

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

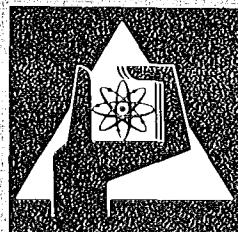
Juli 1975

KFK 2157

Institut für Reaktorentwicklung
Projekt Schneller Brüter

**Reibung und Verschleiß von Kugellagern in flüssigem Natrium
1. Teil: Vergleichsversuche zur Werkstoffauswahl**

K. Kleefeldt, G. Gering



**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 2157

INSTITUT FÜR REAKTORENTWICKLUNG

Projekt Schneller Brüter

Reibung und Verschleiß von Kugellagern
in flüssigem Natrium

1. Teil: Vergleichsversuche zur Werkstoffauswahl

K. Kleefeldt

G. Gering

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird über Versuche in Natrium mit Kugellagern aus fünf verschiedenen Werkstoffen berichtet, nämlich aus Werkzeugstahl (DMo5), Chromstahl (BG 42), Stellite, Ferro-Titanit (WF 13,5) und Hartmetall (GT 10/20). Im 1. Teil wurden jeweils vier Lager der Baureihe 6207 in vollkugeligter Ausführung aus jedem der genannten Werkstoffe denselben Versuchsbedingungen unterworfen, um den geeignetsten Werkstoff für weitere Versuche zu ermitteln. Die Standardbedingungen waren: Prüftemperatur 400 °C, Axialbelastung 300 kp, Drehzahl 200 min⁻¹, Prüfdauer 0,2 · 10⁶ Umdrehungen, Sauerstoffkonzentration < 10 - 20 ppm.

Die Versuchsauswertung in bezug auf Reibungsverhalten, Verschleißgewicht, makroskopische und mikroskopische Laufflächenveränderungen erbrachte folgende Ergebnisse:

- Das Reibmoment ist bis nahe 100 000 Umdr. für alle fünf Werkstoffe ähnlich. Es beträgt in dieser Phase für ein Lagerpaar ca. 8 bis 18 kpcm mit teilweise unregelmäßigen Schwankungen. Anschließend setzt - mit Ausnahme bei den Hartmetallagern - ein deutlicher Reibungsanstieg ein, der auf zunehmenden Verschleiß hindeutet.
- Das mittlere Verschleißgewicht pro Lager beträgt bei den Stahl- und Stellitesorten ca. 100 bis 670 mg, bei den Ferro-Titanitlagern 19 mg und bei den Hartmetallagern 2 mg, jeweils nach 0,2 · 10⁶ Umdrehungen. Die Streuung der Verschleißgewichte für Lager aus dem gleichen Werkstoff erstreckt sich über mehr als eine Zehnerpotenz.
- Das Laufflächenbild zeigt bei den Stahl- und Stelliteagern übermäßige Aufrauhungen. Nur bei den Hartmetallagern tritt eine Glättung ein.
- Richtwerte für die Lebensdauer der Kugellager unter diesen Prüfbedingungen werden wie folgt angegeben (in 10⁶ Umdr.): für Stahl und Stellite 0,1, für Ferro-Titanit 0,2 und für Hartmetall >> 0,2.
- Diese Versuche mit Kugellagern aus Werkzeugstahl (DMo5), Chromstahl (BG 42) und Stellite bestätigen die mit ähnlichen Werkstoffen erreichten Ergebnisse anderer Autoren. Die Hartmetallager heben sich von allen übrigen bisher getesteten Lagern deutlich ab und werden daher für weitere Parameteruntersuchungen vorgeschlagen.

Ferner wird im Bericht die Werkstoffauswahl begründet, wobei die Verfügbarkeit von Kugellagern aus den in Betracht gezogenen Werkstoffen und die Härte wichtige Gesichtspunkte waren. Die Verwendung von Hartmetall erforderte vom Kugellagerhersteller, Fa. SKF Schweinfurt, neuartige Fertigungstechniken.

FRICITION AND WEAR OF BALL BEARINGS
IN LIQUID SODIUM ENVIRONMENTPhase 1: Material Screening Tests

Summary

This report describes sodium experiments with ball bearings, fabricated out of five different materials, i.e tool steel (s-6-5-2), stainless high speed steel (BG 42), stellite, ferro-titanit (WF 13,5) and tungsten carbide/cobalt cermet (GT 10/20). With each material four cageless bearings of the type 6207 were tested in task 1 under the following test conditions, in order to determine the most promising material for further investigations: test temperature 400 °C, axial load 300 kp, speed 200 min⁻¹, total revolutions 0,2 · 10⁶, oxygen concentration < 10 - 20 ppm.

The following results with respect to friction behavior, weight loss, macroscopic and microscopic changes of the races were obtained:

- The friction torque is very similar for all five materials up to a number of revolutions of almost 0,1 · 10⁶. During this period it runs up to 8 - 18 kpcm for two bearings in duplex arrangement with irregular fluctuations. Above 0,1 · 10⁶ rev. friction increases significantly, indicating enhanced wear, except for the tungsten carbide.
- The average weight loss for one bearing amounts 100 to 670 mg for the steel and stellite alloys, 19 mg for ferro titanit and 2 mg for tungsten carbide after 0,2 · 10⁶ rev. The scattering of the results for the same material covers more than one order of magnitude.
- The ring races and balls of the steel and stellite bearings show excessive wear and roughness. Only the tungsten carbide bearings appear to be polished.
- The approximate values for bearing life under these test conditions are as follows (in 10⁶ revolutions): for steel and stellite 0,1, for ferro-titanit 0,2 and for tungsten carbide >> 0,2.
- The tests with ball bearings out of tool steel (s-6-5-2), stainless high speed steel and stellite prove the results obtained by other authors with similar materials. The wear resistance of the tungsten carbide bearings exceeds that of all the other bearings tested by a wide

margin. Tungsten carbide is therefore suggested for further parametric investigations.

In addition the material selection is explained, whereby the availability of ball bearings and the hardness were considered to be the most important features. The use of tungsten carbide required new fabricating techniques by the manufacturer, SKF Schweinfurt.

VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN

Abb.-Nr.	Benennung
1	Prüflager, Hauptabmessungen
2	Typische Formschriebe für Außenringlaufbahn
3	Typische Formschriebe für Innenringlaufbahn
4	Typische Formschriebe für Kugeln
5	Typische Querprofile für Außen- und Innenringlaufbahn
6	Versuchsaufbau für Untersuchungen an Wälzlagern in Na
7	Schema der Versuchsvorrichtung
8	Prüflagerbausatz, Schwingungsdämpfer für Reibmomentmessung
9	Vorrichtung zur mikroskopischen Auswertung der Lagerteile
10	Typischer Versuchsablauf
11	Beispiel für die Reibmomentschwankungen (Vers. 11)
12	Beispiel für die Reibmomentschwankungen (Vers. 7)
13	Reibmoment in Abhängigkeit der Betriebsdauer
14	Reibmoment als Funktion der Axialbelastung
15	Gewichtsabnahme bei den Versuchen der Phase 1
16	Gewichtsabnahme der Kugellager
17	Mittlere spez. Verschleißrate in Abhängigkeit der Härte
18	Die Einlauftiefe nach den Versuchen
19	Typische Verschleißmarken an Kugeln
20	Typische Verschleißmarken an Ringen
21	Schadenskarten für die Ringe der Hartmetallager
22	Schadenskarten für die Ringe der Ferro-Titanit-Lager

VERZEICHNIS DER TABELLEN

(Tabellen befinden sich jeweils am Ende des zugeh. Kap.)

Tab. Nr.	Benennung	Seite
Tab. 1-1	Übersicht über Versuche an Wälzlagern in Flüssigmetall nach der Literatur	3
Tab. 2-1	Werkstoffkombination für Prüflager	12
Tab. 2-2	Werkstoffbezeichnungen und Richtanalyse für die verwendeten Werkstoffe	13
Tab. 2-3	Mechanische und physikalische Eigenschaften der verwendeten Werkstoffe bei Raumtemperatur	14
Tab. 2-4	Qualitätsanforderungen und Prüfergebnisse	15
Tab. 2-5	Zusammenstellung der wichtigsten Daten aus den Abnahmeprotokollen	16
Tab. 2-6	Wärmbehandlung	17
Tab. 3-1	Versuchsintervalle (Definitionen gem. Abb. 10)	25
Tab. 4-1	Untersuchungen an Wälzlagern in Natrium Übersicht über die durchgeführten Versuche	38
Tab. 4-2	Typische Oberflächenmerkmale auf den Laufbahnen der Lager aus Hartmetall (WC) nach $0,2 \cdot 10^6$ Umdrehungen	39
Tab. 4-3	Typische Oberflächenmerkmale auf den Kugeln der Lager aus Hartmetall (WC) nach $0,2 \cdot 10^6$ Umdrehungen	40
Tab. 4-4	Breite der Laufspur und Berührungswinkel für die Lager aus Hartmetall und Ferro-Titanit nach $0,2 \cdot 10^6$ Umdrehungen	41
Tab. 4-5	Oberflächenmerkmale an den Kugeln aus Hartmetall (WC) nach den Versuchen 6 und 7	42
Tab. B-1	Typische Oberflächenmerkmale auf den Laufbahnen der Lager aus Ferro-Titanit (WF 13,5) nach $0,2 \cdot 10^6$ Umdrehungen	B2
Tab. B-2	Oberflächenmerkmale auf den Kugeln der Lager aus Ferro-Titanit (WF 13,5) nach $0,2 \cdot 10^6$ Umdrehungen	B3
Tab. B-3	Oberflächenmerkmale an den Kugeln aus Ferro-Titanit nach den Versuchen 11 und 12	B4

	<u>Seite</u>
5. <u>Diskussion der Versuchsergebnisse</u>	43
5.1 Versuchsergebnisse der untersuchten Werkstoffe	43
5.2 Vergleich mit Ergebnissen aus der Literatur	45
5.3 Weiteres Vorgehen	46
Literatur	47
Abbildungen	
Anhang A: Berechnung der Verschleißrate	
Anhang B: Das Tragbild der Kugellager aus Ferro-Titanit	

1. Einleitung

Leichtgängigkeit und Zuverlässigkeit sind zwei Grundforderungen, die an Steuer- und Bedienungseinrichtungen von Reaktoren gestellt werden müssen. Für die Lagerung von drehenden oder längsgeführten Bauteilen (z.B. Gelenke in Manipulatoren, Führungen in Teleskop- oder Hubsäulen, Drehkränze, Revolvermagazine, Spindeln) haben in dieser Hinsicht Wälzlager gegenüber Gleitlagern einige Vorzüge [23]. Die Reibungsarmut bei Wälzlagern ist evident, insbesondere auch bei intermittierendem Betrieb oder kleinen Relativgeschwindigkeiten, wo es bei Gleitlagern zu trockener oder Mischreibung mit erhöhtem Verschleiß kommt. Auch hinsichtlich der Zuverlässigkeit bieten Wälzlager gegenüber Gleitlagern insofern Vorteile, als sie nicht zum plötzlichen Festfressen neigen. Vielmehr kündigt sich eine Beschädigung lange vor einem vollständigen Versagen durch rauheren Lauf, ansteigendes Reibmoment und verstärktes Laufgeräusch an.

Diese Vorzüge sind jedoch nicht ohne weiteres auf Betriebsbedingungen übertragbar, wie sie in natriumgekühlten Reaktoren vorherrschen. Insbesondere führen hier die mangelhafte Schmierfähigkeit des Natriums und die relativ hohe Betriebstemperatur zu Reibungs- und Verschleißproblemen. Zum Komplex der gleitenden Reibung sind viele Arbeiten mit einem weiten Spektrum von Werkstoffkombinationen und Versuchsparametern bekannt geworden. Ein wesentliches Ergebnis ist, daß der Reibungskoeffizient in Na nur in günstigen Fällen auf Werte von 0,4 bis 0,5 gesenkt werden kann, und auch die Verschleißrate mit ihren Folgeerscheinungen (Aufrauhung, Ungleichförmigkeiten im Bewegungsablauf, Spielveränderung) sind unerwünscht hoch.

Zur experimentellen Untersuchung der rollenden Reibung im Natrium sind nur wenige Ansätze gemacht worden [3 bis 11], jedoch bisher ohne nennenswerten Erfolg. Der Grund mag darin liegen, daß die Herstellung von Prüfkörpern, also z.B. Kugellager, aus Sonderwerkstoffen einen sehr viel höheren technologischen Aufwand erfordert als bei Prüfkörpern für Gleitreibungsversuche. Es sind daher ausnahmslos nur Versuche mit Kugel- oder Rollenlagern aus solchen Werkstoffen bekannt geworden, die in der Wälzlagertechnik allgemein oder auf Sondergebieten bereits bekannt waren.

Tab. 1-1 gibt eine Übersicht über die vom Schrifttum her bekannten Versuche an Wälzlagern in Flüssigmetallen. Die ersten Arbeiten [3,4,5] befaßten sich ausnahmslos mit Lagern aus Wälzlagerstahl oder bei sehr niedrigen Temperaturen (vorwiegend 120 °C) in NaK. Die relativ hohen Drehzahlen (1750 min⁻¹) zeigen dabei, daß das Ziel hier mehr auf die Lagerung von Dauerläufern (z.B. Pumpenrotoren) gerichtet war. Nach vorliegenden Erfahrungen sind die Erfolgsaussichten für die Verwendung von Wälzlagern in diesem Bereich sehr gering. Die späteren Untersuchungen [6 bis 11] sind dementsprechend auf langsame und intermittierende Bewegungen ausgerichtet mit ähnlichen Parametern, wie sie im Rahmen dieses Programms vorgesehen sind. Dabei zeigt sich deutlich die technologisch bedingte Einengung auf nur wenige Werkstoffe.

In der vorliegenden Arbeit wurden erstmals u.a. Kugellager aus Hartmetallen untersucht, die von der Fa. SKF Schweinfurt unter Anwendung spezieller Technologien hergestellt worden waren. Damit ist das Spektrum auf Werkstoffe erweitert worden, die sich auch bei höheren Temperaturen (ca. 600 °C) durch hohe Härte auszeichnen. Der erste Teil der Untersuchungen, über den hier berichtet wird, stellt daher einen Werkstoffvergleich hinsichtlich des Reibungsverhaltens der Kugellager im Laufe der Versuchszeit und der auftretenden Verschleißphänomene dar. Mit dem aus diesen Versuchen am geeignetsten hervorgegangenen Werkstoff sind in einer zweiten Phase Parameteruntersuchungen (Belastung, Temperatur, Drehzahl) vorgesehen. Erst diese zweite Versuchsphase wird einen Beitrag zu der eingangs gestellten Frage der Zuverlässigkeit bzw. Belastbarkeit von Kugellagern leisten können.

Tab. 1-1 Übersicht über Versuche an Wälzlagern in Flüssigmetall nach der Literatur

Zitat Nr.	Autor / Land / Jahr	Versuchsp arameter					Medium	Lagerwerkstoff Ringe/Kugeln/Käfig	Bemerkungen
		Lagertyp	Belastg. (kp) ¹⁾	Drehz. (min ⁻¹)	Temp. (°C)	Dauer (10 ⁶ Umdr.)			
[3]	Greenert/USA/1956	6306 303	100-270r 100-220r	1725 1725	120 260	0,4-12,1 0,7-2,4	NaK NaK	52100/52100/div. Werkzeugst./dto./ Alum.	Lagerbruch Verschleiß u. Bruch
[4]	Markert/USA/1957	6306 7207 B 7320 7418,7222, 7128	14r+14a 14r+14a 320a 180-2000a	1750 1750 850 850	120 120 120 120	0,53 0,53 0,255	NaK NaK NaK NaK	52100/52100/1010 St. 52100/52100/1010 St. 52100/52100/Eisen 52100/52100/div.	starker Verschl. " " " " Lebensdauer als Fkt. d. Belastg.
[5]	Richards/USA/1965	6208	5-20	1000- 2500	320		Li	M2/M2/AMS 6415	Lagerbruch
[6]	Jwai/Japan/1968	6311	775a	120	400	0,72	Na	WL-Stahl,Stellite 6 u.Hastelloy C in div. Kombinationen	befriedigende Er- gebnisse mit Stellite
[7]	Barreau/Frankreich/ 1970	6204	50-200r	50	280	2,1	Na	Stellite/Stellite/?	starker Verschl.
[8]	Delves/England/1970	6207	1000r	5 oscill.	400	500 h	Na	Werkzeugst./dto./-	Zustand zufriede- denstellend
[9]	Takea Uga/Japan/1971	6311	100-800r	120	400	0,14-0,72	Na	Stellite,Hastel- loy C u.Stainless Steel	je härter der Werk- stoff, umso geringer d.Verschleiß
[10] [11]	Freede/USA/1971 (nach [10]) SKF Industries/USA/ 1972	7205 6306	200a <250a	50 <1000	650 <427	0,03 <0,5	Na Na	Werkzeugst./dto./ Molybdän NM 100/NM 100/TZM	Systematische Un- tersuchg. ist un- terwegs

1) a = axiale Belastung, r = radiale Belastung

2. Die Prüflager

2.1 Werkstoffauswahl

Hierbei müssen im allgemeinen die folgenden Werkstoffeigenschaften beachtet werden:

- Härte bei Betriebstemperatur
- Verarbeitbarkeit mit den geforderten Genauigkeiten und Oberflächengüten
- Korrosionsbeständigkeit
- Unempfindlich gegen Ermüdung und Schlagbeanspruchung
- Formstabilität, einschließlich eines geeigneten Wärmeausdehnungskoeffizienten
- Reibungs-, Verschleiß- und Selbstverschweißverhalten
- geringe Aktivierbarkeit

Bisher wurden in den aus Veröffentlichungen bekanntgewordenen Versuchen an Wälzlagern in Flüssigmetall die in Tab.1-1 aufgeführten Werkstoffe verwendet. Man erkennt, daß zunächst mit herkömmlichen Stählen begonnen wurde, wie die Beispiele der Wälzlagerstähle und der austenitischen Cr-Ni-Stähle zeigen. Diese Werkstoffe haben in der Na-Technologie nicht zum Erfolg geführt. Die WL-Stähle verlieren bei etwa 400 °C ihre Martensithärte und neigen dann zum Verschweißen [9]. Etwas besser sind Edelstähle vom Typ 316 SS, die aber wegen zu geringer Härte einen hohen Abrieb haben. Generell hat man in [9], welches bisher die einzige Arbeit mit Lagern aus verschiedenen Werkstoffen ist, gefunden, daß der Abrieb sich mit zunehmender Härte stark verringert, nämlich um ca. zwei Zehnerpotenzen vom Cr-Ni-Stahl (316 SS) zum Stellite (Abb. 17). Dieselbe Tendenz ist auch in Gleitreibungsversuchen nach der Pin-Disc-Methode gefunden worden [12,13,14]. Nach diesen Ergebnissen muß man die Härte bzw. die Warmhärte als ein vorrangiges Auswahlkriterium ansehen, und nach [10] sollte bei Betriebstemperatur ein Härtewert von mindestens HRC 57 bis 58 vorhanden sein.

In einem Versuchsprogramm mit Wälzlagern, in dem ein möglichst weites Werkstoffspektrum untersucht werden soll, sind die Verarbeitbarkeit und der Stand der Technik weitere stark einschränkende Auswahlkriterien. Die Fertigung von Kugellagern ist auf eine Massenproduktion ausgerichtet, und die speziellen Verfahren zur Wärmebehandlung, Formgebung und zum Schleifen sowie auch die Werkstoffeigenschaften (z.B. Polierbarkeit, Formstabilität) sind nur für wenige Werkstoffarten erprobt und bekannt. Es sind daher bevorzugt solche Werkstoffe auszuwählen, über die beim Hersteller ausreichende Erfahrungen vorliegen. Aus dieser Sachlage heraus, wurden nach Absprache mit der Herstellerfirma der Prüflager für diesen Versuchsabschnitt die fünf in Tab. 2-1 aufgelisteten Werkstoffkombinationen ausgewählt, wobei bei den Lagern mit den Kombinationen C und D die Ringe und die Kugeln zwar jeweils aus demselben Werkstofftyp, jedoch aus etwas unterschiedlichen Legierungen gefertigt wurde. Bezeichnungen, Richtanalysen sowie mechanische und physikalische Eigenschaften für diese Werkstoffe sind in Tab. 2-2 und 2-3 zusammengestellt. Im folgenden wird diese Auswahl näher begründet.

Der Werkstoff DMo5 ist ein Hochleistungswerkzeugstahl mit relativ hohen Anteilen an Legierungselementen (Cr, Mo, W und V, vgl. Tab. 2-2). Er zeichnet sich im Gegensatz zum üblichen Wälzlagerstahl dadurch aus, daß seine Härte erst oberhalb ca. 500 °C beträchtlich abfällt. Er wird seit langem für Sonderzwecke, meist bei erhöhten Betriebstemperaturen, in der Wälzlagertechnik verwendet, so daß es sich anbietet, den DMo5 als Vertreter der Hochleistungswerkzeugstähle in das Versuchsprogramm aufzunehmen. Damit ist auch eine Vergleichsmöglichkeit mit den Untersuchungen von Delves/Rodwell [8] gegeben, die einen ähnlichen Stahl verwandten. Die Härte beruht bei den Hochleistungswerkzeugstählen auf den Karbidausscheidungen. Es bestehen daher Befürchtungen, daß bei langen Betriebszeiten der Kohlenstoff herausgelöst wird und der Werkstoff erweicht. Nach Untersuchungen in [12] mit den Werkstoffen DMo5 und C92 konnten Anzeichen dieser Art nach 100 h bei 500 °C jedoch noch nicht festgestellt werden. Eine Voraussage ist bei diesen komplexen Systemen nicht möglich,

jedoch lassen die Zusätze von Karbidbildnern (V, W, und in geringem Maße auch Mo) eine nur geringe Kohlenstoffverarmung erwarten.

Bei den Cr-Stählen wird die Härte durch ein martensitisches Gefüge herbeigeführt, so daß die Gefahr der Kohlenstoffverarmung im Natrium ebenfalls gegeben ist. Wegen des hohen Cr-Gehaltes sind diese Stähle relativ korrosionsbeständig. Der amerinaknische Werkstoff BG 42 zeichnet sich innerhalb dieser Gruppe durch Verschleiß- und Wärmebeständigkeit aus und findet daher bei hochbeanspruchten Bauteilen wie Wälzlager, Zahnräder, Nocken, Kolbenringen und Ventilen u.a. im Triebwerksbau Anwendung. Die Warmhärte ist bei 500 °C um ca. 8 Rockwell-Einheiten geringer als bei Raumtemperatur, so daß bei 500 °C noch Härtewerte von HRC = 52-55 vorhanden sind, die auch über mehrere 100 Stunden erhalten bleiben. Der Stahl BG 42 wurde als Vertreter der härtbaren Cr-Stähle ebenfalls untersucht.

In sehr vielen Anwendungsfällen von gleitenden Mechanismen in Natrium hat sich die Gruppe der Stellite (Co-Basislegierungen) hervorragend bewährt. Diese Werkstoffe sind daher in bezug auf Reibverhalten, Verschleiß und Korrosion weitgehend mit guten Resultaten untersucht worden. Auch für Versuche mit Kugellagern wurden Stellite schon mehrfach verwendet [6,7,9]. Die erreichbare Härte hängt stark von den Cr- und C-Anteilen sowie vom Herstellungsverfahren ab. Mit Rücksicht auf die vorliegenden Erfahrungen beim Hersteller und auf die Fertigungstechnologie wurden aus der Vielzahl der Stellite die Werkstoffe Virium 12 für die Ringe Virium 11 für die Kugeln gewählt. Die Raumtemperaturhärte liegt mit Werten HRC = 44-49 bzw. 56 deutlich niedriger als die Härte der o.g. Stähle (vgl. Tab. 2-3), jedoch wird angenommen, daß der Härteabfall mit steigender Temperatur bei den Stellites schwächer ist. Insbesondere das gute Reibverhalten, das günstige Korrosionsverhalten in Na und bereits vorhandene Erfahrungen in der Wälzlagertechnik waren Veranlassung für die Aufnahme der Stellite in das Versuchsprogramm, wengleich sie hinsichtlich der Aktivierbarkeit wegen des hohen Co-Gehaltes (> 50 %) zusätzliche Fragen aufwerfen (Transport von Abrieb).

Der Werkstoff Ferro-Titanit mit der Bezeichnung WF 13,5^x ist ein Sintermetall auf Eisenbasis mit einem hohen Titankarbidanteil von 34,5 % (vgl. Tab. 2-2). Er ist im geglühten Zustand gut bearbeitbar und erreicht bei entsprechender Wärmebehandlung Härtewerte bis zu

x Markenbezeichnung der Fa. DEW, Krefeld

ca. HRC=70, die er auch beim Anlassen bis zu ca. 550 °C weitgehend beibehält. Oberhalb 550 °C fällt die Härte allerdings beträchtlich ab. Der hohe Chromgehalt von 13,5 % läßt eine geringe Korrosionsanfälligkeit erwarten, jedoch sind Versuchsdaten bezüglich des Korrosionsverhaltens dieses Werkstoffes in Natrium nicht bekannt. Sinterwerkstoffe mit TiC gelten als sehr verschleißfest und sind verschiedentlich in Untersuchungen zum Reibungs- und Selbstverschleißverhalten in Na mit befriedigendem Erfolg verwendet worden [15,16]. Diese Eigenschaften und die Tatsache, daß Ferro-Titanit WF 13,5 in der Kugellagerfertigung bereits erprobt war, ließen den Werkstoff als aussichtsreich erscheinen.

Als Verschleißschutz in der Umformtechnik und bei der spanenden Formgebung, wo es auf hohe Standzeiten der Werkzeuge ankommt, haben sich Sinterhartmetalle auf Wolframkarbid-Basis hervorragend bewährt. Auch in Natriumversuchen haben sie niedrige Verschleißraten, gute Korrosionsbeständigkeit und i.a. keine Neigung zum Selbstverschleiß gezeigt [12,17,18,19,20]. Die Vickershärte liegt i.a. oberhalb 1300 kp/mm² und erreicht Werte bis zu 2000 kp/mm² (zum Vergleich die Härte des WF 13,5: HRC=68 $\hat{=}$ HV=940 kp/mm²). Besondere Schwierigkeiten bereitet die Bearbeitung (vgl. Abschnitt 2.4), weshalb diese Werkstoffgruppe in die Wälzlagertechnik bisher keinen Eingang gefunden hatte. Unangenehm können ferner der beträchtliche Kobaltanteil (Tab. 2-2) und der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient (Tab. 2-3) sein. Dennoch erschien die Auswahl des Wolframkarbid für dieses Versuchsprogramm in Anbetracht des vielversprechenden tribologischen Verhaltens (Zusammenwirken von Reibung, Schmierung und Verschleiß) in Na und der guten Temperaturbeständigkeit sinnvoll. Durch die Erweiterung der Kugellagertechnologie auf den Hartmetallsektor werden außerdem weitere Anwendungen, wie z.B. in heißen Gasen, erschlossen. Fertigungstechnisch bieten evtl. die Beschichtungsverfahren noch Entwicklungsmöglichkeiten. Aus der großen Zahl der WIDIA-Hartmetallsorten wurden auf Empfehlung des Herstellers die Werkstoffe GT 10^x für die Kugeln und GT 20^x für die Ringe ausgewählt. Letzterer ist etwas zäher und damit unempfindlicher gegen Verspannungen bei der Montage.

x Markenbezeichnung der Krupp WIDIA-Fabrik, Essen

2.2 Konstruktion der Prüflager

Die Prüflager entsprechen in Form und Abmessungen weitgehend den genormten Rillenkugellagern vom Typ 6207 gemäß DIN 620 (Abb. 1). Abweichend von der üblichen Bauart wurde hier eine vollkugelige Ausführung, d.h. ohne Käfig, gewählt, um den von anderen Experimentatoren stets als kritisch erkannten Käfigverschleiß zu vermeiden. Die dadurch bedingte einschultrige Ausführung des Innenringes gewährleistet eine bequeme Montage, ist andererseits aber nur anwendbar, wenn eine hinreichend große und stets in dieselbe Richtung wirkende Axialbelastung vorhanden ist. Konstruktiv läßt sich dies in den meisten Fällen durch Anordnung eines Lagerpaares verwirklichen.

Die Lagergröße mit einem Bohrungsdurchmesser von 35 mm wurde so festgelegt, daß sie als repräsentativ für die meisten absehbaren Anwendungsfälle (vgl. 1) gelten kann.

Im allgemeinen sind Rollenlager den Kugellagern bei gleicher Baugröße in bezug auf die Tragfähigkeit überlegen. Jedoch müssen die Rollen in axialer Richtung, z.B. durch Borde an den Ringen, geführt werden, was eine lastabhängige Gleitreibung erzeugt. Zur Vermeidung von hieraus möglicherweise sich ergebenden Komplikation bei der hier im Vordergrund stehenden Untersuchung der Rollreibung wurden deshalb zunächst Kugellager bevorzugt, wenngleich sich auch bei diesem Lagertyp die Gleitreibung nicht vollständig eliminieren läßt.

Im Versuch 8 wurden ausnahmsweise Lager mit einem Massivkäfig aus Edelstahl verwendet. Die Zahl der Kugeln betrug hier nur 10 anstatt 16. Diese Lager aus Stellite sind bereits listenmäßig erhältlich, so daß sie zu Vergleichszwecken in einem Versuch ohne großen zusätzlichen Aufwand getestet wurden (vgl. Tab. 4-1).

2.3 Qualitätsanforderungen und -kontrolle

Maße und Profile

Um den Einfluß von Geometriefehlern auf das Versuchsergebnis, insbesondere auf den Verschleiß, möglichst gering zu halten, mußte eine weitgehende Qualitätskontrolle durchgeführt werden. Die Qualitätsanforderungen hinsichtlich Toleranzen und Laufgenauigkeit orientierten sich an den Vorschriften der DIN 620, Toleranzklasse 0 (Normalklasse). Tab. 2-4 enthält eine Zusammenstellung aller Kontrolldaten mit den zulässigen Abweichungen und den Istabweichungen. Für letztere sind dabei der aufgetretene Kleinstwert und der Größtwert aus allen Lagern dieser Versuchsphase, sowie auch der arithmetische Mittelwert angegeben. Man erkennt, daß bei dem größten Teil der Messungen die Toleranzen im Mittel weit unterschritten wurden. Dies trifft besonders für die Sitzflächen der Ringe zu. Nur in Einzelfällen wurden die Toleranzgrenzen überschritten, z.B. bei dem Laufbahndurchmesser einiger Ringe aus den schwerbearbeitbaren Werkstoffen. Dies ist hier jedoch unbedeutend, da die Abweichungen durch geeignete Paarung der Ringe ausgeglichen wurden, wie die radiale Lagerluft zeigt. Ebenso konnten offenbar die üblicherweise geforderten Rauheiten an den Ringlaufbahnen von $R_a < 0,05$ bzw. $0,06 \mu\text{m}$ bei den Ringen aus GT 20 und WF 13,5 aus arbeitstechnischen Gründen nicht eingehalten werden (vgl. Tab. 2-5). Für die besonders wichtigen Meßgrößen, also insbesondere für Laufbahnen und Kugeln, sind die vollständigen Prüfergebnisse für alle Lagerteile in Tab. 2-5 zusammengestellt. Außerdem sind dafür in der Fußleiste, aufgeschlüsselt nach Werkstoffen, die Abweichungen in den Balkendiagrammen dargestellt. Es ist darin deutlich zu erkennen, daß die größten Maßabweichungen bzw. Streuungen stets bei den Lagern aus Hartmetall zu verzeichnen sind, was die Bearbeitungsschwierigkeiten verdeutlicht.

Alle oben angesprochenen Qualitätskontrollen wurden vom Hersteller der Prüflager vorgenommen. Einige Meßwerte resultieren aus Formschriften, die für jeden Ring und eine Auswahl von Kugeln mit Spezial-Prüfgeräten (Talyrond, Talysurf, Perth-o-Meter) aufgezeichnet wurden. Solche Schriebe liegen für folgende Flächen vor:

Mantel des Außenringes und Bohrung des Innenringes
Laufbahn des Innen- und Außenringes
Laufbahnform quer des Innen- und Außenringes
Kugelumfang
Kugelrauheit

Die Abbn. 2-5 zeigen auszugsweise eine Gegenüberstellung typischer Formschriebe für Lagerteile im Neuzustand aus dem gutbearbeitbaren Werkstoffstahl DMo5 und aus Hartmetall GT 10 bzw. GT 20 (WC-Basis). Auffallend sind die starken Abweichungen der Querprofile der Ringe aus GT 20 von der Kreisform (Abb. 5b), die in dieser Darstellung im Idealfall eine Gerade ergibt. Die Abbildungen bestätigen nochmals, daß in bezug auf Formgenauigkeit die eindeutig günstigeren Voraussetzungen bei den Lagern aus Stahl vorlagen.

Härteprüfung

Die Härte wurde stichprobenweise bei Raumtemperatur nach dem Vickersverfahren (HV 10) gemessen und auf Rockwellhärte umgerechnet. Die Prüfprotokolle des Lagerherstellers weisen Härtewerte in den Grenzen gem. Tab. 2-3 aus.

2.4 Bemerkungen zur Prüflagerfertigung

Absolut neu in der Wälzlagertechnologie war die Herstellung der Kugellager aus Hartmetall. Es wurden hierzu gesinterte Rohlinge verwendet, die in hartem Zustand auf das Fertigmaß geschliffen werden mußten. Dazu war ein Abgehen von dem normalerweise angewandten sog. Dreipunkt-Schleifverfahren erforderlich, welches mit einer magnetischen Einspannung der Ringe arbeitet. Stattdessen mußten für das nichtmagnetische Hartmetall entsprechende Spannzeuge neu konstruiert und erprobt werden. Auch der Schleifvorgang selbst stellte sich als äußerst aufwendig heraus, da die Schleifscheiben bei dem harten Werkstück geringe Standzeit aufwiesen.

Diese Herstellungsschwierigkeiten drücken sich in dem hohen Preis der Hartmetall-Lager und in der Formgenauigkeit und Oberflächengüte der Lagerteile aus, wie in 2.3 dargestellt.

Im Gegensatz dazu wurden die Kugellager aus Stahl (DMo5 und BG 42) und Ferro-Titanit (WF 13,5) im ungehärteten Zustand in der üblichen Weise bearbeitet und einer anschließenden Wärmebehandlung unterzogen, über die Tab. 2-5 Auskunft gibt.

2.5 Kurzbezeichnung der Lager bzw. Lagerteile

Bezeichnung für Lager

Beispiel: 5/5/5C

1fd. Nummer des Außenringes
innerhalb einer Werkstoffgruppe

1fd. Nummer des Innenringes
innerhalb einer Werkstoffgruppe

1fd. Nummer des Kugelsatzes
innerhalb einer Werkstoffgruppe
(kann weggelassen werden, wenn
identisch mit Innenringnummer)

Werkstoffkennbuchstabe

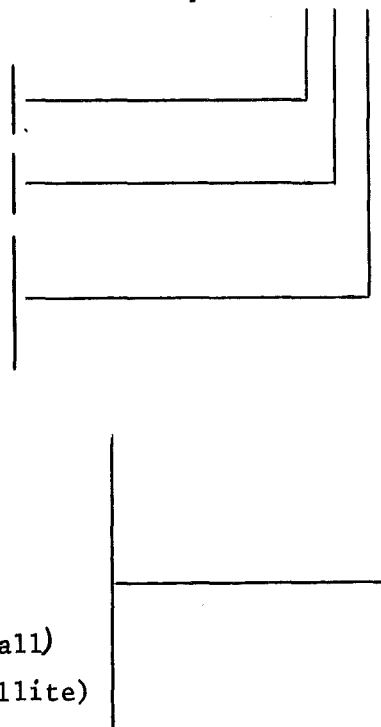
ohne: DMo5

A: BG 42

B: Ferro-Titanit

C: GT 10 bzw. 20 (Hartmetall)

D: Virium 11 bzw. 12 (Stellite)



Bezeichnung für Lagerteile

Beispiel: K5C/16

Kennbuchstaben für Lagerteil

K = Kugel

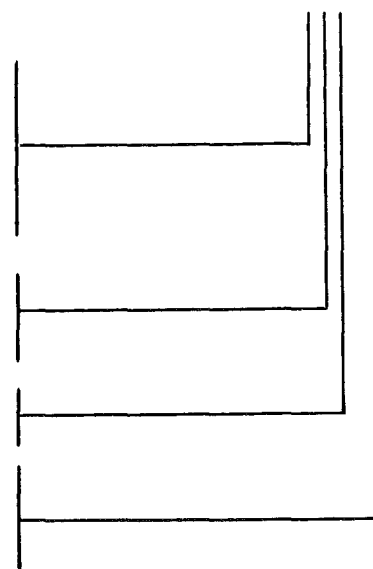
IR = Innenring

OR = Außenring

1fd. Nummer des Ringes bzw. des
Kugelsatzes innerhalb einer Werk-
stoffgruppe

Werkstoffkennbuchstabe
(vgl. oben)

Kugelnummer 1 bis 16
innerhalb des Lagersatzes,
geordnet nach fallendem Eigenge-
wicht (entf. bei Ringen)



Tab. 2-1: Werkstoffkombination für Prüflager

Werkstoff- kombination- Kennbuchstabe	Werkstoff für	
	Ringe	Kugeln
ohne	DMo5	DMo5
A	BG 42	BG 42
B	Ferro-Titanit WF 13,5	Ferro-Titanit WF 13,5
C	GT 20	GT 10
D	Virium 12	Virium 11

Tab. 2-2: Werkstoffbezeichnungen und Richtanalyse für die verwendeten Werkstoffe

Werkstoffart	W.-Nr.	Marken- bezeichnung	Richtanalyse (Werte in %)	Bemerkungen
Werkzeugstahl	1.3343	DMo5	0,9 C; 0,3 Si; 0,3 Mn; 4,3 Cr; 5,0 Mo; 6,5 W; 1,9 V; Rest Fe	für Ringe und Kugeln
härth. Cr-Stahl		BG 42	1,15; 0,5 Mn; 0,35 Si; 0,01 S; 0,01 P; 15 Cr; 4,2 Mo; 1,2 V; 0,2 Ni; Rest Fe	für Ringe und Kugeln
Sinterwerkstoff		Ferro-Titanit WF 13,5	0,6 C; 34,5 TiC; 13,5 Cr; 3,0 Mo; 1,0 Cu; 0,02 B; Rest Fe	für Ringe und Kugeln
Hartmetall		GT 20	85 WC; 3 TiC + TaC; 12 Co	für Ringe
Hartmetall		GT 10	94 WC; 6 Co	für Kugeln
Co-Hartleg. (Stellite)		Virium 11 (\approx Stellite 3)	30 Cr; 12 W; < 2 Fe; 4 Si; Mo, Ni, C Rest Co	für Kugeln
Co-Hartleg. (Stellite)		Virium 12 (\approx Stellite 12)	28 Cr; 8 W; < 2 Fe; 4 Si, Mo, Ni, C, Rest Co	für Ringe

Tab. 2-3: Mechanische und physikalische Eigenschaften der verwendeten Werkstoffe bei Raumtemperatur

Werkstoff	Druckfestigkeit kp/mm ²	Zugfestigkeit kp/mm ²	Biegefestigkeit kp/mm ²	Härte 6)	Elastizitätsmodul kg/mm ²	Wärmedehnzahl 10 ⁻⁶ /°C	Wärmeleit- zahl cal/cm grd sec	Dichte g/cm ³	Quelle
DMo5			ca. 430	HRC 64,5-65,2	21000	11,6		8,1	1)
BG 42		280		HRC 60,4-63,2	21000	11,9		7,7	2)
Ferro-Titanit WF 13,5	400-410	180-200		HRC 61-66 (Kugeln: 68)	30100	8,4-9,1	0,0630	6,45-6,5	3)
GT 10	ca. 540		170	HV 1500	62000	5	0,19	14,9	4)
GT 20	ca. 450		210	HV 1343-1390	58000	5,5	0,16		4)
Virium 11 (≈ Stellite 3)	200	63		HRC 56	25000			8,6	5)
Virium 12 (≈ Stellite 12)	180	85		HRC 44-49	21000	11,5-13,8		8,6	

- 1) DEW-Technische Berichte 11. Bd. 1971, Heft 3
- 2) Data Sheet LESCALLOY BG 42 der Latrobe Steel Co., Latrobe, Pennsylvania USA
- 3) Werkstoffblatt Ferro-Titanit 13,5, DEW, Krefeld
- 4) Druckschrift der Krupp Widia-Fabrik, "WIDIA"
- 5) Druckschrift "Properties of Deloro Stellite Alloys", Deloro Stellite (UK) Limited
- 6) Gemäß Prüfprotokoll der Fa. SKF Schweinfurt (Die Härte wurde nach dem Vickersverfahren gemessen und nach DIN 50 150 auf Rockwellhärte umgerechnet; Umrechnung nur bis HRC = 68 möglich)

Tab. 2-4: Qualitätsanforderungen und Prüfergebnisse

Bau- teil	Messung	Zeichngs.- maß (mm)	Toleranz (μm)	Istabweichung Min/Mittel/Max. (μm)
OR	Manteldurchmesser (Bezugsseite)	72,0	-13	-1/-5,5/-12
	Manteldurchmesser (Gegenseite)	72,0	-13	-1/-5,3/-12
	Radiendifferenz (Mantel)		2	x
	Kegeligkeit (Mantel)		4	0/0,8/3
	Schiefelage (Mantel)		25	1/1,5/5
	Oberflächenrauheit (Mantel)		0,4	0,06/0,15/0,38
	Kantenabstand	2,0	+500/-600	-100/-125/-200
	Breite	17,0	-120	0/-16/-35
	Breitenschwankung		20	1/1,4/4
	Unebenheit d. Seitenfläche		10	1/1,7/3
	Unebenheit d. Seitenfl.(Gegens.)		10	0,5/1,3/3
	Oberflächenrauheit (Seiten)		0,6	0,05/0,15/0,32
	Laufbahndurchmesser	63,5	+55/+15	-14/+14/+96
	Radiendifferenz		4	x
	Radialschlag		20	1/1,8/5
	Laufbahnseitenschlag		30	1/1,7/5
	Laufbahnlage		50	1/6,1/35
	Oberflächenrauheit (Laufb.)		0,06	x
Rillenradius	5,175	+100	x	
IR	Bohrungsdurchm. (Bezugsseite)	35,0	-12	-1,5/-5,8/+2
	Bohrungsdurchm. (Gegenseite)	35,0	-12	-3/-5,3/+3
	Radiendifferenz (Bohrung)		2	x
	Kegeligkeit (Bohrung)		4	0/1/3
	Seitenschlag (Bohrung)		20	1/2,3/5
	Oberflächenrauigkeit (Bohrg.)		0,4	0,1/0,19/0,55
	Kantenabstand	2,0	+500/-600	-100/-175/-200
	Breite	17,0	-120	-4/-28,5/-65
	Breitenschwankung		20	1/1,8/6
	Unebenheit d. Seitenfläche		10	0,5/1,4/3
	Unebenheit d. Seitenfl.(Gegens.)		10	0,5/1,9/9
	Oberflächenrauheit (Seiten)		0,6	0,06/0,15/0,3
	Laufbahndurchmesser	43,5	+20/-20	-62/-20/+78
	Radiendifferenz		3	x
	Radialschlag		12	1/2,1/11
	Laufbahnseitenschlag		20	1/1,7/3
Laufbahnlage		40	0/4,3/25	
Oberflächenrauheit (Laufb.)		0,05	x	
Rillenradius	5,175	+100	x	
Kugeln	Radiendiff. an einem Kugelgroßkreis			x
	Streuung d.mittl. Durchm. innerhalb eines Loses		1	x
	Oberflächenrauheit			x
Lager mon- tiert	Radiale Lagerluft	C4	34/47	x
	Berührungswinkel		34/46	33/36/45
	Endspiel		~ 7 mm	7

Tab. 2-6: Wärmebehandlung

Lagerteile aus DMo5 (gemäß Protokoll)

	<u>Ofen</u>	<u>Temp. (°C)</u>	<u>Zeit</u>
1. Vorwärmen	Salzbad	500	20 min
2. Vorwärmen	"	850	4 min
Härten	"	1180	70 sec
Abschrecken	"	540	1,5 min
1. Anlassen	Luftanlaßofen	550	2 h
2. Anlassen	" "	550	2 h
3. Anlassen	" "	550	2 h
Entspannen	" "	180	1 h

Lagerteile aus BG 42 (gemäß Protokoll)

	<u>Ofen</u>	<u>Temp. (°C)</u>	<u>Zeit</u>
1. Vorwärmen	Salzbad	500	20 min
2. Vorwärmen	"	850	4 min
Härten	"	1110	12 min
Abschrecken	"	540	1,5 min
Tiefkühlen	Truhe	- 70	1 h
1. Anlassen	Luftanlaßofen	520	2 h
2. Anlassen	" "	520	2 h
3. Anlassen	" "	520	2 h
Entspannen	" "	180	1 h

Lagerteile aus WF 13,5 (Empfehlung des Halbzeugherstellers,
Protokoll liegt nicht vor)

	<u>Ofen</u>	<u>Temp. (°C)</u>	<u>Zeit</u>
Härten	Öl/Luft- oder Warmbad	1090	
Anlassen		490-510	1 h

3. Versuchsvorrichtung und -durchführung

3.1 Aufbau und Wirkungsweise der Versuchsvorrichtung

Abb. 6 zeigt einen Längsschnitt durch die Versuchsvorrichtung mit der von oben eingesetzten Lagerprüfvorrichtung. Der Behälter ist Hauptbestandteil der Natrium-Behälteranlage (NABEA) / 21, über die die Bereitstellung des Natriums mit den erforderlichen Nebenversorgungen wie Heizung, Reinigung, Schutzgas, Regelung erfolgt. Während des Versuches ist nur der innere Behältereinsatz bis zum Überlauf mit Natrium gefüllt.

Die Erläuterung der Prüfvorrichtung erfolgt an Hand der schematischen Darstellung, Abb. 7. Das Prüflagerpaar (1) wird von einem Lagerhalter (2) am unteren Ende der Antriebswelle (4) aufgenommen. Die Innenringe des Lagerpaares werden angetrieben und axial über eine mitrotierende Zugstange (5) gegeneinander mit einer definierten Axialkraft verspannt. Dies geschieht mit Hilfe der pneumatischen Belastungsvorrichtung (7) am oberen Wellenende. Sie besteht aus einem Ringzylinder und einem mit O-Ringen abgedichteten Ringkolben, welche über Drucklager auf die Hohlwelle und die Zugstange wirken. Die Außenringe der Prüflager werden über ein gemeinsames Gehäuse (3) festgehalten. Das im Lagerpaar erzeugte Reibmoment wird somit ohne Nebenwirkungen auf das Gehäuse übertragen und kann dort über einen angekoppelten Biegestab (6) gemessen werden. Das Gehäuse läßt sich auch durch Einfahren eines starren Arretierstabes (8) feststellen. Der Antrieb erfolgt durch einen thyristorgesteuerten Gleichstrommotor (9), der zwischen 20 und 1000 U/min stufenlos regelbar ist. Die Antriebswelle (4) ist außerhalb des Natriumbereiches in zwei Kugellagern (10) geführt. Ein weiteres nahezu belastungsfreies Gleitlager (11) aus Stellite befindet sich in der Nähe des unteren Wellenendes im Natrium und dient nur zur Unterdrückung möglicher Querschwingungen. Die Wellendurchführung in den Behälter ist durch eine Gleitringdichtung (12) und durch einen zusätzlichen Lippenring, deren Zwischenraum mit Argon beaufschlagt ist, abgedichtet. Für das Auswechseln der Prüflager werden der Natriumbehälter vollständig entleert und die gesamte Vorrichtung nach Abkühlung ausgebaut.

Die Meßwertgeber sind im folgenden Abschnitt behandelt.

3.2 Meßtechnik und Angaben zur Genauigkeit

Während der Belastungsphase des Versuches wurden laufend die folgenden Meßgrößen von einem Punktschreiber aufgezeichnet:

- Reibmoment des Prüflagerpaares (auch auf Linienschreiber),
- Einlauftiefe axial (nicht bei allen Versuchen),
- Axialbelastung der Prüflager,
- Drehzahl des Antriebsmotors,
- Natriumtemperatur in Lagernähe.

Bei einigen in Tab. 4-1 gekennzeichneten Versuchen wurde außerdem die Sauerstoffkonzentration durch einmalige Probennahme bestimmt. Die Nachuntersuchungen beschränkten sich bei dieser Testserie im wesentlichen auf die

- mikroskopische Untersuchungen der Laufflächen,
- Gewichtsbestimmung der Lagerteile,
- Wiederholung der Qualitätskontrolle gem. 2.3 (Stichproben).

Im folgenden werden die angewandten Meßtechniken erläutert:

Reibmomentmessung

Das in den Prüflagern erzeugte Reibmoment wird über das Lagergehäuse auf den Biegestab übertragen. Zur Verminderung von Schwingungen dieses elastischen Systems ist am unteren Ende des Biegeschabes ein hydraulischer Dämpfer (Abb. 8) angeordnet. Der doppelwirkende Kolben folgt den Bewegungen des Meßstabes und muß dabei im Zylinder das Natrium über den zwischen Kolben und Zylinder vorhandenen Ringspalt (ca. 0,15 mm diametrales Spiel) verdrängen bzw. ansaugen. Die Reibkraft und Dämpfcharakteristik wurden in Wasser gemessen. Der Biegestab trägt kurz unterhalb seiner starren Kopfeinspannung zwei um 180° versetzte Dehnmeßstreifen (DMS) in Halbbrückenschaltung. Die Signale der stahlgekapselten DMS werden über einen Trägerfrequenz-Meßverstärker auf einen Punktschreiber geschaltet. Das System muß hinreichend mechanisch steif ausgeführt werden, was bei den geringen Meßkräften kleine Signale erzeugt, denen sich Störeffekte wie Hysterese und Temperaturgang der DMS, Nullpunktdrift des Verstärkers und ggf. Reibkräfte überlagern. In Eichenversuchen wurden diese Einflüsse untersucht, so daß sich der größte absolute Fehler

der Reibmomentmessung zu ca. ± 5 kpcm bei kleinen Meßwerten und ca. ± 8 kpcm bei den in diesen Versuchen aufgetretenen größeren Meßwerten angeben läßt. Das bedeutet, daß bei gemessenen Reibmomentwerten von 10 kpcm, wie sie etwa bei den Lagern aus Hartmetall auftraten, die Unsicherheit im ungünstigsten Fall bis zu ± 50 % betragen kann. Davon entfällt ein Anteil von ca. $2/5$ auf die Nullpunktsdrift am Verstärker, die eine Folge von Raumtemperaturschwankungen und damit vorwiegend ein Langzeiteffekt (Tag/Nacht-Betrieb) ist. Etwa der gleiche Anteil wurde für die Wirkung der Reibkräfte im Schwingungsdämpfer bei statischen Eichversuchen gemessen. Wahrscheinlich ist jedoch die tatsächliche Wirkung der Dämpferreibung durch die Vibrationen erheblich geringer. Unterstellt man dies, so beträgt der Fehler für eine kurzfristige Messung (bis zu einige Stunden nach dem Abgleich) in der Größenordnung von nur 1-2 kpcm.

Einlauftiefe der Lager

Die Einlauftiefe der Lager, d.h. also die axiale Annäherung der beiden Innenringe während des Versuches, erscheint am oberen Wellenende als Relativverschiebung zwischen Zugstange und Antriebswelle. Dieses Maß wurde mit einem induktiven Wegaufnehmer und Meßverstärker bestimmt. Die Anordnung ist wegen ähnlicher Störeffekte, wie schon bei der Reibmomentmessung beschrieben, nur für relativ große Einlauftiefen ($> 0,1$ mm) geeignet und sollte daher nur als Grobmessung gewertet werden. Der absolute Fehler dürfte unter 0,05 mm liegen.

Bei sehr kleinem Verschleiß wurde daher die Einlauftiefe am ausgebauten Lager mittels Meßuhr bestimmt, wobei die Genauigkeit besser als $\pm 0,01$ mm ist. Beide Meßmethoden können bei großem Verschleiß stark abweichende Ergebnisse liefern, da beim Ausbau der Lager eine Umorientierung der Kugeln gegenüber ihrer eingelaufenen Lage unvermeidbar ist. In diesen Fällen ist aber die Einlauftiefe ohnehin kein geeignetes Beurteilungskriterium mehr.

Axialbelastung der Prüflager

Die Axialbelastung wird über die nicht mitrotierende pneumatische Belastungsvorrichtung aufgebracht (vgl. 3.1). Der statische Gasdruck wird daher direkt als Maß für die Axialkraft angesehen, und es ergibt

sich aus den Kolbenabmessungen ohne Reibung der Zusammenhang:
1 atü $\hat{=}$ 95,3 kp Axialkraft. Die Reibkraft an den Kolbendichtungen ist im Gebrauchsbereich der Vorrichtung nahezu druckunabhängig und wurde zu ± 15 bis 18 kp beim Aus- und Einfahren des Kolbens gemessen. Da der Kolben während des Versuches keine meßbaren Verschiebungen erfährt, wird davon ausgegangen, daß die Reibkraft nicht wirksam wird. Die Meßgenauigkeit hängt dann nur von der Druckanzeige (Feinmeßmanometer und induktiver Aufnehmer in Verbindung mit Trägerfrequenzmeßverstärker) ab und kann mit etwa $\pm 0,6$ % des Skalenendwertes (15 atü), entsprechend ca. ± 10 kp bei der Axialbelastung, angegeben werden. Die Konstanz während der Versuchsdauer war i.a. besser als ± 4 kp.

Drehzahl

Die Motordrehzahl wird mit einem Tachogenerator gemessen. Zusätzlich wird die kumulierte Umdrehungszahl der Antriebswelle mit einem Zählwerk bestimmt.

Lagertemperatur

Das Thermoelement zur Messung der Lagertemperatur befindet sich in Höhe der Prüflager am unteren Ende des Reibmomentmeßstabes. Die Temperaturverteilung in der Umgebung der Prüflager kann als isotherm angesehen werden. Von der Behälterinstrumentierung ist bekannt, daß die maximale Temperaturdifferenz über die Füllhöhe (ca. 900 mm) weniger als 4 °C beträgt bei einer Nenntemperatur von 600-700 °C. Die Unsicherheit in der Messung, also einschließlich Übertragungsfehlern, wird zu ± 8 °C geschätzt. Für die in den Versuchsergebnissen genannten mittleren Prüftemperaturen ist außerdem eine Regelabweichung über die gesamte Versuchsdauer von maximal ± 3 °C anzusetzen.

Sauerstoffkonzentration

Zur Bestimmung der Sauerstoffkonzentration wurden nach Ablauf der halben Versuchsdauer mit Hilfe einer Probenentnahmevorrichtung Natriumproben aus dem Versuchsbehälter entnommen und einer Analyse ^x zugeführt.

x Durchgeführt durch das Institut für Material- und Festkörperforschung der GfK

Außerdem wurde nach Ablauf der Reinigungsphase (vgl. 3.3), also vor Versuchsbeginn, die Plugging-Temperatur bestimmt. Das zuerst genannte Verfahren lieferte, abgesehen von den beiden ersten Messungen, ungläubwürdige Ergebnisse, so daß es später nicht mehr angewendet wurde. Es wird vermutet, daß die Proben bei der Entnahme und der anschließenden Abkühlung, bedingt durch einen Mangel der Vorrichtung, verunreinigt wurden. Nach der Plugging-Temperatur müßte bei Versuchsbeginn die Sauerstoffkonzentration unter 3 ppM (für $T_p \leq 150^\circ\text{C}$ nach [22]) betragen haben. Es ist jedoch nicht auszuschließen, daß sie im Laufe des Versuches wieder angestiegen ist, nämlich durch Schutzgaszufuhr und mit der Prüfvorrichtung eingeschleppte Rückstände, die evtl. während der Reinigung nicht vollständig beseitigt wurden. Da alle Versuche in etwa im gleichen Rhythmus abliefen und die ersten Probenentnahmen niedrige Werte bestätigt haben, kann angenommen werden, daß die Sauerstoffkonzentration unter ca. 10 bis 20 ppm betragen hat.

Mikroskopische Untersuchungen

Zur Erleichterung der stereomikroskopischen Betrachtung der Laufflächen bei 20 bis 40-facher Vergrößerung diente eine Aufnahmevorrichtung (Abb. 9). Mit ihr kann jeder Punkt der Ringlaufbahn durch Dreh- und Schwenkbewegungen in das Blickfeld bei konstantem Objektstand gebracht werden.

Gewichtsbestimmung

Das Gewicht der Lagerteile wurde mit einer Analysenwaage mit einer Ablesegenauigkeit von 0,1 mg bestimmt. Die Reproduzierbarkeit über mehrere Tage liegt bei den vorherrschenden, nicht optimalen Raumbedingungen innerhalb von ca. 1 mg. Während einer Meßreihe hingegen können Unterschiede, z.B. Kugeln eines Satzes, bis zu 0,1 mg noch sicher festgestellt werden.

3.3 Versuchsdurchführung

Einen typischen Ablauf für einen Standardversuch veranschaulicht Abb. 10. Alle Versuche Nr. 1 bis 13 (vgl. Tab.4-1) wurden nach diesem Schema durchgeführt, wobei allerdings die Wartezeiten aus betrieb-

lichen Gründen nicht immer gleich waren.

Während der Anfahrphase (b) wird der zunächst noch leere Behälter elektrisch auf ca. 150 °C vorgeheizt, mit Natrium aus dem Lagertank der NABEA (vgl. 3.1) gefüllt und im Umwälzbetrieb auf Versuchstemperatur gebracht. Dabei wird das Natrium gleichzeitig im Bypass über eine Kaltfalle im Reinigungskreislauf geleitet, in der sich das Oxid abscheidet. Die eigentliche Reinigungsphase (c) zählt erst ab dem Zeitpunkt des Erreichens der Versuchstemperatur und dauert mindestens 4 h. Es hat sich gezeigt, daß nach dieser Zeit keine Änderung der Plugging-Temperatur und also auch der Sauerstoffkonzentration mehr feststellbar ist.

Die Versuchszeit (d) ist das Intervall, in dem die Prüflager unter Versuchsbedingungen betrieben wurden. Bei einigen Versuchen waren eine oder mehrere Unterbrechungen erforderlich, wobei jeweils beim Anfahren der Vorrichtung zunächst die Drehzahl und dann die Belastung aufgebracht wurden, während beim Abstellen zuerst die Belastung und dann die Drehzahl entfernt wurden. Dies kann für den Versuch deswegen von Bedeutung sein, weil sich bei diesem Vorgang die Kugelachsen bezüglich ihrer Lage umverteilen könnten. Insgesamt waren die Prüflager der Versuchstemperatur während der "Hochtemperaturdauer" (h) ausgesetzt (vgl. Tab. 3-1), an deren Ende das Natrium aus dem Versuchsbehälter abgelassen wurde. Es folgte die anlagenbedingte langsame Abkühlung (f) und der Ausbau der Vorrichtung aus dem Behälter bei ca. 50 °C. Die Lagerteile wurden mit Wasser gereinigt.

3.4 Versuchsparameter

Bei diesen Versuchen kam es im wesentlichen auf einen relativen Vergleich mehrerer Werkstoffe an. Einziger Parameter war daher der Werkstoff in den Kombinationen mit den Kennbuchstaben A bis D (einschließlich der Kombination ohne Kennbuchstabe) gemäß Tab. 2-1. Im übrigen wurden die Bedingungen weitgehend konstant gehalten, nämlich mit folgenden Nenndaten:

Prüftemperatur	400 °C
Axialbelastung	300 kp
Drehzahl	200 min ⁻¹

Totale Umdrehungszahl	$0,2 \cdot 10^6$
Sauerstoffkonzentration (vgl. 3.2)	< 22 ppm
Lagertyp	ähnl. 6207 (vgl. Abb. 1)

Tab. 4-1 gibt Auskunft über die tatsächlichen über die Versuchszeit gemittelten Daten. Die Regelabweichung von diesen Mittelwerten (vgl. 3.2) kann vernachlässigt werden.

Tab. 3-1 Versuchsintervalle (Definitionen gem. Abb. 10)

Vers. Nr.	Reinigungszeit (c) \bar{h}	Versuchszeit (d) \bar{h}	Hochtemp.-dauer (h) \bar{h}	Anzahl Unterbrechg. während (d)
1	3,5	18,3	23	0
2	5,5	16	48	1
3	4,0	16	37	0
4	3	16	34	0
5	4	16,3	21	0
6	6	15,5	34	0
7	5	16,2	37	0
8	4	7,7	23	1
9	4	x	60	einige ^x
10	5	10,3	52	2
11	6	15,2	52	1
12	6	15,2	52	1
13	4	14,6	52	1

x Sonderversuch (vgl. 4.1)

4. Versuchsergebnisse

4.1 Übersicht über die durchgeführten Versuche

Tab. 4-1 enthält die wesentlichen Angaben über Werkstoffkombination, Versuchsparameter, Verschleißgewicht und gemessenes Reibmoment für die insgesamt 15 durchgeführten Versuche. Die Versuche 0,1 und 0,2 sind als Vorversuche zur Erprobung der Vorrichtung anzusehen. Sie wurden mit Kugellagern aus dem üblichen Wälzlagerstahl durchgeführt und zeigten den erwarteten hohen Verschleiß. Damit wurden die schon von anderen Experimentatoren gewonnenen Erfahrungen bestätigt, daß Wälzlagerstähle für den Einsatz in Natrium bei höheren Temperaturen wegen des Härteverlustes ungeeignet sind. Diese beiden Experimente werden daher im folgenden nicht weiter diskutiert.

Bei den Versuchen Nr. 2 bis 13 (mit Ausnahme von Nr. 9) handelt es sich um Standardversuche mit annähernd gleichen Bedingungen, so daß an Hand des Verschleißes vergleichende Aussagen über die Eignung der fünf untersuchten Werkstoffkombinationen (vgl. Tab. 2-1) für weitere Parameterversuche möglich sind. Für jeden Werkstoff liegen somit Daten aus je zwei Versuchen, d.h. also von vier Kugellagern, vor.

Ursprünglich war eine höhere Axialbelastung von ca. 500 kp vorgesehen. Wegen des Kugelbruches im Versuch Nr. 1 wurde jedoch für die folgenden Läufe eine Last von nur 300 kp festgesetzt. Versuch Nr. 1 ist daher mit den übrigen nicht unmittelbar vergleichbar. Ebenso hatte Versuch Nr. 9 eine andere Zielsetzung, auf die in Abschnitt 4.2 eingegangen wird. Eine weitere Besonderheit stellt der Vers. Nr. 8 dar. Hier wurden Kugellager mit Käfig, also mit 10 ansatt 16 Kugeln verwendet. Der Kugelbruch bei ca. 80.000 Umdrehungen, der eine vorzeitige Beendigung erzwang, wird auf die höhere Wälzkörperbelastung zurückgeführt und kann daher nicht ohne weiteres dem Werkstoff Stellite angelastet werden. Außerdem entstammen diese Lager einem anderen Fertigungsprozeß (vgl. Abschnitt 2.2).

Im übrigen erreichten nahezu alle Lager die vorgesehene Umdrehungszahl von 200.000 mit mehr oder minder starker Beschädigung, die in den folgenden Abschnitten beschrieben ist.

4.2 Das Reibverhalten

Das Reibmoment wird in diesen Versuchen, bedingt durch die Konstruktion der Vorrichtung, stets für das Lagerpaar und nicht für ein Einzellager gemessen. Soweit sich angegebene Werte auf nur ein Lager beziehen, wurde dafür die Hälfte des Meßwertes angenommen.

Grundsätzlich kann man feststellen, daß das Reibmoment eine stark schwankende Größe ist und dies umso mehr, je stärker die Aufrauung der Lagerteile fortgeschritten ist. Ansich ist das nicht überraschend, denn das Lagerreibmoment wird durch den Abwälzvorgang von 16 Kugeln in 32 Berührungsstellen mit den Ringen sowie Reibung zwischen den Kugeln erzeugt, wobei infolge lokaler Formfehler der abwälzenden Flächen ständig eine Lastumverteilung an den Berührungsstellen und auch ein Wechsel der Rauigkeiten der Kontaktflächen erfolgen. Dementsprechend sind höherfrequente (> 10 Hz) statistische Reibmomentschwankungen vorhanden (die allerdings vom Meßsystem wegen der Trägheit nicht erfaßt werden können), ferner sind periodische Anteile mit Frequenzen in der Größenordnung der Wellendrehzahl erkennbar und schließlich treten auch langzeitige Schwankungen durch Zufallereignisse wie Ausbrechen und Zermahlen von Partikeln, begleitet von Oberflächenzerstörungen und Glättungen, auf. Ein Beispiel für solche unregelmäßigen, langzeitigen Schwankungen zeigt Abb. 11 am Originalschrieb des Reibmomentes im Versuch 11. Die Schriebbreite kennzeichnet die Amplitude der periodischen Schwankungen, die mit den Ring- bzw. Kugelumläufen korreliert zu sein scheinen. Eine Analyse hierzu ist beabsichtigt. Nur die Lager aus WC haben im Gegensatz zu allen anderen einen relativ gleichmäßigen Verlauf (Abb. 12). Insgesamt gesehen ist das Reibmoment daher nicht reproduzierbar und es wird z.Zt. keine Möglichkeit zur quantitativen Beschreibung der Zusammenhänge zwischen Reibmoment und Oberflächenbeschaffenheit gesehen. Betrachtet man jedoch nur den langzeitlichen Mittelwert des Reibmoments, so gibt dieser sehr wohl einige Aufschlüsse über den Zustand der Lager. Abb. 13 zeigt den langzeitigen Reibmomentverlauf (ohne die höherfrequenten Anteile) über die Versuchszeit für die fünf untersuchten Werkstoffpaarungen. So global gesehen, und dies dürfte im wesentlichen den Konstrukteur interessieren, ist die Reproduzierbarkeit bei gleichem Werkstoff hinreichend gut.

Bei allen Werkstoffen ist eine Erhöhung des Reibmomentes von einem sehr niedrigen Anfangswert (ca. 1 kpcm), der nur wenig größer als die Ansprechgrenze des Meßsystems ist, auf einen nahezu stationären Wert von 8 bis 12 kpcm während der ersten 1000 bis 5000 Umdrehungen festzustellen. Die Ursache für diesen schnellen Reibmomentanstieg um etwa den Faktor 10 ist noch ungeklärt. Es gibt jedoch Anzeichen dafür, daß sie nicht allein auf eine bereits beginnende Aufrauung zurückzuführen ist. Die Lagerringe aus Wolframkarbid haben nämlich insgesamt sogar eine Glättung während des Versuches erfahren (vgl. 4.3.3), obwohl auch hier die deutliche Reibmomentzunahme in der Anfangsphase vorhanden ist. Möglicherweise ist die Ursache in einer plastischen Verformung der abwälzenden Körper bei den ersten Überrollungen zu suchen, wodurch die Schmiegun g der Kontaktflächen und damit die mikroskopische Gleitreibung verändert werden. Für die Anwendung von Kugellagern in Natrium dürfte nur der Reibbeiwert nach dem Einlaufvorgang Bedeutung haben und nicht der sehr niedrige Anfangswert. Übrigens stimmt dieser sehr gut mit Meßergebnissen aus Vorversuchen an ähnlichen Lagern bei Raumtemperatur in Wasser überein.

Bei den Lagern aus Werkzeugstahl (BG 42 und DMo5) und Stellite (Virium 11/12) steigt das Reibmoment nach ca. 100 000 Umdrehungen relativ schnell um den Faktor 2 bis 4 an und erfährt starke langzeitige Schwankungen (Abb. 13). Diese Lager zeigen auch einen erheblichen Verschleiß nach Versuchsende, so daß man annehmen muß, daß die plötzliche Reibmomentzunahme den Beginn einer Verschleißpropagation durch Transport und Zermahlen von abgeriebenen Partikeln darstellt. Das Ende der Lebensdauer ließe sich dann als der Zeitpunkt oder die Umdrehungszahl, bei welchem die Reibmomentkurve von dem quasi stationären Wert abbiegt, definieren (vgl. Abschnitt 5.1). Diese Frage erhält besondere Bedeutung bei den anschließenden Parameteruntersuchungen.

Zur Veranschaulichung des Reibmomentes wird bei Wälzlagern oft auch die Reibungszahl μ nach der Definitionsgleichung (1) angegeben

$$\mu = \frac{2M}{dF_a} \quad (1)$$

Hierin bedeuten M das Reibmoment für ein Lager, d der Bohrungsdurchmesser und F_a die Axiallast. μ ist als der Vergleichswert zu dem Reibbeiwert eines entsprechenden Gleitlagers aufzufassen. Z.B. er-

gibt sich aus den Versuchen 6 und 7 für Wolframkarbidlager nach 200.000 Umdrehungen eine Reibungszahl von 0,012, die etwa um den Faktor 30 bis 50 kleiner ist als der Gleitreibungskoeffizient für verschleißfeste Werkstoffpaarungen in Natrium [1].

In einem Zusatzversuch (Nr. 9) wurde das Reibmoment eines fast neuen Lagerpaares bei verschiedenen Drehzahlen und Axiallasten gemessen. In Abb. 14 ist das nach einer Betriebsdauer von 10.000 bis 15.000 gelaufene Umdrehungen aufgenommene Kennfeld dargestellt. Ohne eine allgemeine Gültigkeit dieses Stichprobenexperimentes ableiten zu wollen, wird hiermit bestätigt, daß das Reibmoment stark drehzahlabhängig ist. Es fällt mit zunehmender Drehzahl zunächst sehr stark, bei mittleren Drehzahlen (200-400 min^{-1}) nur noch wenig ab. Diese Erscheinung, die von der Theorie über die Ausbildung von hydrodynamischen Schmierfilmen bekannt ist, wurde auch an Wälzlagern bei Öl- und Fettschmierung [2] sowie bei eigenen Vorversuchen mit Wasserschmierung gefunden. Sie wird bei der Beurteilung des Einflusses der Drehzahl auf die Lebensdauer von Bedeutung sein.

4.3 Verschleiß

Der Verschleiß soll hier nach drei Gesichtspunkten bewertet werden, nämlich a) nach dem Gewichtsverlust der Lagerteile, b) nach der makroskopischen Veränderung der Laufflächen, die sich beispielsweise in einer Einlauftiefe (vgl. 3.2) ausdrückt, und c) nach der mikroskopischen Veränderung der Laufflächen (Aufrauungen, Ausbrüche, Risse). Diese drei Bestimmungsgrößen ergänzen sich gegenseitig. Die erste ist bei starkem Verschleiß leicht meßbar und gestattet einen integralen Überblick und damit einen groben Vergleich. Demgegenüber ist die mikroskopische Veränderung der Laufflächen für die Beschreibung von sehr kleinen Schädigungen geeignet, jedoch nur schwer quantifizierbar. Dazwischen liegt die Bewertung der Schädigung nach den makroskopischen Veränderungen. Diese sind bei mäßigem Verschleiß relativ gut meßbar (Profilschriebe, Einlauftiefe). Bei den hier vorliegenden Vergleichsversuchen zur Werkstoffauswahl trat ein sehr weites Spektrum des Verschleißes hinsichtlich der Stärke und der Erscheinungsformen auf, so daß die Auswertung nach allen drei Kriterien in jeweils angemessenem Umfang erfolgte.

4.3.1 Verschleißgewicht

Es wird davon ausgegangen, daß das Verschleißgewicht gleich der Gewichtsdifferenz der Lagerteile, gemessen vor und nach dem Versuch, ist. Andere Einflüsse wie Korrosionsabtrag oder Natriumaufnahme in evtl. vorhandenen Poren können bei dieser Betrachtung vernachlässigt werden.

Abb. 15 zeigt einen Vergleich der gemessenen Verschleißgewichte für jeweils vier Kugellager aus den fünf untersuchten Werkstoffen, die einem Standardversuch mit den in 3.4 angegebenen Parametern ausgesetzt waren. Betrachtet man für jeden Werkstoff die Mittelwerte, so läßt sich folgendes Ergebnis feststellen:

- Den eindeutig geringsten Verschleiß zeigen die Lager aus Hartmetall GT 10/20 mit ca. 2 mg/Lager. ^x
- Der Verschleiß der Lager aus Ferro-Titanit ist ebenfalls relativ gering aber immerhin um eine Größenordnung höher als bei den Hartmetallagern.
- Den höchsten Verschleiß weisen die Lager aus den Stählen BG 42, DMo5 und aus der Stellitekombination mit Mittelwerten von 668, 98 bzw. 218 mg/Lager auf.

Die Streuung der Verschleißgewichte innerhalb einer Werkstoffgruppe ist, wie bei den meisten Verschleißversuchen, relativ groß. Sie erstreckt sich bei den stark verschlissenen Lagern über mehr als eine Zehnerpotenz (Abb.15). Diese großen Abweichungen werden im wesentlichen darauf zurückgeführt, daß die Verschleißrate an einem Lager während des Versuchsintervalls nicht konstant ist, sondern i.a. bei Erreichen einer gewissen Schädigung mit zunehmender Umdrehungszahl stark progressiv anwächst. Das Verhalten des Reibmomentes (vgl. 4.2, Abb. 13) deutet darauf hin, daß diese kritische Schädigung bei den hier untersuchten Stahl- und Stellitelagern und unter den gewählten Versuchsbedingungen bei ca. 10^5 Umdrehungen liegt, d.h. nach Ablauf der halben Versuchszeit. Im weiteren Verlauf wird der Verschleiß von

x Dieser Wert ist nach den Ergebnissen von Fortsetzungsversuchen mit denselben Lagern sogar noch zu hoch gemessen worden.

nicht erfaßbaren Zufallereignissen (Ausbrechen und Mitschleppen von Partikeln, Rissen, Härteschwankungen, Geometriefehlern) beeinflußt, so daß entsprechend das Endergebnis stark schwankt.

In Abb.16 ist nochmals die Gewichtsabnahme für die Stahl- und Stellite-Kugellager dargestellt, diesmal aufgeschlüsselt nach der Gewichtsabnahme der einzelnen Lagerteile. Auch hierin spiegeln sich deutlich die Verschleißschwankungen bei Versuchen mit gleichen nominellen Bedingungen wieder. Es läßt sich daraus ablesen, daß i.a. der Innenring (IR) stärker beschädigt wurde als der Außenring (OR). Berücksichtigt man, daß die größere Gewichtsabnahme bei den IR sich im Vergleich zu den OR auf eine kürzere Laufbahnlänge verteilt, dann wird deutlich, daß die makroskopische Schädigung der Innenringlaufbahn wesentlich stärker ist als die der OR-Laufbahn.

Es wurde untersucht, ob ein Zusammenhang zwischen dem Verschleißgewicht und der Laufbahnform der Ringe im Neuzustand erkennbar ist.

Bei den hier aufgetretenen Schwankungsbereichen der Laufbahnrauheit (ca. 0,02-0,12 µm), der Differenz zwischen Rillanradius und Kugelradius (195-280 µm) sowie der Welligkeit der Laufbahn in Umfangsrichtung (0,25-2,75 µm) konnte keinerlei Zusammenhang zwischen diesen und dem Verschleißgewicht bei Versuchsende festgestellt werden. (Die Hartmetallager wurden aus dieser Betrachtung herausgelassen, da hierbei die Meßgenauigkeit der Gewichtsbestimmung in der Größenordnung des Meßwertes selbst lag.)

Gelegentlich wird in Analogie zu Gleitreibungsversuchen eine spezifische Verschleißrate w nach Gl.(2) definiert

$$w = \frac{V}{s \cdot F} \quad (\text{cm}^3/\text{cmkp}), \quad (2)$$

die das Abriebvolumen V auf den Reibweg bzw. hier den Abwälzweg s der Kugeln und die Normalkraft F bezieht (vgl. Anhang A). Obwohl die Angabe einer solchen Verschleißrate wegen der oben erwähnten Nichtlinearität zumindest bei starkem Verschleiß nicht sehr sinnvoll ist, gibt sie doch eine grobe Vergleichsmöglichkeit zu Versuchen mit unterschiedlichen Parametern. Die in dieser Versuchsphase enthaltenen Verschleißraten sind, gemittelt für jeden Werkstoff, als Funktion der Härte bei Raumtemperatur ^x in Abb. 17 dargestellt. Zum Vergleich

x Besser wäre die Verwendung der Härtewerte bei Prüftemperatur. Diese sind nicht bekannt, dürften aber bei 400 °C noch nicht wesentlich von den Werten bei RT verschieden sein.

sind auch die Ergebnisse von Takeo et.al. [9] übernommen worden. Man erkennt den eindeutigen Trend zu kleineren Verschleißraten mit steigender Härte. Der Vorteil des Hartmetalls GT 10/20 tritt hier mit rund zwei bis drei Zehnerpotenzen gegenüber den übrigen Werkstoffen noch deutlicher in Erscheinung als bei der Betrachtung des Verschleißgewichtes.

4.3.2 Makroskopische Laufflächenveränderungen

Ein einfach zu bestimmendes und für die praktische Beurteilung der Lagerschädigung sehr anschauliches Maß ist die Einlauftiefe in der Definition gemäß 3.2, also gemessen für das Lagerpaar. Es läßt sich keine allgemeingültige Toleranzgrenze für die Einlauftiefe angeben, bis zu der ein Kugellager noch als funktionsfähig angesehen werden kann. Aufgrund praktischer Erfahrungen und unter Berücksichtigung von Laufgeräuschen und des allgemeinen Verschleißbildes läßt sich diese zulässige Einlauftiefe jedoch in der Größenordnung von 20 bis 50 µm annehmen. So gesehen sind von den untersuchten Lagern nur die Lager aus Hartmetall GT 10/20 mit einer Einlauftiefe von weniger als 10 µm noch als funktionsfähig anzusehen (Abb. 18). Die Lager aus den übrigen Werkstoffen liegen mit Einlauftiefen von 70 µm bis zu 650 µm deutlich oberhalb der Toleranzgrenze.

Obige Aussage wird durch die Photographien von den Kugeln und Ringlaufbahnen (Abb. 19 u. 20) veranschaulicht. Abb. 19 zeigt typische Verschleißmarken an Kugeln nach $0,2 \cdot 10^6$ Lagerumdrehungen; und zwar ist für jeden der fünf untersuchten Werkstoffe eine Serie von vier unterschiedlichen Verschleißgraden, aus jeweils demselben Lager stammend, dargestellt. Die Bildfolge macht deutlich, wie unterschiedlich der Verschleiß an den Kugeln, selbst innerhalb desselben Lagers, sein kann. In der Relation entsprechen diese Verschleißmarken in etwa den in Abb. 15 dargestellten Gewichtsabnahmen. Mit Ausnahme des Hartmetalls GT 10/20 haben sich bei allen übrigen Werkstoffen Auflaufspuren unterschiedlichen Ausmaßes durch Reibung der Kugeln aneinander gebildet, die oft mit bloßem Auge sichtbar sind und teilweise eine konkave Form angenommen haben (vgl. Abb. 19, Aufnahme 1d, 2d, 3d). Neben dieser Auflaufspur zeigt sich meist ein Gürtel mit relativ starken Aufrauungen vom Abwälzvorgang auf der Laufbahn. Diese deutliche Laufspur-

bildung beweist, daß viele Kugeln eine feste Drehachse über einen weiten Versuchszeitraum beibehalten. Andererseits gibt es Kugeln mit einer annähernd gleichmäßigen Aufrauung über die gesamte Oberfläche (Abb. 19, Aufn. 1a, 2a, 3a). Die Ursache für dieses ungleiche Verhalten konnte bisher nicht geklärt werden. Denkbar wäre eine Unrundheit einzelner Kugeln in Form eines Ellipsoides, jedoch ließen nachträglich aufgenommene Durchmesserformschriebe an zwei Kugeln aus Hartmetall mit mikroskopisch sichtbaren Laufspuren keine Durchmesserunterschiede erkennen.

Ein ähnliches Bild ergibt sich für die Laufbahnen der Ringe (Abb. 20). Dargestellt sind für jeden Werkstoff Laufbahnausschnitte von Außen- und Innenringen, jeweils einer mit relativ geringem und einer mit relativ starkem Verschleiß. Die Ringe der Lager aus Werkzeugstahl, Chromstahl und Stellite weisen größtenteils eine breite Laufspur mit starker Aufrauung auf (Abb. 20, Aufn. 1b, 2b, 3b, 1d, 2d, 3d). In Einzelfällen ist die Laufrille so stark abgerieben und teilweise deformiert, daß sich an der Rillenkante ein Grat gebildet hat (Abb. 20, Aufn. 2d, 3c). Im Gegensatz dazu erkennt man an den Ringen aus Hartmetall eine 2 bis 3 mm breite Laufspur, die im Vergleich zu der Originalschlifffläche, abgesehen von örtlichen Riefen, insgesamt eine Glättung erfahren hat (Abb. 20, Aufn. 5a, b, c, d). Bei diesen Lagerteilen und z.T. auch bei den Ringen aus Ferro-Titanit kann man noch nicht von einer makroskopischen Veränderung sprechen. Vielmehr sind hier die Beschädigungen nur mikroskopisch erkennbar und daher im nächsten Abschnitt 4.3.3 beschrieben.

Bemerkenswert ist der geringe Verschleiß des Lagers 9/9 aus DMo5 nach dem Versuch Nr. 3 und anderer vereinzelter Lagerteile. (Aus noch nicht geklärten Gründen wurden teilweise sogar geringe Gewichtszunahmen gemessen, vgl. Abb. 16). Diese Unterschiede bei gleichen nominellen Bedingungen deuten darauf hin, daß die Tragfähigkeit eines in Natrium betriebenen Kugellagers eine instabile Größe ist, d.h. ein Schaden von einer kritischen Größe propagiert sehr schnell. Es ist jedoch in keinem Falle ein plötzliches totales Versagen des Lagers (Blockieren) eingetreten. Vielmehr hat sich der Zustand des Lagers qualitativ sehr deutlich in dem hörbaren Laufgeräusch ausgedrückt. Es erscheint aus-

sichtsreich, für weitere Versuche die Geräuschanalyse für die Beurteilung der Lager während des Versuches heranzuziehen.

4.3.3 Mikroskopische Laufflächenveränderungen

Hierunter sollen alle Schädigungen oder Veränderungen an den Ringlaufbahnen und Kugeln verstanden werden, die noch keinen wägbaren Verschleiß und keine Beeinträchtigung der Laufgenauigkeit zur Folge haben. Sie sind i. a. mit bloßem Auge nicht sichtbar. Die Untersuchung beschränkt sich in diesem Stadium noch auf eine zerstörungsfreie Oberflächenprüfung. Nur bei den Lagern aus Hartmetall (WC) und in beschränktem Umfang bei den Ferro-Titanit-Lagern war wegen des geringen Verschleißes diese Kontrolle, besonders auch im Hinblick auf die Verfolgung der Schädigung bei weiteren Versuchen, sinnvoll. Die Ergebnisse sind im folgenden zusammengefaßt.

4.3.3.1 Tragbild der Ringe aus Hartmetall nach den Vers. 6 und 7

Die Betrachtung mit dem Stereomikroskop bei 10 bis 40-facher Vergrößerung läßt auf den Laufbahnen der Ringe die Oberflächenmerkmale a bis d (Tab. 4-2) unterscheiden. Es handelt sich also im wesentlichen um breite, geglättete Laufspuren (Merkmal b) mit beginnenden Beschädigungen in Form von örtlichen Aufrauungen oder kleinen Ausbrüchen unterschiedlichen Ausmaßes. Die einzelnen Marken treten bei den Innen- und Außenringen in sehr unterschiedlicher und über den Umfang wechselnder Stärke auf. Die Abb. 21 zeigt die Schadenskarten der Ringlaufbahnen als Abwicklung für die Lager 1/1C, 2/2C, 4/4C und 5/5C nach den Versuchen 6 bzw. 7. Deutlich erkennbar ist darauf eine Höhenschwankung über den Umfang, d. h. die Laufspuren sind teilweise nicht genau achsnormal. Eine schiefe Lagerbelastung kann als Ursache hierfür nicht ausgeschlossen werden.

Betrachtet man das Querprofil der Laufflächen im Neuzustand^x, dann fällt auf, daß die relativ starken Beschädigungen vom Typ d, meistens auf Wellenbergeliegen (z. B. an den Innenringen (IR) IR1C, IR2C, IR4C und an dem Außenring (OR) OR5C, vgl. Abb. 21), wo die Hertz'sche Pressung sehr hoch ist. Allgemein ist die Schädigung an den IR etwas größer als an den OR, da bei den OR die Zahl der Überrollungen pro Wellenumdrehung um den Faktor 0,693 geringer ist.

x Das Querprofil der Laufbahnen ist in Abb. 21 als Abweichung von der Kreisform dargestellt.

Der Berührungswinkel ist aus dem Tragbild nicht eindeutig bestimmbar. Definiert man jedoch als Berührungslinie zwischen Kugel und Laufbahn die Mittellinie der Laufspur (Merkmal b), dann läßt sich der Berührungswinkel aus der Lage dieser Mittellinien auf dem Innen- und Außenring sehr einfach graphisch ermitteln. Es ergeben sich dann die in Tab. 4-4 verzeichneten Werte von 16 bis 20 Grad. Die Tabelle enthält auch Angaben über die Breite der Laufspur, die im Mittel zwischen 1,6 und 3 mm schwankt.

4.3.3.2 Tragbild der Kugeln aus Hartmetall nach den Vers. 6 und 7

An den Kugeln K1C, K2C, K4C und K5C wurden bei der mikroskopischen Betrachtung die Oberflächenstrukturen k) bis m) gemäß Tab. 4-3 beobachtet.

Während die unter dem Merkmal m in Tab. 4-3 beschriebenen Eindrückungen nur sehr vereinzelt auftreten und nicht als Verschleißerscheinungen angesehen werden können, stellen die unter l) beschriebenen Pittings (s. Tab. 4-3) eine beginnende Schädigung des Lagers dar. Sie treten in sehr unterschiedlicher räumlicher Verteilung auf, z.B. annähernd gleichmäßig über die ganze Kugeloberfläche verteilt, konzentriert auf einen umlaufenden bzw. auch auf zwei sich kreuzende Gürtel von 0,5 bis 1 mm Breite oder auch verstreut auf einen umlaufenden Gürtel von 3 bis 4 mm Breite. Die Pittinggröße bleibt i.a. unter 0,1 mm; nur vereinzelt treten auch größere Abplatzungen bis zu ca. 0,3 mm Durchmesser auf. Diese Tragbilder zeigen, daß einige Kugeln eine feste Drehachse beibehalten, während andere Kugeln innerhalb desselben Lagers ihre Drehachse im Laufe des Versuches verändern. Die beobachteten Merkmale auf den Kugeln sind in Tab. 4-5 zusammengestellt, wobei die Kugeln eines Lagers durch ihr Eigengewicht identifiziert werden (Nr. 1 ist die schwerste Kugel). Allgemein läßt die Tabelle erkennen, daß innerhalb eines Lagers stets eine der o.g. räumlichen Verteilungen der Pittings vorherrscht, d.h. daß hier offenbar die Laufbahnform der Ringe einen Einfluß haben muß. Auch die Stärke der Pittingbildung ist innerhalb eines Lagers relativ gleichmäßig, bei den einzelnen Lagern jedoch sehr unterschiedlich. So ist die Schädigung bei den Kugeln K1C am weitesten fortgeschritten und bei den Kugeln K5C am geringsten. Ein Zusammenhang zwischen der Kugelschädigung und den Tragbildern für die Ringe ist nicht zu erkennen.

4.3.3.3 Tragbild der Ringe aus Ferro-Titanit (WF 13,5) nach den Vers. 11 und 12

Die Tragbilder der Innenringe unterscheiden sich im Prinzip nicht von denen der Außenringe, so daß sie hier zusammen diskutiert werden können. Abb. 22 zeigt die Schadenskarten für die Ringlaufbahnen der Lager 2/2B, 3/3B, 4/4B, und 5/5B nach $0,2 \cdot 10^6$ Umdrehungen. Alle Ringe weisen eine aufgerauhte Laufspur von ca. 2,5 bis 3,2 mm Breite auf (Merkmal b in Abb. 22). Die Aufrauung ist an den Rändern der Laufspur geringer und nimmt zur Mitte hin zu, wobei die stärkste Aufrauung in vielen Fällen in zwei Streifen symmetrisch zur Laufspurmitte auftritt (z.B. IR3B, IR4B, IR5B, OR5B, vgl. Merkmal c in Abb. 22). Diese Erscheinung steht im Gegensatz zu dem Tragbild der Lager aus Hartmetall, bei denen die Laufspur durch eine Glättung gekennzeichnet ist, und sie erklärt auch das erhöhte Reibmoment. Die hier vorliegende Aufrauung scheint nicht durch Pittingbildung (also Ermüdung), sondern durch Abrieb entstanden zu sein.

Neben diesen eindeutigen Verschleißmarken wurden noch lokale Oberflächenveränderungen beobachtet, die nicht unmittelbar auf Verschleiß zurückzuführen sind. Es handelt sich bei einem Typ um bräunliche Flecken, die vermutlich durch Korrosion, evtl. erst nach dem Ausbau der Lager aus der Versuchsvorrichtung, entstanden sind. Ferner treten offene Poren auf, die offenbar vom Herstellungsprozeß herrühren. Ihre scharfkantige Berandung läßt darauf schließen, daß sie nicht als "Verschleißkeime" wirksam waren. Die Projektionsfläche der Poren (bis ca. 0,2 mm Durchmesser) ist um etwa zwei Größenordnungen kleiner als die beim Abrollen gebildete Kontaktfläche zwischen Kugel und Ring.

Insgesamt ist das Verschleißbild bei allen vier Lagern relativ einheitlich. Auch innerhalb eines Ringes ist die Laufspur gleichmäßig und nahezu achsennormal. Definiert man als Berührungslinie zwischen Kugel und Laufbahn die Mittellinie der Laufspur, zu der übrigens das Rauheitsmuster in den meisten Fällen symmetrisch verläuft, so ergeben sich für den Berührungswinkel Werte von 20 bis 25° (Tab. 4-4) gegenüber ca. 15° im Neuzustand.

4.3.3.4 Tragbild der Kugeln aus Ferro-Titanit (WF 13,5) nach den Vers. 11 und 12

Die Oberflächenschäden an den Ferro-Titanit-Kugeln waren wesentlich vielfältiger als bei den Hartmetall-Kugeln (vgl. auch Abb. 19). Sie

lassen sich daher nicht in das für die Hartmetall-Kugeln aufgestellte Schema einordnen. Vereinfacht lassen sich die Merkmale wie folgt beschreiben.

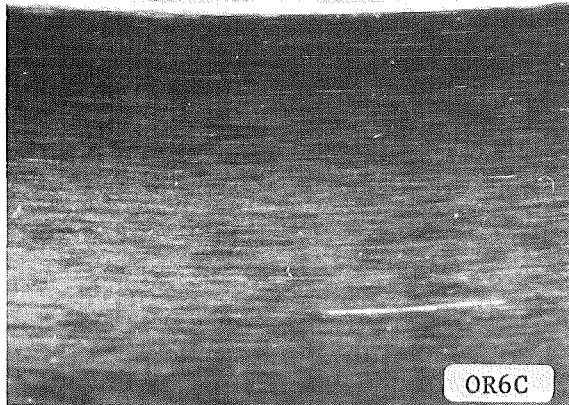
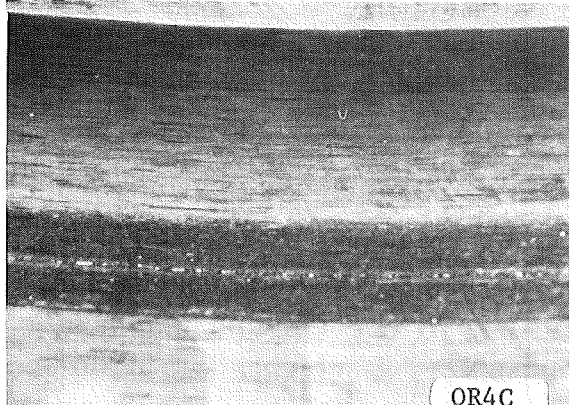
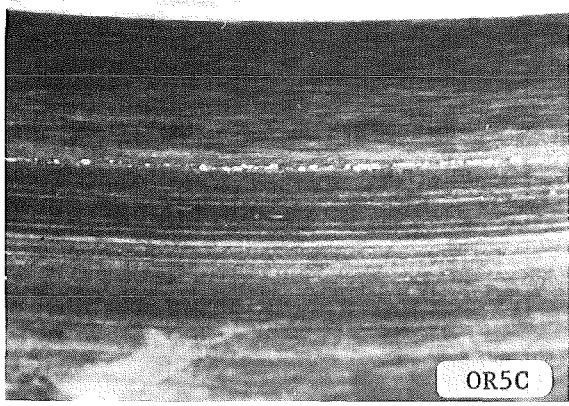
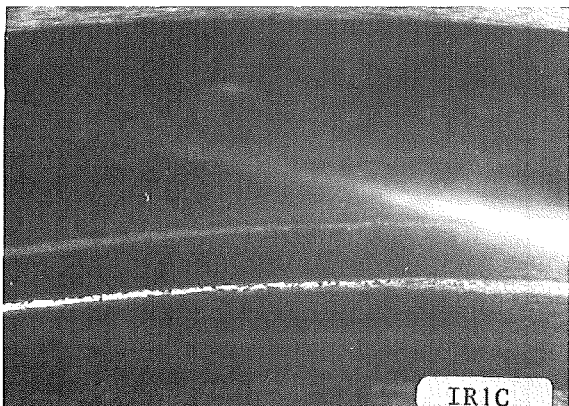
Die Kugeloberfläche hat eine Grundstruktur, die mit Ausnahme von Bereichen mit lokalen Fehlern die ganze Oberfläche bedeckt. Der Rauheitsgrad dieser Grundstruktur ist bei den einzelnen Kugeln sehr unterschiedlich und reicht von $Ra \approx 0,01 \mu\text{m}$ (hochglänzend) bis $Ra \approx 0,2 \mu\text{m}$ (matt). Daneben treten vor allem 2 bis 4 mm breite gürtelförmige Laufspuren auf, deren Mittellinien in geringem Abstand neben dem Kugeläquator verlaufen. Das Rauheitsmuster ist meist symmetrisch zu diesen Mittellinien und zeigt, ähnlich wie bei den Ringen, zwei parallele Streifen mit der stärksten Aufrauung. Dazwischen, also in der Mitte der Laufspur, befindet sich i.a. ein glatterer Gürtel oder in Einzelfällen auch eine konkave Auflaufspur, die durch Reibung an benachbarten Kugeln verursacht worden ist. Weitere Merkmale, wie poröse Bereiche, größere Poren, Eindrückungen sind weniger verschleißbedingt.

In der Grundstruktur tritt der stärkste Aufrauungsgrad bei den Lagern K2B und K4B bei ca. 50 % der Kugeln auf, hingegen bei den Lagern K3B und K5B gar nicht. Demgegenüber ist die Gürtelbildung bei den letzteren im Mittel deutlicher ausgeprägt, so daß die Gesamtschädigung der Kugelsätze in etwa ausgeglichen ist. Wie auch in anderen Versuchen zeigt sich hier wieder, daß ein Teil der Kugeln (ca. 60 %) eine feste Drehachse während des Versuches im wesentlichen beibehält.

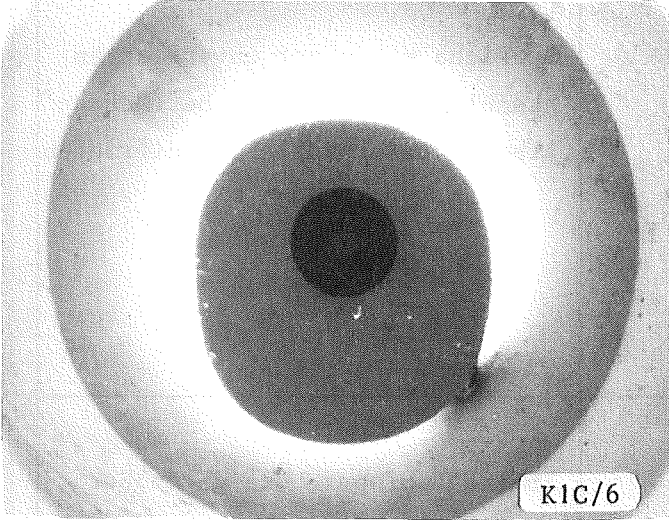
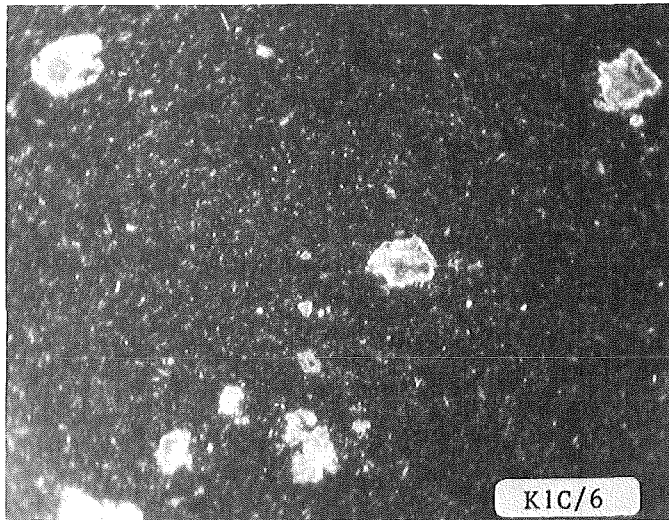
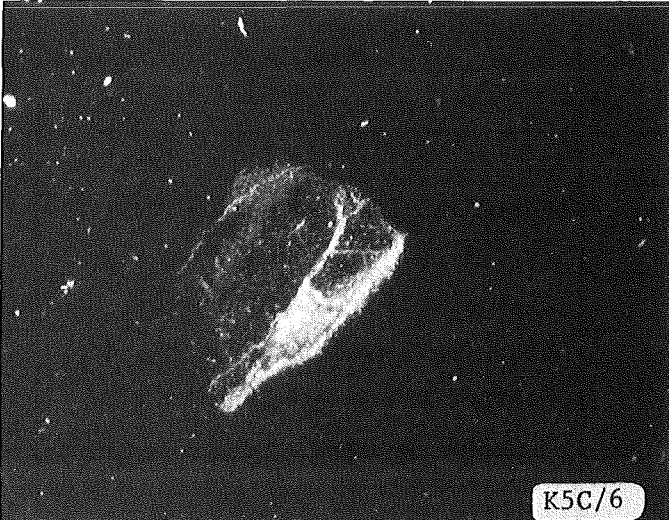
Die "porösen" Bereiche treten in geringer Zahl (etwa 0 bis 5 pro Kugel), regellos verteilt und mit sehr unterschiedlicher Stärke auf. An diesen Stellen wurden einige Tage nach dem Ausbau der Lager "ausgeschwitzte" Natriumrückstände gefunden, die sich beim Reinigen in den Poren verborgen hatten. Es ist bisher nicht geklärt, ob dieses Offenlegen von Poren bzw. die verstärkte Aufrauung eine Folge von Korrosion oder von Verschleiß ist. Jedenfalls muß bei diesem Werkstoff das Korrosionsverhalten stärker beachtet werden.

Eine ausführlichere Beschreibung des Tragbildes der Ferro-Titanit-Lager befindet sich im Anhang B.

Tab. 4-2 Typische Oberflächenmerkmale auf den Laufbahnen der Lager aus Hartmetall (WC) nach $0,2 \cdot 10^6$ Umdrehungen ($T = 400^\circ\text{C}$, Axiallast $F_a = 300 \text{ kp}$, Drehzahl $n = 200 \text{ min}^{-1}$)

Merkmal Typ	Merkmalbeschreibung	Typisches Beispiel (Vergrößerung 10:1)
a	Bereiche mit einer unverletzten geschliffenen Oberfläche (Neuzustand), vereinzelte Schleifriefen	 <p style="text-align: right;">OR6C</p>
b	Breite Laufspur, die gegenüber a ein poliertes (glattgewalztes) Aussehen hat; Grenze zwischen a und b nicht immer scharf ausgeprägt	 <p style="text-align: right;">OR4C</p>
c	Streifenförmige Aufrauung innerhalb von b, vermutlich noch nicht geglättete Reste von a, bis zu ca. 0,3 mm breit	 <p style="text-align: right;">OR5C</p>
d	Kette von kleinen Ausbrüchen (< 0,1 mm), die in frühem Stadium noch unzusammenhängend sind (vgl. Aufnahme bei b), in fortgeschrittenem Stadium eine "Furche" bilden	 <p style="text-align: right;">IR1C</p>

Tab. 4-3 Typische Oberflächenmerkmale auf den Kugeln der Lager aus Hartmetall (WC) nach $0,2 \cdot 10^6$ Umdrehungen ($T = 400^\circ\text{C}$, Axiallast $F_a = 300 \text{ kp}$, Drehzahl $n = 200 \text{ min}^{-1}$)

Merkmal	Merkmalbeschreibung	Typisches Beispiel
k	<p>Bereiche mit glatter, polierter Oberfläche; bei 40-facher Vergr. keinerlei Kratzspuren oder sonstige Fehler erkennbar; hochglänzend; vom Neuzustand nicht unterscheidbar.</p> <p>(10-fach)</p>	 <p>K1C/6</p>
l	<p>Kleine Vertiefungen oder Aufrauungen von geringer Tiefe und sehr unterschiedlicher Größe (meist $< 0,1 \text{ mm}$ Dmr.), Häufigkeit und räumlicher Verteilung (vgl. Tab. 4-5); das Aussehen lässt auf schuppenförmige Abplatzungen (Pittings) schließen.</p> <p>(200-fach)</p>	 <p>K1C/6</p>
m	<p>Eindrückungen von ca. $0,1$ bis $0,2 \text{ mm}$ Dmr.; vermutlich durch eine oberflächennahe Pore hervorgerufen; nur sehr vereinzelt (bis zu 3 Stück je Kugel) auftretend.</p> <p>(200-fach)</p>	 <p>K5C/6</p>

Tab. 4-4 Breite der Laufspur und Berührungswinkel für die Lager aus Hartmetall und Ferro-Titanit nach $0,2 \cdot 10^6$ Umdrehungen

Hartmetall (WC) nach den Vers. 6 und 7

Lager-Nr.	Ring-Nr.	Breite der Laufspur (mm)	Berührungswinkel α ($^\circ$)
1/1C	IR1C	2,5-3,5	16
	OR1C	1,5-1,8	
2/2C	IR2C	2,6-3,4	20
	OR2C	1,9-2	
4/4C	IR4C	2,5-2,8	16
	OR4C	1,5-1,7	
5/5C	IR5C	2,1-2,3	20
	OR5C	2,0-2,1	

Ferro-Titanit (WF 13,5) nach den Vers. 11 und 12

Lager-Nr.	Ring-Nr.	Breite der Laufspur (mm)	Berührungswinkel α ($^\circ$)
2/2B	IR2B	3,2	23
	OR2B	3,0	
3/3B	IR3B	2,4	20
	OR3B	2,7	
4/4B	IR4B	3,2	25
	OR4B	3,1	
5/5B	IR5B	2,6	23
	OR5B	2,8	

Tab. 4-5 Oberflächenmerkmale an den Kugeln aus Hartmetall (WC) nach den Versuchen 6 und 7

Kugelsatz Nr.	Merkmal	k	l								m
			Pittingbildung								
Kugel Nr.		Bereiche mit glatter polierter Oberfläche	gleichmäßig verteilt, < 0,1 mm	auf Gürtel 3-4 mm breit < 0,1 mm Dmr.	auf Gürtel 0,5-1 mm breit, < 0,1 mm Dmr.	auf 2 Gürteln 0,5-1 mm breit, < 0,1 mm Dmr.	vereinzelte grobe Pittings bis 0,3 mm Dmr.	fast keine Pittingbildung vorhanden	frühes Stadium der Pittingbildung	deutliche Pittingbildung	vereinzelte eingedrückte Poren 0,1-0,2 mm Dmr.
K1C	1	x	x							x	
	2	x	x							x	
	3	x	x							x	
	4	x	x							x	
	5	x	x							x	
	6	x		x						x	
	7	x	x							x	
	8	x	x	x						x	
	9	x	x	x						x	
	10	x	x							x	
	11	x		x						x	
	12	x	x							x	
	13	x	x							x	
	14	x							x		
	15	x		x						x	
	16	x		x						x	
K2C	1	x					x			x	x
	2	x	x							x	
	3	x							x		
	4	x					x			x	
	5	x							x		
	6	x	x							x	x
	7	x	x							x	
	8	x							x		x
	9	x	x					x		x	x
	10	x	x					x		x	x
	11	x							x		x
	12	x	x							x	
	13	x	x							x	x
	14	x							x		x
	15	x	x							x	x
	16	x	x							x	x
K4C	1	x			x					x	x
	2	x			x					x	
	3	x			x					x	
	4	x			x					x	
	5	x					x			x	
	6	x							x		x
	7	x								x	
	8				x					x	
	9	x								x	
	10	x								x	
	11	x				x				x	x
	12	x				x				x	
	13	x				x				x	x
	14	x				x				x	x
	15	x				x		x		x	x
	16	x					x			x	
K5C	1	x							x		x
	2	x							x		
	3	x							x		x
	4	x							x		
	5	x							x		
	6	x							x		
	7	x							x		
	8	x							x		x
	9	x						x			
	10	x						x			x
	11	x							x		x
	12	x							x		x
	13	x							x		x
	14	x							x		
	15	x						x			x
	16	x						x			x

5. Diskussion der Versuchsergebnisse

5.1 Vergleich der untersuchten Werkstoffe

Von den fünf untersuchten Werkstoffkombinationen (Tab. 2-1) hat das Hartmetall in bezug auf Reibung und Verschleiß unter den hier vorherrschenden Versuchsbedingungen eindeutig die günstigsten Ergebnisse erbracht. Der Gesamtzustand der Hartmetallager nach $0,2 \cdot 10^6$ Umdrehungen und der gleichförmige Verlauf des Reibmomentes (Abb. 12) lassen darauf schließen, daß das Ende der Lebensdauer noch längst nicht erreicht ist. Vielmehr erwecken die Laufbahnen den Eindruck, als sei der Einlaufvorgang bei diesen Lagern noch nicht abgeschlossen. Tatsächlich hat sich in Fortsetzungsversuchen gezeigt, daß die zunächst noch erkennbaren rauheren Streifen auf den Ringlaufbahnen (Typ c gemäß Tab. 4-2) mit zunehmender Laufzeit teilweise verschwanden, und es wurden in der Zwischenzeit mit diesen Lagern $4 \cdot 10^6$ Umdrehungen erreicht. So viel sei im Vorgriff auf die nächste Versuchsphase hier angemerkt.

Im Gegensatz dazu ist bei den Lagern aus Werkzeugstahl (DMo5), Chromstahl (BG 42) und Stellite die Lebensdauer mit $0,2 \cdot 10^6$ Umdrehungen bereits überschritten. Der Verschleiß, u.a. erkennbar am rauhen Laufgeräusch, ist hierbei nicht mehr tolerierbar. In relativ gutem Zustand waren die Lager aus Ferro-Titanit nach dem Standardversuch, auch wenn sich hier schon ein deutlich meßbarer Verschleiß zeigte, der sich in zwei Fortsetzungen zu den Versuchen 11 und 12 um weitere $0,2 \cdot 10^6$ Umdrehungen bei sonst gleichen Bedingungen (hier nicht näher beschrieben) wiederholte.

Es ist nun schwierig, aus dem Versuchsbefund eine Lebensdauer anzugeben. Bei den Lagern aus Stahl und Stellite kann man den rapiden Anstieg des Reibmomentes bei ca. $0,1 \cdot 10^6$ Umdrehungen (Abb. 13) als das Ende der Lebensdauer definieren, der auch mit einer starken Geräuschzunahme verbunden war. Bei den Ferro-Titanit-Lagern war eine solche Rampe des Reibmomentes nicht erkennbar, selbst nicht bei den Fortsetzungsversuchen bis $0,4 \cdot 10^6$ Umdrehungen. Dem sich kontinuierlich verstärkenden Laufgeräusch und dem allgemeinen Verschleißbild zufolge (vgl. auch die Aussagen zur Verschleißtiefe in 4.3.2) läßt sich diesen Lagern eine Lebensdauer von ca. $0,2 \cdot 10^6$ Umdrehungen zuordnen. Für die Hart-

metallager wird, wie oben schon erwähnt, unter diesen Versuchsbedingungen (vgl. 3.4) eine deutlich höhere Lebensdauer erwartet, deren Bestimmung Gegenstand der nächsten Versuchsphase sein wird. Zur Orientierung sei hier die entsprechende Lebensdauer angegeben, wie sie sich für ein entsprechendes Rillenkugellager unter gleicher Belastung, jedoch bei normalen Schmier- und Temperaturbedingungen, nach den üblichen Berechnungsregeln ergibt. Sie beträgt ca. $180 \cdot 10^6$ Umdrehungen, also drei Größenordnungen mehr als die hier mit Ausnahme des Hartmetalls erreichten Werte.

Die Rangordnung für die Eignung der verwendeten Werkstoffe als Wälzlagermaterial im Natriumbetrieb ist aufgrund dieser Versuche ganz eindeutig: 1. Hartmetall, 2. Ferro-Titanit, 3. die übrigen. Es ist zu erwarten, daß diese Reihenfolge besonders auch bei noch höheren Beanspruchungen (Belastung, Temperatur) gilt, evtl. sogar noch stärker ausgeprägt. Damit wird die Aussage unterstützt, daß die Härte eine dominierende Eigenschaft bei der Werkstoffwahl darstellt, zumindest, solange die Lagerlebensdauer vom Abrieb und nicht von Ermüdungerscheinungen bestimmt wird. Im letzten Fall, der vielleicht für die Hartmetallager zutrifft (was die nächste Versuchsphase zeigen soll), sind in stärkerem Maße die Wechselfestigkeit und damit die Mikrostruktur von Bedeutung.

Die Reibungszahl nach der Definitionsgleichung (1) wurde in 4.2 für die Hartmetallager zu $\mu = 0,012$ angegeben. Sie liegt damit um etwas weniger als eine Größenordnung über dem entsprechenden Wert für Kugellager bei normalen Schmierbedingungen. Dieses Verhältnis trifft in etwa auch für die Gleitreibung bei Natrium gegenüber der Öl/Fett-Schmierung zu. Natürlich kann diese Angabe nur eine Orientierungshilfe sein. Im Einzelfall hängen die Reibungszahlen von vielen Parametern ab (bei Wälzlagern u.a. von den elastischen Eigenschaften der Werkstoffe, von der Schmiegun g zwischen Kugel und Rille, von der Lage des Kraftvektors, von der Beschaffenheit der Oberfläche usw.). Eine quantitative Beschreibung der Zusammenhänge, wie etwa in der konventionellen Wälzlagertechnik, ist für den Natriumbereich wegen der schlechten Reproduzierbarkeit und mangelnder Unterlagen noch nicht möglich. Vom stärksten Einfluß und zugleich auch am schwierigsten wägbar ist wohl die Oberflächenbeschaffenheit, wie diese Versuche mit den Abbn. 11 bis 13 ge-

zeigt haben. Global gesehen ist jedoch der Vorteil gegenüber der Gleitreibung mit einer um den Faktor 30 bis 50 kleineren Reibungszahl deutlich.

5.2 Vergleich mit Ergebnissen aus der Literatur

In das Gesamtbild, das sich aus den Arbeiten anderer Autoren [3-11] (vgl. Tab. 1-1) ergibt, fügen sich diese Ergebnisse gut ein. Diese Feststellung läßt sich treffen trotz größtenteils unterschiedlicher Versuchsparameter. Z.B. wurden von SKF [10,11] mit Kugellagern aus Werkzeugstahl Lebensdauerwerte von ca. $0,1 \cdot 10^6$ bis $0,5 \cdot 10^6$ Umdrehungen erreicht, die hohen Werte allerdings nur bei im Vergleich zu den hier ausgeführten Versuchen niederen Temperaturen und um ca. 20 % geringeren Axiallasten. Nach [10] wurden von Freede $0,03 \cdot 10^6$ Umdrehungen erreicht, jedoch bei 650°C . Delves [8] erzielte $0,15 \cdot 10^6$ Oszillationen bei 1000 kp Radialbelastung. Bei Berücksichtigung der jeweils stärkeren oder schwächeren Beanspruchungen kann die Übereinstimmung dieser Ergebnisse für Kugellager aus Werkzeugstahl als gut bezeichnet werden.

Bei den Versuchen mit Stellitelagern sind die Ergebnisse ähnlich. Jwai [6] und Takea [9] erreichten bei 400°C und Lasten bis zu 800 kp. Gesamtumdrehungszahlen von $0,72 \cdot 10^6$, jedoch mit größeren Lagern (55 mm Bohrungsdurchmesser). Barreau [7] erzielte $2,1 \cdot 10^6$ Umdrehungen bei wesentlich kleineren Belastungen. Insgesamt kann also das Entwicklungspotential für Stellite gegenüber Werkzeugstahl nicht nennenswert günstiger beurteilt werden, wie auch die eigenen Versuche bestätigt haben. Werkstoffe mit noch geringerer Härte wie austenitischer Stahl und Hastelloy, die von Takea [9] untersucht wurden, scheiden für weitere Versuche wegen zu hoher Verschleißraten aus (vgl. Abb. 17).

Für die Ferro-Titanit-Lager liegen keine Vergleichswerte aus der Literatur vor. Es sind lediglich sehr gute Ergebnisse von Versuchen in Gasen oder in Vakuum mit TiC-beschichteten Lagern von Gass und Hintermann [25] bekannt. Mit TiC in Natrium wurden jedoch in bezug auf Korrosion sehr nachteilige Erfahrungen gewonnen [26], so daß diese Spur wenig Erfolg verspricht.

Die im Schrifttum veröffentlichten Versuchsergebnisse wurden soweit den Autoren bekannt ist, alle mit Käfiglagern gewonnen. Dabei hatte sich mehrfach der Käfig als ein kritisches Bauteil in bezug auf Verschleiß herausgestellt. Im Gegensatz dazu wurden alle hier beschriebenen Versuche (mit Ausnahme eines Sonderversuches) mit vollkugelligen Lagern, also ohne Käfig ausgeführt. Eine entscheidende Verbesserung oder Verschlechterung der Lebensdauerwerte durch den Käfig ist demnach für Werkzeugstahl und Stellite nicht erkennbar.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß die hier durchgeführten Versuche mit Kugellagern aus Werkzeugstahl (DMo5), Chromstahl (BG 42) und Stellite die bisher bekannten für die Natriumtechnologie unbefriedigenden Ergebnisse mit ähnlichen Werkstoffen bestätigen. Gleichzeitig ermöglichen sie die Zuordnung der hier erstmals untersuchten Kugellager aus Ferro-Titanit und Hartmetall. Die Hartmetallager heben sich von allen übrigen bisher getesteten Lagern deutlich ab und werden daher für weitere Parameteruntersuchungen vorgeschlagen.

5.3 Weiteres Vorgehen

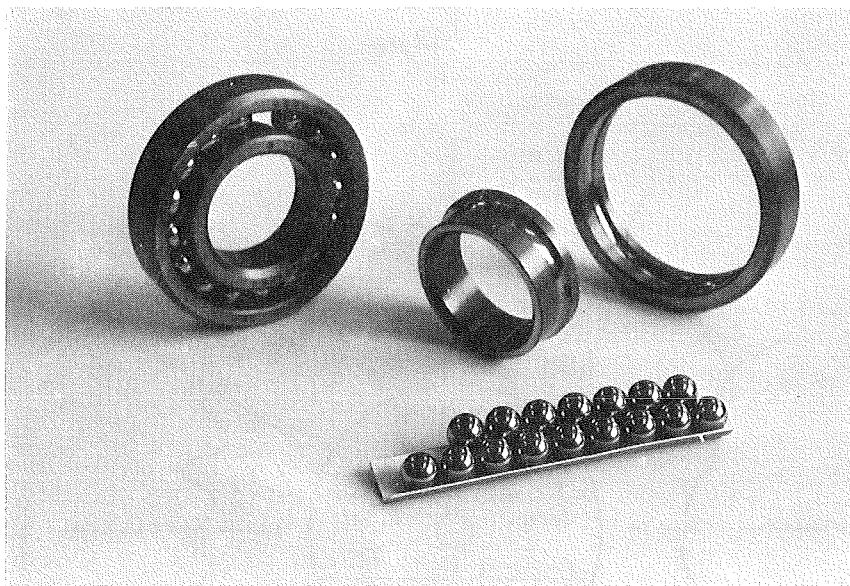
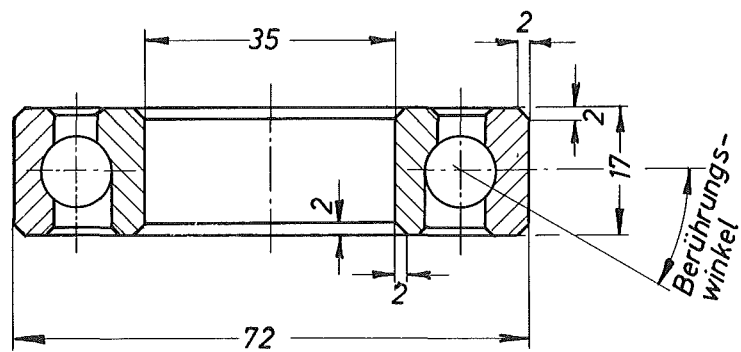
Ein wesentlicher Gesichtspunkt wird die Frage sein, wie sich die Schädigung der Lagerteile aus Hartmetall mit zunehmender Laufzeit fortentwickelt. Es gibt Anzeichen dafür, daß die Werkstoffermüdung lebensdauerbegrenzend werden kann. In diesem Falle gilt es, ein geeignetes Kriterium zur Beurteilung der Schädigung zu finden. Die Tragfähigkeit soll dann für ein Feld von Parametern untersucht werden. Hier sind zunächst die Drehzahl, Belastung und Temperatur als Variable vorgesehen. Der erreichbare Versuchsumfang hängt sehr stark von den noch unbekanntem Lebensdauern und der Zahl der erforderlichen Zwischenkontrollen ab.

Literatur

- [1] E.Wild, K.J.Mack, G.Drechsler:
"Das Verschleißverhalten von Werkstoffkombinationen in flüssigem Natrium", KFK 1659 (1972)
- [2] H.Münnich:
"Einfluß der Schmierung auf Lebensdauer, Reibung und Verschleiß von Wälzlagern", Schmiertechnik und Tribologie, Heft 2, S.87-97 (1968)
- [3] W.J.Greenert, H.M.Rawlings:
"Basic Information on the Bearing Properties of Various Materials in Oil and Sodium-Potassium Alloy", United States Naval Engineering Experimental Station, Annapolis, Md. Report No. 090014D, (April 1956)
- [4] W.Markert jr., K.Ferguson:
"Use of Rolling Contact Bearings in Low Viscosity Liquid Metal Lubricants", Journal of Am. Soc. of Lubrication Eng., May 1957
- [5] W.D.Richards:
"Ball Bearing Tests in Lithium", TIM 923, UC-38-4, 1965
- [6] S.Jwai et.al.:
"Testing of Feasibility of Ball Bearings in Liquid Sodium Environments", ANL-7520, 1968
- [7] Barreau, Frankreich, 1970 - unveröffentlicht
- [8] P.H.Delves, W.Rodwell:
"Mechanism in Sodium", IAEA-SM-130/14
- [9] Takea Uga, et.al.:
"Friction and Wear of Ball Bearings in Liquid Sodium", Journal of Nucl. Science and Technology, 8 (1971)
- [10] W.E.Jamison et.al.:
"Development of High Temperature Rolling Bearings for Operation in Liquid Sodium", Interim Final Report No. 1, NYO-4117-9, 1972

- [11] W.E.Jamison:
"Development of High Temperature Rolling Bearings for
Operation in Liquid Sodium", Quarterly Progress Report, 1972,
unveröffentlicht
- [12] W.H.Roberts:
"The Friction and Wear Behavior of Molybdenum-Thungsten-
Chromium Alloys in High Temperature Sodium Environments",
ASLE Transaction 8, (1965)
- [13] E.Wild, Institut für Reaktorbauelemente,
persönliche Mitteilung
- [14] J.H.Brindley:
"Precision Mechanism in Sodium", LMEC-69-1
- [15] E.Wild, K.Mack, H.Hoffmann:
"Das Verschleißverhalten von Stählen und Legierungen in
flüssigem Natrium", KFK 973, EUR 4174 d
- [16] K.Benndorf:
"Selbstverschweißen von Reaktorstrukturwerkstoffen
unter Natrium bei hoher Temperatur", KFK-Ext. Bericht 8/70-1
- [17] J.W.Kissel, W.A.Gleaser, C.M.Allen:
"Sliding Contact frictional Behavior in Sodium Environment"
ASLE-Transaction 5, 39-44 (1962)
- [18] D.B.Vail:
"The Performance of Thungsten Carbide Journal Bearings
operating in liquid metals", KAPL-1079
- [19] K.Natesan, T.F.Kassner, Che-Yu Lit:
"Effect of Sodium on Mechanical Properties and Friction-Wear
Behavior of LMFBR Materials", Reactor Techn. Vol. 15, No. 4
(1972/73)
- [20] ORNL-2391, Corrosion Resistance of Various Ceramics and
Cermets to Liquid Metals

- [21] F.Huber, R.A.Müller:
"The Karlsruhe Sodium Tank Test Facility", KFK 1203 (1970)
- [22] R.L.Eichelberger: USEAC-Report AI-AEC-12865, 1968
- [23] K.Kleefeldt:
"Beispiele für Bewegungsmechanismen im Natriumbereich
natriumgekühlter Reaktoren unter dem Aspekt der Anwendung
von Wälzlagern", 1974, unveröffentlicht
- [24] Div. Werkstoffblätter, vgl. Tab. 2-3
- [25] H.Gass, H.E.Hintermann:
"Chemical Vapor-Deposited TiC for Bearings",
Chemical Vapor Deposition, Fourth International Conference
- [26] G.A.Whitlow et.al.:
"Evaluation of Coated Duct Load Pad Materials",
WARD-NA-3045-4

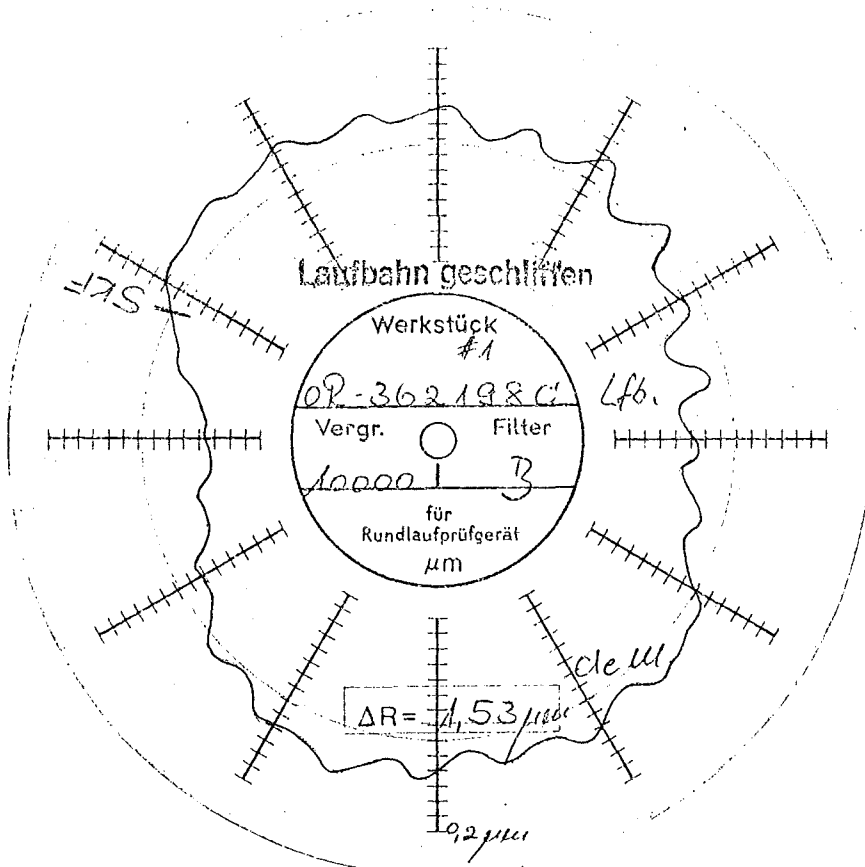
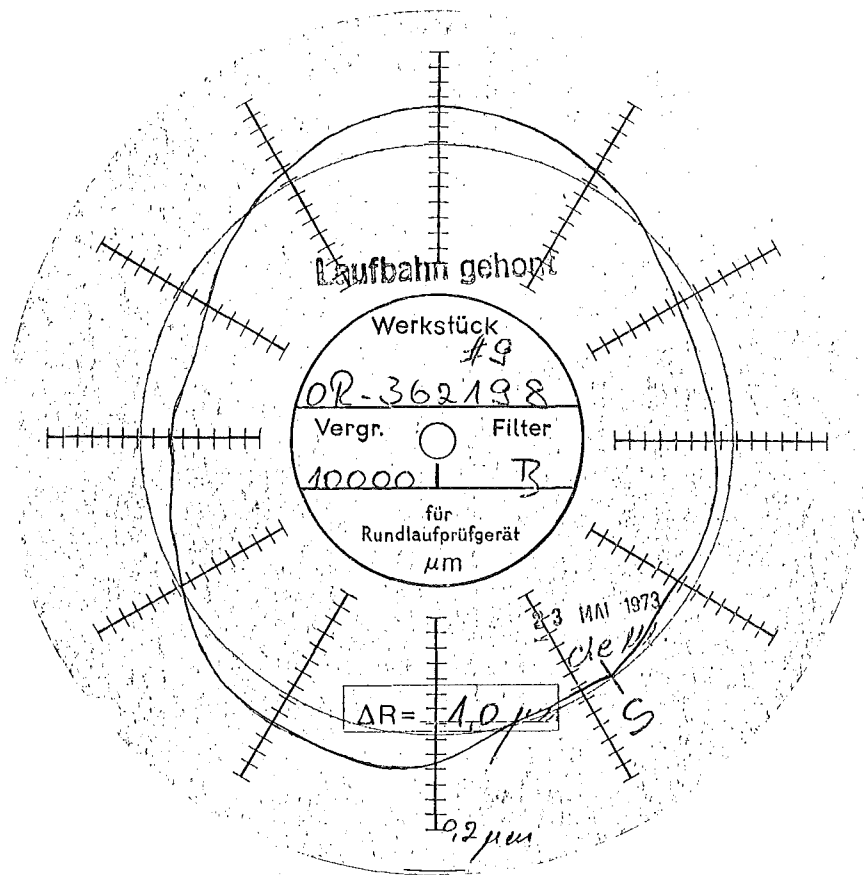


Teilkreis: 53,5 mm
 16 Kugeln 10 mm ϕ
 Vollkugelig
 Endspiel ~7 mm
 Radiale Lagerluft: C4 $\hat{=}$ 28 - 46 μ m
 Innenring herausnehmbar
 Werkstoffkombination s. Tabelle 2-1

G f K

Prüflager, Hauptabmessungen

Abb. 1

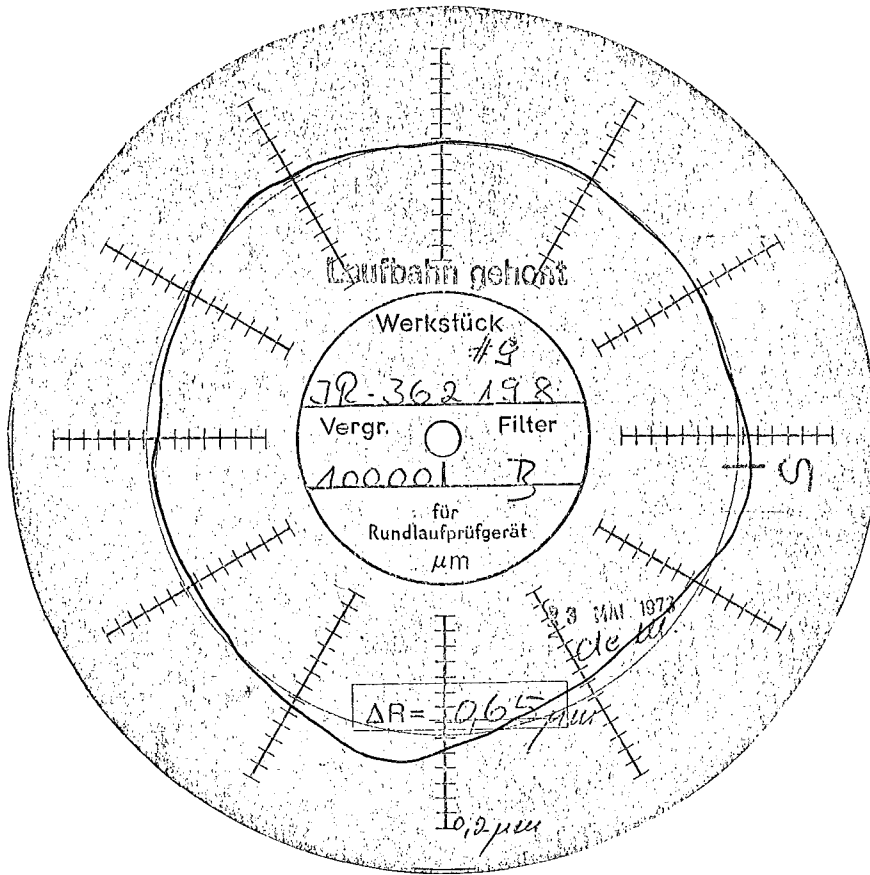


GfK

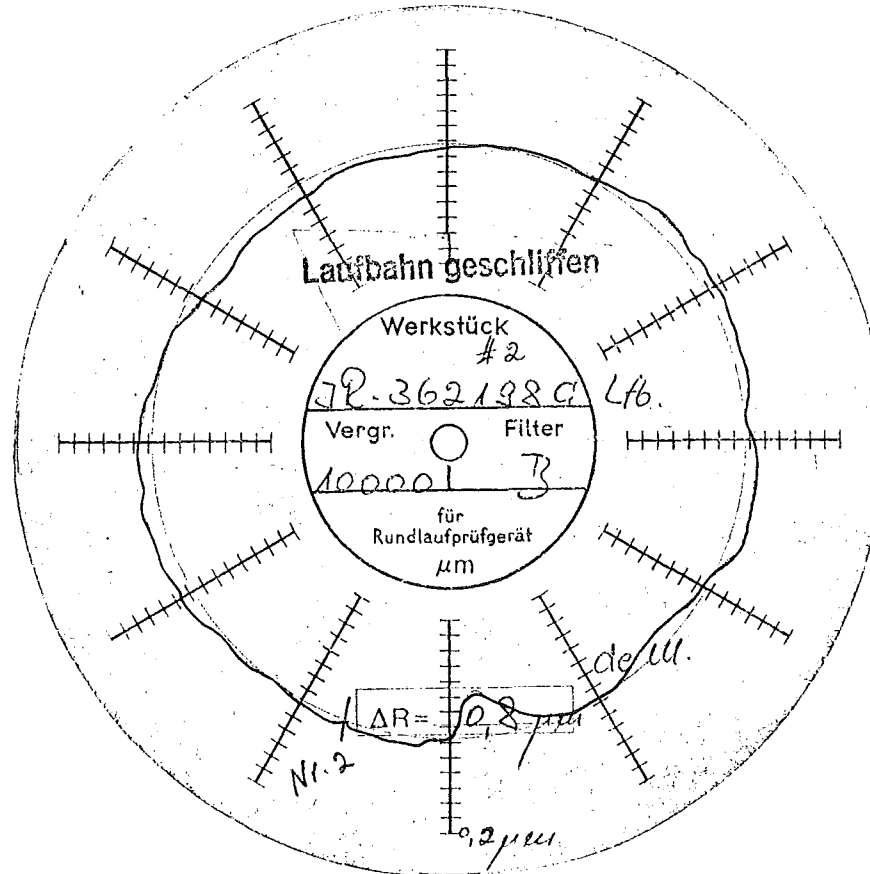
TYPISCHE FORMSCHRIBE FÜR AUßENRINGLAUFBAHN

a) OR Nr. 9 aus DMO 5, b) OR Nr. 1 aus GT20

Abb. 2



a)



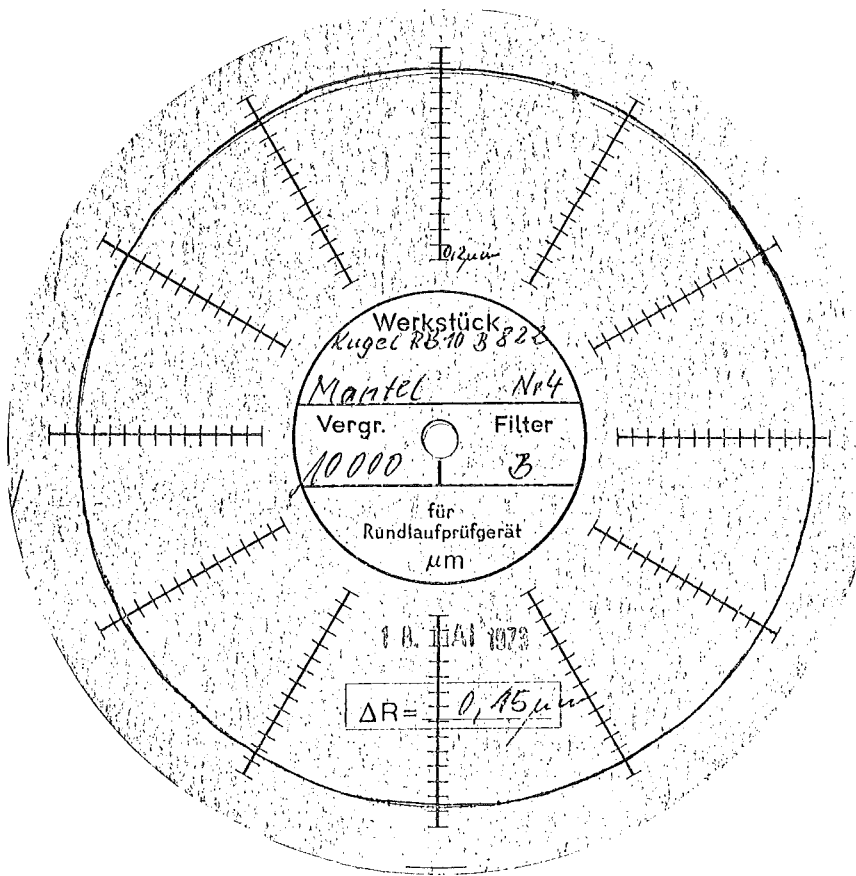
b)

GfK

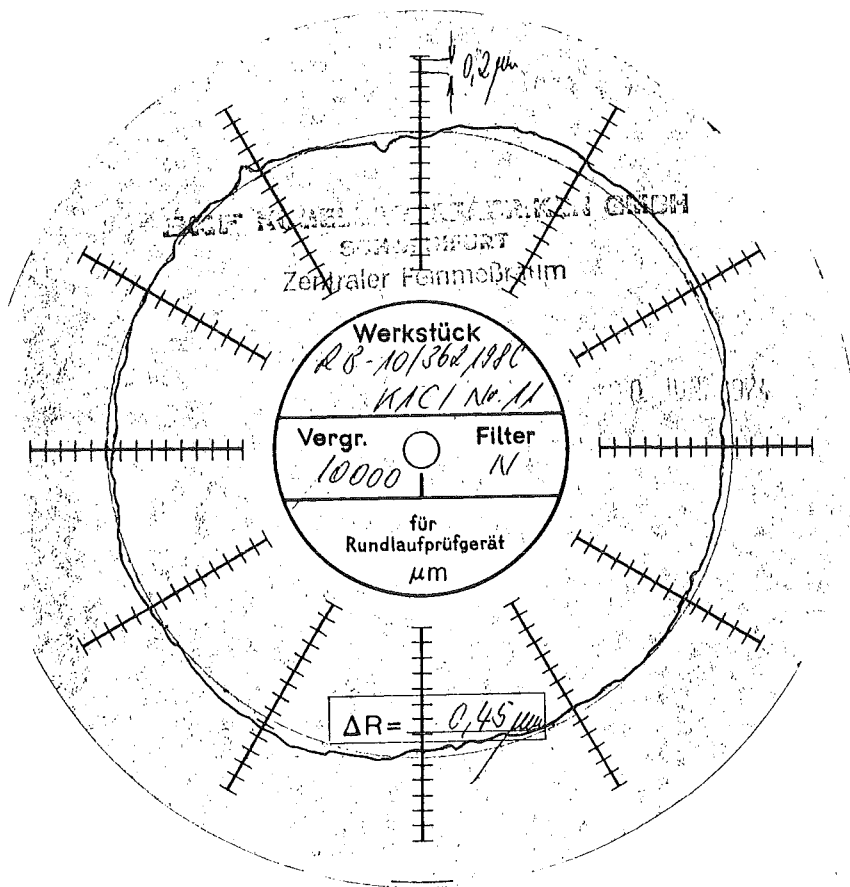
TYPISCHE FORMSCHRIBE FÜR INNENRINGLAUFBAHN

a) IR Nr. 9 aus DMo 5, b) IR Nr. 1 aus GT 20

Abb. 3



a)



b)

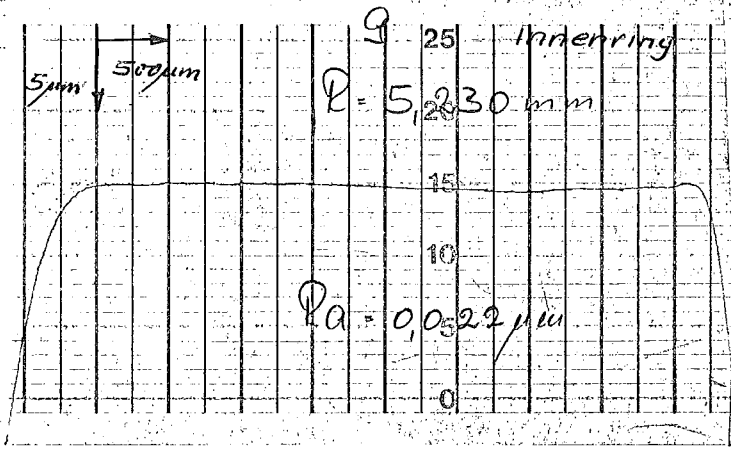
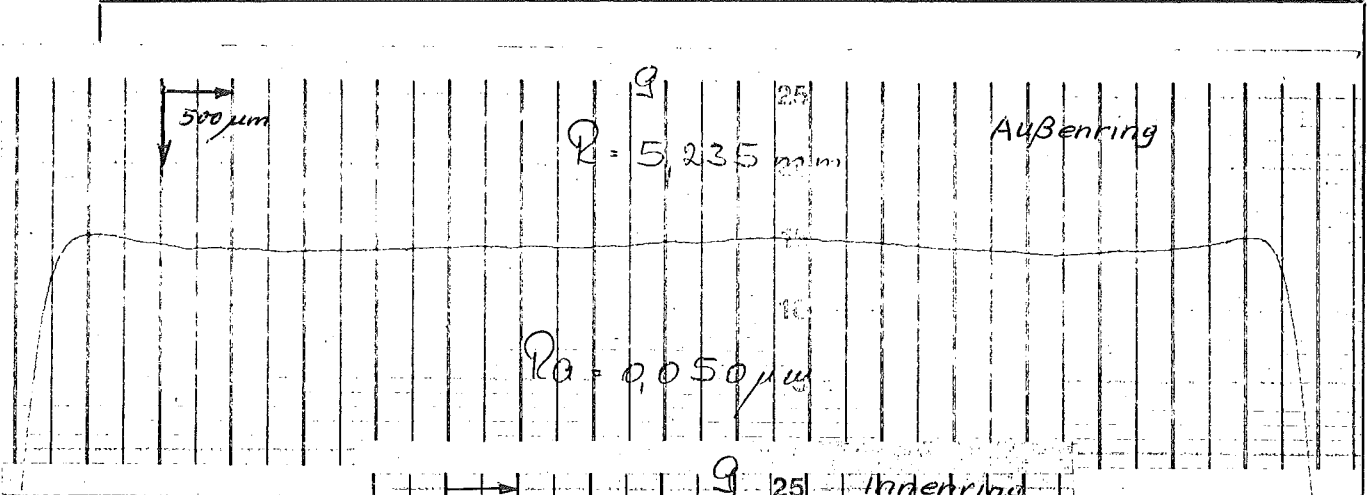
GfK

TYPISCHE FORMSCHRIBE FÜR KUGELN

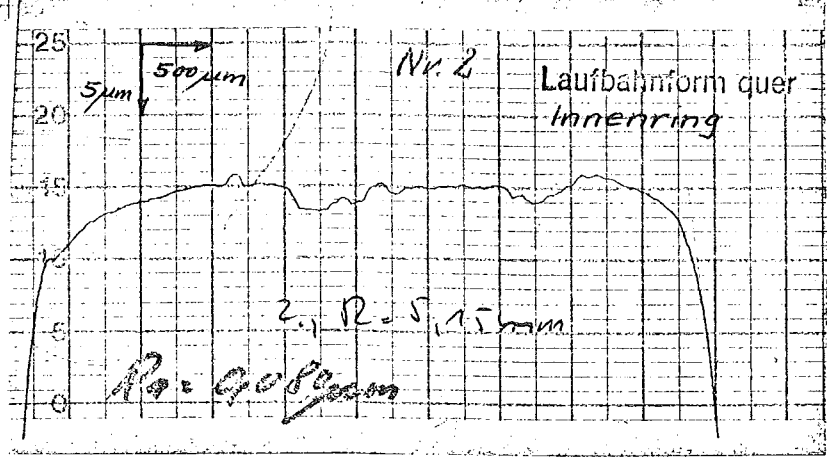
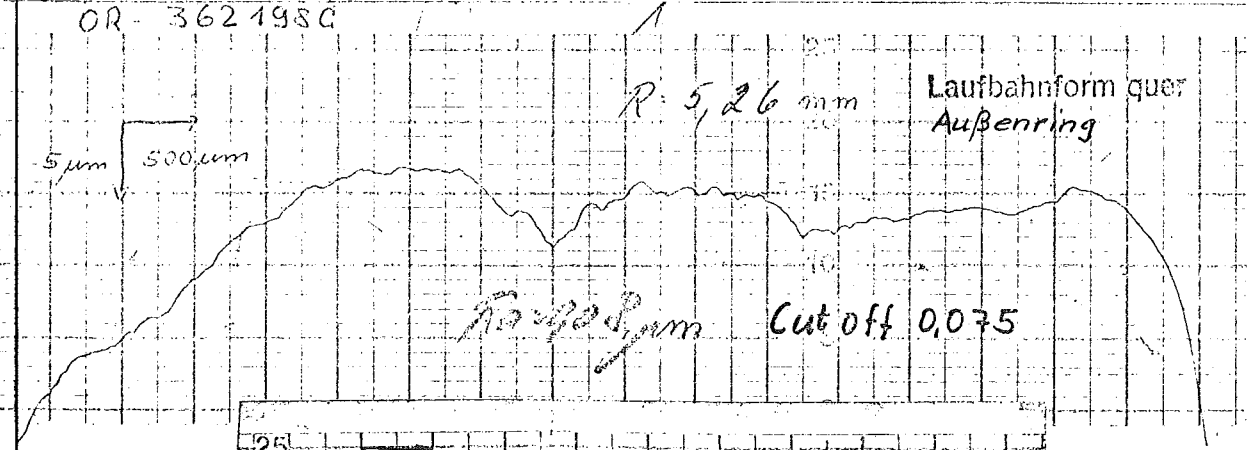
a) Kugel aus DMo 5, b) Kugel aus GT 10

Abb.

4

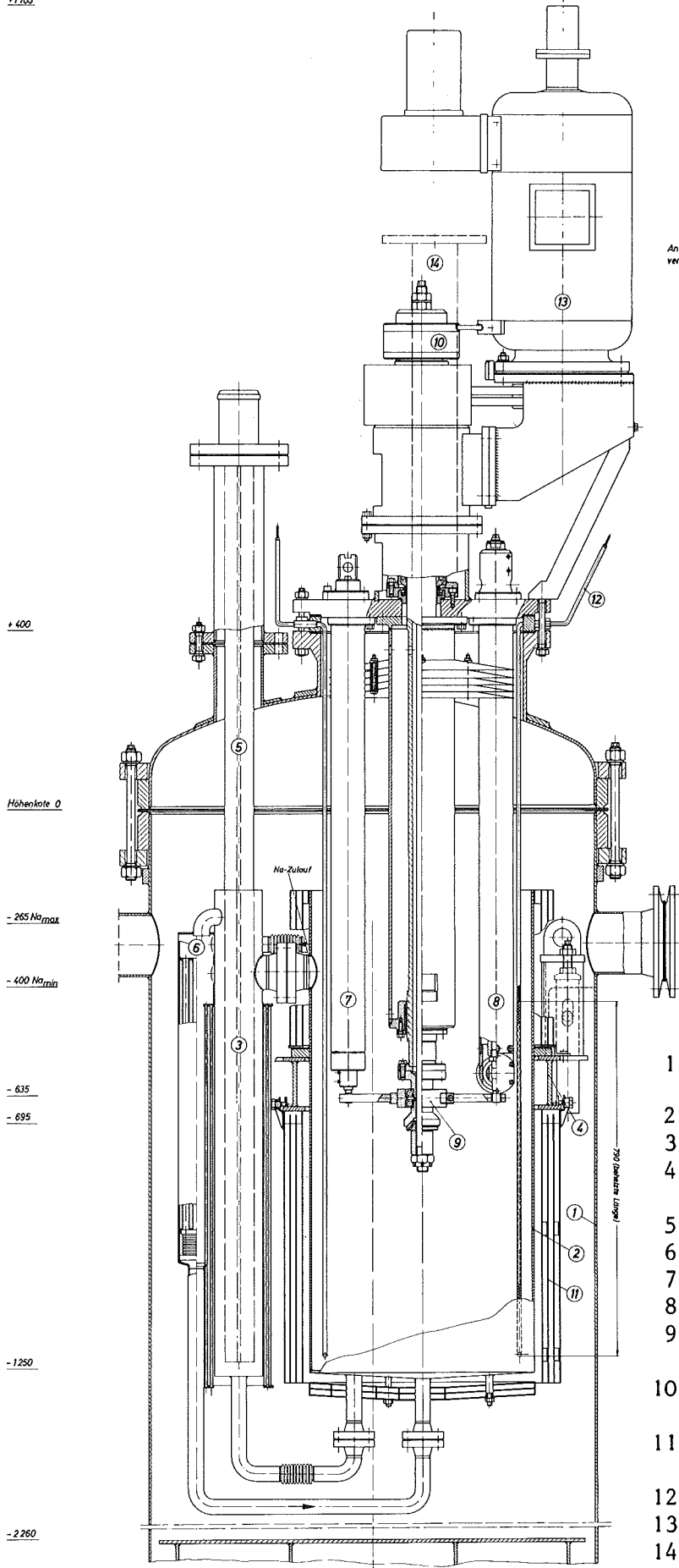


a)



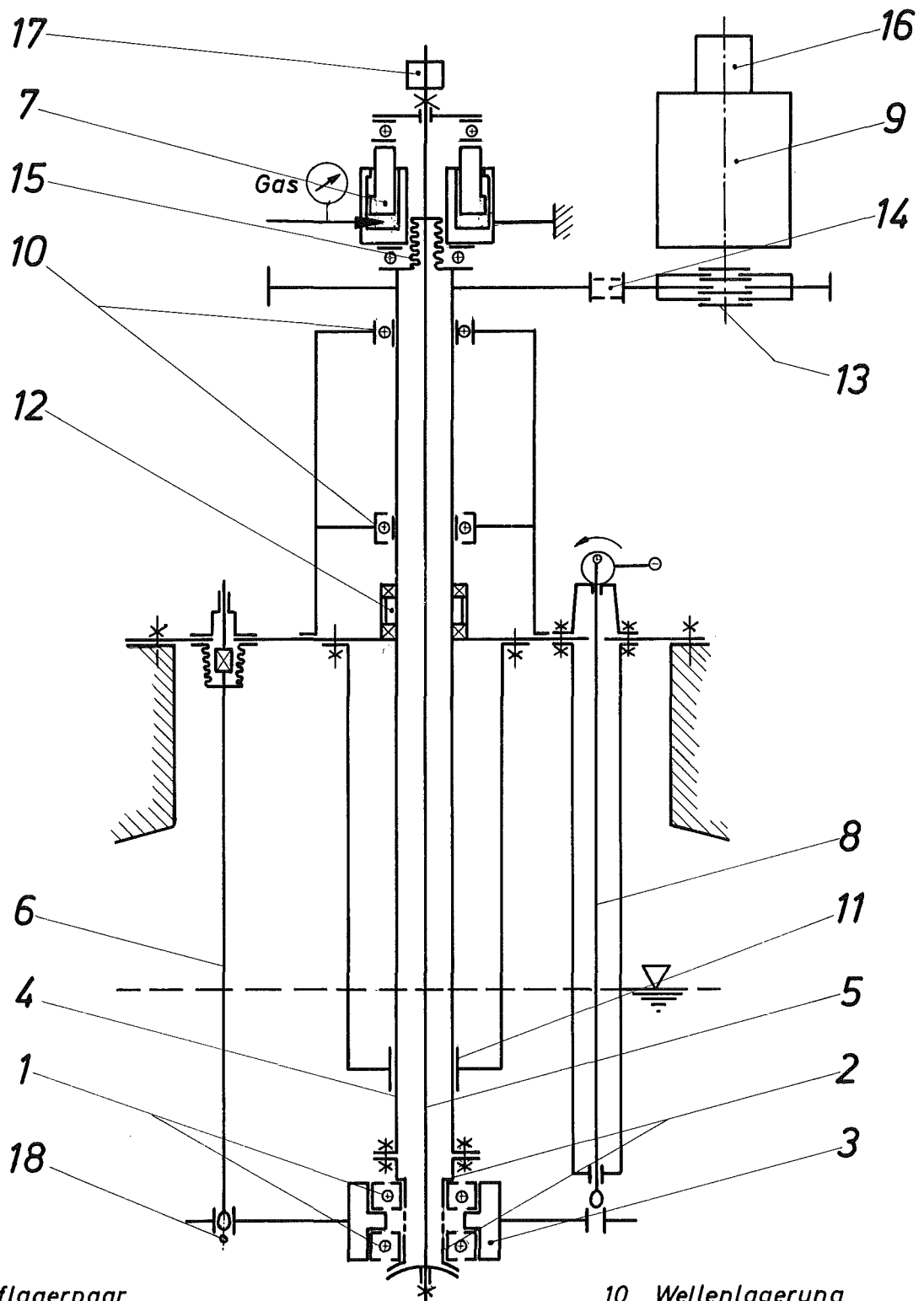
b)

GfK	TYPISCHE QUERPROFILE FÜR AUßEN- UND INNENRINGLAUF- BAHN	Abb. 5
	a) Ringe aus DMo 5, b) Ringe aus GT 20	



Antrieb um 90°
verdreht gezeichnet

- 1 Versuchsbehälter (NABEA)
- 2 Behältereinsatz
- 3 Sondenbehälter
- 4 Aufhängung f. Behältereinsatz
- 5 Füllstandsmeßsonde
- 6 Wärmetauscher
- 7 Arretiervorrichtung
- 8 Reibmomentmeßstab
- 9 Lagerhalter mit Prüflager
- 10 Pneumat. Belastungsvorrichtung
- 11 Thermische Abschirmung
- 12 Tauchheizer
- 13 Antrieb
- 14 Aufhängebügel



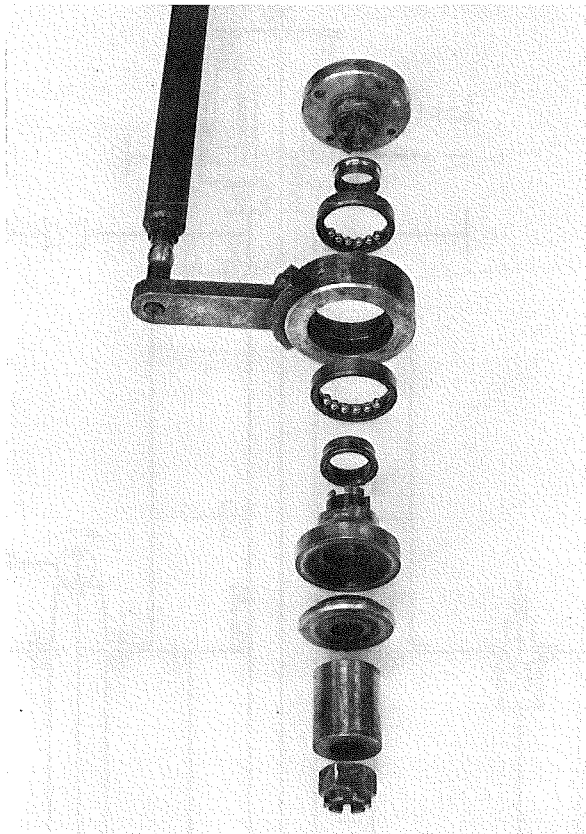
- 1 Prüflagerpaar
- 2 Lagerhalter (rotierend)
- 3 Gehäuse (feststehend)
- 4 Antriebswelle
- 5 Zugstange
- 6 Biegestab
- 7 Belastungsvorrichtung
- 8 Arretierstab
- 9 GS-Motor

- 10 Wellenlagerung
- 11 Gleitlager
- 12 Gleitringdichtung
- 13 Rutschkupplung
- 14 Keilriementrieb
- 15 Faltenbalg
- 16 Drehzahlgeber
- 17 Umdrehungszählwerk
- 18 Thermoelement

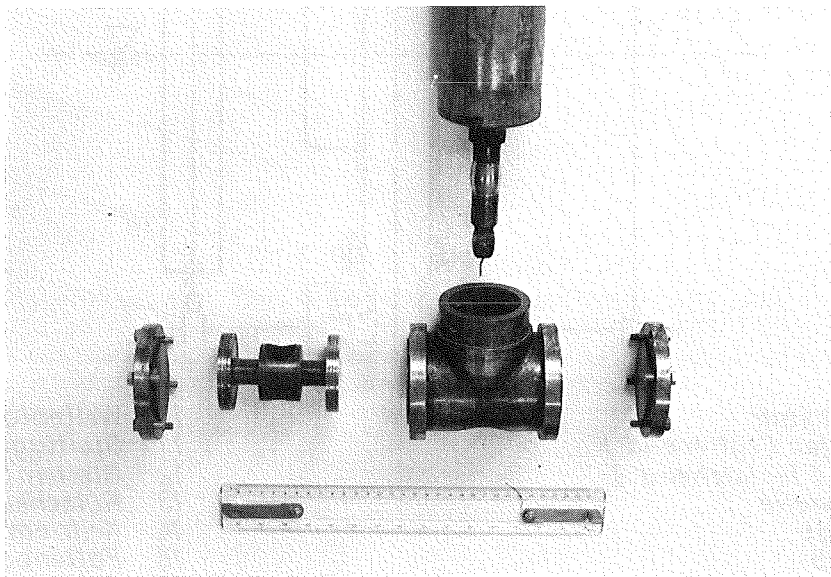
G f K

Schema der Versuchsvorrichtg.

Abb. 7



a)

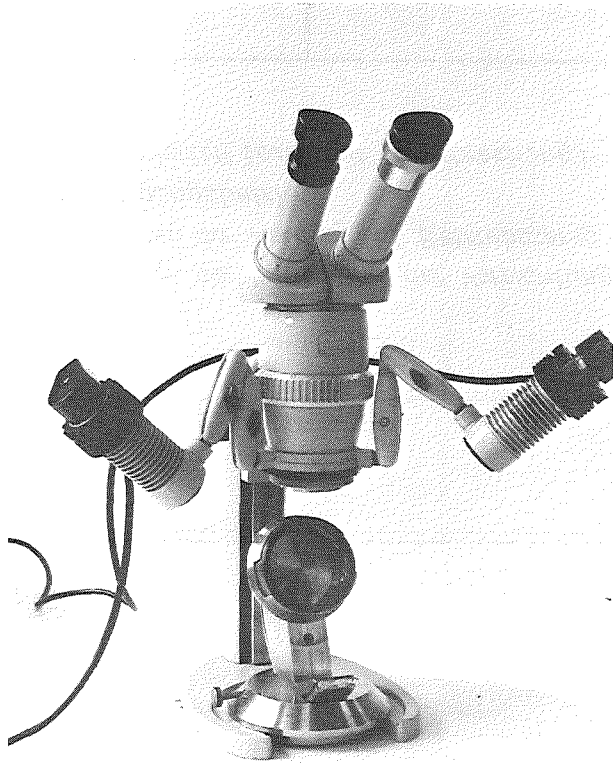


b)

GFK/IRE

a) Prüflagerbausatz
b) Schwingungsdämpfer f. Reibmomentmessung

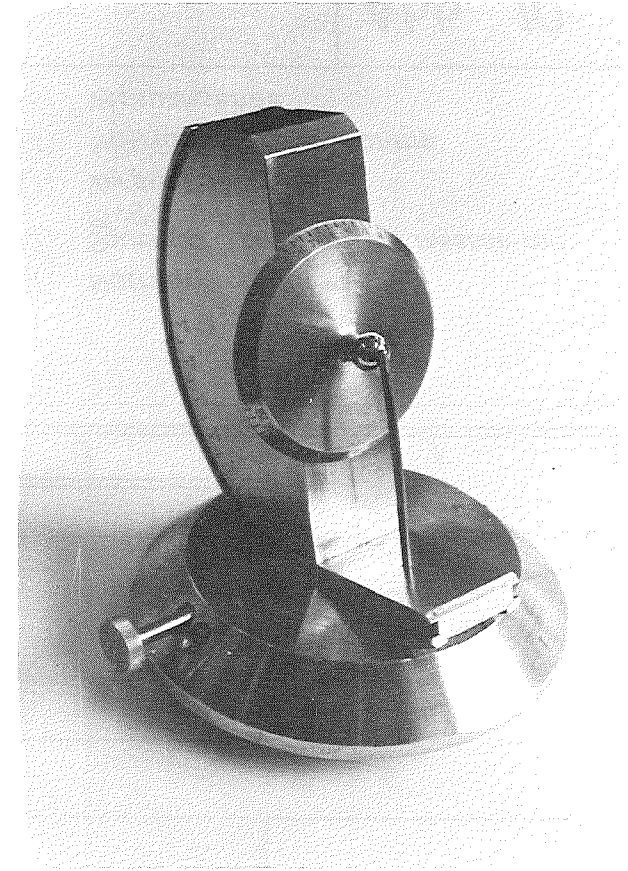
Abb. 8



a)



b)



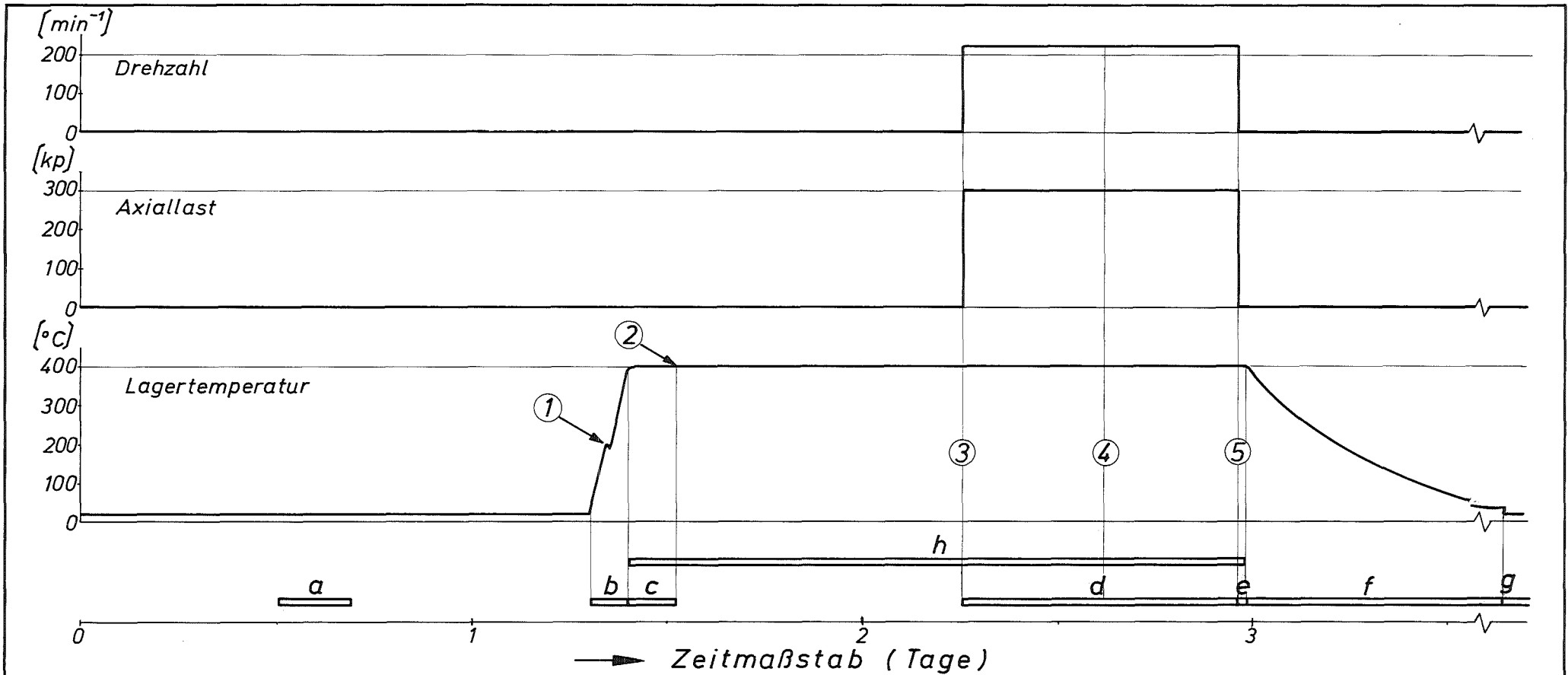
c)

GFK/IRE

Vorrichtung zur mikroskopischen Auswertung der Lagerteile

a) Gesamtaufnahme mit OR-Aufnehmer, b) mit IR-Aufnehmer, c) m. Kugel-Aufnehmer

Abb. 9



a Montage der Lager und der Vorrichtung
 b Anfahren der Anlage auf Betriebstemp.
 c Reinigungsbetrieb
 d Versuchszeit (evtl. mit Unterbrechung)

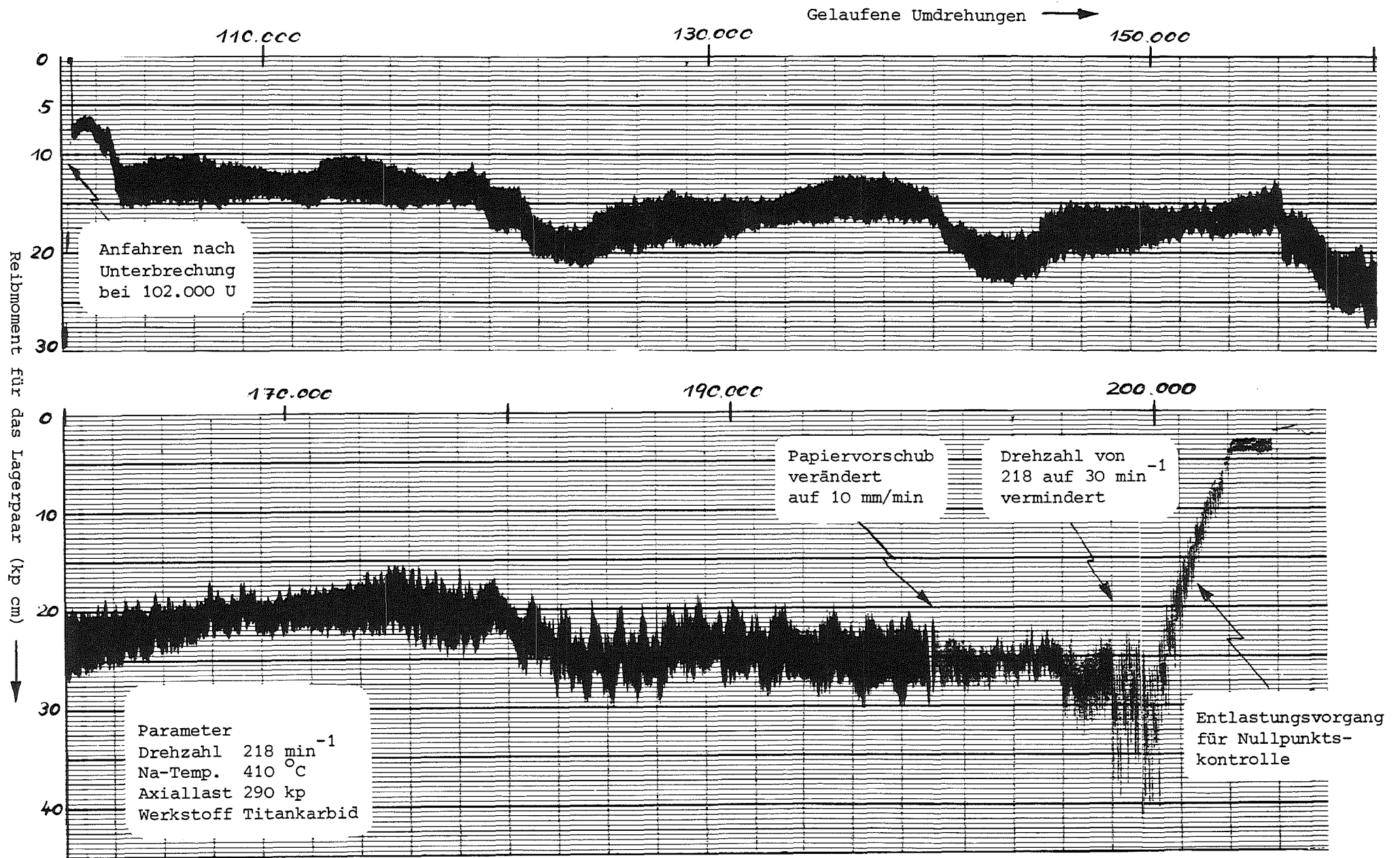
e Anlage abfahren, Behälter entleeren
 f Abkühlungsphase
 g Demontage, Reinigung u. Nachuntersuchung
 h Hochtemperaturdauer

① Natrium einfüllen
 ② Sauerstoffkonzentration messen mit Pluggingmeter
 ③ Versuchsbeginn
 ④ Natriumprobeentnahme
 ⑤ Versuchsende

G f K

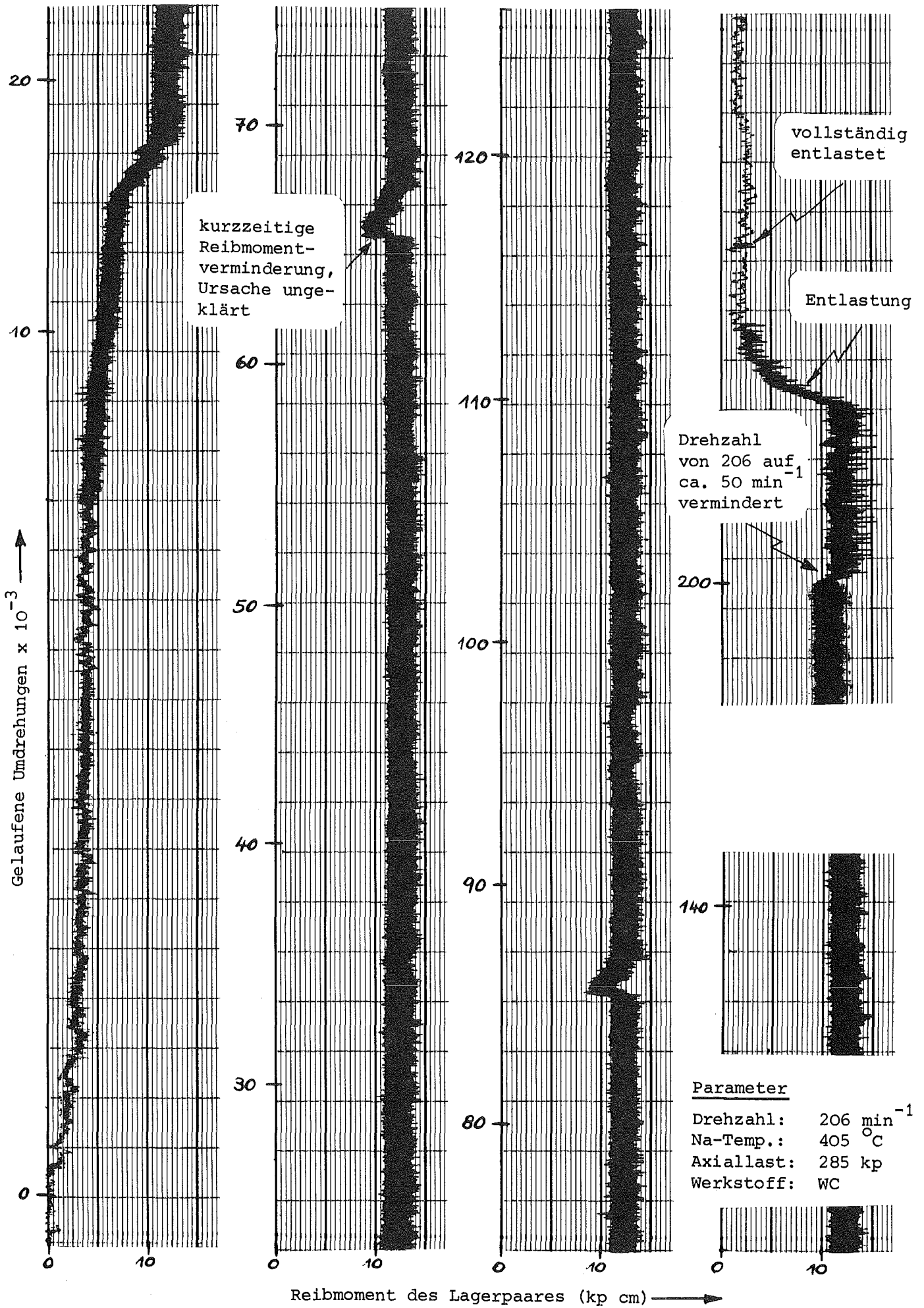
Typischer Versuchsablauf

Abb. 10



Beispiel für die Reibmomentschwankungen (Versuch 11)

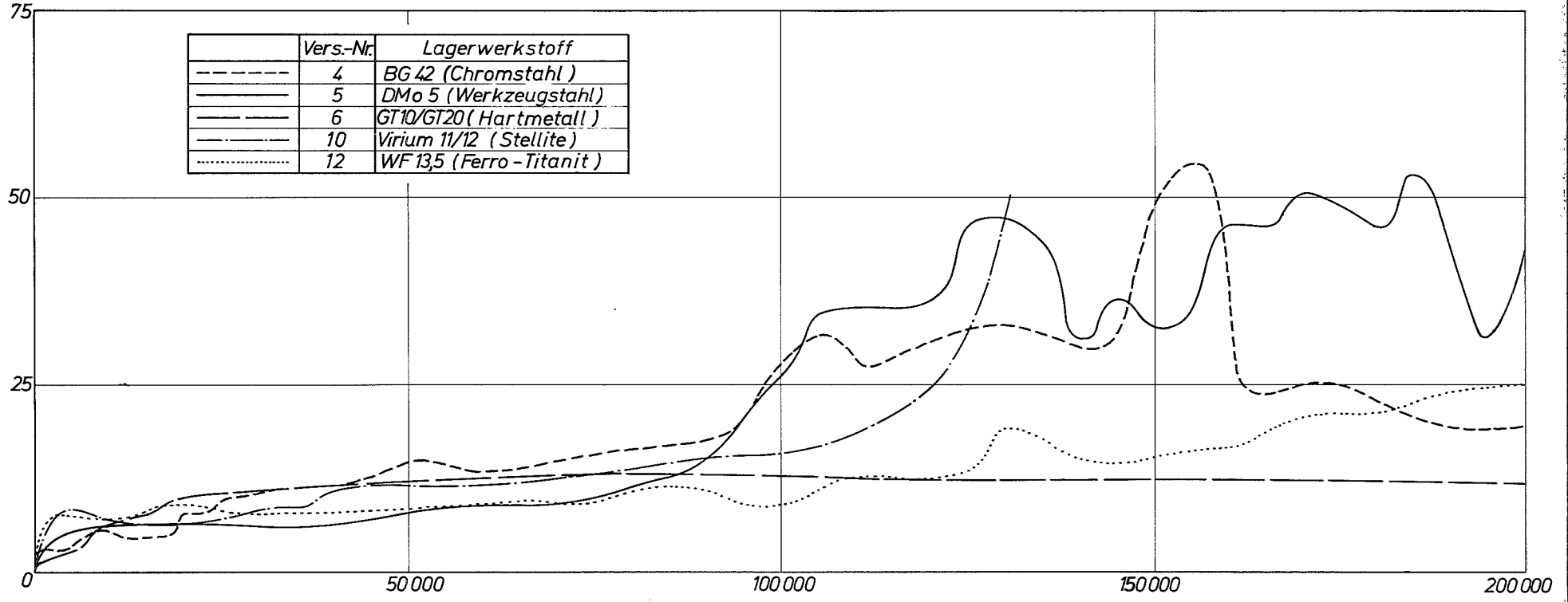
Abb. 11



Beispiel für Reibmomentschwankungen (Versuch 7)

Abb. 12

Reibmoment
für das Lagerpaar
(kpcm)



→ Gelaufene Umdrehungen

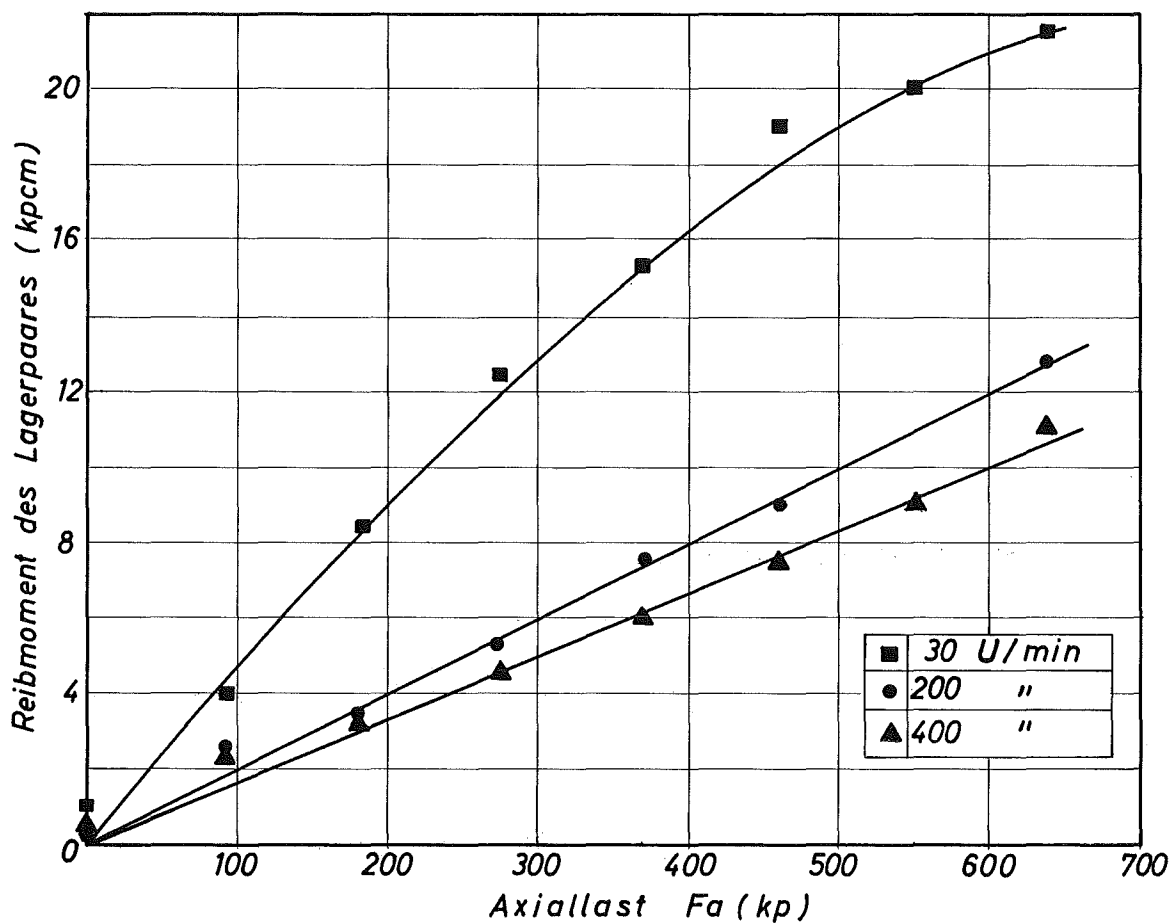
Parameter (Nennwerten):
 Drehzahl : 200 min⁻¹
 Na-Temperatur : 400 °C
 Axiallast : 280 kp

G f K

Untersuchungen an Wälzlagern in Natrium

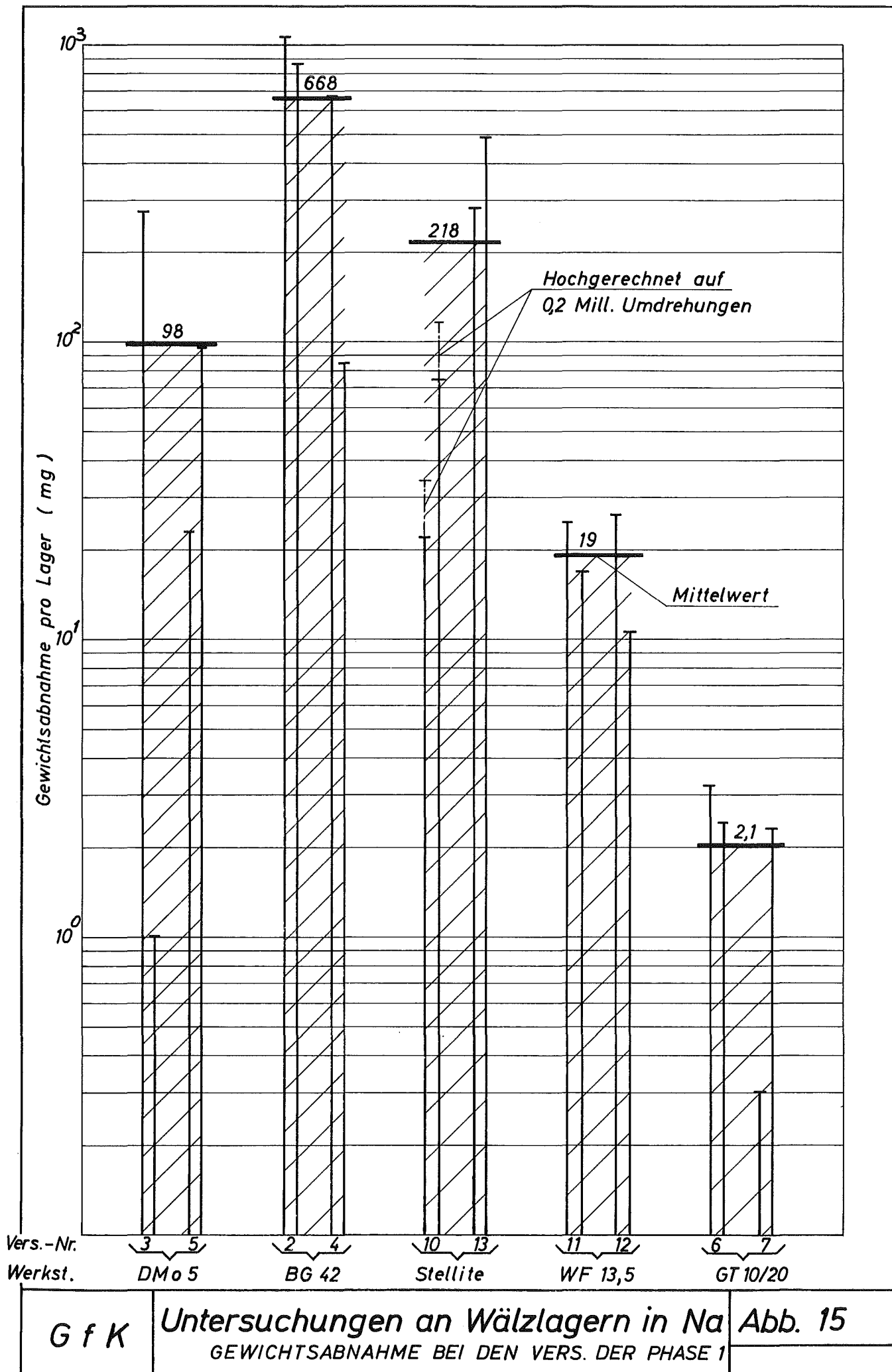
Reibmoment in Abhängigkeit der Betriebsdauer für
Kugellager 6207 aus verschiedenen Werkstoffen

Abb. 13



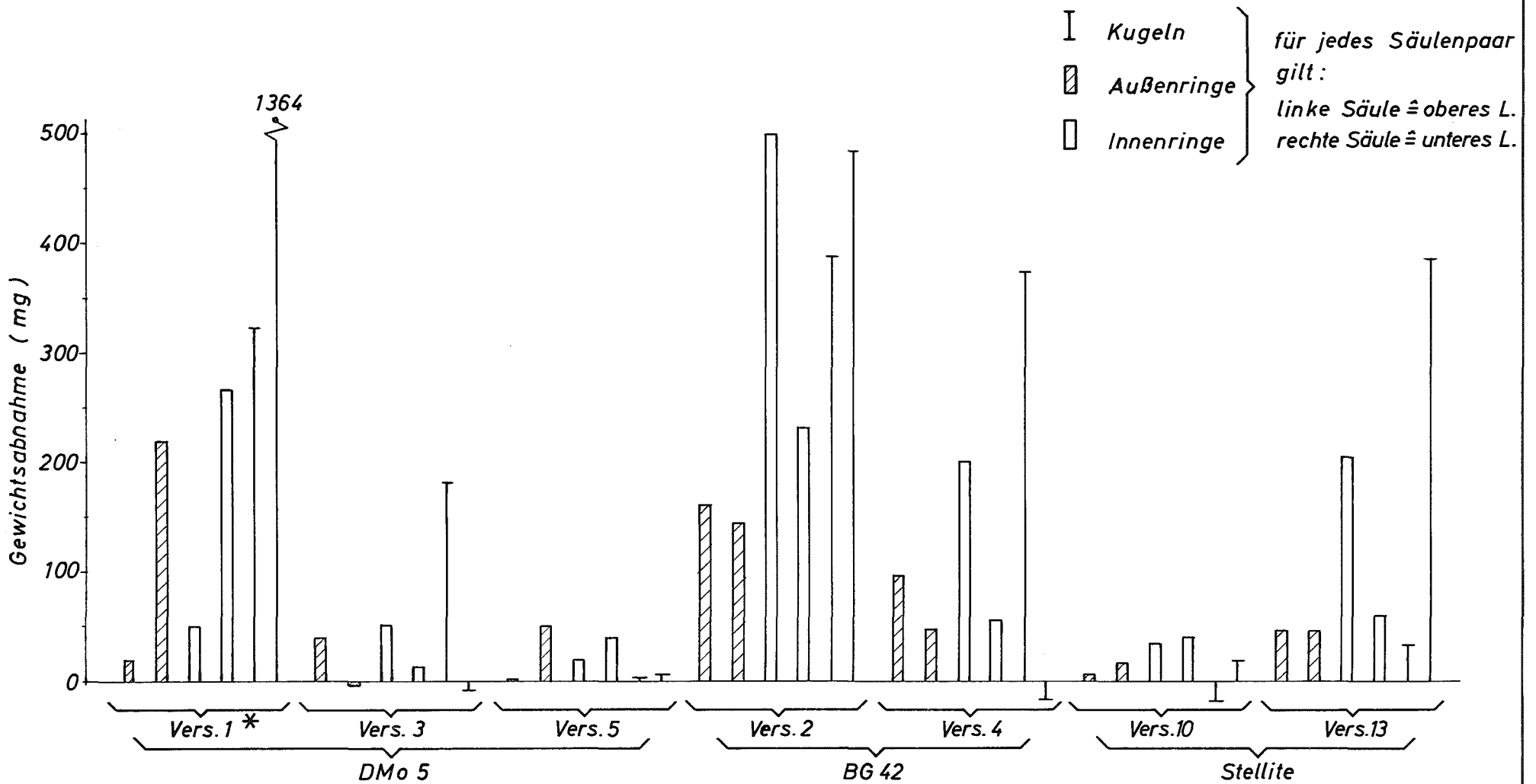
Reibmoment als Funktion der Axialbelastung für ein Lagerpaar aus WF 13,5 nach einer Laufdauer von 10.000 – 15.000 U (über mehrere Umdrehungen gemittelt, Versuch 9)

Abb. 14



G f K

Untersuchungen an Wälzlagern in Na Abb. 15
 GEWICHTSABNAHME BEI DEN VERS. DER PHASE 1



* Versuch 1 wurde mit höherer Belastung gefahren (vgl. Tabelle 4-1)

G f K

GEWICHTSABNAHME DER KUGELLAGER
 aus den Werkstoffen DMo 5, BG 42 u. Stellite

Abb. 16

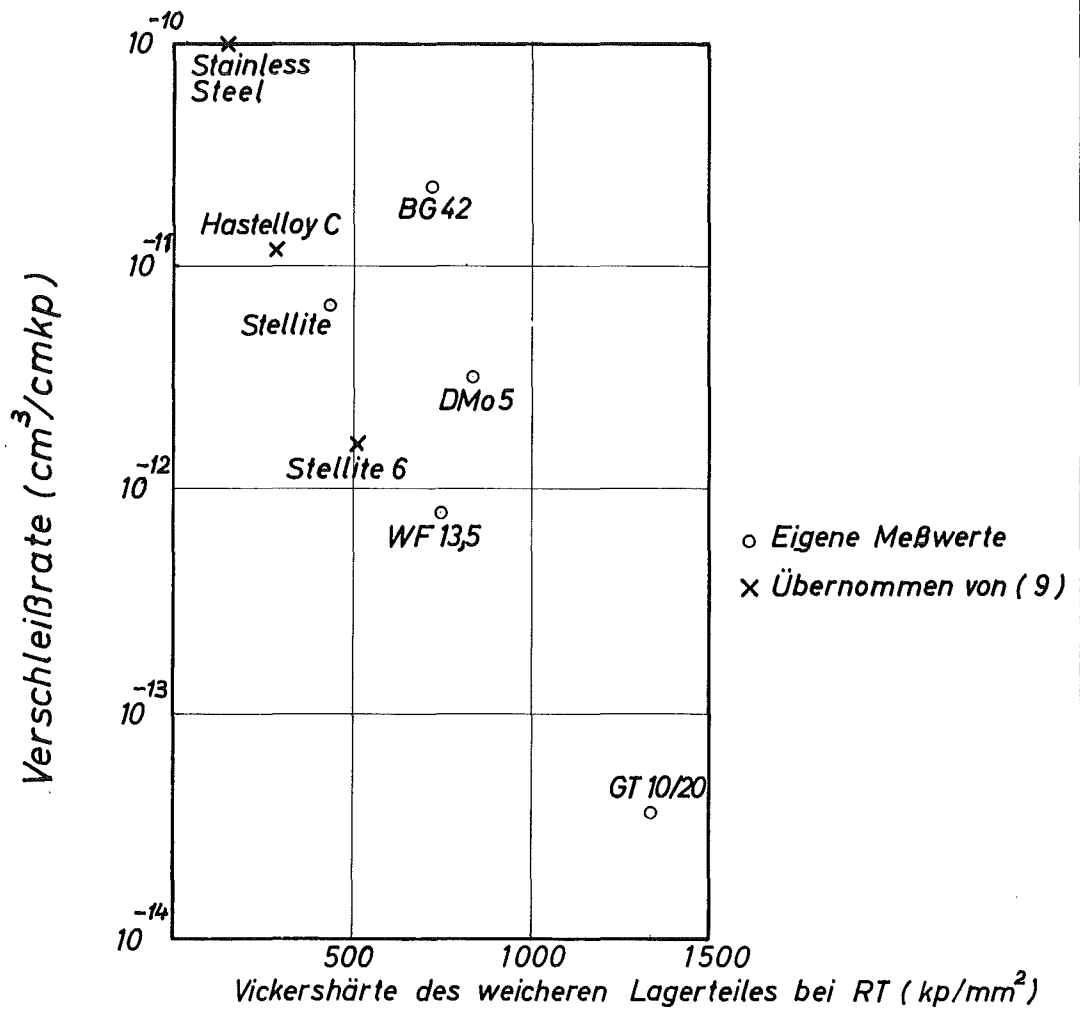


Abb. 17 Mittlere spezifische Verschleißrate für Kugellager aus verschiedenen Werkstoffen in Abhängigkeit der Härte.

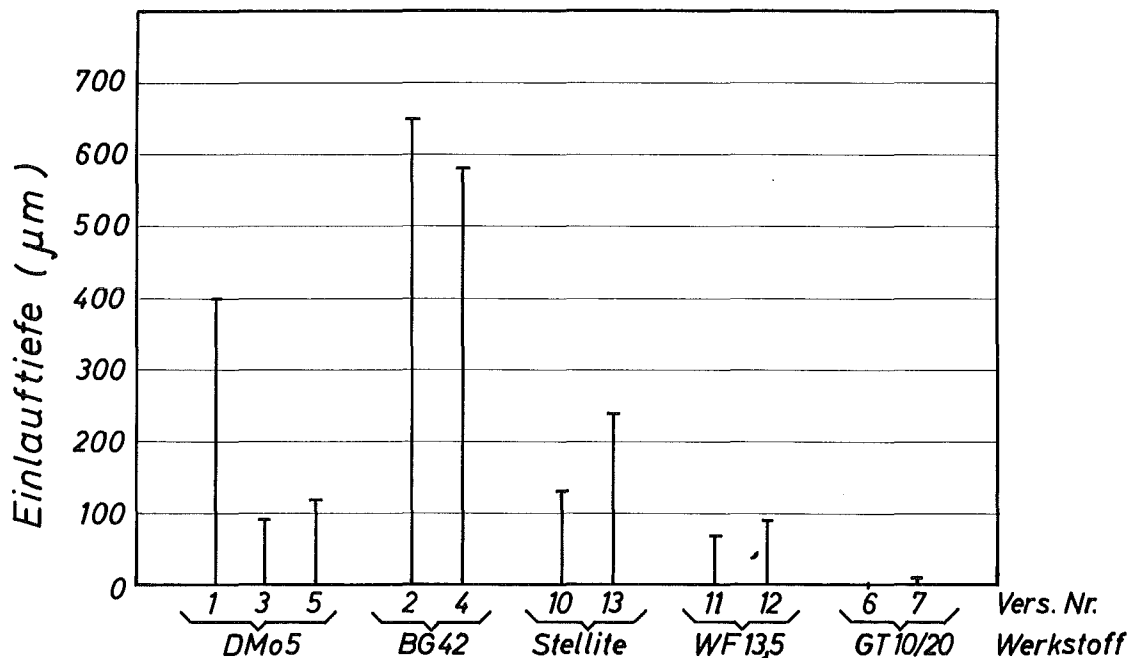


Abb. 18 Die Einlauftiefe (Def. gem. 3.2) bei den Lagerpaaren nach den Versuchen (Versuchsparemeter vgl. 3.4)

Abb. 19: Typische Verschleißmarken an Kugeln nach $0,2 \cdot 10^6$ Umdrehungen (Versuchsparameter vgl. 3.4)

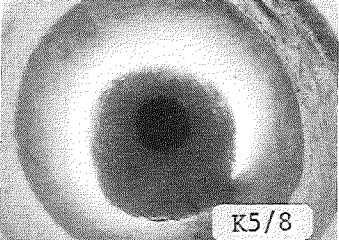
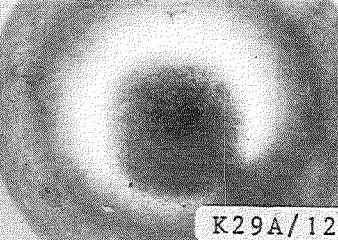
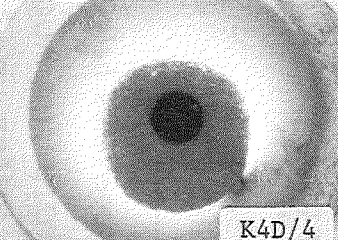
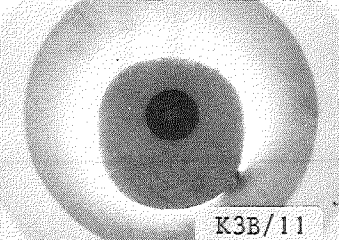
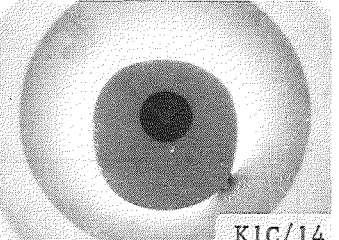
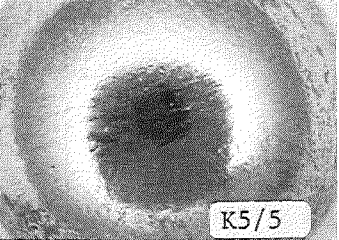
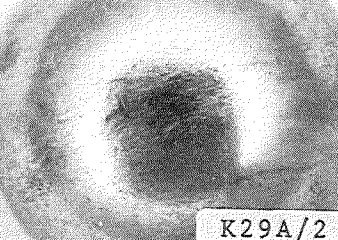
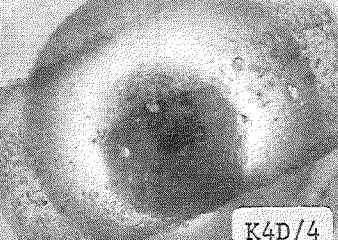
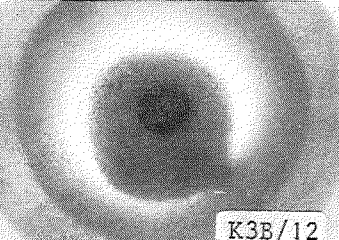
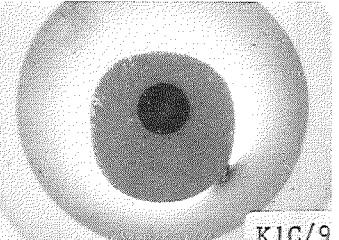
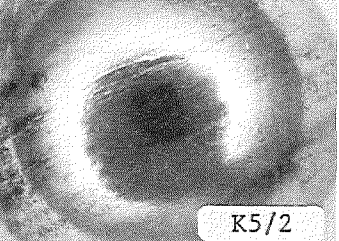
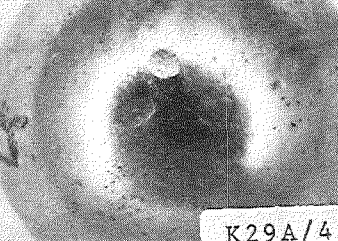

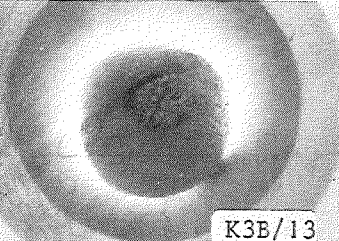
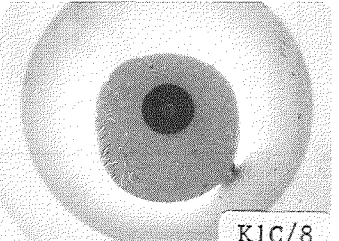
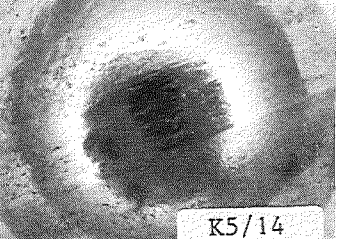
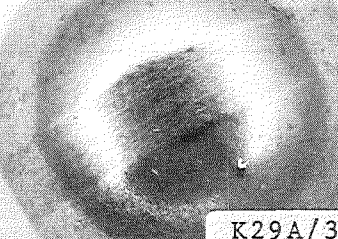

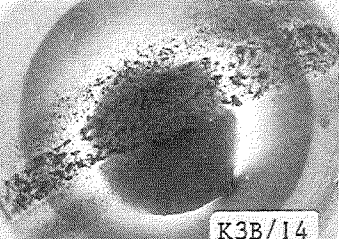
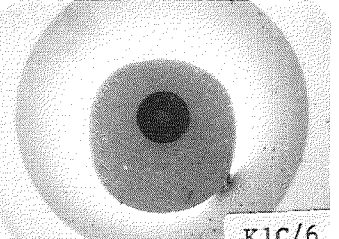
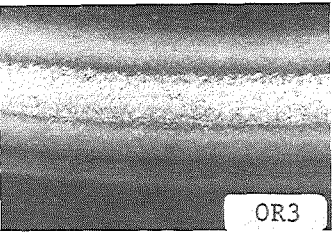
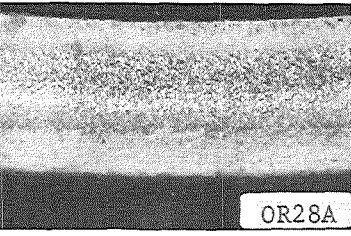
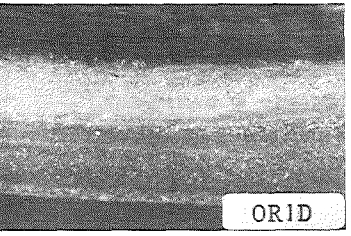
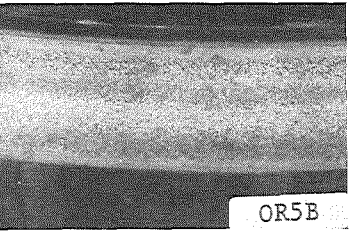
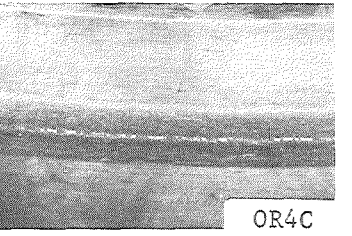
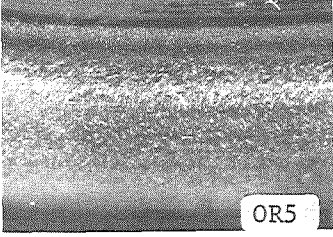
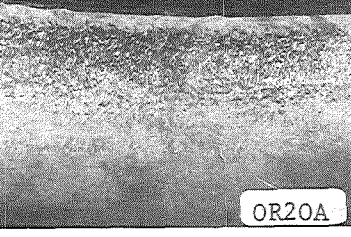
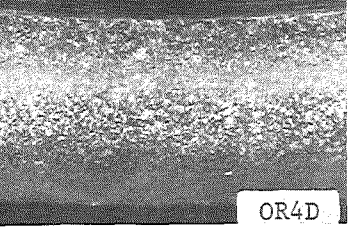
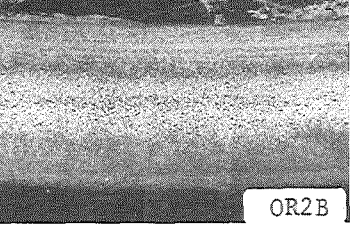
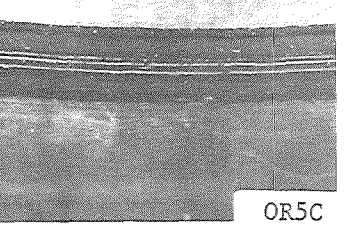
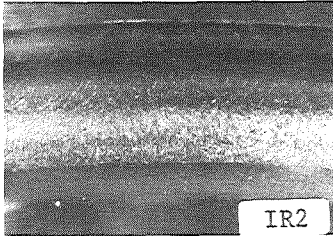
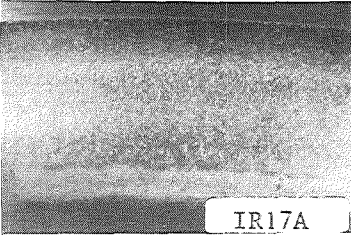
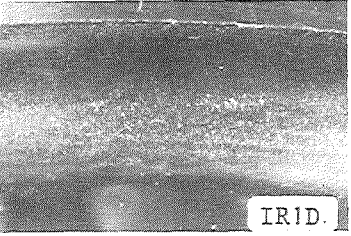
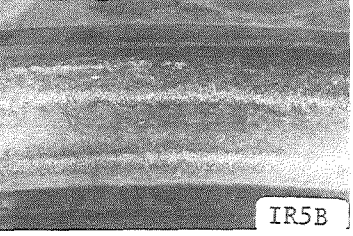
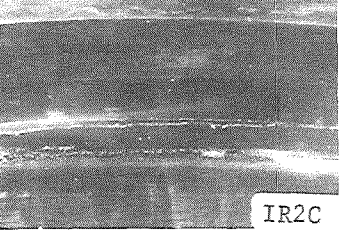
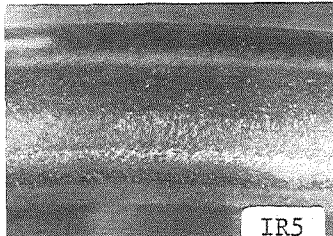
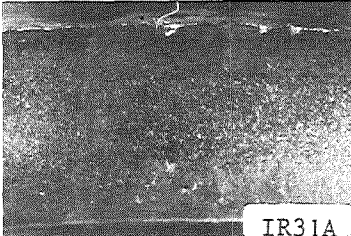
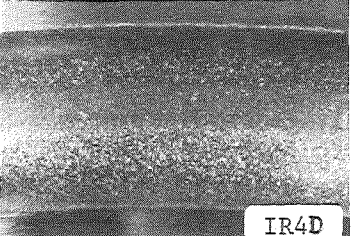

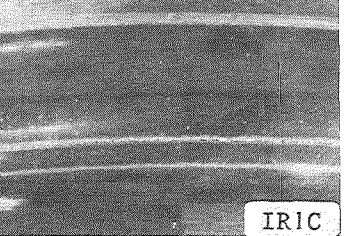
Werkstoff	1) DMo5 Werkzeugstahl	2) BG 42 Cr-Stahl	3) Virium 11/12 Stellite	4) WF 13,5 Ferro-Titanit	5) GT 10/20 Hartmetall
a) Kugel mit dem geringsten Verschleiß	 K5/8	 K29A/12	 K4D/4	 K3B/11	 K1C/14
b) Andeutung eines Verschleißgürtels	 K5/5	 K29A/2	 K4D/4	 K3B/12	 K1C/9
c) Besondere Merkmale (Auflaufspur, Ausbrüche, Aufwalzung)	 K5/2	 K29A/4	 K4D/9	 K3B/13	 K1C/8
d) Kugeln mit stärkstem Verschleiß	 K5/14	 K29A/3	 K4D/16	 K3B/14	 K1C/6

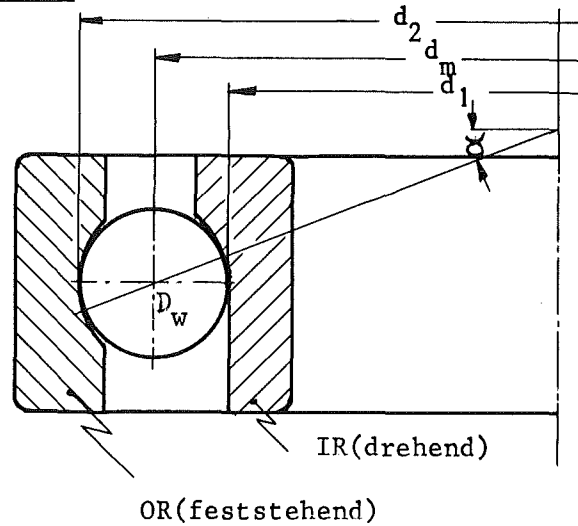
Abb. 20: Typische Verschleißmarken an Ringen nach $0,2 \cdot 10^6$ Umdrehungen (Versuchsparameter vgl. 3.4)

Werkstoff rel. Verschleiß	1) DMo5 Werkzeugstahl	2) BG 42 Cr-Stahl	3) Virium 11/12 Stellite	4) WF 13,5 Ferro-Titanit	5) GT 10/20 Hartmetall
a) Außenring, schwach	 OR3	 OR28A	 OR1D	 OR5B	 OR4C
b) Außenring, stark	 OR5	 OR20A	 OR4D	 OR2B	 OR5C
c) Innenring, schwach	 IR2	 IR17A	 IR1D	 IR5B	 IR2C
d) Innenring, stark	 IR5	 IR31A	 IR4D	 IR2B	 IR1C

ANHANG A

Berechnung der Verschleißrate

Wenn der Außenring stillsteht, wie hier im Versuch, und der Innenring N Umdrehungen ausführt, dann ist der relative Weg, den jede Kugel auf dem Außenring und auf dem Innenring abwälzt



$$s_a = s_i = \pi N \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2} \quad (A1)$$

Es sind d_1 und d_2 die Durchmesser der Berührungsbahnen auf dem Innen- und Außenring. Mit den Ausdrücken

$$d_m = \frac{1}{2} (d_1 + d_2) \quad \text{und} \quad d_2 - d_1 = 2D_w \cos \alpha,$$

die unmittelbar aus obiger Skizze folgen, ergibt sich aus (A1) nach Umformung für den Abwälzweg s einer Kugel

$$s \equiv s_i + s_a = \pi N \left(d_m - \frac{D_w^2 \cos^2 \alpha}{d_m} \right) \quad (A2)$$

Bei der Gleitreibung ist die spez. Verschleißrate w definiert als

$$w = \frac{V}{s_G \cdot F} \quad (A3)$$

mit V = Abriebvolumen

F = Kraft normal zur Bewegungsrichtung

s_G = Gleitweg.

Setzt man analog hierzu bei Kugellagern für den Gleitweg s_G den Abwälzweg aller z Kugeln und für die Normalkraft F die Wälzkörperbelastung Q , so wird Gl. (A3)

$$w = \frac{V}{z \cdot s \cdot Q} \quad (A3^X)$$

Es wird eine gleichmäßige Verteilung der axialen Lagerbelastung F_a auf alle z Kugeln angenommen, so daß gilt

$$Q = \frac{F_a}{z \cdot \sin \alpha} \quad (A4)$$

Mit $V = G/\rho$ (G = Verschleißgewicht) und den Ausdrücken (A2) und (A4) wird die spez. Verschleißrate:

$$w = \frac{G}{\rho \pi N F_a} \frac{d_m \sin \alpha}{(d_m^2 - D_w^2 \cos^2 \alpha)} \quad (A5)$$

	<u>Versuchswerte</u>
w = spez. Verschleißrate	vgl. Abb. 17
G = Verschleißgewicht des Kugellagers	gem. Abb. 15
ρ = Werkstoffdichte	gem. Tab. 2-3
N = gesamte Umdrehungszahl des Innenringes relativ zum Außenring	$0,2 \cdot 10^6$
F_a = Axiallast des Lagers	ca. 300 kp
d_m = Teilkreisdurchmesser der Kugeln	5,35 cm
D_w = Kugeldurchmesser	1,0 cm
α = Berührungswinkel	15° *

* Entspricht dem Nennwert für diese Lager

ANHANG B

Das Tragbild der Kugellager aus Ferro-Titanit

Tragbild der Ringe

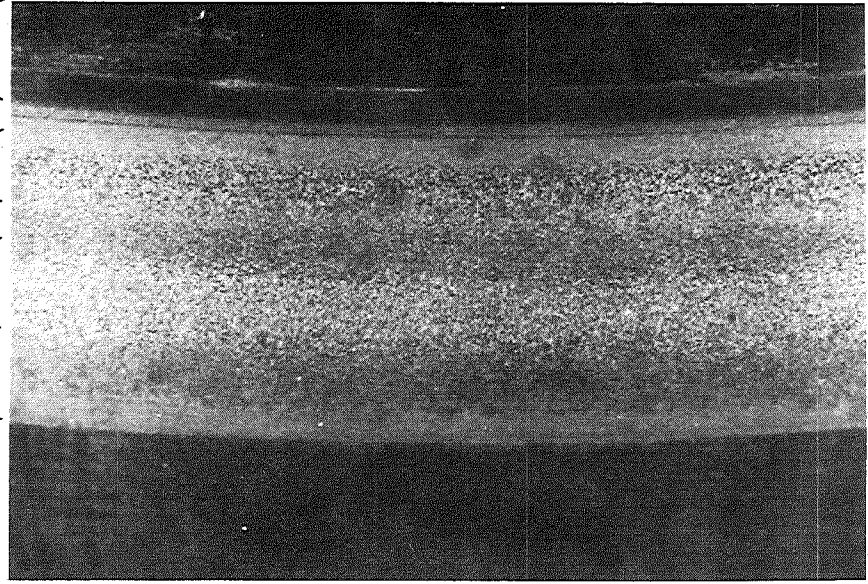
Auf den Ringlaufbahnen der Ferro-Titanit-Lager wurden die Oberflächenmerkmale, wie in Tab. B-1 beschrieben, beobachtet. Ihre Anordnung und Häufigkeit ist auf den Schadenskarten in Abb. 22 für die Lager 2/2B, 3/3B, 4/4B und 5/5B dargestellt und in Abschnitt 4.3.3 bereits zusammenfassend diskutiert.

Tragbild der Kugeln

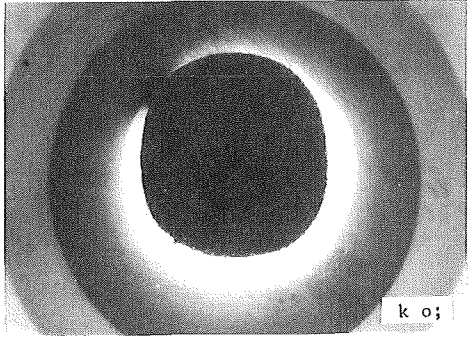
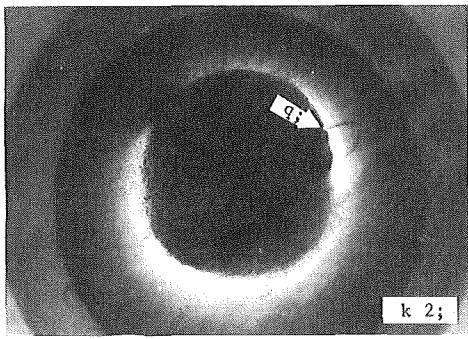
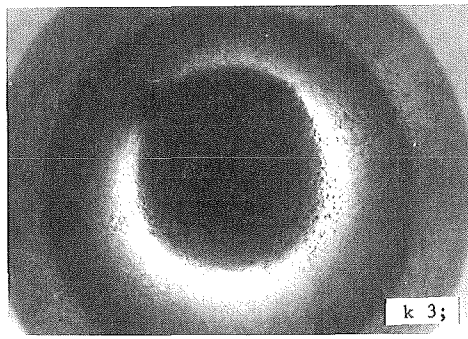
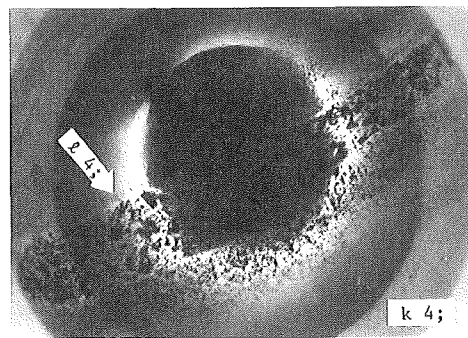

Auf den Ferro-Titanit-Kugeln wurden die Oberflächenmerkmale gemäß Tab. B-2 festgestellt. Einen Überblick über die Häufigkeit dieser Merkmale bei den einzelnen Kugeln gibt Tab. B-3. Die Kugeln sind nach ihrem Gewicht geordnet. (Nr. 1 ist schwerste Kugel des Kugelsatzes.) In der Tabelle ist für jedes Merkmal k, l, m, n der vorherrschende Rauheitsgrad 0 bis 4, in Einzelfällen auch mehrere in wesentlichem Ausmaß vorkommende Rauheitsgrade verzeichnet. Bei den offenen Poren (Typ 0) bedeuten die Ziffern eine Größenangabe, wie in Tab. B-2 definiert. Z.B. sind die Angaben für die Kugel Nr. 6 des Kugelsatzes K2B wie folgt zu lesen: Die Oberfläche hat eine Grundstruktur mit dem Rauheitsgrad 1 (hochglänzend). Sie hat eine wesentlich stärker aufgerauhte gürtelförmige Laufspur vom Rauheitsgrad 3, teilweise auch 4, jedoch hat sich keine konkave Auflaufspur m von benachbarten Kugeln gebildet. Ferner treten einige poröse Bereiche n vom Rauheitsgrad 4 und 3 auf, also kraterartige "Ausfressungen" sowie kleine Poren 0 (< 0,1 mm Durchmesser) und eine aufgewalzte Schuppe q auf.

Diese aufwendige Dokumentation, die in dieser Form nur für die Lager aus Hartmetall und Ferro-Titanit durchgeführt worden ist, sollte nochmals den geringen Verschleiß des Hartmetalls im Vergleich zu dem nächstbesten Werkstoff, dem Ferro-Titanit, verdeutlichen.

Tab. B-1 Typische Oberflächenmerkmale auf den Laufbahnen der Lager aus Ferro-Titanit (WF 13,5) nach $0,2 \cdot 10^6$ Umdrehungen ($T = 400^\circ\text{C}$, Axiallast $F_a = 300 \text{ kp}$, Drehzahl $n = 200 \text{ min}^{-1}$)

Merkmal Typ	Merkmalbeschreibung	Typische Laufspur auf Ringlaufbahn
a	Bereiche mit einer unverletzten, geschliffenen Lauffläche, matt, ähnlich wie bei Hartmetall (vgl. Tab. 4-2, Merkmal a), jedoch fast keine Schleifriefen erkennbar.	 <p style="text-align: right;">OR 5B</p>
b	Breite Laufspur, die gegenüber a stark aufgeraut ist, u.z. in mittleren Zonen stärker als am Rande; Berandung zu a meist deutlich und geradlinig ausgeprägt.	
c	Zone innerhalb von b) mit stärkster Aufrauung (auch mit Nadel fühlbar), jedoch keine Ausbrüche erkennbar.	
e	Vereinzelte unregelmäßig verteilte offene Poren bis zu 0,2 mm Durchmesser. Keine Folge von Verschleiß.	
f	Bräunliche Flecken von mehreren mm^2 Größe, dort unterschiedlich tiefe "Ausfressungen" durch mechanische oder korrosive Einwirkung.	

Tab. B-2 Oberflächenmerkmale auf den Kugeln der Lager aus Ferro-Titanit (WF 13,5) nach $0,2 \cdot 10^6$ Umdrehungen (Versuche 11 und 12)

Merkmal	Merkmalbeschreibung	Typische Beispiele
k	<p>Grundstruktur, die mit Ausnahme an Stellen örtlicher Fehler (z.B. Typ l - q) im wesentlichen die ganze Kugeloberfläche bedeckt, mit unterschiedlichen Aufrauungsgraden wie nachfolgend definiert:</p> <p>k0 Glatte polierte Oberfläche, bei 40-facher Vergrößerung keine Bearbeitungsmarken erkennbar, hochglänzend, vom Neuzustand nicht unterscheidbar.</p> <p>k1 Beginnende Aufrauung durch Verschleiß, bei 20-facher Vergrößerung, schlierenähnl. Aussehen, ohne Vergrößerung (OV) noch hochglänzend.</p> <p>k2 Fortgeschrittene Aufrauung, OV noch glänzend.</p> <p>k3 Starke Aufrauung mit Anschein, als sei die Matrix "herausgewaschen", OV matt glänzend.</p> <p>k4 Kraterartige Ausbrüche, die vermutlich weniger durch Abrieb als vielmehr durch Ermüdung (evtl. auch Korrosion) entstanden sind, OV matt.</p>	 <p style="text-align: right;">k 0;</p>  <p style="text-align: right;">k 1;</p>  <p style="text-align: right;">k 2;</p>  <p style="text-align: right;">k 3;</p>  <p style="text-align: right;">k 4;</p>
l	<p>Gürtelförmige Laufspuren von ca. 2 bis 4 mm Breite, (mitunter auch zwei Gürtel) Ränder meist ausgefranst, vorherrschender Aufrauungsgrad durch Index 0 bis 4, wie bei k definiert, gekennzeichnet.</p>	
m	<p>Konkave Auflaufspur durch Gleitreibung an Nachbarkugeln entstanden, meist in l eingelagert, Breite ca. 0,5 - 1,5 mm, stärkster Aufrauungsgrad innerhalb von m durch Index 0 bis 4, wie bei k definiert, gekennzeichnet.</p>	
n	<p>"Poröser" Bereich bis zu mehreren mm Durchmesser, durch viele offene Poren oder Ausbrüche und durch Färbung gekennzeichnet, Ursache: Poren, Korrosion und/oder Verschleiß?, meist in Aufrauungsgrad 3 oder 4.</p>	
o	<p>Offene Poren bzw. Ausbrüche</p> <p>O1: < 0,1 mm Durchmesser</p> <p>O2: ca. 0,1 - 0,2 mm Durchmesser</p> <p>O3: ca. 0,2 - 0,3 mm Durchmesser (Anzahl angegeben)</p>	
p	<p>Eindrückungen von ca. 0,1 - 0,3 mm Durchmesser, Vermutlich durch eine oberflächennahe Pore hervorgerufen (Anzahl angegeben).</p>	
q	<p>Aufliegende aufgewalzte Schuppe, anscheinend ein plattgewalztes Fremdpartikel, bis zu ca. 0,5 mm Durchmesser.</p>	

Tab. B-3 Oberflächenmerkmale an den Kugeln aus Ferro-Titanit nach den Versuchen 11 und 12

Kugelsatz Nr.	Kugel Nr.	Grundstruktur	Gürtelförm. Laufspur 1	Auflaufspur m	Poröser Bereich n	Offene Poren o	Eindrückungen p	Aufliegende Schuppe q	Bemerkungen
K2B	1	0	2;1		3	1	1x		
	2	3			3	1;2;3;(1x)	1x		
	3	3			3	1;2	1x		
	4	3			3	1;2;3;(1x)			
	5	3;0			3	1;2			
	6	1	3;4		4;3	1		1x	
	7	0	3;1		3	1			
	8	3			4;3	1	1x		
	9	1	3		4;3	1;2			
	10	0	3		4;3	1;2	2x		
	11	0;3					2x		
	12	3			3	1	2x		
	13	3			3	1	1x		
	14	3			3;4	1	1x		
	15	1	4		4;3	1;2	1x		
	16	0	4			1			
K3B	1	0				1	2x		
	2	1;2			3				
	3	0			3	1			
	4	1			3	1			
	5	0	3;4;1		4	1;2			
	6	0	3;4			1;2			
	7	0	3;4;1		3				
	8	2	3		3		1x		
	9	0;3			3	1			
	10	0	3		4	3			
	11	1	3;4		4;3				
	12	1	3;4						
	13	2;3				1		1x?	
	14	0	3;4			1		1x?	
	15	2	1		4	1	1x		
	16	0	3;4					1x	
K4B	1	3			4	1			
	2	3			3;4	2;3;(1x)			
	3	3			3	2;3;(1x)			
	4	1	4	1	4;3	1			
	5	0;3			4;3	1			
	6	3			3;4	1			
	7	0	3;4			1			
	8	3			3	2			
	9	0	4	1	3	1;3;(3x)			
	10	0	3;4	1		1;2			
	11	3;1			3	1			
	12	3			3				
	13	1	3;4;1			1;2			
	14	0	3;1		3	1	1x		
	15	0	3;4;1		4	1;2			
	16	0	4			1			
K5B	1	2	3		3	1	1x	1x	
	2	2			3	1			
	3	1	3;4			1;2			
	4	1	3;1		3	1			
	5	1	3;1		3	1			
	6	0	3;4		4	1	1x		
	7	2	3;4			1;2	1x		
	8	0	3		4;3	1	1x		
	9	2			3	1			
	10	1	2		3	1			
	11	1	2		4	1			
	12	2			3	1			
	13	2	3		4	1			
	14	1	2;4						
	15	1	3;4		4	1			
	16	1	3			1			