rest	
Stellit 1	2.5					30.0						12						Rest	
Colmonoy 5						13.5		76		3		Fe + Si + C 9% max							
Colmonoy 6						16.5		70		3.75		Fe + Si + C 10% max							
Colmonoy 56						10		78		2.5		Rest Fe Si C Mn V Mo							
Hartmetall 1												WC Ni							
Tantal	unlegiert																		
Legierungsbestandteile der untersuchten Werkstoffe																	Tab. 1		

Unbeschichtete Strukturwerkstoffe gegen gleiche Gleitpartner





Zyl. Probenkörper	Ringscheibe
1.4961	1.4961
1.4981	1.4981
Inconel 718	Inconel 718

Schweißauftragslegierungen gegen unbeschichtete Strukturwerkstoffe

Zyl. Probenkörper	Ringscheibe
Colmonoy 5	1.4981
Colmonoy 6	1.4981
Colmonoy 56	1.4981
Stellit 61	1.4961
Colmonoy 6	Inconel 718
Colmonoy 56	"
Fe Cr 50	"
Stellit 6H	"
Tantal (Sonderwerkstoff)	Inconel 718

Schweißauftragslegierungen gegen Hartwerkstoffe







Zyl. Probenkörper	Ring scheinbe
Stellit 1	Hartmetall 1
Colmonoy 6	Hartmetall 1

Versuch Nr.:	Werkstoffpaarungen		Gleitweg [x 10 ³ m]	Spez. Belastung [kp/cm ²]	Δl [μm]	R _f vorVersuch	E m * nach Versuch	Verschleißrate [cm ³ /cm-kp]	
									
1	Colmonoy 5	1. 4981	11	6	+149 / +170 / +186	~ 1	~ 300	5.53 · 10 ⁻¹⁰	18.4 · 10 ⁻⁹
2	Colmonoy 5	1. 4981	11	12	- 19 / - 26 / - 31	1.1	~ 300	4.67 · 10 ⁻¹¹	92.5 · 10 ⁻¹⁰
3	Colmonoy 6	Inconel 718	11	12	- 7 / - 33 / - 5	1.2	12.5 / 9.6 / 10	0.82 · 10 ⁻¹¹	3.3 · 10 ⁻¹⁰
4	Colmonoy 6	1. 4981	11	12	+ 40 / + 15 / + 38	1.6	300 / 250 / 290		86.4 · 10 ⁻¹⁰
5	Colmonoy 56	1. 4981	11	12	+ 5 / + 7 / - 12	1	255 / 260 / 257		79.5 · 10 ⁻¹⁰
6	Colmonoy 56	1. 4981	11	12	- 19 / + 16 / - 21		180 / 210 / 200		60.7 · 10 ⁻¹⁰
7	Tantal	Inconel 718	11	12	- 2.5 / + 0.3 / - 3	0.6	4 / 13 / 5		2.2 · 10 ⁻¹⁰
8	Colmonoy 56	Inconel 718	11	12	- 22 / - 36 / - 26	0.8	~ 12	4.47 · 10 ⁻¹¹	3.7 · 10 ⁻¹⁰
9	Stellit 6H	1. 4981	11	12	- 8.5 / - 4 / - 14.8	1.3	260 / 273 / 258	1.46 · 10 ⁻¹¹	81.3 · 10 ⁻¹⁰
10	Colmonoy 6	1. 4981	11	6	- 3 / - 1.5 / - 2	0.8	190 / 230 / 215	6.8 · 10 ⁻¹²	13.0 · 10 ⁻⁹
11	Colmonoy 6	Inconel 718	22	12	+ 13 / - 8 / - 14	~ 1	5 / 4 / 4.5		6.93 · 10 ⁻¹¹
12	Fe Cr 50	Inconel 718	11	12	- 4 / - 2 / - 6	0.75	~ 25	6.37 · 10 ⁻¹²	7.73 · 10 ⁻¹⁰

* E m = Mittlere Eindringtiefe (Abb.: 19)

Ergebnisse aus Verschleißuntersuchungen in Natrium bei 600° C

Tab. 4





Versuch Nr.:	Werkstoffpaarungen		Gleitweg [x 10 ³ m]	Spez. Belastung [kp/cm ²]	Δl [μm]	R _t vorVersuch	E _m * \odot		Verschleißrate [cm ³ / cm-kp]	
							nach Versuch	  		
13	Fe Cr 50	Inconel 718	11	12	- 20 /- 28 /- 22	1.2	~ 52		3.75 · 10 ⁻¹¹	16.1 · 10 ⁻¹⁰
14	1.4981	Colmonoy 6	11	12	- 80 /-120 /-100	0.8	7 / 5 / 8		15.9 · 10 ⁻¹¹	2.06 · 10 ⁻¹⁰
15	1.4961	Colmonoy 6	11	6	- 250 /-275 /-210	1.2	5 / 5.5 / 6		78.5 · 10 ⁻¹¹	3.4 · 10 ⁻¹⁰
16	Inconel 718	Colmonoy 6	11	6	~ + 58 part.	1	4 / 2 / 7			1.33 · 10 ⁻¹⁰
17	1.4981	Colmonoy 6	11	6	- 70 /- 80 /- 60	1.2	6 / 3 / 4.5		22.4 · 10 ⁻¹¹	2.78 · 10 ⁻¹⁰
18	Colmonoy 6	1.4981	11	6	- 2 /- 3 /- 3	1	68 / 80 / 80		8.5 · 10 ⁻¹²	4.7 · 10 ⁻⁹
19	Colmonoy 6	1.4961	11	6	- 8 /- 9 /- 7	0.8	18 / 25 / 19		2.56 · 10 ⁻¹¹	1.28 · 10 ⁻⁹
20	Colmonoy 6	Inconel 718	11	6	- 2.5 /- 2 /- 3	1	5.8 / 4.5 / 5		8.03 · 10 ⁻¹²	3.14 · 10 ⁻¹⁰
21	1.4981	Colmonoy 6	11	6	± 0 /-120 /- 30	1.3	4 / 6 / 5.5			3.23 · 10 ⁻¹⁰
22	Stellit 1	Hartmetall 1	11	12	- 1.5 /± 0 /- 1	1.2	0.8 - 1	**		
23	Stellit 1	1.4961	11	12	+ 72 /+ 98 /+112	1.2	~ 250			77.3 · 10 ⁻¹⁰
24	1.4961	1.4961	11	12	+145 /-150 /-133	0.8	250 / 210 / 218			70.0 · 10 ⁻¹⁰

* E_m = Mittlere Eindringtiefe (Abb.: 19)

**Rauhtiefe R_t

Ergebnisse aus Verschleißuntersuchungen in Natrium bei 600° C

Tab. 5







Versuch Nr.:	Werkstoffpaarungen		Gleitweg [x 10 ³ m]	Spez. Belastung [kp/cm ²]	Δl [μ m]	R _t vorVersuch	E _m nach Versuch	Verschleißrate [cm ³ /cm-kp]	
									
2 5	Colmonoy 6	Hartmetall 1	1 1	1 2	- 4 /- 3 /- 8	0.9	0.15 / 0.18 / 0.15 ^{**}	0.8 · 10 ⁻¹¹	
2 6	Stellit 1	1.4961	1 1	9	- 5 /- 2 /- 2	1	7 2 / 7 0 / 9 6	0.6 37 · 10 ⁻¹¹	32.8 · 10 ⁻¹⁰
2 7	Stellit 1	1.4961	1 1	6	- 1 /- 1 /- 1	1.1	1 8 / 2 0 / 2 3	3.2 · 10 ⁻¹²	1.28 · 10 ⁻⁹
2 8	1.4981	1.4981	1 1	1 2	- 110 /- 9 5 /- 10 7	0.3	17 5 / 1 6 0 / 1 6 8	16.6 · 10 ⁻¹¹	51.7 · 10 ⁻¹⁰
2 9	Stellit 1	1.4961	1 1	9	± 0 /- 1 /+ 1	1.2	7 5 / 1 0 0 / 8 7		2 6.0 · 10 ⁻¹⁰
3 0	Stellit 1	1.4961	1 1	3	- 1 /- 4 /- 2.5	0.75	1 5 / 2 2 / 1 7	4.0 · 10 ⁻¹²	5.57 · 10 ⁻¹⁰
3 1	Stellit 6H	Inconel 718	1 1	1 2	- 2 2 /- 2 7 /- 1 8	0.5	1.6 2 / 4.6 / 2	3.5 8 · 10 ⁻¹¹	0.8 4 · 10 ⁻¹⁰
3 2	Stellit 6H	Inconel 718	2 2	1 2	- 1 2 1 /- 9 5 /- 8 6	0.4	7 / 1 3 / 5	5.6 · 10 ⁻¹¹	1.2 3 · 10 ⁻¹⁰
3 3	Stellit 6H	Inconel 718	3 3	1 2	- 1 2 5 /- 1 4 2 / 1 9 0	0.4	8 / 1 2 / 1 0	8.1 6 · 10 ⁻¹¹	1.0 3 · 10 ⁻¹⁰
3 4	Inconel 718	Stellit 6H	1 1	1 2	- 8 /- 6 /- 7	0.8	1 5 / 1 1 / 1 2	1.3 9 · 10 ⁻¹¹	3.9 1 · 10 ⁻¹⁰
3 5	Inconel 718	Stellit 6H	1 1	1 8	- 1 0.5 /- 1 1 /- 1 1	1.1	2 0 / 2 0 / 1 9	1.1 6 · 10 ⁻¹¹	4.0 5 · 10 ⁻¹⁰
3 6	Inconel 718	Stellit 6H	1 1	2 4	- 1 8 /- 1 9 /- 2 3	0.1	2 0 / 2 1 / 1 7	1.6 · 10 ⁻¹¹	3.0 · 10 ⁻¹⁰

* E_m = Mittlere Eindringtiefe (Abb.: 19)

** Rauhtiefe R_t

Ergebnisse aus Verschleißuntersuchungen in Natrium bei 600°C

Tab. 6

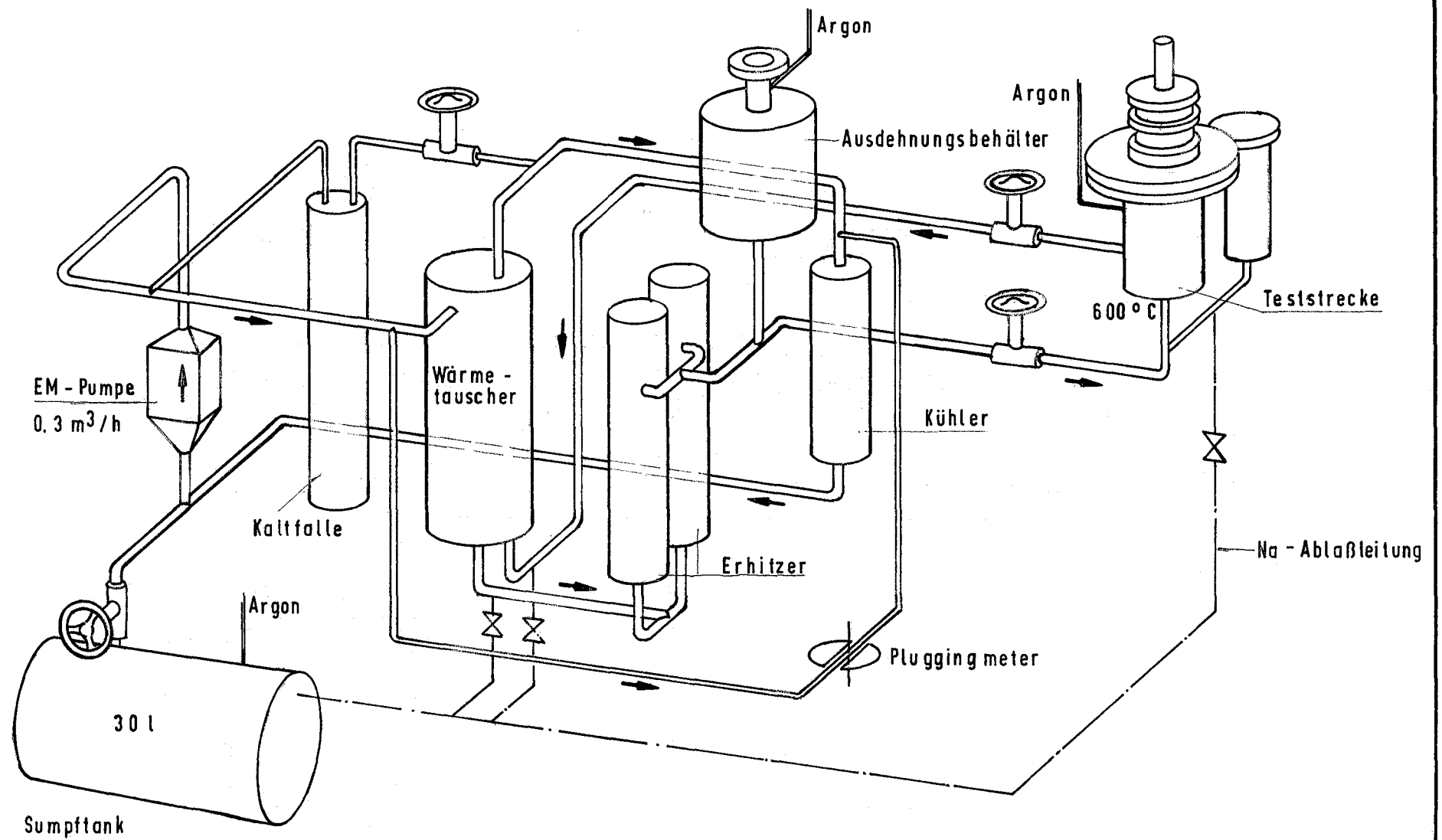
Versuch Nr.:	Werkstoffpaarungen		Gleitweg [x 10 ³ m]	Spez. Belastung [kp/cm ²]	Δl [μm]	R _t vorVersuch	E m * nach Versuch	Verschleißrate [cm ³ /cm - kp]			
											
37	Inconel 718	Stellite 6H	22	12	- 11 / - 13.5 / - 15.2	0.4	20.5 / 17 / 18	1.42 · 10 ⁻¹¹		2.83 · 10 ⁻¹⁰	
38	Inconel 718	Stellite 6H	33	12	- 20 / - 18 / - 23	0.8	20 / 29 / 31	1.07 · 10 ⁻¹¹		2.75 · 10 ⁻¹⁰	
39	Stellite 6H	Inconel 718	11	10	- 63 / - 59.5 / - 61	1.2	10.2 / 5.3 / 7.6	6.5 · 10 ⁻¹¹		1.57 · 10 ⁻¹⁰	
40	Stellite 6H	Inconel 718	11	24	- 68 / - 92 / - 80	1.3	9.5 / 11 / 10.5	6.45 · 10 ⁻¹¹		1.60 · 10 ⁻¹⁰	

Em = Mittlere Eindringtiefe (Abb.: 19)

Ergebnisse aus Verschleißuntersuchungen in Natrium bei 600° C

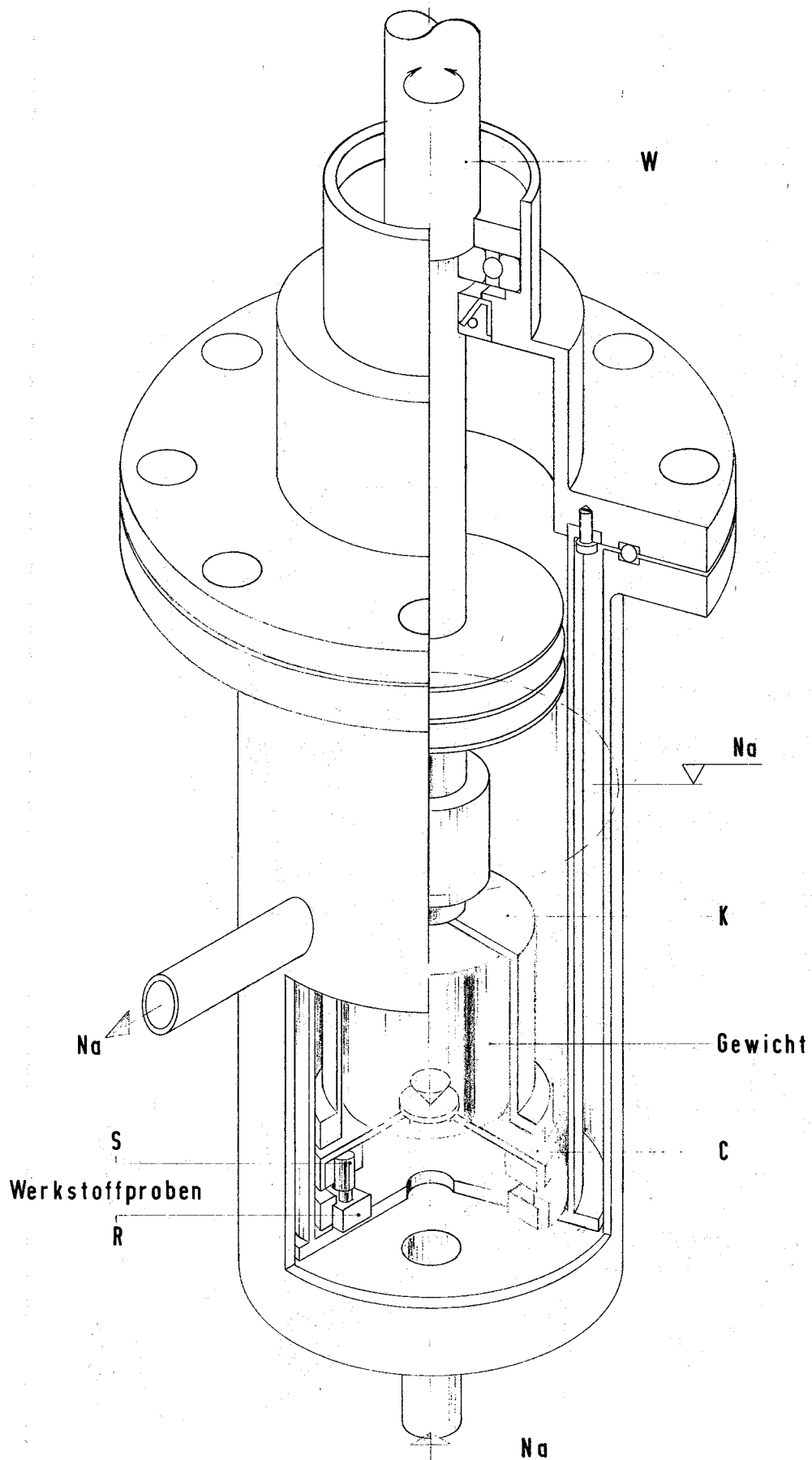
Tab. 7

[The page contains extremely faint and illegible text, likely bleed-through from the reverse side of the document. The text is arranged in several vertical columns and is too light to transcribe accurately.]



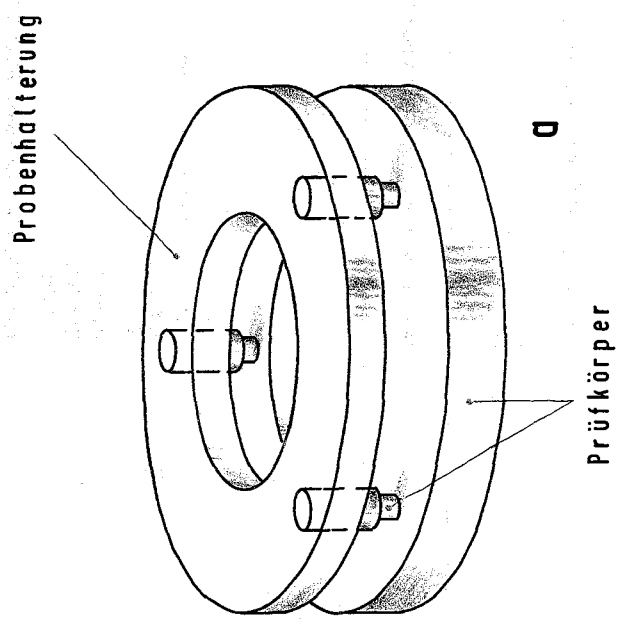
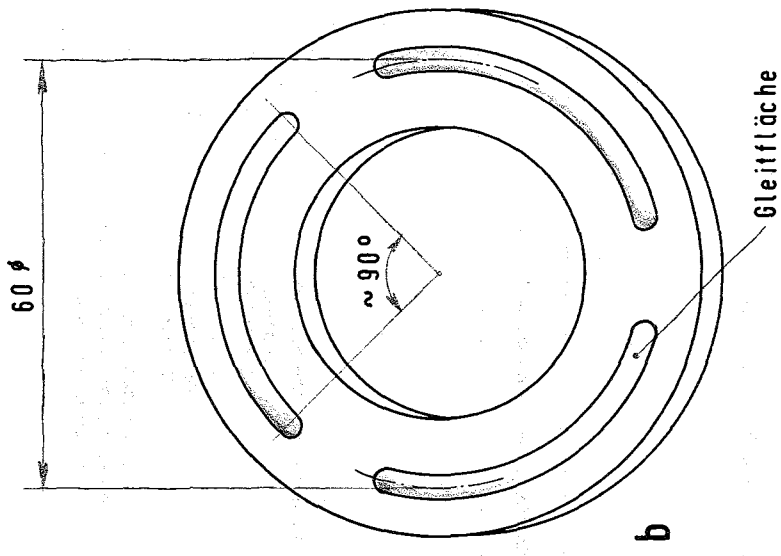
Na - Verschleißprüfstand I

Abb . 1



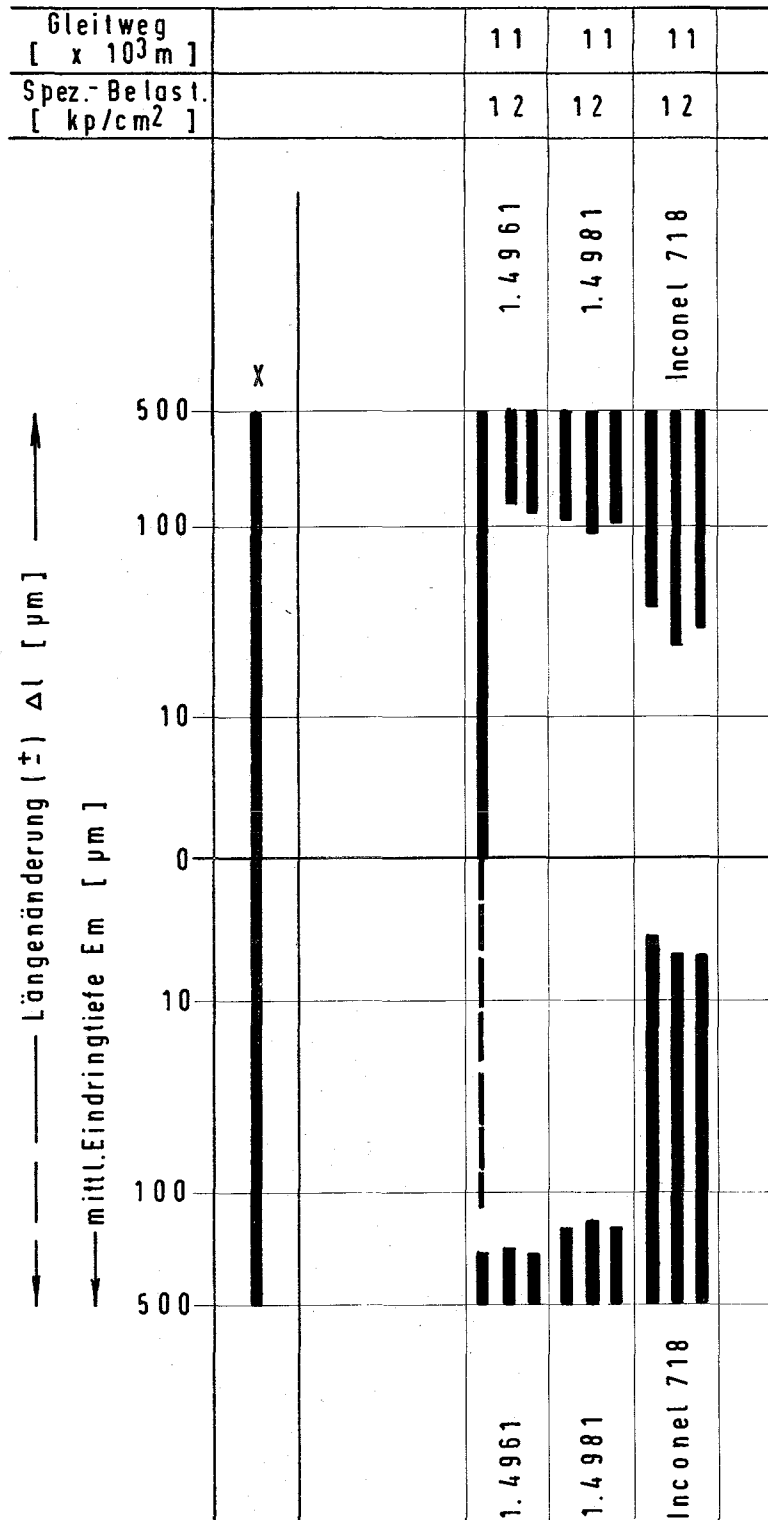
Teststrecke für oszillierende Bewegung

Abb. 2

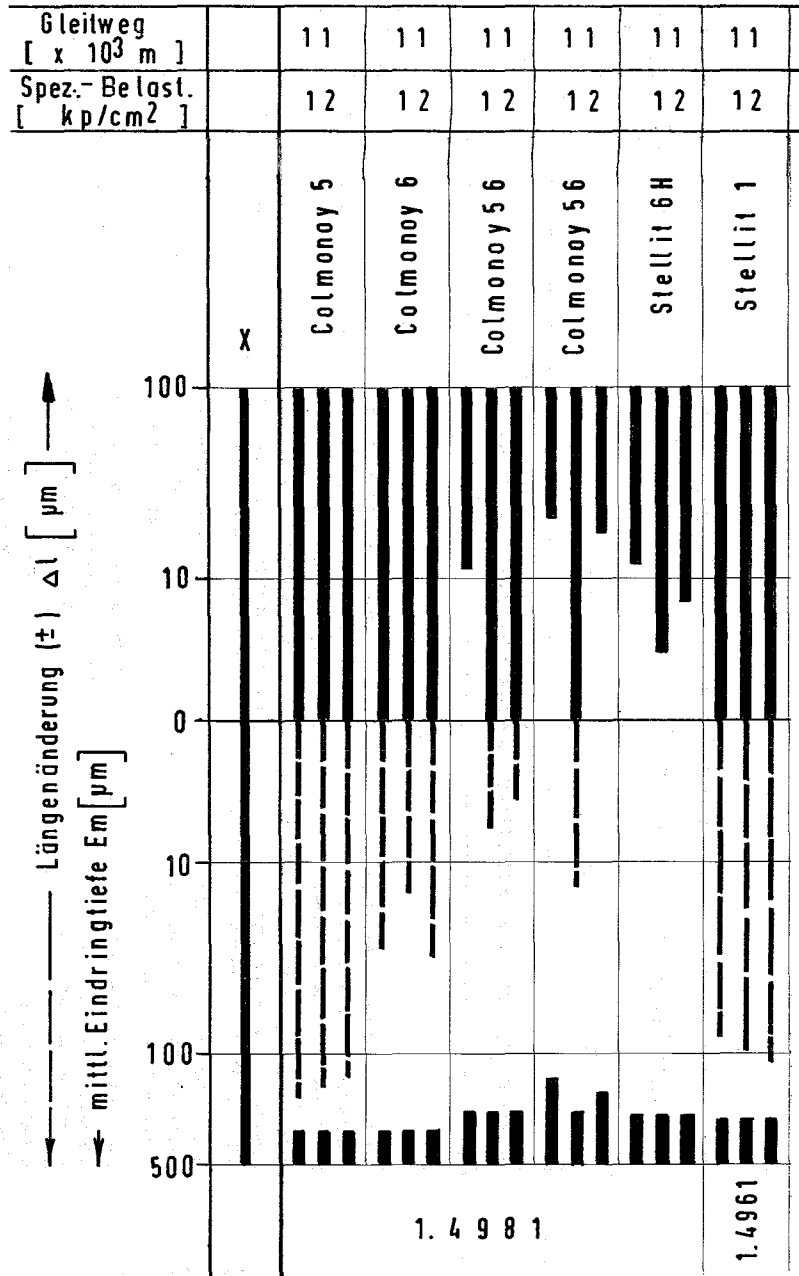


Anordnung der Werkstoffproben

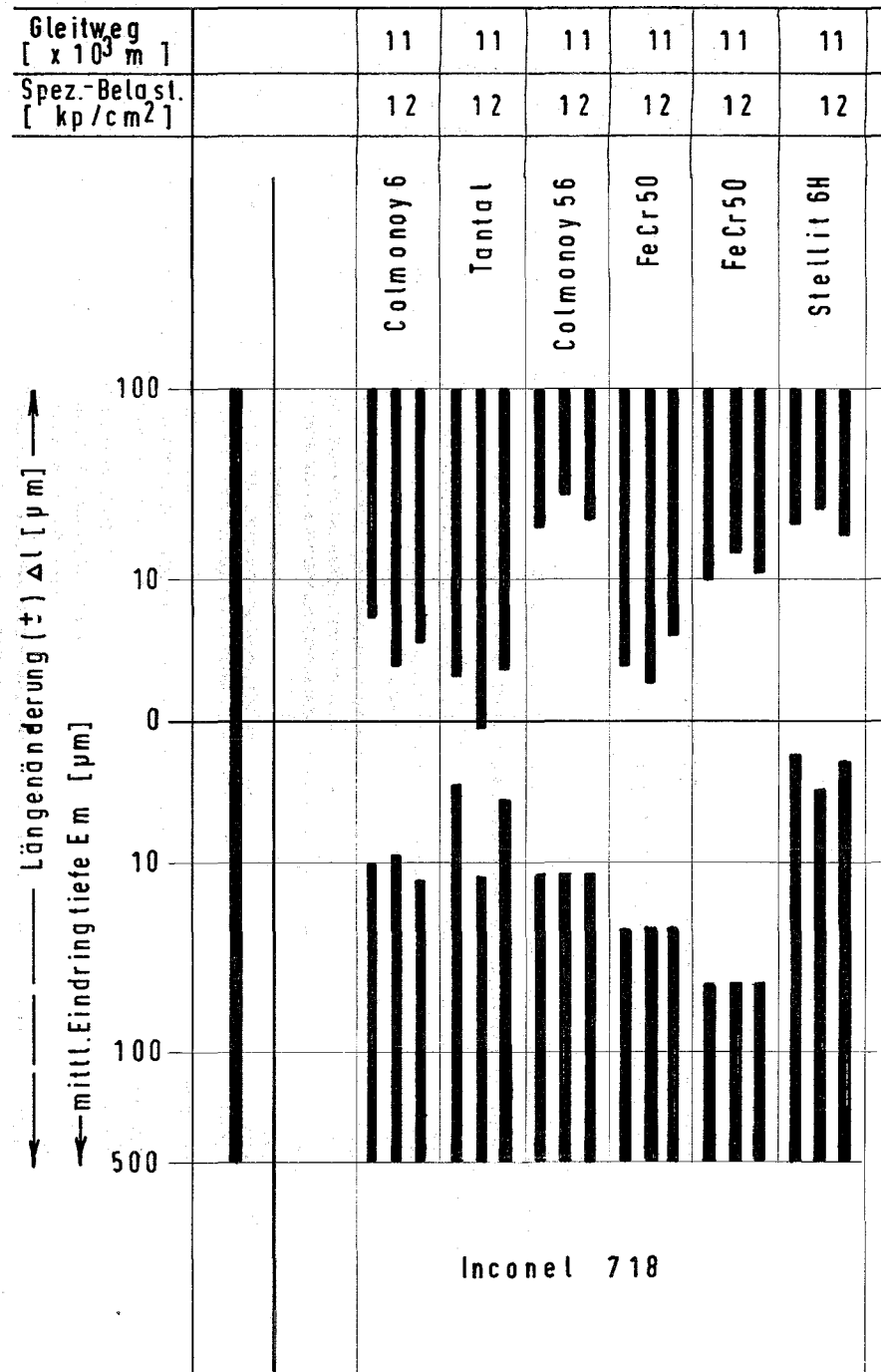
Abb. 3



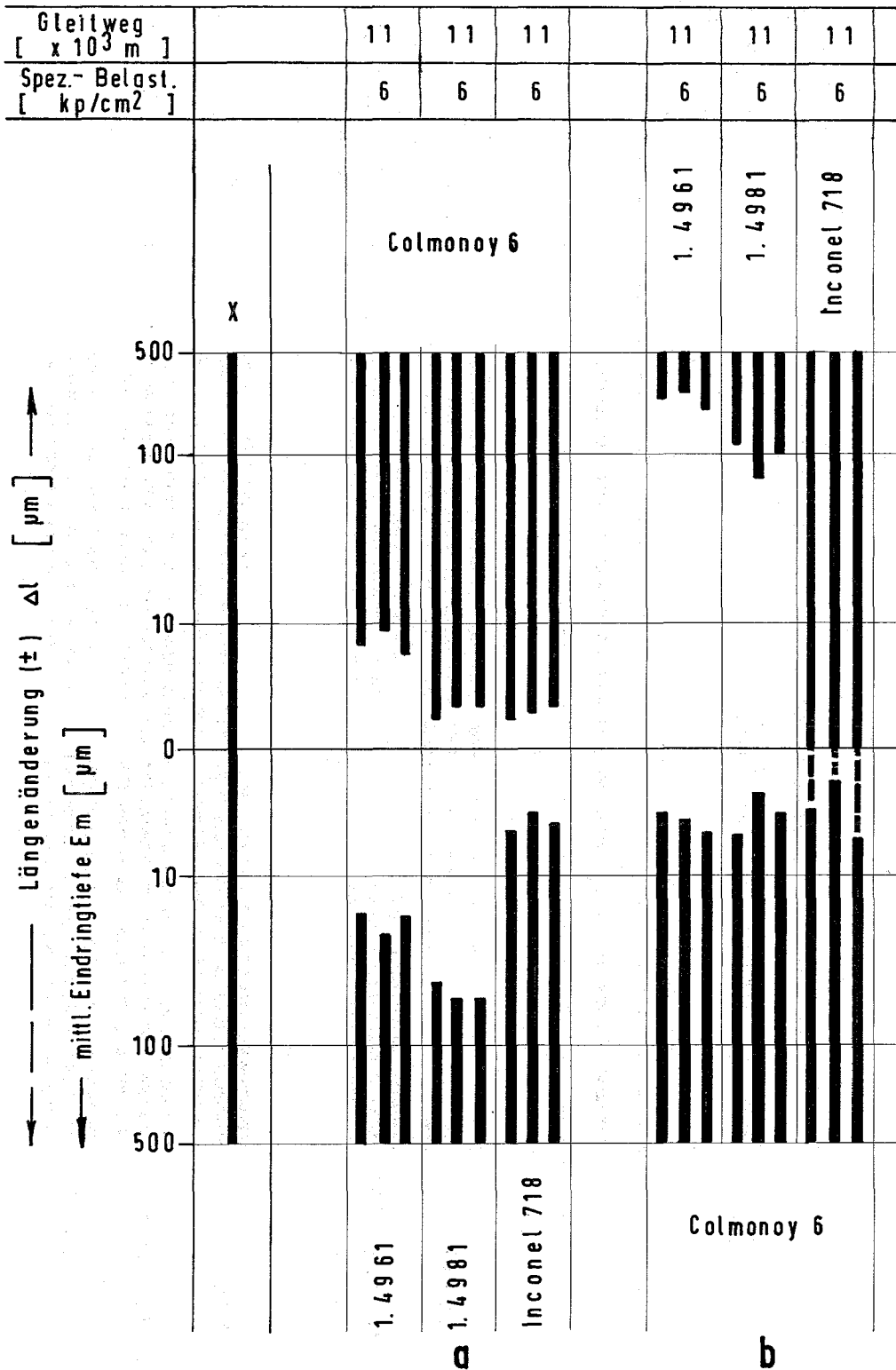
Das Verschleißverhalten als Funktion der Werkstoffpaarung



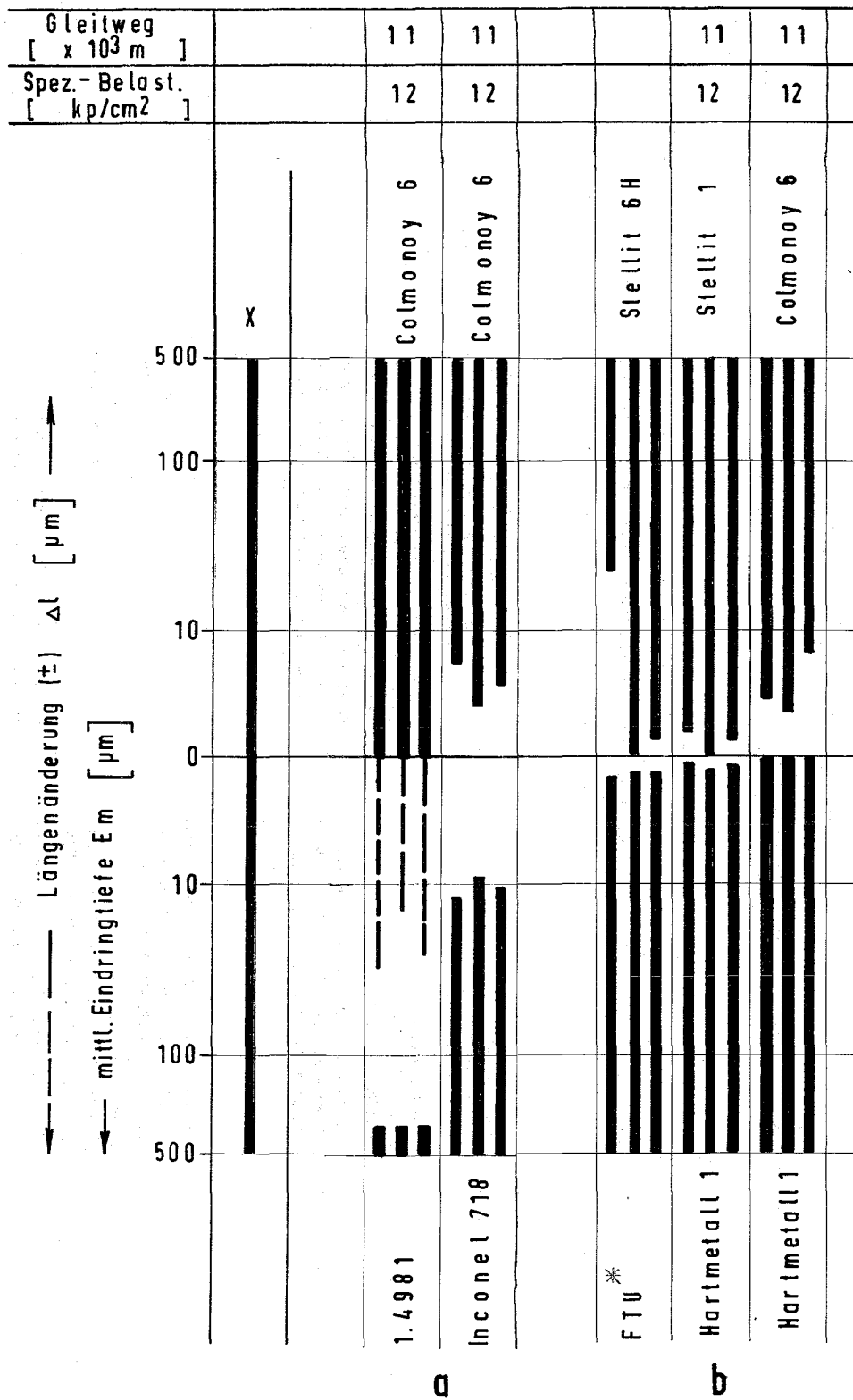
Das Verschleißverhalten als Funktion der Werkstoffpaarung



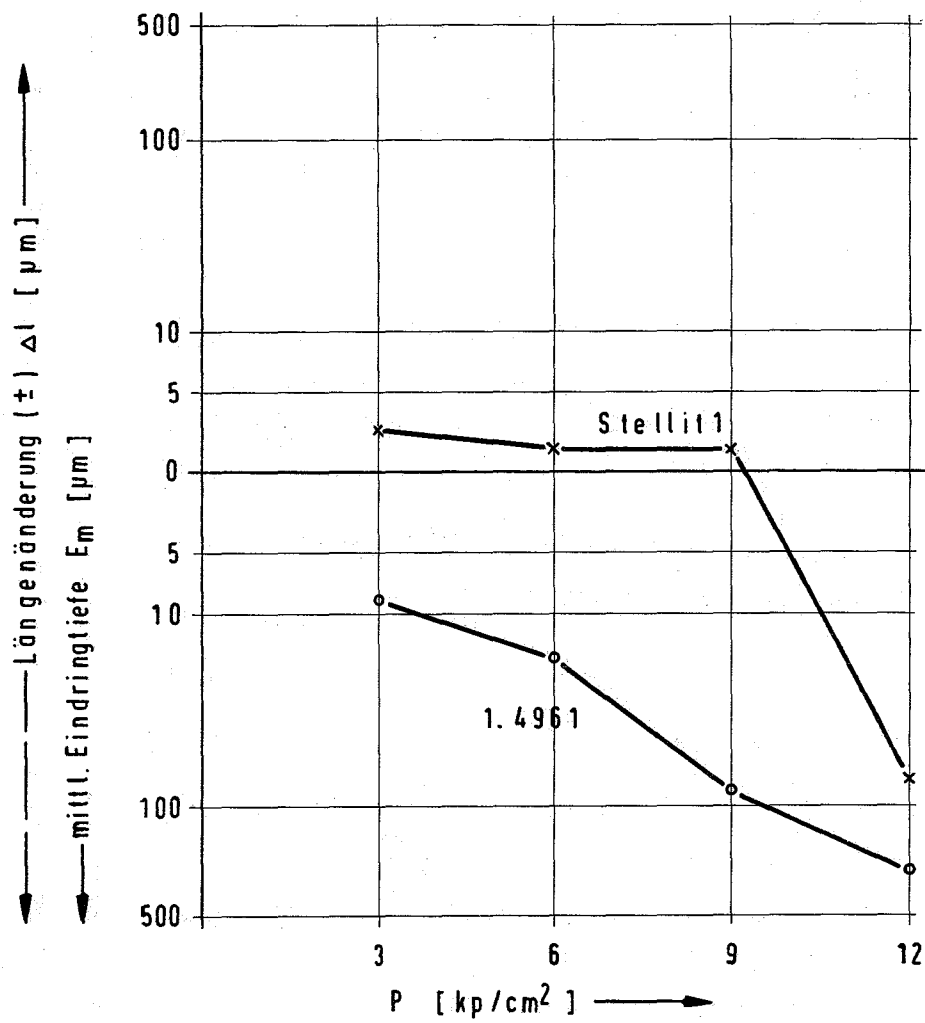
Das Verschleißverhalten als Funktion der Werkstoffpaarung



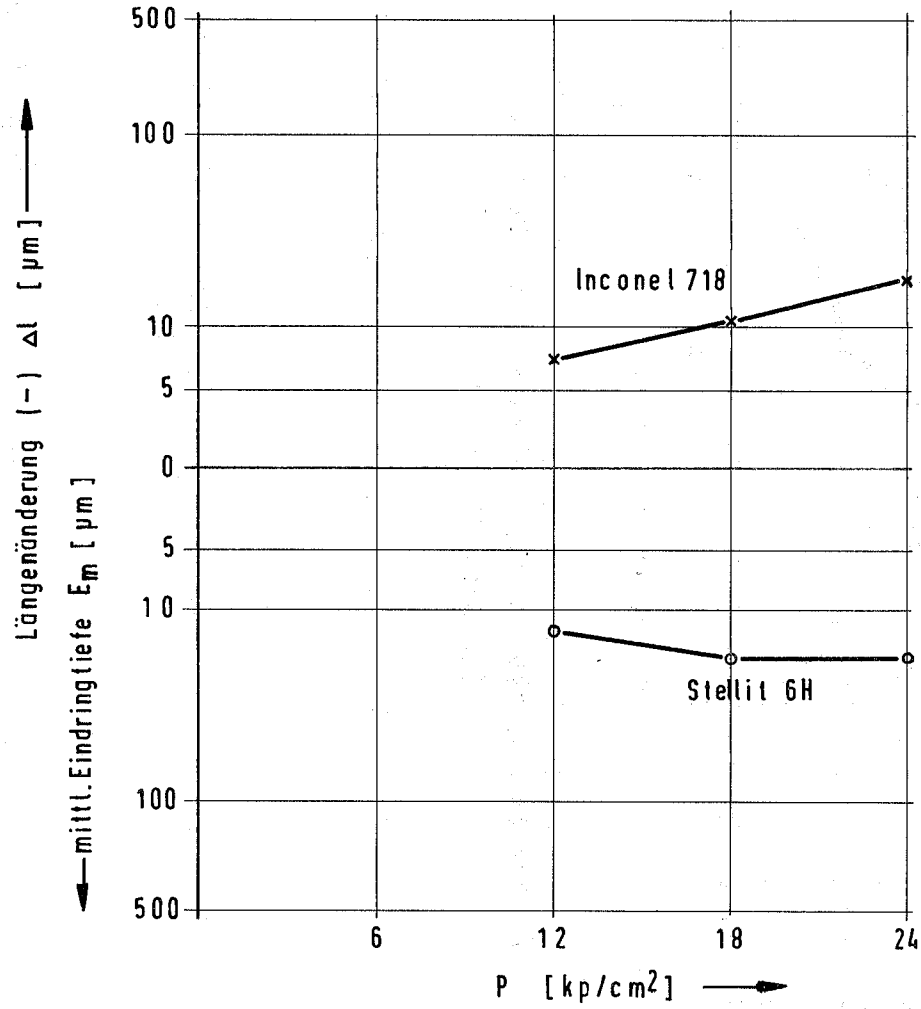
Das Verschleißverhalten als Funktion der Probengeometrie



Versuch aus [1] zum Vergleich
 Das Verschleißverhalten als Funktion der Werkstoffpaarung

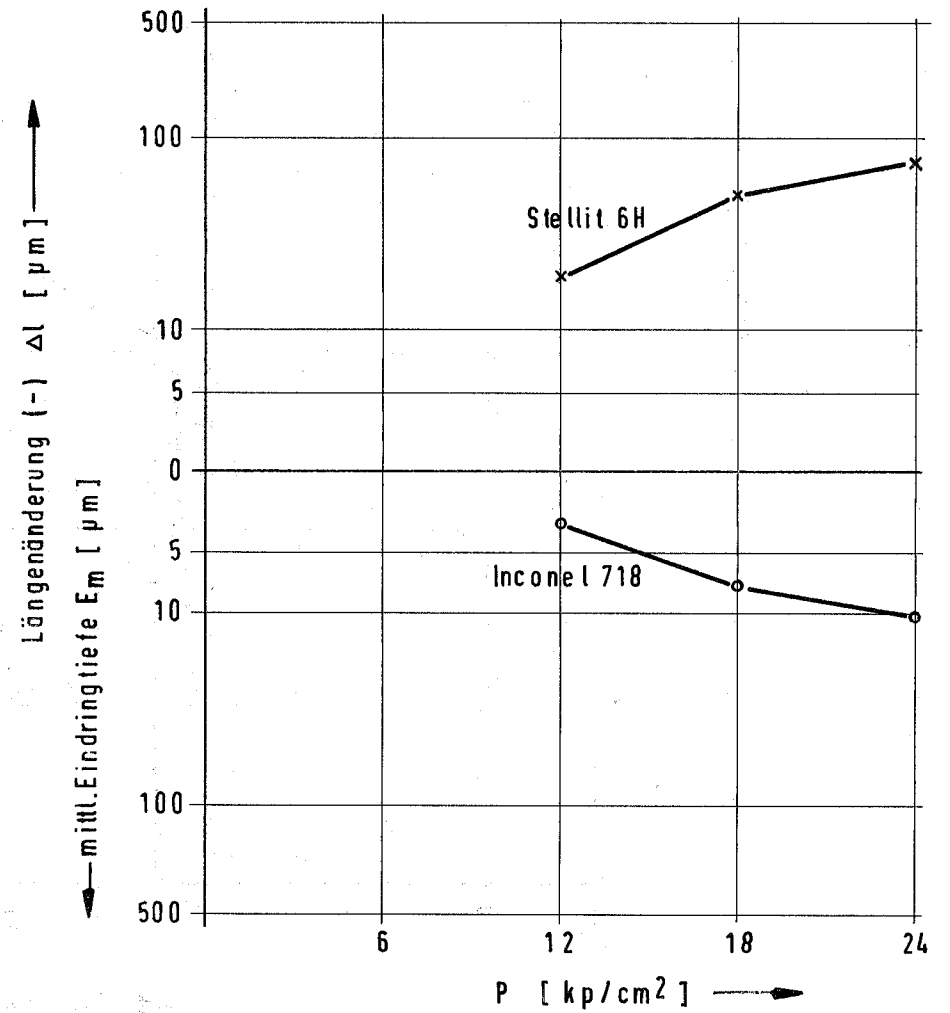


Das Verschleißverhalten als Funktion der spez. Belastung
(Gleitweg $11 \times 10^3 \text{ m}$)



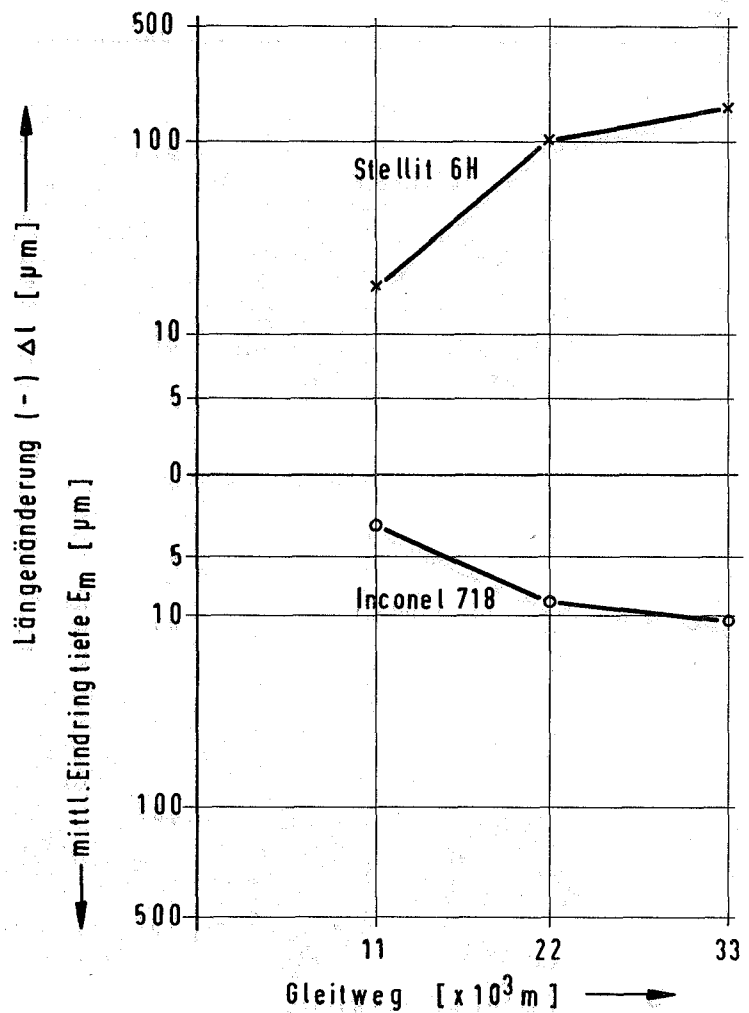
Das Verschleißverhalten als Funktion der Belastung
(Gleitweg $11 \times 10^3 \text{ m}$)

Abb. 10



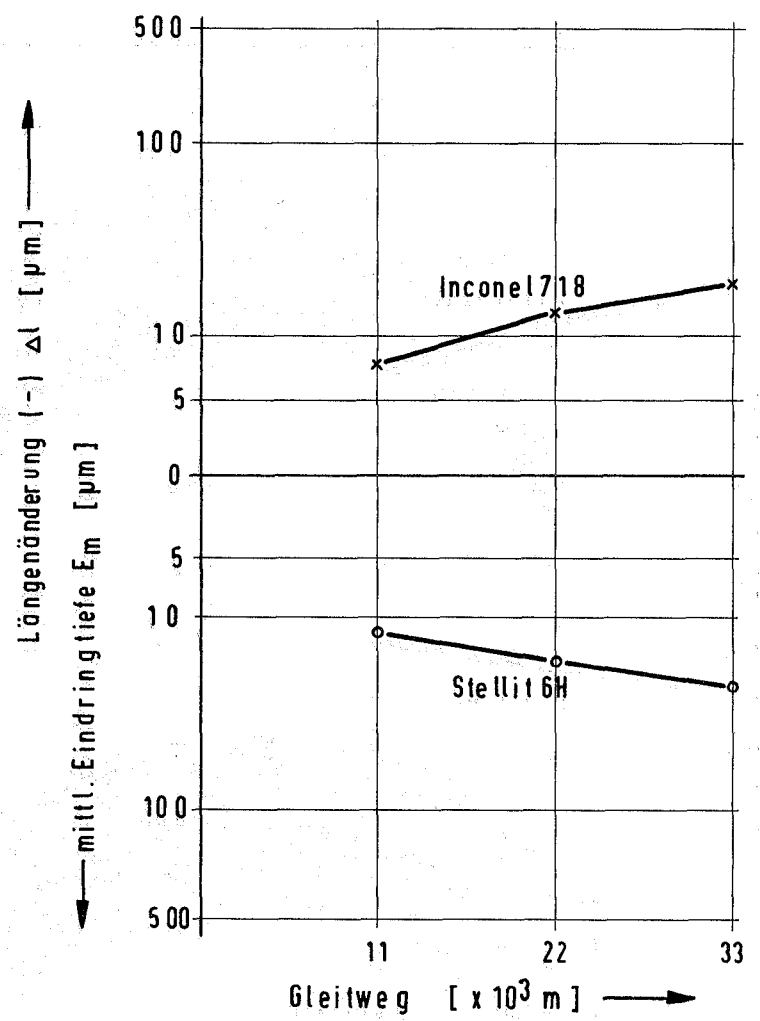
Das Verschleißverhalten als Funktion der Belastung
(Gleitweg $11 \times 10^3 \text{ m}$)

Abb. 11



Das Verschleißverhalten als Funktion des Gleitweges
(Spez.-Belastung 12 kp/cm^2)

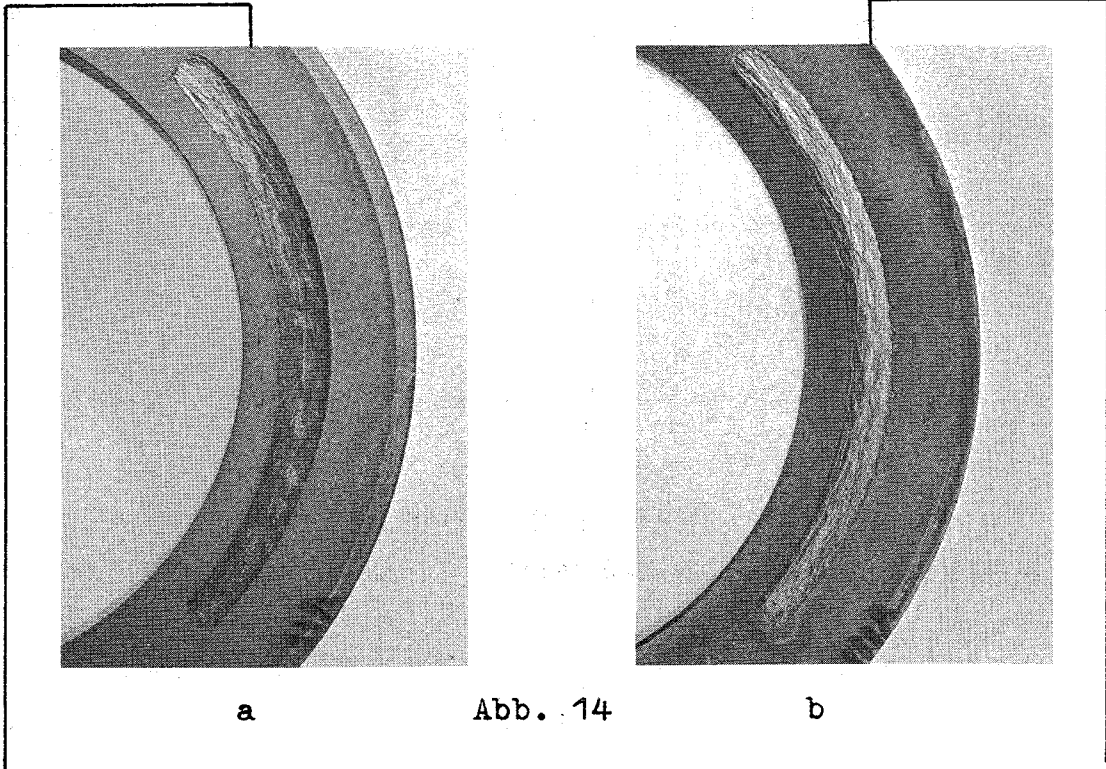
Abb. 12



Das Verschleißverhalten als Funktion des Gleitweges
(Spez.-Belastung 12 kp/cm^2)

Abb. 13

Unbeschichtete austenitische Stähle
gegen gleiche Gleitpartner



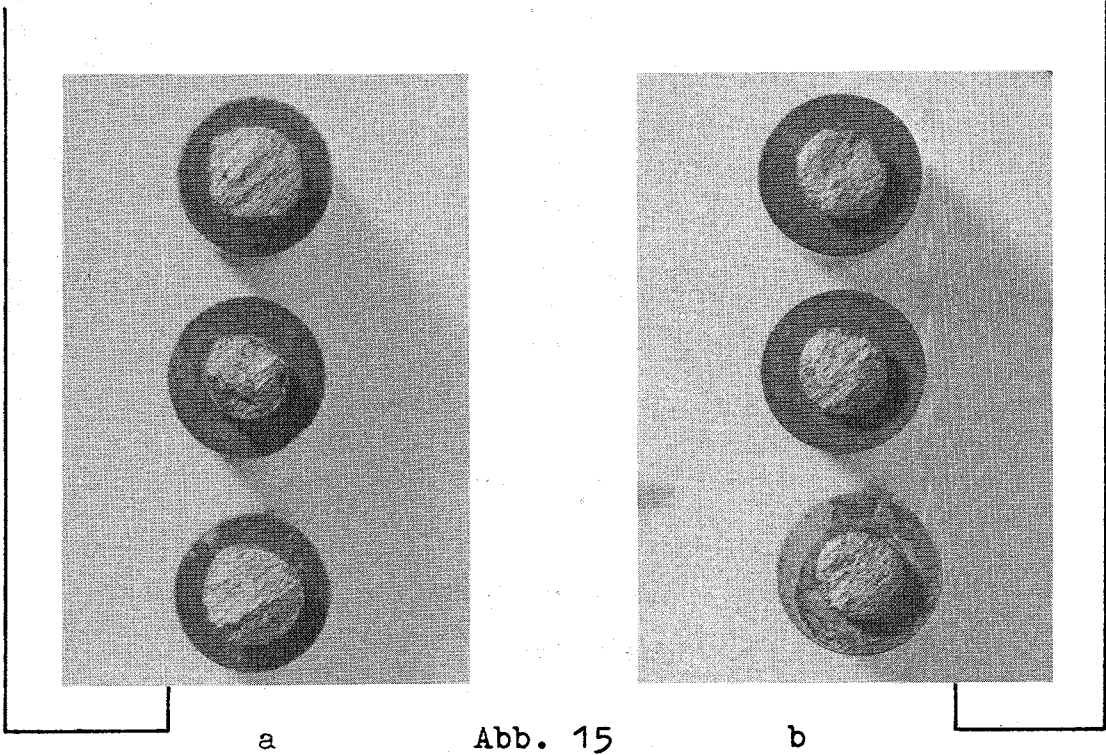
a

Abb. 14

b

1.4961

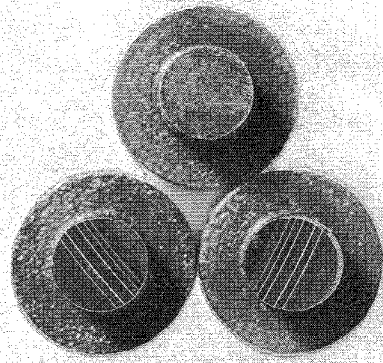
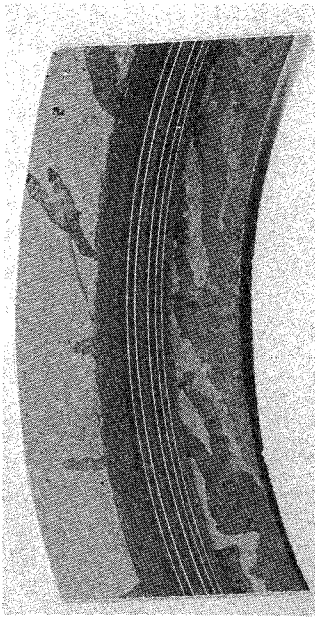
1.4981



a

Abb. 15

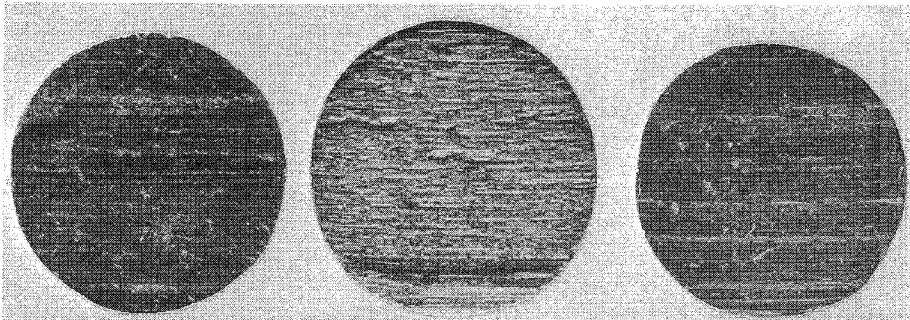
b



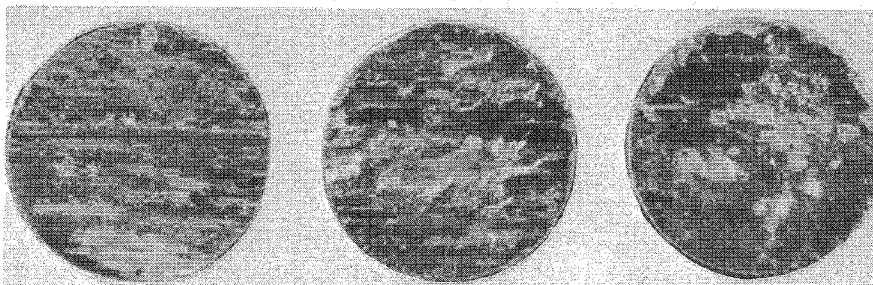
a

b

Abb. 16
Riefenbildung auf gleichen Gleit-
partnern aus Inconel 718



a Abrasiver Verschleiß von Stellite 6 H -Proben
auf 1.4981



b Stellite 1 - Proben mit starken Aufschweiß-
effekten aus 1.4961

Abb. 17

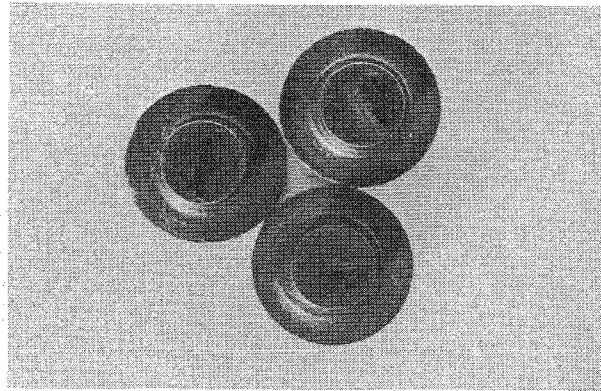


Abb. 18 Partielle Aufschweißungen aus Colmonoy 6 auf Inconel 718

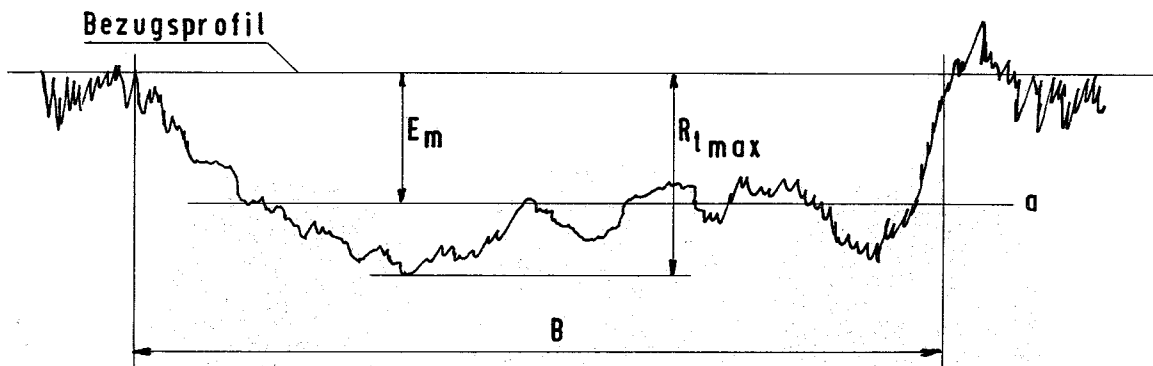


Abb. 19 Darstellung von Rauhtiefe R_t und mittlerer Eindringtiefe E_m

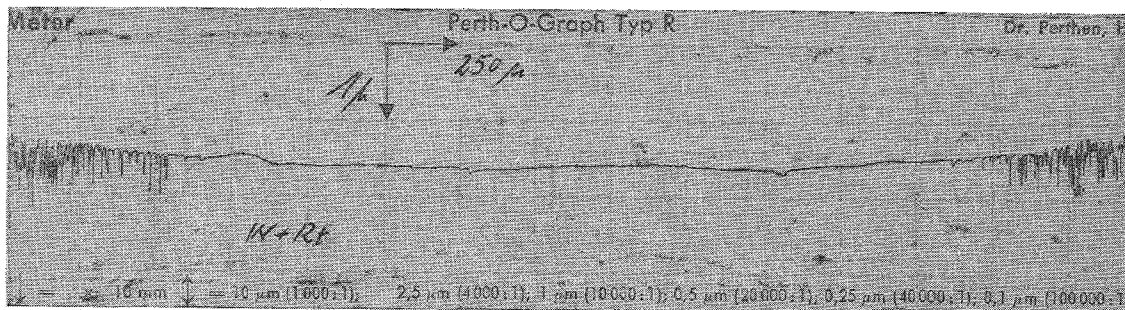
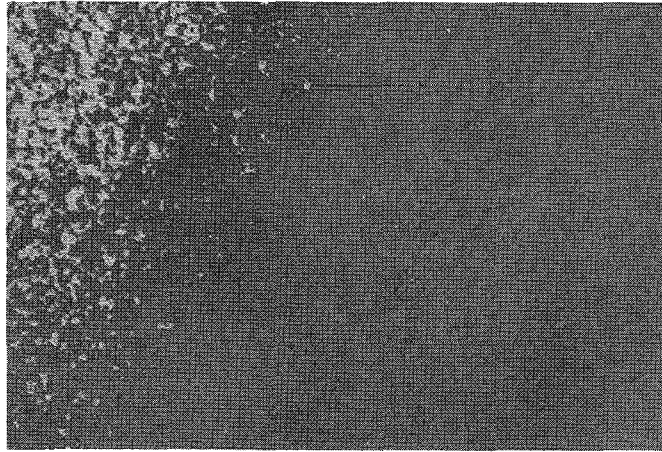


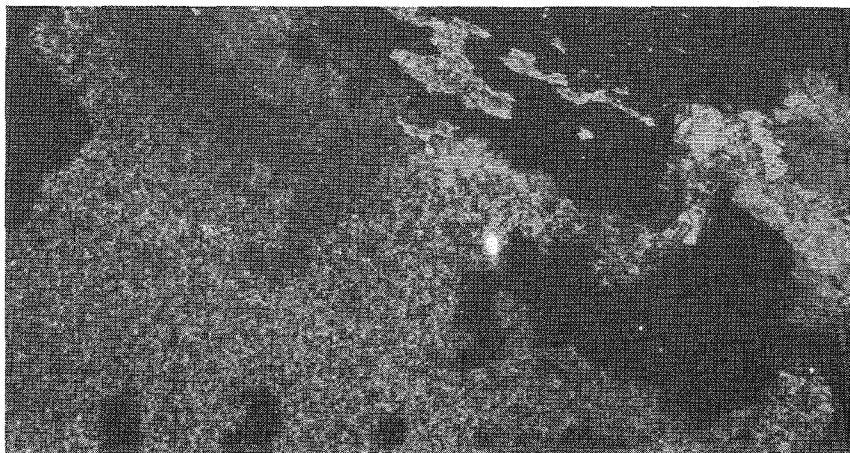
Abb. 20 Gleitbahnprofil auf Hartmetall 1

Vers. Nr. 25



x 125

Abb. 21 Gleitbahnrand auf Hartmetall 1



x 125

Abb. 22 Colmonoy 6-Auftrag auf Hartmetall 1

