

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

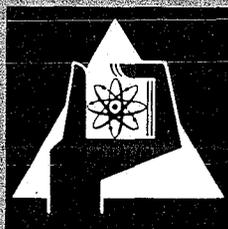
Februar 1972

KFK 1567

Laboratorium für Isotopentechnik

**Bestimmung des Verschleißes und der Kinematik
schnellaufender Wälzlager mit Hilfe radioaktiver Isotope**

B. Herkert



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

Februar 1972

KFK 1567

Laboratorium für Isotopentechnik

Bestimmung des Verschleißes und der Kinematik schnelllaufender
Wälzlager mit Hilfe radioaktiver Isotope⁺

von

Bernhard Herkert

Gesellschaft für Kernforschung mbH. Karlsruhe
⁺ von der Fakultät für Maschinenbau der Universität
Karlsruhe genehmigte Dissertation

Zusammenfassung

An leichtbelasteten und schnellaufenden Kugel- und Rollenlagern wurden Messungen zur Untersuchung der Kinematik und des Verschleißverhaltens durchgeführt. Die Wellenverlagerung wurde kapazitiv, die Käfigdrehzahl optisch und die Rollendrehzahl mit Hilfe von Radioisotopen durch punktförmige Aktivierung einer Rolle gemessen. An allen Lagerteilen wurden kontinuierlich während des Betriebs Verschleißmessungen durchgeführt. Die Teile waren in geeigneter Weise mit Neutronen oder Deuteronen aktiviert worden. Die Ergebnisse zeigen das Einlaufverhalten der Lager. Nach dem Einlauf entsteht nur noch sehr geringer Verschleiß. Auch hoher Käfigschlupf verursachte nach dem Einlauf keine erhöhten Verschleißraten gegenüber Laufbereichen ohne Schlupf.

Abstract

Measurements on high speed and lightly loaded ball and roller bearings were made to investigate the kinematic and wear behaviour. Shaft displacements (by capacitance means), cage speeds (with optic pick up) and the speed of rollers in a roller bearing (by point marking one roller with radioisotopes) were also measured.

Continuous wear measurements were made on all parts of the bearings, that had been suitably activated with neutrons or deuterons. The results show the running-in behaviour and indicate that operation of ball bearings at light load and high cage creep does not affect the wear of a bearing that is run-in.

I N H A L T S Ü B E R S I C H T

	Seite
1. EINLEITUNG	1
1.1 Literatur über Untersuchungen an schnell- laufenden Wälzlagern	1
1.2 Ziel der Arbeit	5
2. MESSVERFAHREN ZUR ERMITTLUNG DER KINEMATIK AN WÄLZLAGERN	6
2.1 Käfigdrehzahlmessung	6
2.2 Rollendrehzahlmessung mit Radioisotopen	7
2.2.1 Meßprinzip	7
2.2.2 Aktivierung der Rolle	8
2.2.3 Ausbildung des Kollimators	11
2.2.4 Blockschalbild	12
2.2.5 Prüfstandsumbau zur Anwendung des Verfahrens	13
2.3 Verlagerungsmessung der Welle	14
3. UNTERSUCHUNGEN ZUR KINEMATIK SCHNELLAUFENDER WÄLZLAGER	15
3.1 Prüfstands Aufbau und Meßgrößen	15
3.2 Kugellager	16
3.2.1 Käfigschlupf	16
3.2.2 Einfluß der Ölzufuhr auf das Schlupf- verhalten	19
3.2.3 Axialverschiebung	22
3.3 Rollenlager	24
3.3.1 Käfigschlupf	24
3.3.2 Wellenbewegung	26
3.3.3 Unwucht	28
3.3.4 Rollenschlupf	28

	Seite
4. AKTIVIERUNGSVERFAHREN	33
4.1 Neutronenaktivierung	33
4.2 Aktivierung mit geladenen Teilchen	34
4.2.1 Aktivierung der Lagerteile	35
4.2.2 Intensitätsverteilung des Deuteronenstrahls	36
4.2.3 Berechnungsbeispiel zur Deuteronenaktivierung	37
5. BESCHREIBUNG DES VERSCHLEISSMESSVERFAHRENS	39
5.1 Meßkreislauf	39
5.2 Meßelektronik	40
5.3 Eichung der Anlage	41
5.4 Beispiel zur Verschleißbestimmung aus Zählraten	42
6. VERSCHLEISSMESSUNGEN AN WÄLZLAGERN	44
6.1 Meßergebnisse Kugellager	44
6.1.1 Versuchsprogramm	44
6.1.2 Kugelverschleiß	44
6.1.2.1 Verschleiß im Schlupfgebiet	44
6.1.2.2 Verschleiß bei Schlupfzusammenbruch	46
6.1.2.3 Verschleiß bei Laststeigerung	48
6.1.2.4 Verschleiß bei geringer Ölzufuhr	49
6.1.2.5 Einfluß des Käfigmaterials auf den Kugelverschleiß	50
6.1.3 Außenringverschleiß	50
6.1.4 Innenringverschleiß	52
6.1.5 Käfigverschleiß	53
6.1.6 Vergleich der Gesamtverschleißmengen	54
6.1.7 Geometrische Veränderungen aufgrund des Verschleißes	57
6.1.8 Diskussion der Ergebnisse	57

	Seite
6.2 Meßergebnisse Rollenlager	58
6.2.1 Versuchsprogramm	58
6.2.2 Rollenverschleiß	58
6.2.3 Rollenstirnflächenverschleiß	62
6.2.4 Verschleiß der Innenringe	65
6.2.5 Verschleiß des Außenrings	65
6.2.6 Verschleiß des Käfigs	66
6.2.7 Vergleich der Gesamtverschleißmengen	67
6.2.8 Geometrische Veränderungen aufgrund des Verschleißes	69
6.3 Lagertemperatur	69
6.4 Einfluß von Wasser auf den Verschleiß	70
7. ZUSAMMENFASSUNG	74
8. ANHANG	76
9. LITERATURVERZEICHNIS	79

1. E I N L E I T U N G

1.1 Literatur über Untersuchungen an schnelllaufenden Wälzlagern

Schnelllaufende Wälzlager sind Lager, welche über den zulässigen Drehzahlen betrieben werden, die in den Katalogen der Hersteller angegeben sind. Eine geeignete Größe zur Beschreibung des "Schnellaufes" ist der Geschwindigkeitswert $d_m \cdot n$. (Mittlerer Lagerdurchmesser d_m in mm, Innenringdrehzahl n in U/min). Im angelsächsischen Schrifttum wird häufig der Wellendurchmesser d statt d_m verwendet.

Das Gebiet der schnelllaufenden Lager beginnt etwa bei $d_m \cdot n > 5 \cdot 10^5$. Nach einer neueren Veröffentlichung [1] wird für Flugzeugturbinen in den nächsten zehn Jahren der gegenwärtige Bereich von $d \cdot n = 1,5-2 \cdot 10^6$ auf $2,5-3 \cdot 10^6$ ansteigen.

Die Überholzeiten für solche Lager liegen gegenwärtig bei 12 000 Stunden, angestrebt werden 30 000 Laufstunden [2]. Von Turbinenlagern für den militärischen Einsatz in den USA wird gefordert, daß sie bei Ausfall der Schmierung eine Minute unter voller Belastung weiterlaufen können. Die Lagertemperaturen liegen bei 150 - 200°C, in Testversuchen wurden bis zu 320°C befriedigende Ergebnisse erzielt [3, 4].

Entsprechend große Anforderungen werden an das Lagermaterial, die Schmierung und die Einbauverhältnisse gestellt. So konnten z.B. die erwähnten militärischen Ansprüche erst erfüllt werden, nachdem innenringgeführte Stahlkäfige mit einer Silberauflage von 0,025 - 0,05 mm Dicke entwickelt waren. Solche Lager überlebten ein 50-maliges Abschalten der Schmierung für jeweils eine Minute bei $d \cdot n = 1,5 \cdot 10^6$.

Eine neue Möglichkeit zur Verbesserung schnelllaufender Wälzlager zeichnet sich ab durch die Verwendung von hohlen Wälzkörpern. In diesem Fall werden die Kugeln aus 2 Halbschalen zusammengeschweißt. Wie theoretische Untersuchungen [5,6] zeigen, haben solche Lager Vorteile für den Betrieb bei $d \cdot n > 2 \cdot 10^6$.

Die Außenringbelastung durch die Fliehkräfte wird geringer, das Bohr- zu Roll-Verhältnis sowie das Verlustmoment kleiner und die Lebensdauer größer.

Den bedeutenden Einfluß der Schmiermittel auf die Lebensdauer zeigt eine Untersuchung [4] von verschiedenen Ölen bei $d_m \cdot n = 1,4 \cdot 10^6$ und Temperaturen bis 340°C . Unter den 11 getesteten Ölen bewies ein synthetischer Kohlenwasserstoff mit Antiverschleißadditiv die günstigsten Eigenschaften.

Die Schmierung hochtouriger Lager wird gewöhnlich durch Einspritzen von Öl vorgenommen, wobei das Öl zusätzlich die Funktion der Lagerkühlung übernimmt. Die Anzahl der Düsen kann einen beachtlichen Einfluß haben, wie in [7] beschrieben wird. Die Temperatur des Außenrings eines Rollenlagers in Umfangsrichtung ($75 \times 130 \times 25 \text{ mm}$; $d \cdot n = 1,2 \cdot 10^6$) variierte um 19°C mit einer Düse und nur um 3°C bei Verwendung von 12 Düsen.

Die Ölnebelschmierung findet man in Fällen geringer Wärmebelastung, wie auch die bei diesen Untersuchungen verwendete BWM-Antriebsturbine mit Ölnebel geschmiert wird.

Bei leichtbelasteten Wälzlagern kann hoher Käfigschlupf entstehen, wenn die Wälzkörper nicht mehr ihrer kinematischen Drehzahl gemäß abrollen. In [8] wird berichtet, wie der Käfigschlupf von Zylinderrollenlagern mit steigender Innenringdrehzahl bis zu Maximalwerten von etwa 60% anwächst und bei weiterer Drehzahlsteigerung wieder abfällt. Dabei ist die Lage und Größe des Schlupfgebiets stark abhängig vom Lagerspiel. Bei geringem oder negativen Lagerspiel entsteht kein Schlupf, bei großem Lagerspiel wurden Schlupfchwankungen festgestellt. In der Untersuchung wurde auch an radioaktiven Rollen Verschleiß gemessen und festgestellt, daß kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Verschleiß und Schlupf besteht. Das Lager kann bei hohem Schlupf durchaus verschleißfrei laufen, wie auch in [2] berichtet wird.

Weitere Angaben über Käfig- und Rollen-Schlupf findet man in [9], wo der Einfluß des Lagerspiels, der Last und ver-

schiedener Öle untersucht wird. Ansteigende Belastung oder Verkleinern des Lagerspiels verringern, zunehmende Viskosität vergrößert den Schlupf.

In [10] ist eine Methode entwickelt, mit deren Hilfe der Schlupf in Rollenlagern berechnet werden kann. Durch Aufbringen von Vorlasten oder Verwendung unrunder Wälzlagerringe ist der Schlupf vermeidbar. Der gleiche Verfasser beschreibt in [11] ein Verfahren zur Berechnung des Schlupfs für axialbelastete Kugellager. In beiden Fällen bestehen wesentliche Abweichungen der theoretischen Werte von Meßergebnissen für besonders geringe Belastung, weil dann keine elastohydrodynamische Schmierung auftritt.

Eine neue Möglichkeit, den Schlupf zu vermeiden, ist die Verwendung von Schmiermitteln, die gegenüber üblichen Ölen ein Mehrfaches an Tangentialkraft übertragen können. So sind in [12] Versuche beschrieben, bei denen ein synthetisches konventionelles Gasturbinenöl Schlupf bis zu 65% ergab, während mit einem synthetischen Kohlenwasserstoff mit der genannten Eigenschaft nur maximal 3% auftrat. Das Viskositätsverhalten der beiden Schmiermittel war ähnlich, die Versuchsbedingungen waren gleich und $d \cdot n$ -Werte bis $3 \cdot 10^6$ wurden erreicht.

In [13] und [14] ist beschrieben, wie die Bewegung der Kugel in radial- und axialbelasteten Kugellagern gemessen wurde. Dazu war eine Kugel diametral magnetisiert worden. In einer um den Außenring gelegten Spule wurden durch die Bewegung der Kugel Wechselströme induziert, die ein Maß für den Winkel zwischen der magnetischen Kugelachse und der Lagerachse darstellten. Bei Radialbelastung war die Winkeländerung proportional dem Käfigschlupf. Bei Axiallast wurden plötzliche Winkeländerungen gemessen, die darauf hindeuten, daß die Kugeln abwechselnd am Außen- oder Innenring abrollen.

In einer theoretischen Arbeit [15] wird die Bewegung einer Kugel im Lager unter der Voraussetzung der Coulombschen Reibung berechnet. In dieser, wie auch in anderen Arbeiten, wird die Bedingung für Rollen der Kugel am Außenring und Rollen

und Bohren am Innenring verwendet. In [10] wird diese Bedingung für ölgeschmierte Lager in Frage gestellt und auch ein Teil der Ergebnisse in [14] deutet darauf hin, daß diese Bedingung zweifelhaft ist. Die Bewegung der Kugeln in schnelllaufenden Schrägkugellagern nähert sich nach [10] der Bewegung von Rollen, d.h. der Vektor der Kugeldrehung wird dem Vektor der Ringdrehung parallel.

Wälzlager können aus verschiedenen Ursachen unbrauchbar werden. So basiert die Lebensdauerberechnung von Wälzlagern nach DIN 622 auf der Ermüdung der Lagerwerkstoffe. Die Folge der Ermüdung sind Risse, Grübchen und Abschälungen an Wälzkörpern und Ringen. Nicht berücksichtigt im DIN-Blatt ist der Verschleiß, also ein im Betrieb entstehender fortwährender Abtrag von Lagermaterial. Der Ausfall von konventionellen, also langsamlaufenden Wälzlagern aufgrund von Verschleiß ist nach [16] im allgemeinen auf die Umweltbedingungen, z.B. Schmutz, zurückzuführen. In einer statistischen Untersuchung, in der 7000 Wälzlager erfaßt wurden, hat sich bestätigt, daß "praktisch" verschleißfreier Lauf bis 50 000 Betriebsstunden möglich ist. "Praktisch" bedeutet, daß mit üblichen Werkstattmeßgeräten Radialspielveränderungen aufgrund des Verschleißes auch nach langen Laufzeiten nicht nachgewiesen werden können.

Erst der Einsatz von Radioisotopen ermöglicht die Messung der sehr geringen Verschleißraten bei Wälzlagern. So wurden an radioaktiven, axialbelasteten Kugellagern [17] Verschleißversuche durchgeführt. Die Lager waren mit einer bestimmten Menge Öl oder Fett versehen. Der Abrieb wurde diskontinuierlich gemessen, wobei der Prüflauf in bestimmten Zeitabständen unterbrochen, Lager und Gehäuse ausgewaschen, die Waschflüssigkeit und das Schmiermittel eingedampft und die Aktivität des Rückstandes bestimmt wurde. Aus einer Vielzahl von Messungen wurde ein Verschleißgesetz der Form $V = at^b$ abgeleitet, das einen Einlaufvorgang beschreibt. (V Verschleiß, t Zeit, a, b Konstanten mit $b < 1$).

1.2 Ziel der Arbeit

Im günstigsten Fall sind Wälzlager Zehntausende von Stunden in Betrieb, ohne daß mit üblichen Längen- und Gewichtsmeßmethoden Verschleiß festgestellt werden kann. Daneben gibt es vielfältige Möglichkeiten, daß Lager vorzeitig versagen. In Prüfstandsversuchen sollen diese Fälle eingegrenzt und bestimmt werden. Unter ungünstigen Bedingungen kann auch der Verschleiß zum Ausfall von Lagern führen. Deshalb besteht der Wunsch, neben anderen Meßgrößen den Materialabrieb kontinuierlich während des Betriebs zu erfassen. Dazu eignet sich besonders die Anwendung von Radioisotopen. Für die Aktivierung und Verschleißmessung mußten im Prinzip bekannte Verfahren verfeinert und ergänzt werden, für die Bestimmung der Kinematik der Lager mußte u.a. ein neues Verfahren zur Messung der Rollendrehzahl entwickelt werden.

Die Aufgabe bestand darin, Aktivierung und Aufbau der Meßeinrichtungen so vorzunehmen, daß der Verschleiß an allen Lagerteilen gemessen werden konnte. Zur Erprobung des Verfahrens sollte das Verschleißverhalten von schnelllaufenden und leichtbelasteten Kugel- und Rollenlagern untersucht werden. Zur Messung kinematischer Größen war auch eine Meßeinrichtung für die Käfigdrehzahl erforderlich, die im Hinblick auf radioaktive Verschleißmessungen den folgenden Anforderungen genügen mußte: Es durften keine Verfahren angewendet werden, die auf dem Prinzip der elektromagnetischen Induktion beruhen. Durch Magnetisieren von Prüfstands- oder Lagerteilen könnte infolge von Kraftwirkungen das Laufverhalten des Lagers gestört werden, insbesondere würden Verschleißpartikel an magnetisierten Teilen hängen bleiben und die Verschleißmessung stören. Aus den gleichen Gründen sollte die Messung der Rollendrehzahl nicht mit sonst üblichen magnetischen Verfahren, sondern mit Radioisotopen durch geeignete Aktivierung einer Rolle gemessen werden.

2. MESSVERFAHREN ZUR ERMITTLUNG DER KINEMATIK AN WÄLZLAGERN

2.1 Käfigdrehzahlmessung

Die Käfigdrehzahl wird optisch gemessen. Eine Stirnseite des Käfigs ist in gleichen Abständen mit hellen und dunklen Feldern versehen. Neben dem Käfig ist der aus Lichtquelle und Phototransistor bestehende Drehzahlgeber angeordnet. Auf Bild 1 erkennt man außer dem Drehzahlgeber noch die um 180° versetzt liegenden Einspritzdüsen zur Lagerschmierung.

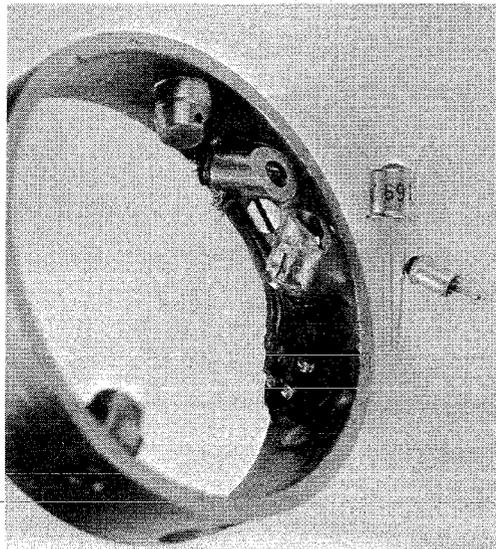


Bild 1. Optischer Drehzahlgeber

Bei der Drehung des markierten Käfigs werden die Lichtstrahlen von den Hell-Dunkel-Feldern unterschiedlich stark reflektiert. Diese Intensitätsunterschiede werden vom Phototransistor in Spannungsimpulse umgesetzt, verstärkt und einem Zähler oder Oszillographen zugeführt. Am Käfig sind 6 Felder markiert, damit bei einer Zählzeit von 10 sec die Drehzahl in Umdrehungen pro Minute ausgedruckt wird.

Vorversuche nach diesem Rückstreuprinzip, sowie nach einem Verfahren, Phototransistor und Lichtquelle auf verschiedenen Seiten des Lagers anzuordnen, wobei die vorbeilaufenden Kugeln den Lichtstrahl unterbrechen, waren gleichermaßen vielversprechend. Das Eintauchen von Lager und Geber in Öl ergab

lediglich eine geringe Schwächung der Lichtintensität. Bei hohen Drehzahlen entsteht jedoch eine starke Ölverschäumung um das Lager, die den Strahlengang sehr beeinträchtigt. Aus diesem Grunde ist die Rückstremethode die bessere Lösung. Der Geber muß nahe am Lager angeordnet sein, etwa 0,5 - 1 mm.

2.2 Rollendrehzahlmessung mit Radioisotopen

Die Entwicklung des Verfahrens zur Rollendrehzahlmessung wurde parallel zu den Verschleißmessungen betrieben. Diese Messungen waren bereits abgeschlossen, als die notwendigen Umbauteile für den Einsatz der Rollendrehzahlmessung im Verschleißprüfstand gefertigt waren. Aus diesem Grunde konnte während der Verschleißmessungen die Rollendrehzahl nicht mitgemessen werden.

2.2.1 Meßprinzip

Eine Zylinderrolle wird an der Kante zwischen Lauffläche und Stirnseite punktförmig aktiviert. Vor dem Lager ist eine Bleiabschirmung angebracht, bestehend aus einer Scheibe und einem äußeren Bleiring. Dadurch entsteht ein Ringspalt von etwa dem halben Rollendurchmesser. Bei der Rollendrehung erscheint der aktivierte Punkt während einer halben Umdrehung im Ringspalt. Während der nächsten halben Umdrehung ist er von der äußeren Bleiabschirmung verdeckt.

Neben der Bleiabschirmung ist ein Meßkristall angeordnet, der die γ -Strahlen der Quelle zählt (vgl. Bild 2).

Prinzip der Rollendrehung

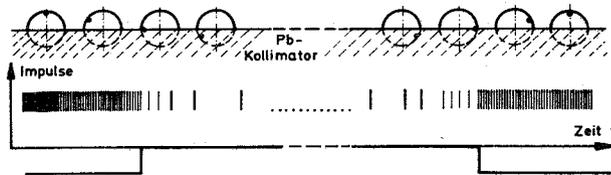
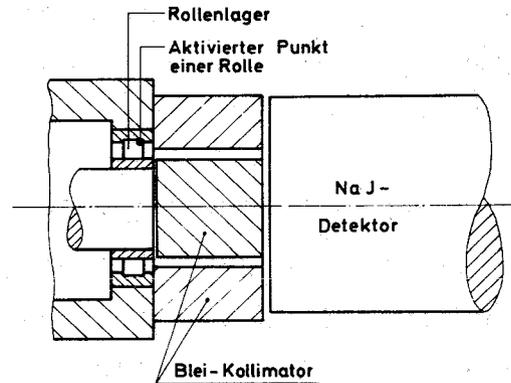


Bild 2.

2.2.2 Aktivierung der Rolle

Die punktförmige Aktivierung, d.h. die Aktivierung einer kleinen Fläche von ca. 1 mm^2 wird erreicht durch Bestrahlung der Rolle mit Deuteronen am Zyklotron.

Für die Auswahl des Strahlers sind verschiedene Gesichtspunkte zu beachten. Das verwendete Radioisotop muß gegenüber der Versuchszeit bzw. Einsatzzeit eine genügend hohe Halbwertszeit besitzen. Das für Radioisotope charakteristische Energiespektrum sollte für den vorliegenden Meßfall der folgenden Bedingung bezüglich der Energielage der γ -Quanten genügen. Im allgemeinen emittiert ein Strahler γ -Quanten bei mehreren diskreten Energien. Die Abschwächung der Quanten durch die Wechselwirkungen mit Blei ist stark abhängig von der Energie der Quanten. Für den betreffenden Energiebereich nimmt die Absorptionswirkung mit zunehmender Energie stark ab. Deshalb sollte das Meßisotop eine niedrige γ -Energie kleiner als 0,5 MeV

besitzen.

Bei der Bestrahlung von Eisen mit Deuteronen entstehen ^{52}Mn , ^{56}Co und ^{57}Co . Die Tiefenverteilung dieser Isotope nach [18] zeigt Bild 3.

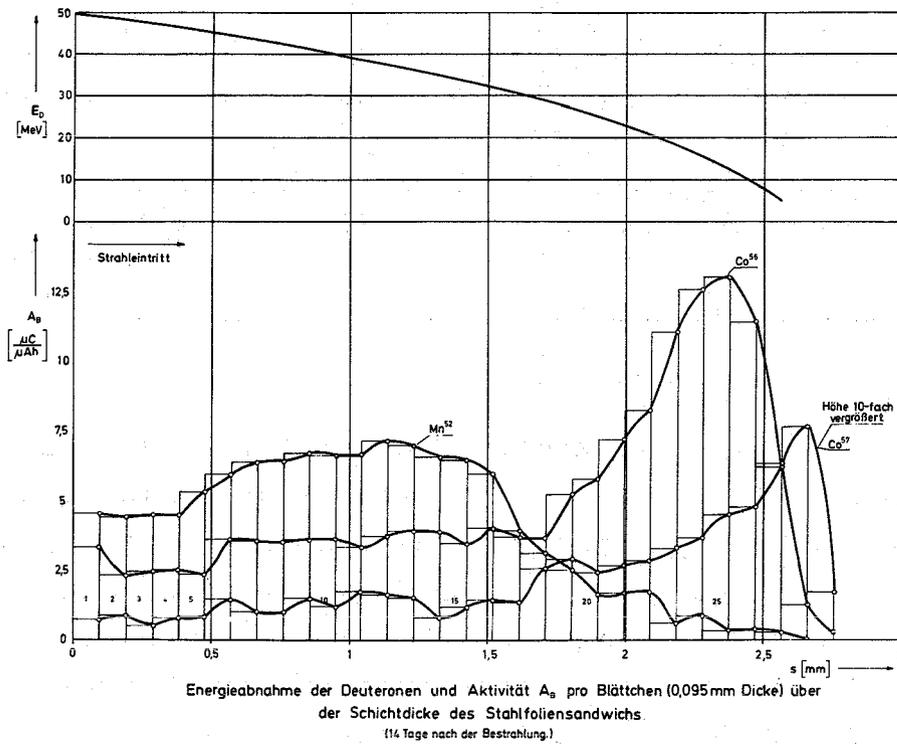


Bild 3.

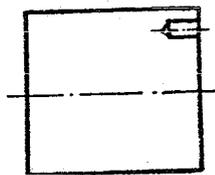
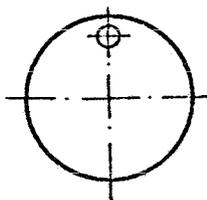
In der folgenden Tafel 1 sind die bei Bestrahlungen von Eisen entstehenden Isotope und deren Daten aufgeführt. Wälzlager- und auch andere Stahlsorten enthalten oft geringe Cr-Zulegierungen, die zusätzlich zur ^{52}Mn -Erzeugung beitragen können.

Entstehende Radioisotope	Halbwertszeit Tage	Energie der γ -Quanten MeV	γ -Häufigkeit/Zerfall %	Mögliche Entstehungskernreaktionen
^{52}Mn	5,7	0,511	67	^{54}Fe (d, α) ^{52}Cr (d, 2n) ^{53}Cr (d, 3n)
		0,744	82	
		0,935	84	
		1,434	100	
^{56}Co	77	0,511	40	^{56}Fe (d, 2n) ^{57}Fe (d, 3n)
		0,847	100	
		1,04	15	
		1,24	66	
^{57}Co	270	0,122	87	^{56}Fe (d, n) ^{57}Fe (d, 2n) ^{58}Fe (d, 3n)
		0,136	11	

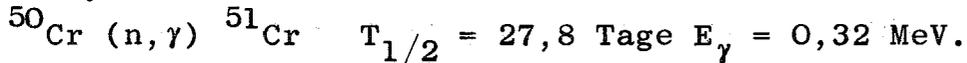
Tafel 1

Man erkennt, daß nach den angeführten Kriterien das Isotop ^{57}Co besonders geeignet ist. Es besitzt die relativ niedrige γ -Energie von 0,122 MeV und erreicht das Maximum der Anregungsfunktion bei kleinerer Deuteronenenergie als ^{52}Mn und ^{56}Co , so daß diese Isotope bei geeigneter Aktivierung nicht auftreten können. Bei der Aktivierung mit Deuteronen der Energie von 50 MeV, wie sie am Zyklotron im Kernforschungszentrum Karlsruhe zur Verfügung stehen, ist die Rolle in einer Vorrichtung zu bestrahlen, die an der zu aktivierenden Stelle eine Dicke von 2,7 mm besitzt. Dadurch wird das Maximum der ^{57}Co -Aktivität in die Oberfläche der Rolle gebracht.

Zum Zeitpunkt dieser Untersuchung war das Zyklotron am Kernforschungszentrum Karlsruhe nicht voll einsatzfähig (zu geringe Stromstärke $< 1 \mu\text{A}$, häufiger Ausfall der Anlage), so daß eine Ersatzlösung zur Aktivierung der Rolle gewählt werden mußte. Dazu wurde auf elektroerosivem Wege an der Stirnfläche der Rolle



eine Bohrung herausgearbeitet und eine aktive Probe eines geeigneten Radioisotops eingepresst. Die Bohrung wurde mit einem Kunststoff verschlossen. Als Isotop wurde eine Probe aus Elektrolytchrom im Reaktor mit Neutronen aktiviert.



Diese Methode kann dann Vorteile gegenüber der punktförmigen Aktivierung der Rolle selbst bieten, wenn ein solcher Eingriff an der Rolle zulässig ist.

1. Die Isotopenerzeugung ist unabhängig vom Rollenmaterial, da beliebige, im Reaktor erzeugte Isotope verwendet werden können.
2. Durch dichten Verschluss eines so hergestellten aktivierten Maschinenteils entsteht ein sogenannter "umschlossener Strahler", dessen Handhabung ungefährlicher ist, da keine Kontamination auftreten kann. Dadurch wird die Anwendung solcher Methoden in der Industrie erleichtert.

2.2.3 Ausbildung des Kollimators

Der Kollimator (Bleiblende, Bleiabschirmung) hat die Aufgabe, eine hinreichende Abschirmung der γ -Strahlung des aktivierten Punktes zu ermöglichen. Zur eindeutigen Zuordnung der Rollenstellung zur gemessenen Strahlungsintensität muß das Zählratenverhältnis a , das ist der Quotient aus den gemessenen Intensitäten des Strahlers in der freien und der abgedeckten Stellung, genügend hoch sein. Gleichzeitig muß die von der Rollendrehzahl unabhängige mittlere Zählrate Z_m , das ist die im Mittel vom Detektor aufgelöste Impulszahl innerhalb eines gewissen Bereiches liegen.

Zur Erfassung dieser Einflußgrößen war ein Modellprüfstand gebaut worden [19], mit dem Rollendrehzahlen bis zu 30 000 U/min erreicht werden konnten. Die Versuche mit verschiedenen stark aktivierten ^{51}Cr -Proben von 0,5 - 1,35 mC und unterschiedlichen Kollimatoren mit auswechselbaren Innenteilen zeigten, daß eine Drehzahlmessung unter folgender Bedingung möglich ist:

$$a \cdot Z_m = \text{konst. mit } a > 2 \text{ und } Z_m > 10^4 \text{ I/sec}$$

Besonders wichtig ist die Anordnung des Kollimators unmittelbar neben dem Lager. Ein Kollimator mit engem Spalt ergibt zwar ein hohes Zählratenverhältnis von etwa 20 - 100, aber geringe mittlere Zählraten, da der Raumwinkel sehr klein ist und nur ein geringes Volumen des Kristalls zur Messung ausgenutzt wird. In diesem Fall sind stärkere Aktivitäten als oben angegeben erforderlich. Dagegen sind gute Ergebnisse mit kleinen Probenaktivitäten zu erzielen, wenn ohne die innere Bleischeibe gearbeitet wird. Der Innendurchmesser des äußeren Bleirings war folgendermaßen gewählt:

$$d_{\text{Laufbahn des Innenrings}} < d_{\text{i Kollimator}} < d_{\text{Teilkreis der Rollen}}$$

Damit wurden Zählratenverhältnisse von $a = 2 - 10$ erreicht. Die Länge des Kollimators in Achsrichtung lag bei 3 cm.

2.2.4 Blockschaltbild

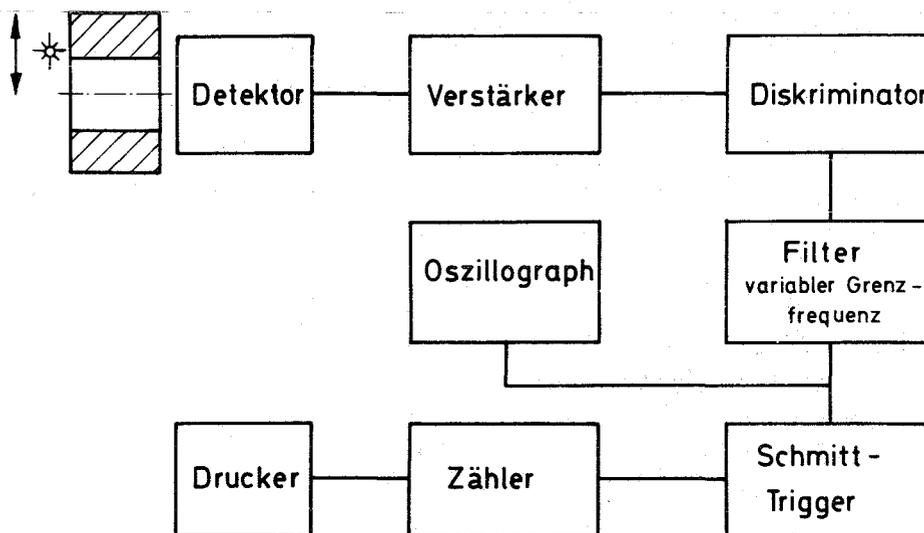


Bild 4. Blockschaltbild der Rollendrehzahlmessung

Als Detektor wird wegen seiner hohen Empfindlichkeit ein Szintillationskristall verwendet. γ -Quanten verursachen im Detektor Spannungsimpulse. Ein Verstärker mit Diskriminator bildet daraus Normimpulse (Amplitude 5V, Impulsbreite 10^{-6} sec), die einem elektrischen Filter variabler Grenzfrequenz (0 - 200 KHz) zugeführt werden. Die Einschwingvorgänge dieser Impulse werden im Filter linear superponiert. Aus den unterschiedlichen Impulsdichten aufgrund der beiden Rollenstellungen erhält man am Filterausgang 2 verschieden hohe Spannungen, die wegen der statistischen Folge der Einzelimpulse aus Kernzerfällen eine Störmodulation aufweisen. Zur weiteren Verarbeitung ist ein Schmitt-Trigger erforderlich, der trotz überlagerter Störungen die den beiden Rollenstellungen entsprechenden Spannungen sicher voneinander unterscheiden kann. Zähler und Drucker registrieren die Umdrehungen der Rolle.

Mit einem Speicheroszillographen läßt sich der Verlauf von einzelnen Rollendrehungen beobachten, was besonders bei Schlupferscheinungen der Rolle von Interesse ist. Auf diese Weise können auch Drehzahländerungen der Rolle während eines Käfigumlaufs erfaßt werden.

Die in der Kernstrahlenmeßtechnik üblichen Ratemeter konnten zur Verarbeitung der Impulsdichten nicht verwendet werden. Die Grenzfrequenz eines Ratemeters liegt bei 3 Hz, damit könnten nur Drehzahlen von 0 - 180 U/min gemessen werden. Die Verwendung eines geeigneten Filters erlaubt Drehzahlmessungen von 0 - 10^6 U/min.

2.2.5 Prüfstandsumbau zur Anwendung des Verfahrens

Der in Kapitel 3.1 beschriebene Prüfstand, Bild Nr.6, mußte umgebaut werden, damit das Verfahren eingesetzt werden konnte. Dabei wurde besonders auf den zeitsparenden Ein- und Ausbau des Lagers und die Anordnung des Kollimators möglichst nahe am Lager geachtet. Überdies wurde zur Käfigdrehzahlmessung aus Montage- und Platzgründen der optische Geber nicht neben dem Lager, sondern außerhalb des Prüfstandes angeordnet und die Lichtführung zum hell-dunkel-markierten Käfig mit einem biege-

samen zweiarmigen Lichtleiter vorgenommen. Die Ergebnisse der Rollendrehzahlmessung sind in Kap. 3.3.4 mitgeteilt. Bild 5 zeigt einen Schnitt durch den Prüfstand sowie ein Photo der Gesamtansicht mit aufgebautem Detektor.

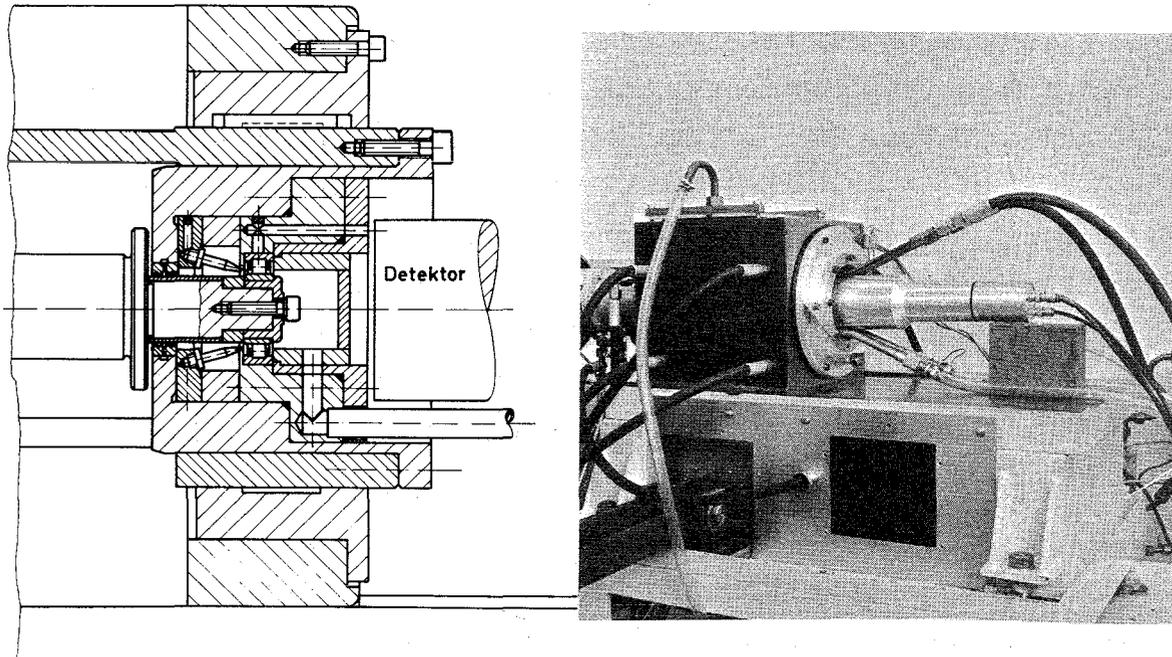


Bild 5. Prüfstand zur Rollendrehzahlmessung

2.3 Verlagerungsmessung der Welle

Eine wichtige Einflußgröße auf das Laufverhalten von Wälzlagern sind u.a. das Lagerspiel und die damit zusammenhängenden Bewegungsmöglichkeiten der Welle mit dem Innenring. Die Bewegung der Welle wird erfaßt mit einer kapazitiven Meßeinrichtung, die am Lehrstuhl für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau der Universität Karlsruhe, Prof. Kollmann, entwickelt wurde. Mit $2 \text{ um } 90^\circ$ versetzten und an der Welle angeordneten Gebern, deren Signale weiterverarbeitet und auf einen Oszillographen mit X-Y-Ablenkung gegeben werden, kann die Wellenbewegung während des Betriebs gemessen werden. Die Geber haben einen linearen Bereich von 1 mm , eine Genauigkeit von $1 \text{ }\mu\text{m}$ und eine Auflösung von $0,1 \text{ }\mu\text{m}$. Die Grenzfrequenz des Meßgerätes liegt bei 1 kHz .

3. U N T E R S U C H U N G E N Z U R K I N E M A T I K S C H N E L L A U F E N D E R W Ä L Z L A G E R

3.1 Prüfstands Aufbau und Meßgrößen

Die Verschleißmessungen wurden mit einem Schnellaufprüfstand durchgeführt, dessen konstruktiver Aufbau in Bild 6 dargestellt ist.

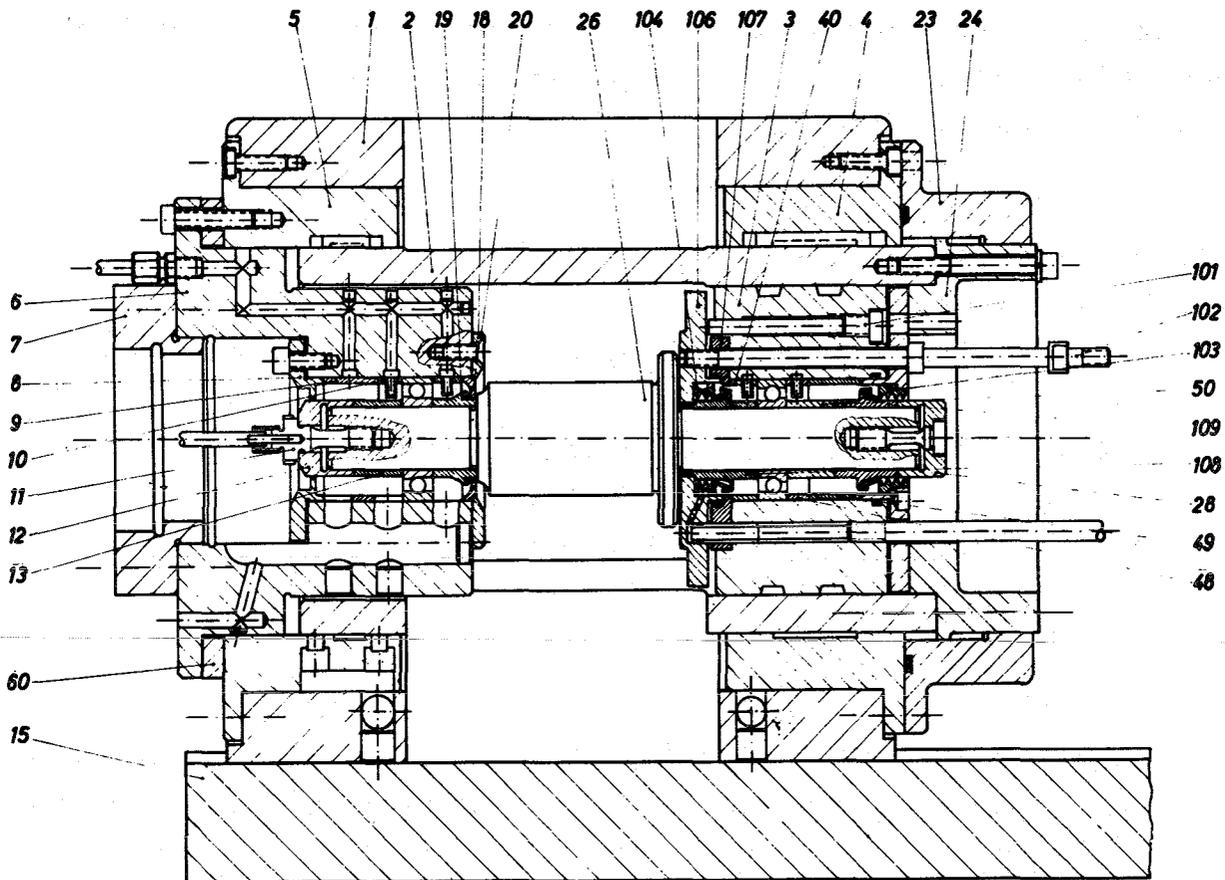


Bild 6. Wälzlagerprüfstand

Die Welle 26 ist an 2 Stellen gelagert und wird von links durch eine Luftturbine angetrieben. Das linke Lager dient als Stützlager, das rechte wird für die Messungen mit Radioisotopen verwendet und ist mit einem eigenen Ölkreislauf ausgestattet. Die Abdichtung der Welle wird durch sorgfältig ausgebildete Labyrinthdichtungen und zusätzliches Einblasen von Luft gewährleistet. Der Außenring des Prüflagers ist fest verbunden mit der Nabe 3, die ihrerseits mit der Hülse 2 verschraubt ist. Diese Hülse ist

hydrostatisch im Prüfstandsgehäuse 4 und 5 gelagert und ist in axialer und radialer Richtung frei beweglich. Durch den Ringkolben 24 im rechten Abschlußdeckel 23 kann eine hydraulische Axialbelastung in beiden Richtungen aufgebracht werden. Die Belastung in radialer Richtung wird über einen Flachriemen in der Wellenmitte aufgebracht. Unwuchtmassen können in dazu vorgesehenen Bohrungen im Flansch der Welle befestigt werden. An diesem Flansch wird auch die in 2.3 erwähnte Verlagerungsmessung der Welle vorgenommen. Die axiale Verlagerung der Kugellagerringe wird an der rechten Stirnseite der Welle gegenüber dem Ringkolben 24 gemessen.

Folgende Größen wurden gemessen:

1. Drehzahl der Welle
2. Drehzahl des Käfigs
3. Temperaturen des Außenrings, sowie des Öls am Ein- und Austritt in den Prüfstand
4. Axialverschiebung der Lagerringe (nur Kugellager)
5. Verlagerung der Welle (nur Rollenlager)
6. Drehzahl der Rollen (nur Rollenlager)
7. Verschleiß

3.2 Kugellager

Die untersuchten Kugellager waren vom Typ 6005 und mit außenringgeführten Bronzemassivkäfigen ausgerüstet. Abmessungen 25 x 47 x 12 mm. Aus Montagegründen war eine der Innenringschultern abgeschliffen. Die Lager wurden axial belastet; die höchste Drehzahl betrug 50 000 U/min, was einem $d_m \cdot n$ -Wert von $1,8 \cdot 10^6$ entspricht.

3.2.1 Käfigschlupf

Wie bereits in der Einleitung erläutert, neigen leichtbelastete Wälzlager unter gewissen Bedingungen zu hohem Käfigschlupf. "Leicht" bedeutet Belastungen von etwa 0-2% der Lagertragzahl; darunter fallen z.B. Lager, die nur durch das Eigengewicht von Wellen beaufschlagt werden. Der Schlupf ent-

steht, wenn die Widerstände des Lagers größer werden als die Kräfte zwischen Wälzkörpern und antreibendem Innenring. Der Käfigschlupf ist definiert als Differenzdrehzahl zwischen gemessener n_{Kgem} und berechneter Drehzahl n_K gemäß der Nenndaten des Lagers, bezogen auf diese Drehzahl n_K .

$$S_K = \frac{n_K - n_{Kgem}}{n_K} \cdot 100\% \quad \text{mit} \quad n_K = \left(1 - \frac{d_w \cdot \cos \alpha_o}{T}\right) \cdot \frac{n_i}{2}$$

Druckwinkel $\alpha_o = 20^\circ$
 Kugeldurchmesser $d_w = 5,556 \text{ mm}$
 Teilkreisdurchmesser $T = 35,992 \text{ mm}$
 Innenringdrehzahl n_i

Mit den Nenndaten des Lagers wird

$$n_K = 0,4275 \cdot n_i$$

Im folgenden wird das Schlupfverhalten der untersuchten Kugellager und seine Beeinflussung beschrieben. In Bild 7 ist das charakteristische Schlupfverhalten dargestellt.

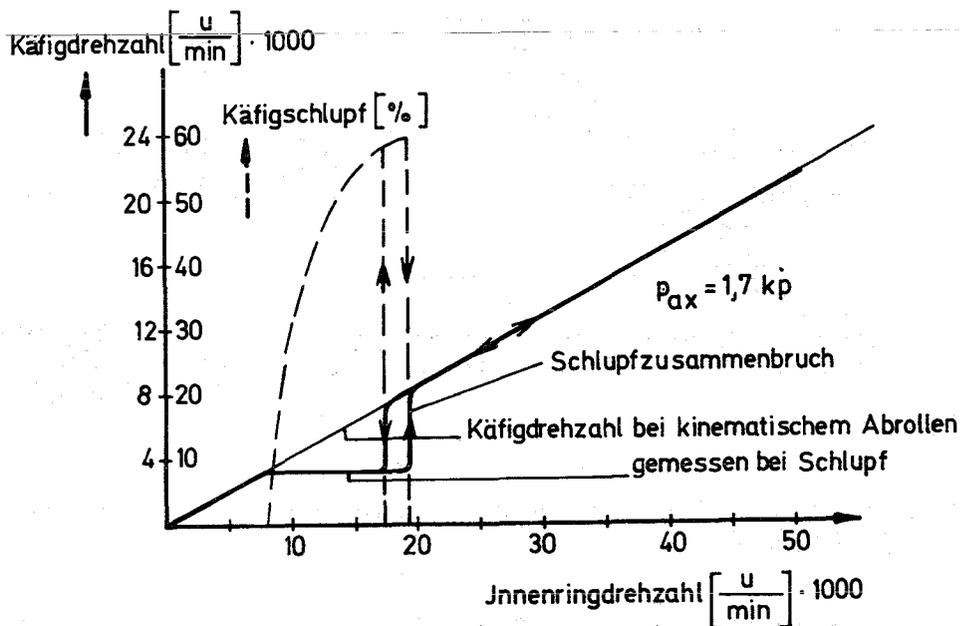


Bild 7. Käfigdrehzahl und Käfigschlupf

Mit steigender Innenringdrehzahl dreht sich der Käfig zunächst

ohne Schlupf, behält dann eine etwa konstante Drehzahl entsprechend anwachsendem Schlupf und wird bei einer höheren Drehzahl plötzlich beschleunigt - der Schlupf bricht zusammen. Mit fallender Innenringdrehzahl erfolgt ein entsprechendes, plötzliches Entstehen des Schlupfs bei einer um 1000 - 2000 U/min geringeren Drehzahl. Die Lage und Größe des Schlupfgebiets wird im wesentlichen von Axiallast und Ölmenge bestimmt. Bei diesen Untersuchungen wurde ausschließlich Hydrauliköl Tellus 15 verwendet ($\eta = 5,6$ cP bei 50°C , Ölzufuhr $0,5$ l/min).

Durch Steigerung der Belastung verschiebt sich sowohl der Beginn als auch der Zusammenbruch des Schlupfs zu höheren Drehzahlen, wie in Bild 8 verdeutlicht wird. In den beiden Streubändern lag in Abhängigkeit von der Axiallast der Schlupfbeginn bei $4 - 18$ 000 U/min, der Schlupfzusammenbruch bei ca. $14 - 27$ 000 U/min. Bei einer Steigerung der Axialbelastung über 6 kp trat kein Schlupf mehr auf.

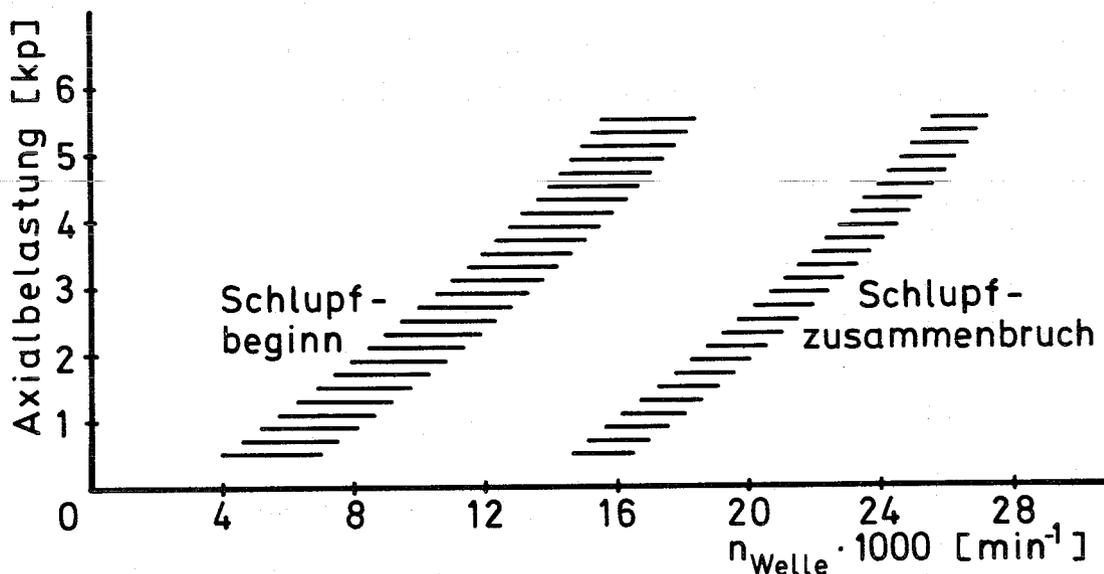


Bild 8. Einfluß der Belastung auf Schlupfbeginn und Schlupfzusammenbruch.

In Bild 9 ist dargestellt, wie der maximale Schlupf von der Belastung abhängig ist für den Lastbereich, in dem hoher Schlupf auftritt.

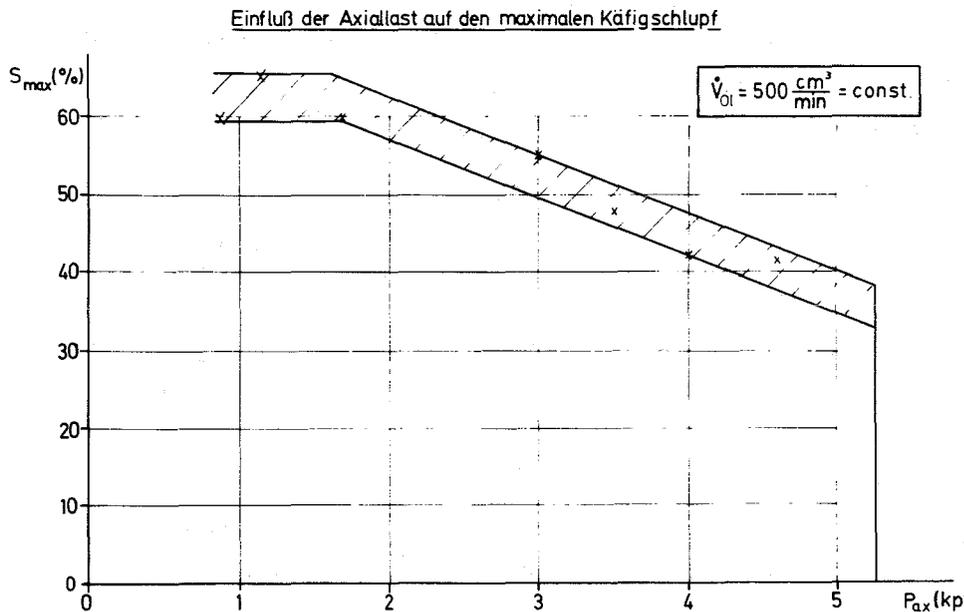


Bild 9.

Theoretische Aussagen über die Gründe des Schlupfzusammenbruchs sind bislang nicht gemacht worden. Nach einer Rechnung in [20] wird Schlupf in der gemessenen Größenordnung vorausgesagt, doch gibt es keine Erklärung für den Schlupfzusammenbruch. Von Kraftmessungen am Außenring eines Rollenlagers ist bekannt [8], daß plötzliche Änderungen des Käfigschlupfs mit dynamischen Bewegungen der Welle und Kraftänderungen am Außenring gekoppelt sind. Bei Messungen an Rollenlagern im Rahmen dieser Arbeit wurden ebenfalls unregelmäßige Wellenbewegungen bei Schlupf gemessen. Solche Vorgänge, die nach [21] der "inneren Dynamik" des Wälzlagers zugehören, können zusammen mit Restunwuchten für den Schlupfzusammenbruch verantwortlich sein.

3.2.2 Einfluß der Ölzufuhr auf das Schlupfverhalten

Das Schmieröl wurde mit zwei um 180° versetzten Düsen in den Spalt zwischen der abgeschliffenen Innenringschulter und dem Käfig eingespritzt (Düsendurchmesser 0,7 mm). Durch getrennte Abflußbohrungen zu beiden Seiten des Lagers ist es mög-

lich, den durch das Lager hindurchgehenden Anteil der Gesamtölzufuhr separat zu messen. In Bild 10 sind die Gesamtölzufuhr und der das Lager durchströmende Öldurchsatz dargestellt. Die Kurven beginnen nicht im Ursprung, da durch die Sperrluftabdichtung ein geringer Überdruck im Prüfstandsgehäuse herrscht, der zunächst überwunden werden muß.

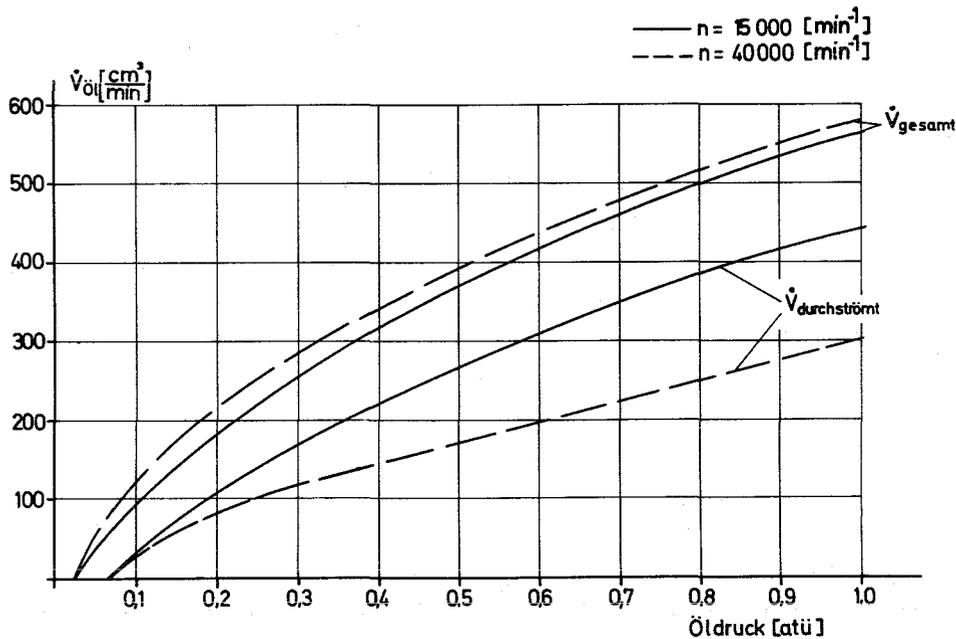


Bild 10. Einfluß des Öldrucks auf Ölzufuhr und Öldurchsatz

Das dem Lager zugeführte Schmieröl hat einen wesentlichen Einfluß auf den Verlauf der Käfigdrehzahl im Lastbereich hohen Käfigschlupfs. Durch Verringern der Ölzufuhr unter $0,5 \text{ l/min}$ wird das Schlupfgebiet eingeengt. In Bild 11 ist gezeigt, daß für jede Axiallast unterhalb einer bestimmten Mindestölzufuhr kein hoher Schlupf mehr auftritt. Eine Steigerung der Ölzufuhr darüber hinaus verändert den maximalen Schlupf nicht wesentlich, wie an den waagrecht verlaufenden Kurven deutlich wird. Auch bei einer Steigerung der Ölzufuhr über $0,5 \text{ l/min}$ entstand oberhalb $5 - 6 \text{ kp}$ Axialbelastung kein Käfigschlupf. Die Verschleißversuche wurden, von später beschriebenen Ausnahmen abgesehen, mit der konstanten Ölzufuhr von $0,5 \text{ l/min}$ durchgeführt.

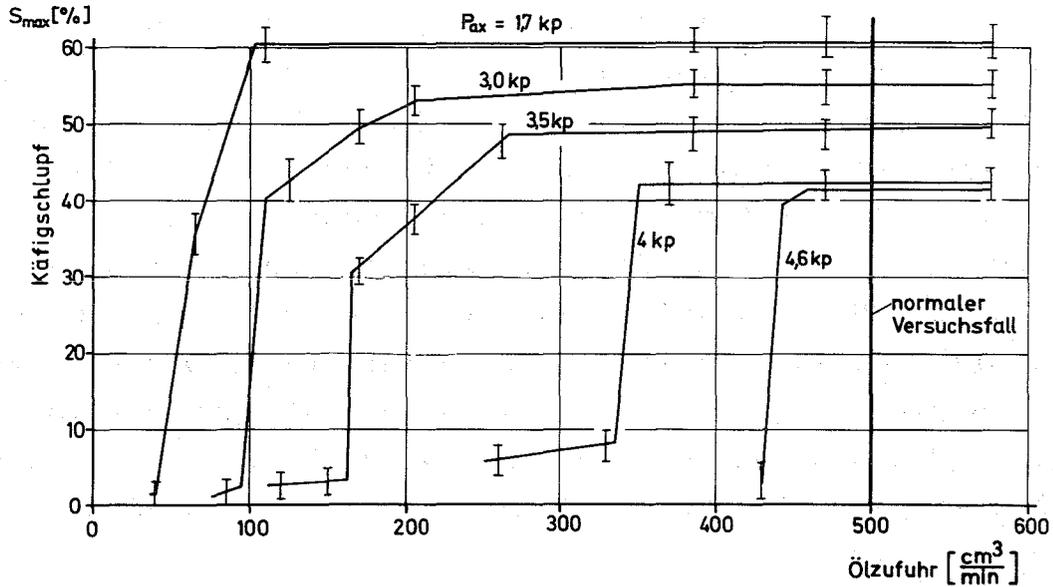


Bild 11. Einfluß der Ölzufuhr auf den maximalen Käfigschlupf

Weiterhin wird der Zusammenhang zwischen der Ölzufuhr und der Lage des Schlupfgebiets aufgeführt (Bild 12). Bei geringerer Ölzufuhr wird nicht nur der maximal auftretende Schlupf kleiner, sondern auch das Schlupfgebiet eingeengt.

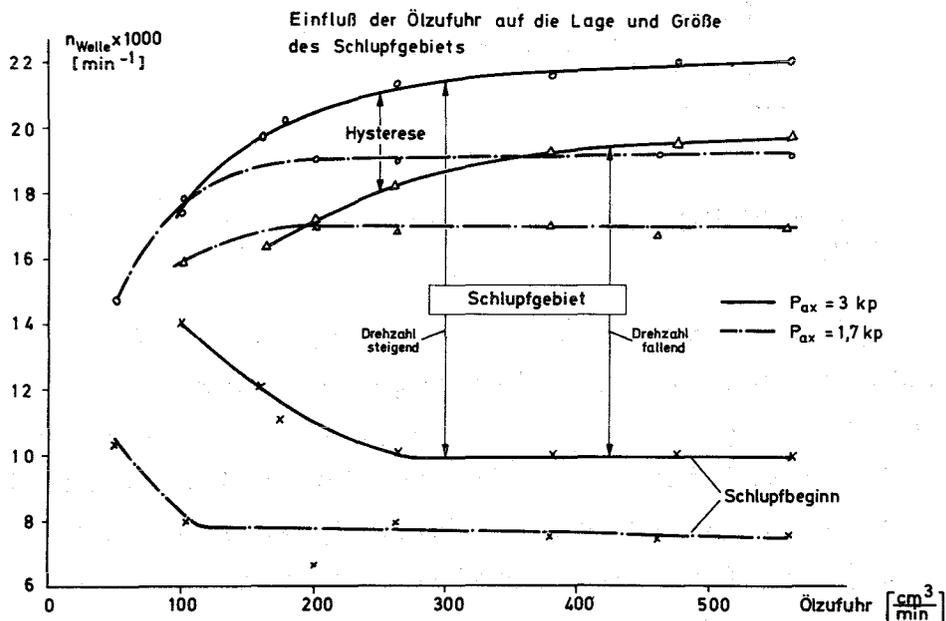


Bild 12.

3.2.3 Axialverschiebung

Der Herstellungsdruckwinkel α_0 des Lagers beträgt 20° . Entsprechend der Drehzahl des Käfigsatzes wirken an den Kugeln Fliehkräfte, die vom Außenring aufgenommen werden. Die am Außenring von außen aufgebrachte Axialbelastung ist konstant. Das notwendige Gleichgewicht der Kräfte zwischen Kugeln und Außenring hat zur Folge, daß mit zunehmender Lagerdrehzahl die Kugeln entlang des Laufbahnradius des Außenrings auswandern. Dabei verändert sich der Druckwinkel α_0 in der Weise, daß er am Außenring abnimmt (α_a), und am Innenring zunimmt (α_i). Die Lagerringe verschieben sich dabei in axialer Richtung entgegen der von außen wirkenden konstanten Axiallast. Bild 13 zeigt eine Skizze der Verlagerungen der Kugeln und der resultierenden Axialverschiebung der Ringe.

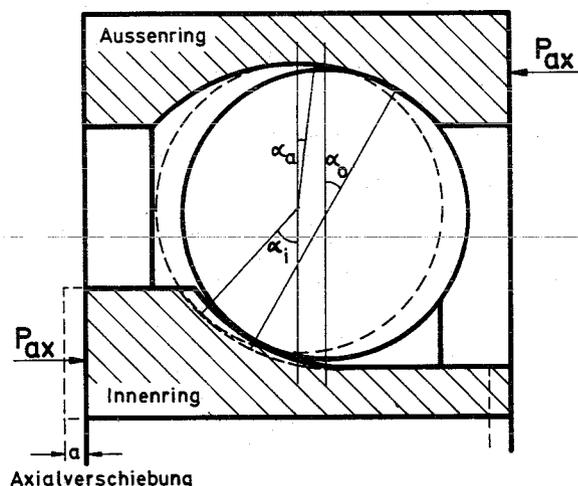


Bild 13. Verlagerung der Kugeln und Axialverschiebung der Ringe

Die Axialverschiebung wird gemessen mit Hilfe des unter 2.3 aufgeführten kapazitiven Abstandgebers. Der Geber ist mit der Schwimmhülse, also dem Außenring verbunden und steht konzentrisch vor der Prüfstandswelle mit dem Innenring. Damit kann die Axialverschiebung während des Laufs gemessen werden. Bild 14 zeigt den stetigen Verlauf der Axialverschiebung im schlupf-

losen Betrieb, der durch die geringe Ölmenge erreicht wird. Bei Käfigschlupf steigt die axiale Verschiebung entsprechend der etwa konstanten Käfigdrehzahl nur wenig an. Beim Schlupfzusammenbruch erfolgt aufgrund der höheren Käfigdrehzahl auch ein Sprung in der Axialverschiebung. Der Einfluß der äußeren Belastung auf die Axialverschiebung ist in Bild 15 dargestellt.

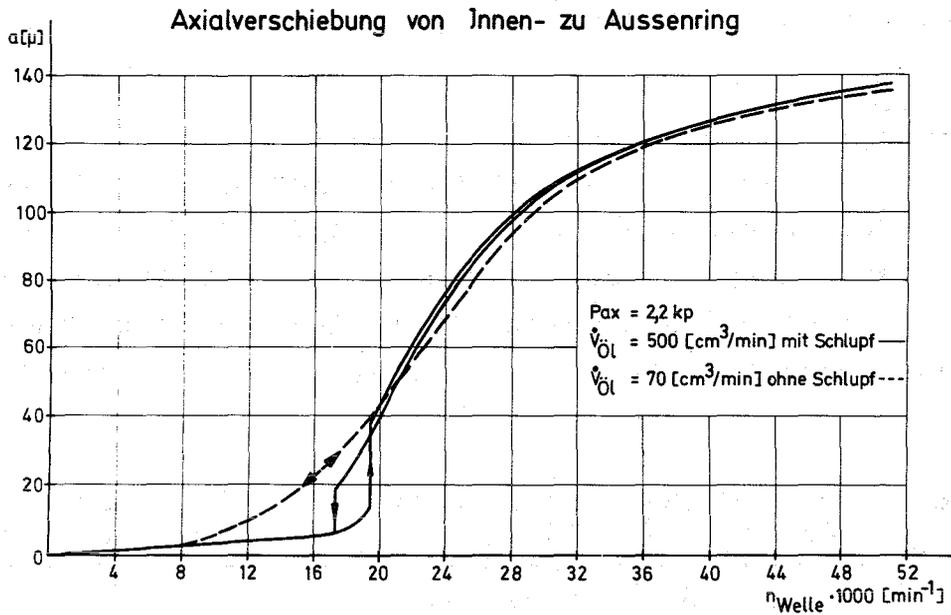


Bild 14.

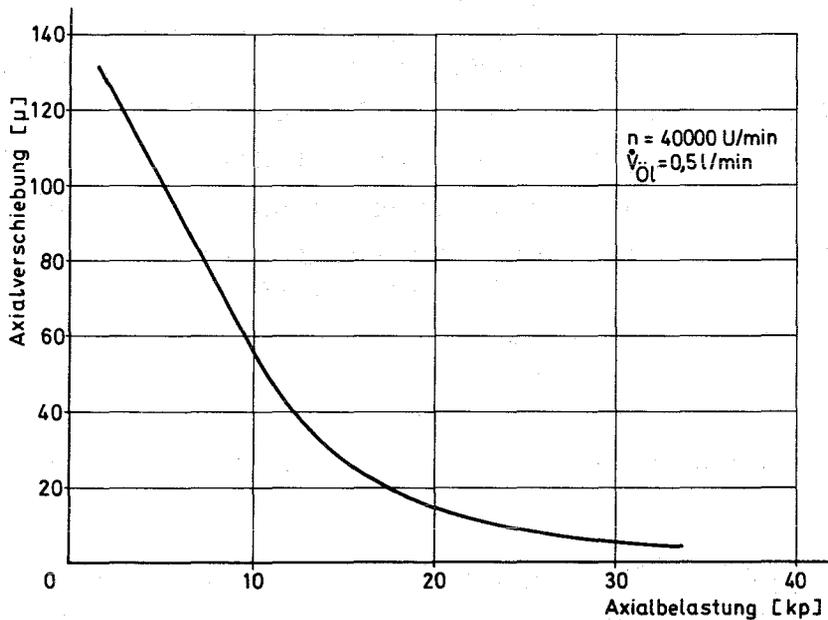


Bild 15. Einfluß der Axialbelastung auf die Axialverschiebung

3.3 Rollenlager

Die untersuchten Rollenlager waren vom Typ NU 1005, Abmessungen 25 x 47 x 12 mm. Die aufgrund der größeren Lagerwiderstände (als Stützlagerung wurden 2 Kugellager verwendet, hinzu kam eine Radialbelastung über Flachriemen) noch erreichbare Drehzahl war zunächst 35 000 U/min, nach der Reparatur eines Turbinendefekts noch knapp 30 000 U/min, was einem $d_m \cdot n$ -Wert von 10^6 entspricht.

3.3.1 Käfigschlupf

Auch die Rollenlager wiesen bei geringen Belastungen bis etwa 2% der Tragzahl hohen Käfigschlupf auf. Zu den vorher erwähnten, den Schlupf beeinflussenden Größen erscheint als zusätzlicher Parameter das Lagerspiel. In der folgenden Tabelle sind die untersuchten Lager mit Original- und Einbauspiel aufgeführt.

Lager Nr.	Original Spiel	Einbau Spiel [μ]	Aktiviertes Teil	Art der Bestrahlung
224	37	30	Vorversuche	-
199	39	32	Rollen	Reaktor
200	27	19	Rollen Ein Bord des Außenringes	Zyklotron
190	44	34	Innenringlaufbahn	Zyklotron
214	28	20,5	Innenringlaufbahn	Zyklotron
486	29	20	Außenringlaufbahn	Reaktor
191	44	34	Rollenstirnflächen auf einer Seite	Zyklotron
488	27	17	Käfig, iridiumle- giert	Reaktor

Es sind 2 Gruppen von Einbauspielen vorhanden, 17 - 20,5 μ und 30 - 34 μ.

Das Verhalten der Lager mit kleinerem Spiel ähnelt dem der Kugellager. Man erkennt in der folgenden Darstellung, wie der Beginn des Käfigschlupfes mit steigender Belastung zu höheren Drehzahlen verschoben wird. Ein Zusammenbruch des Schlupfes trat

bis zur erreichbaren Drehzahl von 30 000 U/min nicht auf (Bild 16).

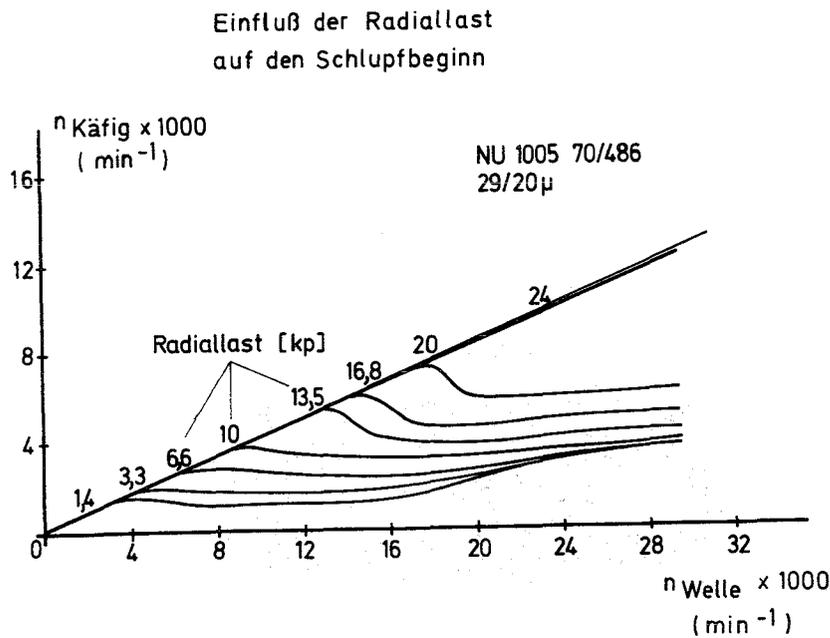
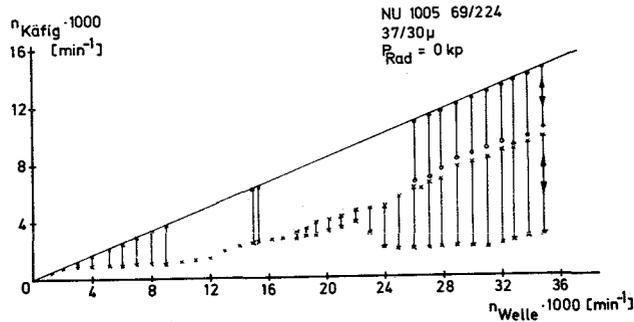


Bild 16.

Die Lager mit dem größeren Einbauspiel von 30 - 34 μ zeigen ein etwas anderes Verhalten. Der Schlupfbeginn wird ebenfalls mit steigender Radialbelastung zu höheren Drehzahlen verschoben.

Im Schlupfgebiet selbst sind starke Drehzahlschwankungen des Käfigs aufgetreten. Die Käfigdrehzahl wechselt sprunghaft zwischen Werten, die unterschiedlich hohem Schlupf entsprechen und solchen, bei denen die Rollen richtig abrollen. (Vgl. Bild 17 oben). Die Zeitdauer der jeweiligen Käfigdrehzahl schwankt zwischen Bruchteilen von Sekunden bis zu mehreren Sekunden, wobei Wellendrehzahl und Belastung konstant gehalten werden. Der Wechsel zwischen Schlupf und Rollen ist auch akustisch unterscheidbar. Im schlupflosen Betrieb entsprechend der höheren Käfigdrehzahl ist die Geräuschentwicklung wesentlich heftiger als beim Lauf mit Schlupf.

Drehzahlschwankungen
des Käfigs



Verlagerung des Wellenmittelpunktes

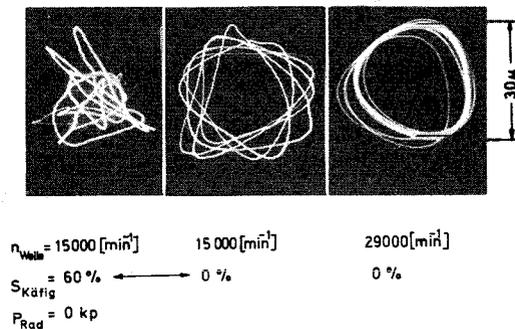


Bild 17.

3.3.2 Wellenbewegung

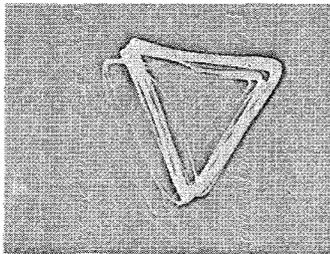
Mit den Käfigdrehzahlschwankungen sind besondere Bewegungen der Welle verbunden. Im Schlupfgebiet erscheinen diese Bewegungen regellos. Im schlupflosen Betrieb und bei geringer Belastung gibt es regelmäßige Verlagerungsbahnen. Besonders ausgeprägt sind diese kreis- oder dreieckförmigen Bewegungen bei hohen Drehzahlen ab etwa 20 000 U/min. Dabei wird das ganze Lagerspiel ausgenützt. Die Umlauffrequenz des Wellenmittelpunktes ist dann gleich der Wellendrehzahl. Im unteren Teil von Bild 17 sind zu den Schlupfchwankungen die jeweils gemessenen Verlagerungsbahnen dargestellt. Man erkennt die Zuordnung der Wellenbewegung zu den Käfigdrehzahlschwankungen bei der konstanten Drehzahl der Welle von 15 000 U/min. Die Bewegung bei einer höheren Wellendrehzahl zeigt Bild 17 unten rechts.

Bild 18 gibt weitere Beispiele für die zwei Formen der Wellenbewegung bei hohen Drehzahlen. Auch mit einer zusätzlich aufgebrauchten Unwucht wurden beide Verlagerungsformen beobachtet, wie die Ergebnisse erkennen lassen.

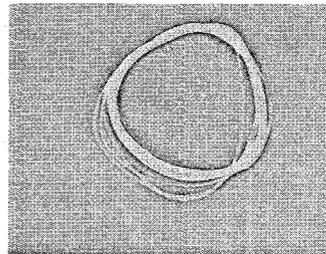
Zusammenfassend ist zu bemerken, daß beim Durchfahren des Drehzahlgebietes Kreis- und Dreieckform jeweils ohne Belastung, bei geringer Radialbelastung bis etwa 10 kp, sowie bei Unwuchtbelastung festgestellt wurden.

Verlagerung des Wellenmittelpunktes

NU 1005 R 224 37/30 μm



$n_{\text{Welle}} = 32000 \text{ [min}^{-1}\text{]}$
 $S_{\text{Käfig}} = 0\%$
 $P_{\text{Rad}} = 0 \text{ kp}$
 $P_{\text{Unw.}} = 0 \text{ kp}$



$n_{\text{Welle}} = 27000 \text{ [min}^{-1}\text{]}$
 $S_{\text{Käfig}} = 0\%$
 $P_{\text{Rad}} = 0 \text{ kp}$
 $P_{\text{Unw.}} = 21 \text{ kp}$

RI 214 28/20,5 μm

$n_{\text{Welle}} = 34000 \text{ [min}^{-1}\text{]}$
 $S_{\text{Käfig}} = 0\%$
 $P_{\text{Rad}} = 1,4 \text{ kp}$
 $P_{\text{Unw.}} = 34 \text{ kp}$

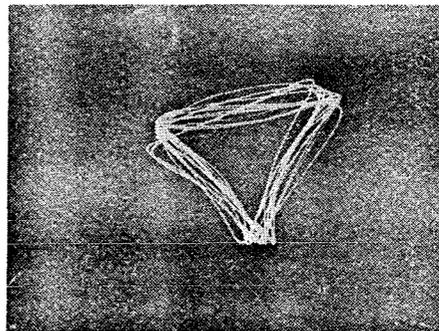


Bild 18.

3.3.3 Unwucht

Die Belastung durch eine Unwucht verkleinert das Schlupfgebiet, wie Bild 19 zeigt. Ab etwa 14 000 U/min besteht kein Käfigschlupf mehr. Die Käfigdrehzahlschwankungen sind ebenfalls geringer, wie der Vergleich mit Bild 17 verdeutlicht. In beiden Bildern handelt es sich um dasselbe Lager.

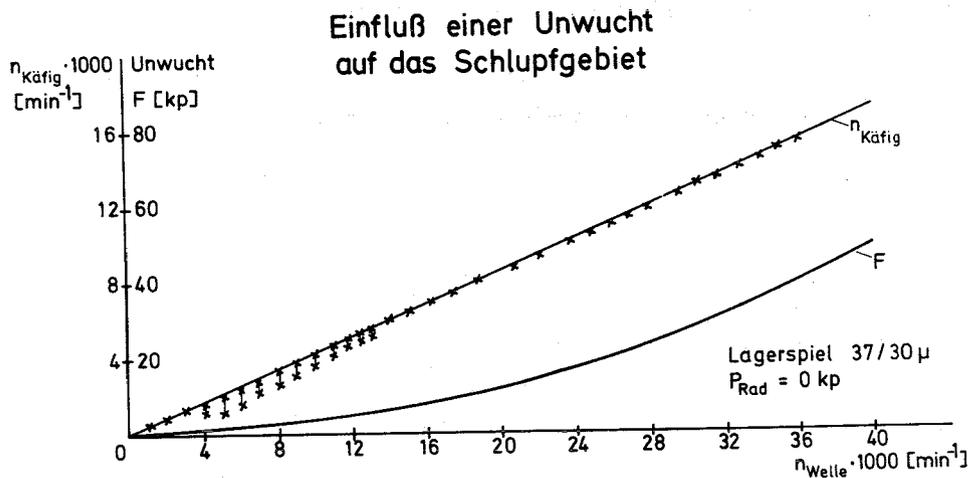


Bild 19.

3.3.4 Rollenschlupf

Nach Fertigstellung des in 2.2.5 dargestellten Umbauteils konnte das in 2.2 beschriebene Verfahren zur Drehzahlmessung am Wälzlagerprüfstand selbst eingesetzt werden. Das Verfahren wurde auf seine Funktionsfähigkeit überprüft, für 2 Belastungsfälle wurden die Rollendrehzahlen gemessen. Verwendung fand das vorerwähnte Lager 224 mit 30 μ Einbauspiel. Mit diesem Lager waren die in Bild 17 dargestellten Käfigdrehzahlschwankungen gemessen worden.

Zunächst fiel auf, daß sich mit dem veränderten Prüfstand und einer neuen Prüfstandswelle auch das Laufverhalten des Lagers geändert hatte. Es kam bei geringer Belastung zu gleichmäßigem Käfigschlupf. Die Käfigdrehzahlschwankungen traten nicht mehr auf.

Zur Durchführung der Rollendrehzahlmessung wurde in der

auf Seite 10 geschilderten Weise in eine der Rollen eine aktivierte Chrom-Probe eingesetzt. Die Aktivität der 4 mg schweren Probe betrug 1 mC.

Käfig- und Rollenschlupf sind definiert als Differenzdrehzahl zwischen jeweils gemessener Drehzahl und Drehzahl gemäß der Nenndaten des Lagers, bezogen auf diese letztere Drehzahl.

Mit den Abmessungen des Lagers

Laufbahndurchmesser des Außenrings $D_a = 41,5 \text{ mm}$
 Laufbahndurchmesser des Innenrings $D_i = 30,5 \text{ mm}$
 Rollendurchmesser $D_R = 5,5 \text{ mm}$

sind die Nenndrehzahlen

des Käfigs $n_K = 0,4236 \cdot n_i$ n_i : Drehzahl des Innenrings

der Rolle $n_R = 3,1963 \cdot n_i$

Damit ist der Käfigschlupf $S_K = \frac{0,4236 \cdot n_i - n_{Kgem}}{0,423 n_i} \cdot 100\%$

und der Rollenschlupf $S_R = \frac{3,1963 \cdot n_i - n_{Rgem}}{3,196 \cdot n_i} \cdot 100\%$

Das Ergebnis von Drehzahlmessungen ist in Bild 20 dargestellt.

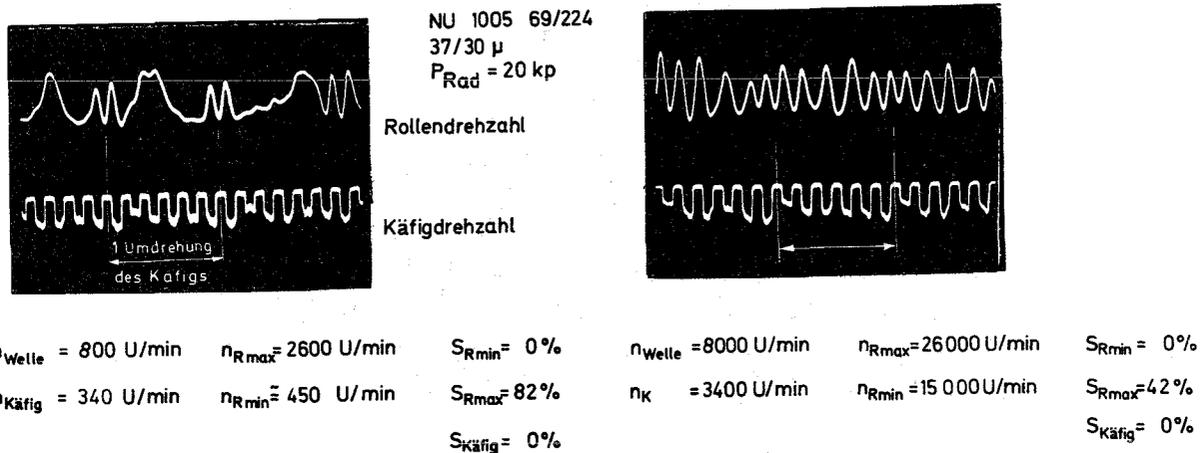


Bild 20. Hoher und mittlerer Rollenschlupf bei einem Käfigumlauf und verschiedenen Drehzahlen der Welle

Die Spannungssignale von Rollen- und Käfigdrehzahl wurden auf einen Zweistrahl-Speicheroszillographen geführt. Die Belastung war so gewählt (20 kp), daß kein Käfigschlupf auftrat. Aufgrund der 6 markierten Felder des Käfigs entsprechen 6 Signale einer Käfigumdrehung. Bei der Rollendrehung entspricht der Abstand von 2 benachbarten Wellenbergen bzw. Tälern der Zeit einer Umdrehung der Rolle. Man erkennt, wie bei der niedrigen Wellendrehzahl von 800 U/min die Rolle jeweils nach einer Umdrehung des Käfigs beschleunigt wird. In der entlasteten Zone des Lagers wird die Rolle, wenn an ihr keine Antriebskräfte wirken, infolge der Reibung stark verzögert und unterliegt dann großem Schlupf. Bei höheren Rollendrehzahlen werden die Rollen auch in der unbelasteten Zone weniger abgebremst, wie im rechten Teil des Bildes zu erkennen ist. Damit läßt sich für die belastete Zone des Lagers die maximale n_{Rmax} , für die entlastete Zone die minimale n_{Rmin} und bei Zusammenfassung aller Umdrehungen während eines Käfigumlaufs eine mittlere Rollendrehzahl $n_{Rmittel}$ definieren. Nach den angegebenen Formeln kann damit der Rollenschlupf S_{Rmin} , S_{Rmax} und $S_{Rmittel}$ bestimmt werden. In der folgenden Polarendarstellung ist für 3 Wellendrehzahlen der Verlauf des Rollenschlupfes für jeweils einen Käfigumlauf eingetragen. Mit steigender Drehzahl verkleinert sich der Schlupf (Bild 21.).

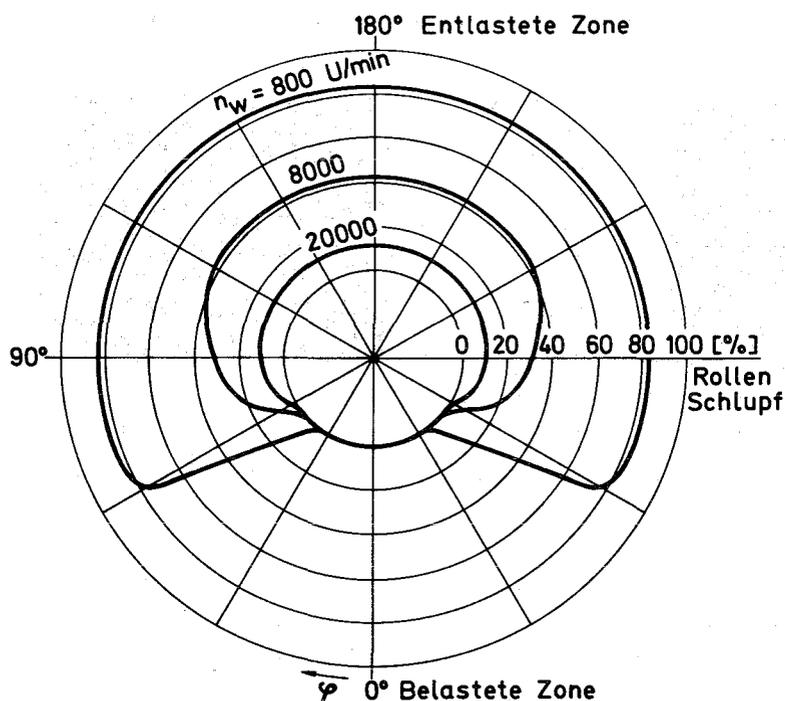


Bild 21. Verlauf des Rollenschlupfes für eine Umdrehung des Käfigs bei verschiedenen Drehzahlen

Den Käfigschlupf sowie die oben bestimmten Arten des Rollenschlupfes über der Wellendrehzahl zeigen die Darstellungen 22 und 23 für 2 verschiedene Radialbelastungen. Im ersten Fall ist infolge der Belastung kein Käfigschlupf S_K und dementsprechend auch kein minimaler Rollenschlupf S_{Rmin} vorhanden. Im zweiten Fall verursacht die geringe Belastung ein ausgesprochenes Schlupfgebiet mit Schlupfzusammenbruch bei 22 000 U/min. Man erkennt, wie der minimale Rollenschlupf S_{Rmin} mit dem Käfigschlupf S_K übereinstimmt. Das bedeutet, daß die Rollen im Bereich der belasteten Zone am Außenring abrollen und der Schlupf nur am Innenring entsteht. Ist der Rollenschlupf größer als der Käfigschlupf, wie es für die unbelastete Lagerzone der Fall ist, entsteht auch am Außenring Rollenschlupf.

Rollen- und Käfigschlupf

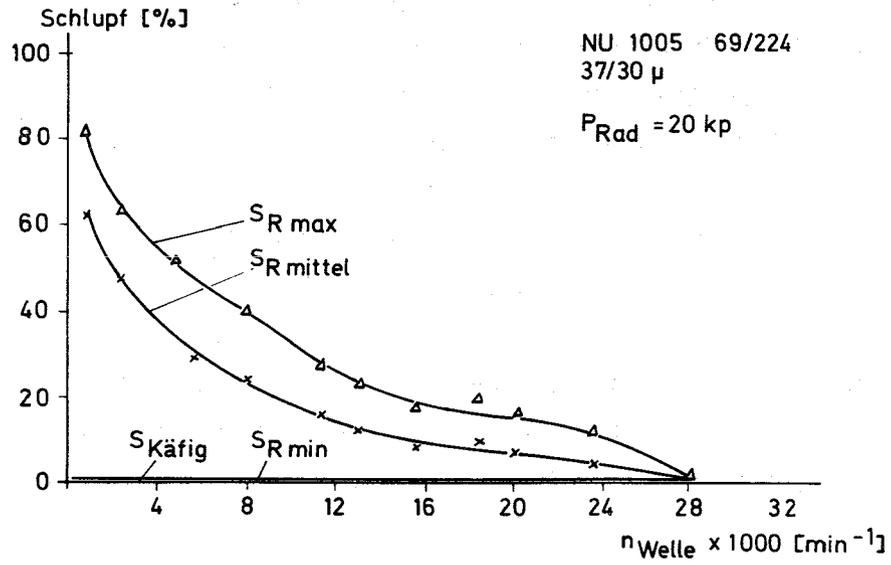


Bild 22.

Rollen- und Käfigschlupf

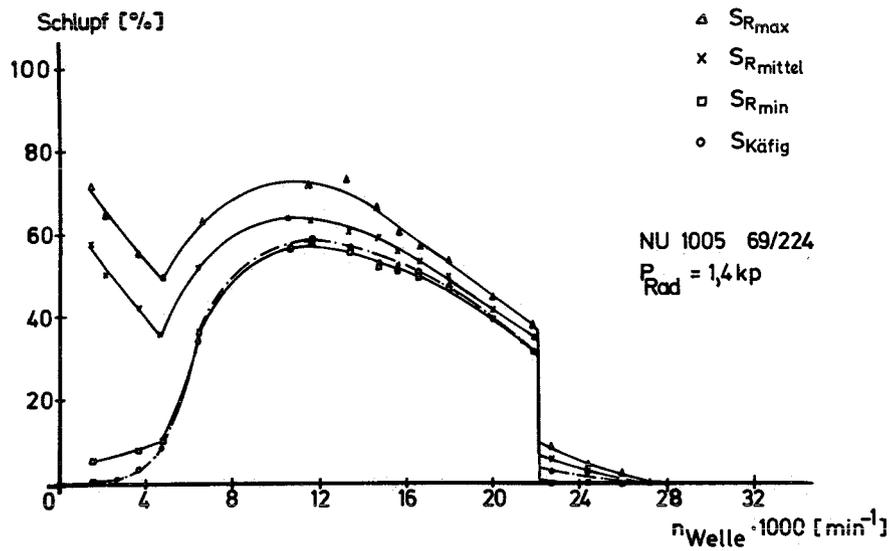
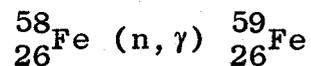


Bild 23.

4. A K T I V I E R U N G S V E R F A H R E N

4.1 Neutronenaktivierung

Das bekannteste und im Maschinenbau bis 1968 fast ausschließlich angewandte Verfahren zur Aktivierung von Maschinenteilen ist die Neutronenaktivierung. Dabei wird das zu aktivierende Teil in den Neutronenfluß eines Reaktors gebracht. Die Neutronen gehen mit den stabilen Isotopen des Materials eine Reaktion ein und es entstehen neue, radioaktive Isotope. Für thermische Neutronen ist das eine (n, γ) -Reaktion, also die Massenzahl des stabilen Isotops wird um eine Einheit erhöht, z.B.:



Für einen vorgegebenen Neutronenfluß kann dann je nach Bestrahlungsdauer die gewünschte Aktivität erreicht werden. Das zu bestrahlende Teil wird durch und durch aktiv, da die Neutronen keine Ladung besitzen und mit den elektrischen Feldern des Targetmaterials keine Wechselwirkung eingehen. Die Berechnung der Aktivität wird nach [22] vorgenommen. Im Anhang 1 ist die chemische Zusammensetzung des Lagermaterials aufgeführt, sowie die bei der Aktivierung von Wälzlagerkugeln entstehenden Isotope und Aktivitäten. In den Untersuchungen war mit Neutronendosen von $0,9 - 2,3 \cdot 10^{18} \text{ n/cm}^2$ gearbeitet worden.

Nach [23] bestehen komplizierte Zusammenhänge zwischen Bestrahlungsdosis, Bestrahlungstemperatur und der Veränderung der mechanischen Eigenschaften von Stahl. Bei Dosen von $5,4 - 11,5 \cdot 10^{18} \text{ n/cm}^2$ und Bestrahlungstemperaturen zwischen 66 und 350°C wurden Veränderungen der Elastizitätsgrenze, der Bruchspannung- und Dehnung um $5 - 20\%$ festgestellt.

Die Aktivierung der Wälzkörper wurde im Forschungsreaktor FR 2 durchgeführt. Der Neutronenfluß beträgt je nach Lage der verschiedenen Bestrahlungskanäle bis zu $9 \cdot 10^{13} \text{ n/cm}^2 \text{ sec}$. Bei einem Fluß von $4 \cdot 10^{13} \text{ n/cm}^2 \text{ sec}$ entstanden bei der ersten

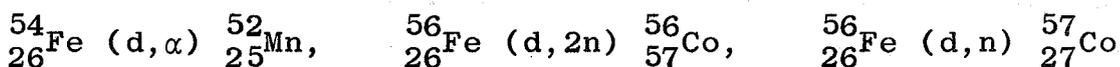
Bestrahlung von Kugeln Temperaturen bis etwa 300°C (geschätzt aufgrund der Anlauffarben). Deshalb wurde bei den folgenden Bestrahlungen nur mit einem Fluß von maximal $1,5 \cdot 10^{13} \text{ n/cm}^2 \text{ sec}$ gearbeitet. Die entstehende Temperatur ist natürlich von der Güte der Wärmeabfuhr abhängig, die aber nicht beeinflußt werden konnte. Nach der Aktivierung wurden die Teile bis zur Verwendung in Öl aufbewahrt, um Korrosion zu vermeiden. Die Wirkung auf das Verschleißverhalten der Aktivierung mit dem höheren Fluß wird später noch besprochen.

4.2 Aktivierung mit geladenen Teilchen

Bei der Bestrahlung von Maschinenteilen mit Deuteronen oder α -Teilchen am Zyklotron können ebenfalls Radioisotope erzeugt werden. Die geladenen Teilchen werden beim Eintritt in das Material aufgrund der Wechselwirkungen mit den elektrischen Ladungen des Targetmaterials stark abgebremst. Die möglichen Kernreaktionen für Deuteronen sind sehr vielfältig und vom Typ (d,a) wobei a sein kann:

$$\alpha, p, n, 2n, 3n, t.$$

Beispiele sind:



Zum Verlauf der Energie der Deuteronen beim Eintritt in Eisen vgl. Bild 3. Bei einem genügend dicken Target nimmt die Energie von der Maximalenergie bis zur Energie Null in einer bestimmten Eindringtiefe ab. Die Wahrscheinlichkeit für das bevorzugte Auftreten einer der verschiedenen möglichen Reaktionen längs des Deuteronenstrahls ist stark abhängig von der Energie der Deuteronen. So gibt es bestimmte Resonanzstellen, das bedeutet, daß bei einer bestimmten Energie eine dieser Kernreaktionen bevorzugt auftritt und die Aktivität des entstehenden Isotops dort ein Maximum aufweist. Dieses Verhalten wird bei der Aktivierung von Maschinenteilen mit Vorteil ausgenutzt.

Während bei Reaktoraktivierungen das ganze Maschinen-

teil radioaktiv wird, läßt sich bei Bestrahlungen mit geladenen Teilchen die Aktivität in die Oberfläche des Targets legen. Somit können auch räumlich ausgedehnte und schwere Maschinenteile an definierten Stellen aktiviert werden. Zur bevorzugten Erzeugung eines bestimmten Isotops in der verschleißenden Oberfläche ist die Energie mit dem Maximum der jeweiligen Anregungsfunktion erforderlich. Steht kein energievvariables Zyklotron zur Verfügung, läßt sich diese Energie durch eine entsprechende Abdeckung vor dem Target erreichen. Von den drei entstehenden Isotopen ^{52}Mn , ^{57}Co , ^{56}Co ist letzteres für den Fall der Wälzlager besonders geeignet, weil es in bezug auf längerdauernde Versuche die günstige Halbwertszeit von 77 Tagen besitzt ($T_{1/2}$ von ^{52}Mn beträgt 5,7 Tage) und gegenüber ^{57}Co eine wesentliche höhere Aktivität aufweist.

4.2.1 Aktivierung der Lagerteile

Nach den angegebenen Kriterien ist es einfach, die Art der Aktivierung der Lagerteile zu wählen. Die Laufbahnen der Ringe wurden mit Deuteronen aktiviert, Wälzkörper und Käfig mit Neutronen. Eine Bestrahlung der Käfigbohrungen mit geladenen Teilchen ist wegen der geometrischen Verhältnisse schwieriger durchzuführen. Obwohl die Käfiglegierung eine Reihe verschiedener Elemente enthält (siehe Anhang), entstehen bei Neutronenbestrahlung nur kurzlebige Isotope mit Halbwertszeiten kleiner als 15 Stunden. Deshalb wurde dem Käfigmaterial die geringe Menge von 0,1% Iridium zulegiert. Iridium besitzt einen hohen Wirkungsquerschnitt für Neutronen, die Halbwertszeit von ^{192}Ir beträgt 74 Tage.

In der folgenden Skizze sind die jeweils aktivierten Stellen der Kugel- und Rollenlager gekennzeichnet.

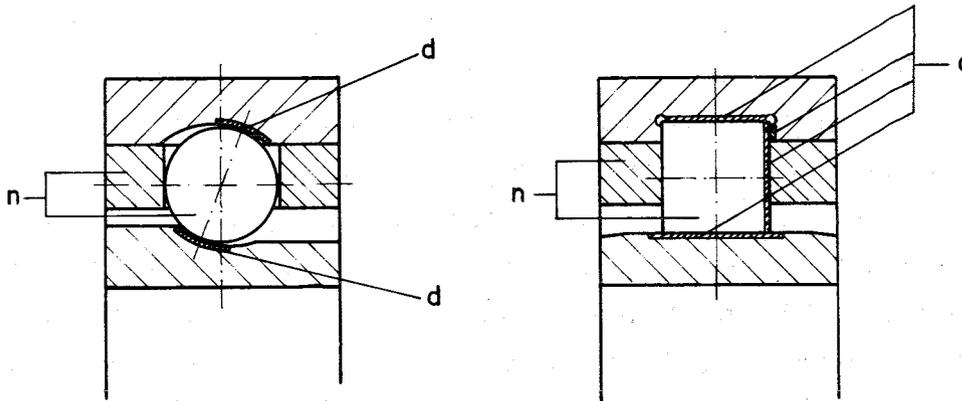


Bild 24. Aktivierte Lagerstellen: n Neutronen, d Deuteronen

4.2.2 Intensitätsverteilung des Deuteronenstrahls

Der Strahlstrom der Deuteronen, der auf das zu aktivierende Teil auftrifft, kann durch magnetische Linsen auf einen Durchmesser von 3 - 10 mm eingestellt werden. Er hat eine Intensitätsverteilung, die von einem Maximum in der Mitte des Strahls zum Rand hin nach Null abfällt.

Die folgende Aktivitätsverteilung stammt von 2 Eichfolien, die bei einer Aktivierung mitbestrahlt wurden. Dabei war der Deuteronenstrahl mit Hilfe der Linsen auf verschiedene Durchmesser eingestellt. Die Folien waren nach der Bestrahlung in Abschnitte von ca. 0,5 mm zerteilt und die Aktivität der Abschnitte ausgezählt worden.

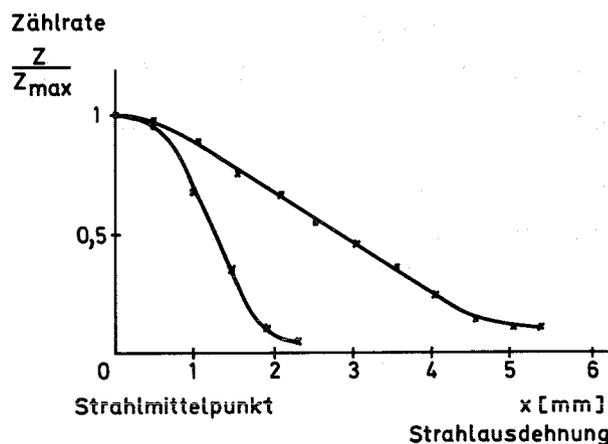


Bild 25. Aktivitätsverlauf bei verschiedenen Einstellungen des Deuteronenstrahls

Um also konstante Aktivität einer größeren Fläche zu erreichen, muß das zu aktivierende Teil in geeigneten parallelen Schritten vor dem Deuteronenstrahl bewegt, bzw. gedreht werden. Das geschieht mit Hilfe einer Vorrichtung, die alle geforderten Bewegungen ausführen kann. Dazu zeigt Bild 26 als Beispiel den Aufbau einer Abdeckung zur Aktivierung der Außenringlaufbahn eines Rollenlagers. Die Radialebene des Lagers war um $13,5^\circ$ zur Richtung des Deuteronenstrahls geneigt, durch Drehung um seine Achse und zusätzliche Bewegung in axialer Richtung wurde die Lauffläche vom Strahl erfaßt. In ähnlicher Weise wurden alle Lagerteile mit Deuteronen aktiviert.

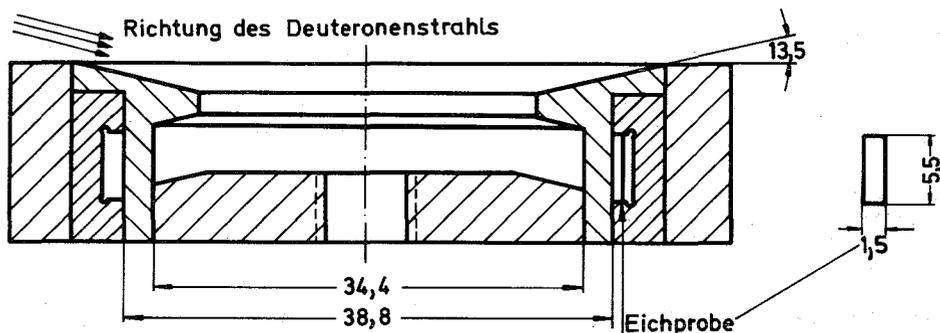


Bild 26. Vorrichtung zur Aktivierung der Lauffläche eines Rollenlager-Außenrings

4.2.3 Berechnungsbeispiel zur Deuteronenaktivierung

Die Lauffläche eines Rollenlageraußenrings wird mit Deuteronen bestrahlt. Das Isotop ^{56}Co soll zur Messung verwendet werden. Um die maximale spezifische Aktivität in der Oberfläche der Laufbahn zu erreichen, muß vor der Lauffläche eine Strahlabdeckung von 2,3 mm in Strahlrichtung angebracht werden. Nach Bild 3 ist die auf den Deuteronenstrom von $1 \mu\text{Ah}$ normierte Aktivität an dieser Stelle $13 \mu\text{C}/\mu\text{Ah}$.

Bestrahlzeit: $T = 10 \text{ h}$

Strom: $I = 0,7 \mu\text{A}$

Damit ist die Aktivität in der Oberfläche

$$A = 13 \frac{\mu\text{C}}{\mu\text{Ah}} \cdot 0,7 \mu\text{A} \cdot 10 \text{ h} = 91 \mu\text{C}.$$

Die Bestrahlzeit von 10 h ist klein gegenüber der Halbwertszeit von 77 Tagen; somit ist die Linearisierung der Aktivierungsformel zulässig.

Bezieht man, entsprechend der Bestrahlungsfolien in [18], diese Aktivität auf das Gewicht eines gedachten 0,095 mm tiefen Streifens um die Laufbahnoberfläche, so erhält man die spezifische Aktivität in mC/g.

Durchmesser der Laufbahn $D = 41,5$ mm
Breite der Laufbahn $b = 5,5$ mm
Tiefe des Streifenst $t = 0,095$ mm

$$G = D \cdot \pi \cdot b \cdot t \cdot \gamma$$

$$G = 41,5 \text{ mm} \cdot \pi \cdot 5,5 \text{ mm} \cdot 0,095 \text{ mm} \cdot 7,8 \text{ g}/10^3 \text{ mm}^3 = 0,53 \text{ g}$$

$$A_{\text{spez}} = \frac{91 \text{ } \mu\text{A}}{0,53 \text{ g}} = 0,172 \text{ mC/g.}$$

Die Gesamtaktivität des Ringes an ^{56}Co ergibt sich durch Integration der spezifischen Aktivität in der Tiefe der Laufbahn (nach Bild 5 in [18]).

$$A_{\text{ges}} = \frac{35 \text{ } \mu\text{C}}{\mu\text{Ah}} \cdot 0,7 \text{ } \mu\text{A} \cdot 10 \text{ h} = 0,245 \text{ mC}$$

Die Gesamtaktivität von 15 Wälzlagerkugeln (^{59}Fe und ^{51}Cr) 2 Wochen nach der Aktivierung und Abklingen der kurzlebigen Isotope (vgl. Anhang) beträgt etwa 13,5 mC, also mehr als das 50-fache der Ringaktivität. Der Umgang mit dünn-schichtaktivierten Werkstoffen bringt i.a. eine erheblich geringere Strahlenbelastung mit sich.

5. BESCHREIBUNG DES VERSCHLEISSMESSVERFAHRENS

Das Radioisotopenverfahren zur Verschleißmessung beruht auf der Möglichkeit, Maschinenteile zu aktivieren und γ -Quanten nachzuweisen, die vom radioaktiven Abrieb emittiert werden. Die Verschleißteilchen des Lagers werden vom Schmierölstrom mitgeführt zum Nachweisdetektor für γ -Strahlen, der in einem besonderen Durchflußmeßkopf so angeordnet ist, daß er ständig von einem Ölvolumen umgeben ist. Eine Wasserkühlung zwischen Detektor und Ölvolumen schützt den temperaturempfindlichen Meßkristall vor der Wärmeeinwirkung des Öls. Der Meßkopf mit Detektor ist vor der Direktstrahlung des im Prüfstand eingebauten und aktivierten Lagers durch einen 10 cm dicken Bleimantel geschützt.

5.1 Meßkreislauf

Der Ölmeßkreislauf ist in Bild 27, der gesamte Prüfstand mit hydraulischen Einrichtungen und der Bleiabschirmung für den Meßkopf in Bild 28 dargestellt.

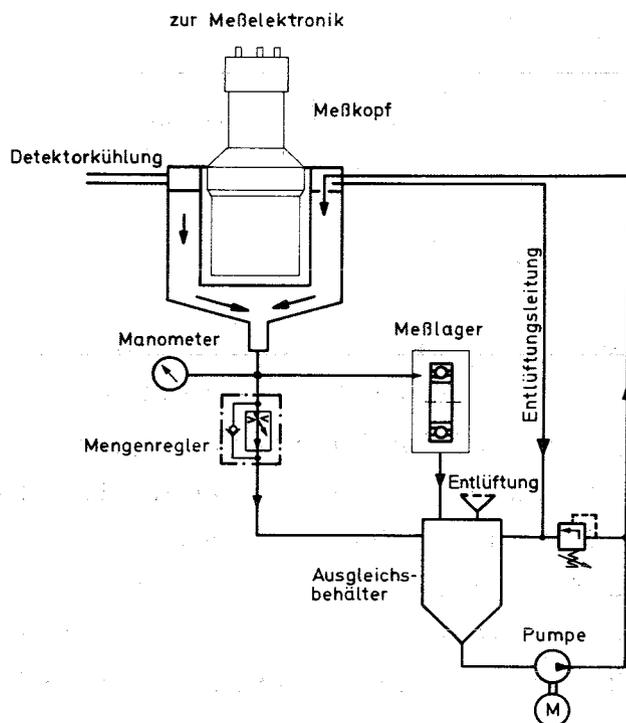


Bild 27.

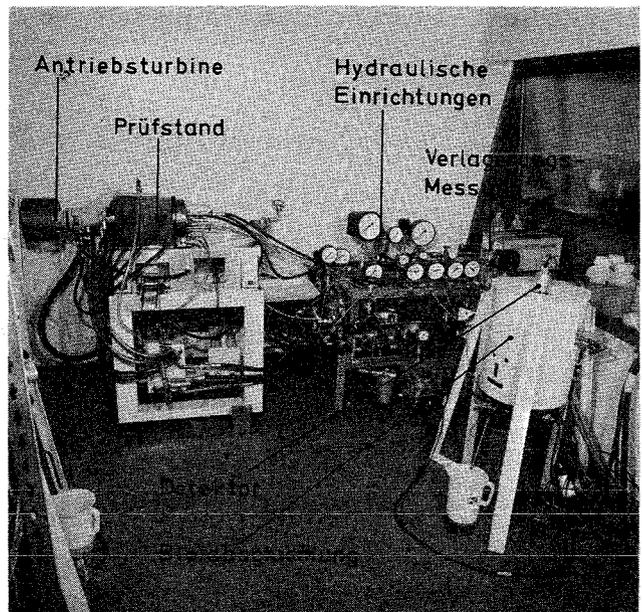


Bild 28.

Im Meßkreislauf saugt die Pumpe das Öl aus einem Vorratsbehälter und fördert es über den Meßkopf durch 2 Spritzdüsen in das Meßlager. Von dort gelangt es mit den Verschleißteilchen durch das Gefälle und die Druckwirkung der in den Prüfstand tretenden Sperrluft zurück in den Vorrats- und Ausgleichsbehälter, aus dem die Luft entweichen kann. Die Öltemperatur in diesem Behälter wird auf 30°C geregelt, damit erübrigt sich bei Verschleißmessungen eine Korrektur aufgrund der Ölausdehnung. Der Mengenregler dient zur Einstellung der Ölmenge von 0,5 l/min zur Versorgung des Meßlagers. Das gesamte Ölvolumen beträgt 1,5 l, der Meßkopfinhalt 0,73 l und die Pumpenfördermenge 4 l/min. Die gute Durchmischung der Verschleißteilchen mit dem Öl gewährleistet eine rasche Anzeige von Verschleißerscheinungen innerhalb einer Minute.

5.2 Meßelektronik

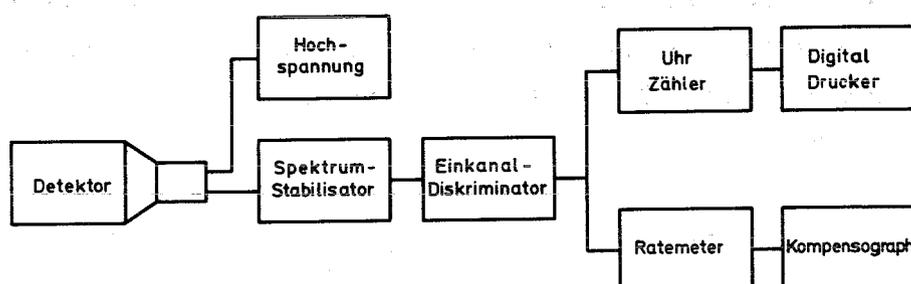


Bild 29. Geräte zur Verschleißmessung

Als Detektor für die Verschleißmessung wird - ebenso wie zur Rollendrehzahlmessung - ein Szintillationskristall verwendet. Der Spektrumstabilisator korrigiert Verstärkungsschwankungen infolge von Temperatur- oder Hochspannungsschwankungen. Im Einkanal-diskriminator wird mit Hilfe von 2 Schwellen der zu registrierende Bereich (Peak) des Energiespektrums erfaßt. Die in diesen Bereich fallenden Impulse werden dem Zähler und Rate-meter zugeführt. Der ausgedruckte Zählerwert bezieht sich auf die gewünschte Meßzeit (z.B. 4 Minuten), die analog angezeigte Impulsrate auf eine Sekunde. Ein Mehrfachpunkteschreiber re-

gistriert die Analogwerte zusammen mit den am Prüfstand gemessenen Temperaturen. In Bild 29 sind die zur Einkomponenten-Verschleißmessung benötigten Geräte zusammengestellt.

5.3 Eichung der Anlage

Die quantitative Zuordnung zwischen der unbekanntem Verschleißmenge und den gemessenen Zählraten ermöglicht eine Eichung, die in 2 Schritten vorgenommen wird. Diese bestehen in einer einmaligen Ermittlung der Eichfaktoren des Meßkopfes und einer Eichung vor jeder Verschleißmessung.

Einmalige Eichung des Meßkopfes:

Dazu werden 2 Eichproben bekannten Gewichts aus dem gleichen Material (z.B. Wälzlagerstahl) im Reaktor aktiviert. Eine der Proben löst man in Säure auf, wobei sorgfältig darauf zu achten ist, daß keines der Legierungselemente ausfällt. Durch Verdünnen wird eine bestimmte Menge der Eichflüssigkeit, z.B. 2 Liter, hergestellt. Nach Einfüllen dieser Eichlösung in den Meßkopf werden für mehrere Energiebereiche des Spektrums die Zählraten ausgedruckt. Bei wieder entleertem Meßkopf wird an einer definierten Stelle in der Nähe des eingebaut bleiben- den Detektors die zweite Eichprobe angebracht, und mit den gleichen Diskriminatoreinstellungen wie zuvor werden die Zählraten bestimmt. Diese Stelle ist so zu wählen, daß das γ -Spektrum, wie z.B. in einem Impulshöhenanalysator beobachtet werden kann, von der festen Probe und der Eichlösung gut übereinstimmen. Die verschiedene Aktivitätsverteilung von fester Probe, bzw. Eichlösung gegenüber Kristall und Bleiabschirmung bewirkt geringe, durch die Lage der festen Probe beeinflussbare Veränderungen des Comptonkontinuums aufgrund der unterschiedlichen Streuverhältnisse der γ -Quanten.

Eichung vor jeder Verschleißmessung:

Bei der Aktivierung von Verschleißteilen wird jeweils eine Eichprobe aus dem Material des Verschleißteils mitbestrahlt, die vor einem Versuch an der oben erwähnten Stelle ausgezählt wird. Das im gesamten Meßkreislauf enthaltene Gewicht des Ver-

schleißes ergibt sich sodann:

$$G = K \cdot V_{\text{ges}} \cdot Z \cdot \frac{G_p}{Z_p}; \quad K = \frac{G' \cdot Z_p'}{Z' \cdot G_p' \cdot V'}$$

G Gewicht des Abtrags (Verschleiß)
Z Zählrate bei Verschleißmessung
G_p Gewicht der Eichprobe
Z_p Zählrate der Eichprobe
V_{ges} Gesamtölmenge des Meßkreislaufs
(vom jeweiligen Versuch abhängig)

Einmalige Bestimmung des Eichfaktors K

G' Gewicht der aufgelösten Eichprobe
Z' Zählrate der Eichflüssigkeit
G_p' Gewicht der festen Eichprobe
Z_p' Zählrate der festen Eichprobe
V' Volumen der Eichflüssigkeit (z.B. 2 Liter)

Der K-Wert wurde getrennt ermittelt für den Energiebereich von ⁵¹Cr, ⁵⁹Fe, sowie für das gesamte Spektrum aus ⁵¹Cr und ⁵⁹Fe.

K_{Cr} = 0,93 l/L, K_{Fe} = 0,88 l/L, K_{ges} = 0,92 l/L.

5.4 Beispiel zur Verschleißbestimmung aus Zählraten

Als Beispiel sei die Verschleißmessung mit dem unter 4.2.2 beschriebenen Rollenlageraußenring angeführt.

Bei der Einkomponentenmessung wurde der Diskriminator so eingestellt, daß das ganze Spektrum ab 0,1 MeV erfaßt wurde. Der hauptsächliche Vorteil von Einkomponentenmessungen gegenüber Mehrkomponentenmessungen ist abgesehen von der einfacheren Auswertung die höhere Empfindlichkeit, wenn statt einzelner Peaks das ganze Spektrum mit Comptonkontinuum zur Messung herangezogen werden kann. Der Gewinn beträgt bis zum 2-3-fachen, was sich in entsprechend niedrigen Aktivierungszeiten und bei Deuteronenaktivierungen auch in den Kosten, bemerkbar macht.

Probenzählrate	$Z_p = 96\ 200\ \text{I}/2\ \text{min}$
Untergrund	$U = 3\ 600\ \text{I}/2\ \text{min}$
	$Z_p - U = 92\ 600\ \text{I}/2\ \text{min}$
Probengewicht	$G_p = 1,63\ \text{mg}$
Ölinhalt	$V_{\text{ges}} = 1,5\ \text{L}$
Ratemetereinstellung	$0 - 100\ \text{I}/\text{sec} = 6000\ \text{I}/\text{min}$

Ein Zuwachs von 100 I/sec entspricht somit dem Verschleiß von

$$G = K \cdot V_{\text{ges}} \cdot Z \cdot \frac{G_p}{Z_p}$$
$$= 0,92\ \text{l/L} \cdot 1,5\ \text{L} \cdot 6000\ \text{I}/\text{min} \cdot \frac{1,63\text{mg} \cdot 2\text{min}}{92\ 600\ \text{I}}$$

$$G = \underline{\underline{0,291\ \text{mg}}}$$

6. VERSCHLEISSMESSUNGEN AN WÄLZLAGERN

Die Verschleißmessungen nach dem Durchflußmeßverfahren wurden, mit einer in 6.2.2 beschriebenen Ausnahme, jeweils als Einkomponentenmessungen vorgenommen.

6.1 Meßergebnisse Kugellager

6.1.1 Versuchsprogramm

Die Versuche wurden folgendermaßen durchgeführt:

1. Bei konstanter Belastung wurde die Drehzahl in Stufen erhöht. Bei jeder Drehzahlstufe wurde 15 - 30 Minuten lang Verschleiß gemessen. Zum Nachweis von Einlaufvorgängen bei Schlupf wurden bestimmte Betriebspunkte bis zu mehreren Stunden gemessen.
2. Bei konstanter Drehzahl wurde die Belastung in Stufen erhöht und dabei Verschleiß gemessen.
3. Bestimmte Drehzahlgebiete, die bei den Versuchen nach 1. und 2. durch besonderen Verschleiß aufgefallen waren, wurden jeweils wiederholt untersucht, um eventuell kritische Stellen zu ermitteln.
4. Die Ölzufuhr betrug 0,5 l/min. In einigen unter 6.1.2.4 beschriebenen Versuchen war mit der kleineren Ölzufuhr von 0,1 l/min gearbeitet worden.
5. Die Öleinlaßtemperatur wurde auf 30°C gehalten.

6.1.2 Kugelverschleiß

In den folgenden Punkten sind verschiedene Betriebsbedingungen und die dabei festgestellten Verschleißerscheinungen an Kugeln beschrieben.

6.1.2.1 Verschleiß im Schlupfgebiet

Während der ersten Versuche zeigte sich bei allen untersuchten Lagern höherer Verschleiß im Schlupfgebiet gegen-

über Laufbereichen außerhalb des Schlupfgebietes.

Verschleißraten beim Einlauf der Kugeln

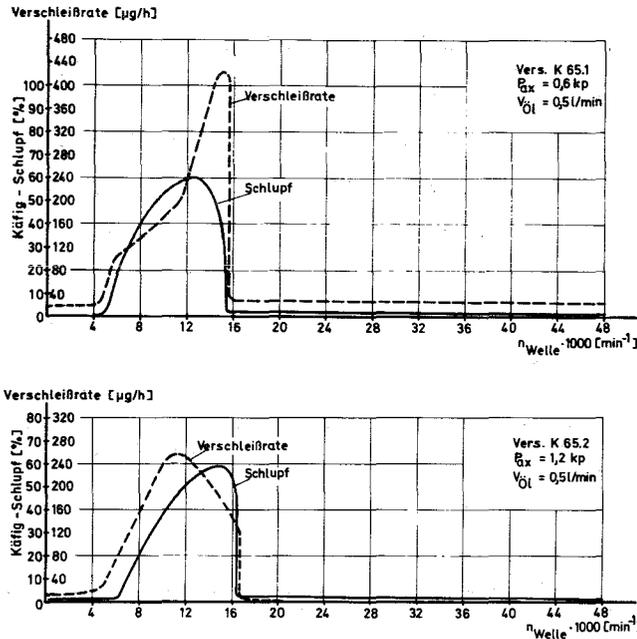


Bild 30.

Bild 30 zeigt das Verschleißverhalten der Kugeln. In dieser Darstellung sind die Verschleißraten zusammen mit dem Käfigschlupf über der Innenring- bzw. Wellendrehzahl aufgetragen. Es handelt sich um die beiden ersten Versuche mit einem Lager, wobei die Belastung jeweils konstant war. Die Drehzahl wurde in Stufen erhöht und bei jeder Stufe 15 Minuten gemessen.

Man erkennt hohe Verschleißraten von mehreren hundert Mikrogramm/h im Schlupfgebiet. Nach Überschreiten des Schlupfgebietes gehen sie wieder zurück auf Werte von wenigen µg/h. Dabei handelt es sich jedoch nicht um einen dauerhaften, bei diesen Betriebszuständen immer auftretenden Verschleiß. Wird ein Betriebspunkt im Schlupfgebiet längere Zeit gefahren, so vermindern sich die Verschleißraten, bis schließlich keine Verschleißzunahme mehr nachweisbar ist. Das Lager läuft ein, wobei zu beachten ist, daß dies zunächst nur für diesen speziellen Betriebspunkt gilt. Die Kugeln gleiten in den Bohrungen des Käfigs und auf den Laufringen und jede Veränderung der Drehzahl sowie der Belastung bringt die Kugeln in eine neue Laufspur in

den Ringen und Käfigtaschen, was eine neue Einlauferscheinung bedingen kann. Wenn schließlich alle diese möglichen Laufspuren erfaßt sind, ist das Lager eingelaufen.

Bild 31 zeigt eine solche Einlauferscheinung für einen bestimmten Betriebspunkt im Schlupfgebiet, wobei Drehzahl, Belastung und damit auch der Schlupf konstant waren. In dieser wie auch in den folgenden Darstellungen ist der Gesamtverschleiß über der Versuchszeit dargestellt.

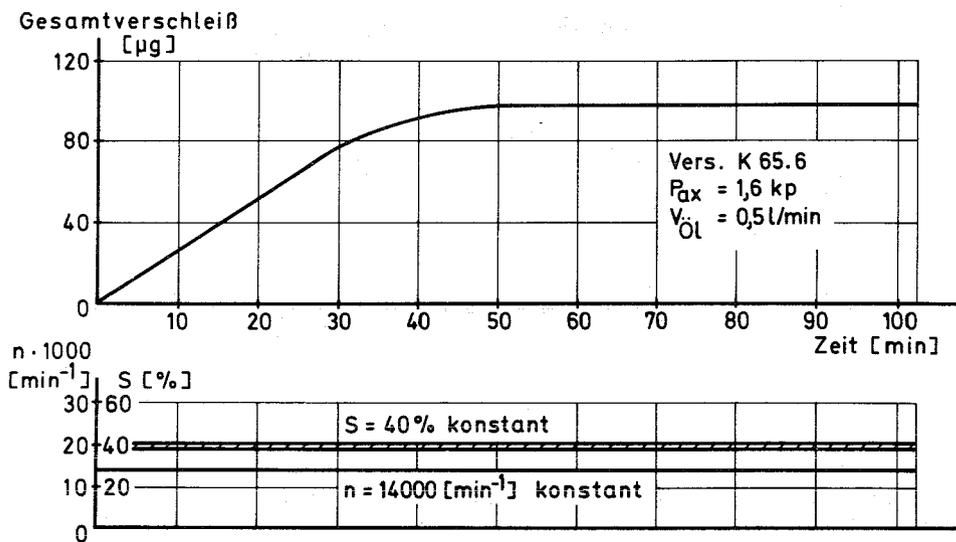


Bild 31. Einlaufverschleiß der Kugeln

6.1.2.2 Verschleiß bei Schlupfzusammenbruch

Im Gebiet des Schlupfzusammenbruchs wurde bei 3 Lagern während mehrerer Stunden Verschleiß gemessen. Dabei wurde die Wellendrehzahl in den Bereich der unter 3.2.1 erwähnten Hysterese eingestellt, so daß Schlupfzusammenbruch (a) und Schlupfentstehen (b) abwechselten. Aufgrund der Leistungsaufnahme des Lagers innerhalb und oberhalb des Schlupfgebietes in Verbindung mit der Kennlinie der Antriebsturbine pendelt die Wellendrehzahl zwischen diesen Werten (a) und (b). Schlupfzusammenbruch bedeutet eine z.B. doppelte Käfigdrehzahl mit höherem Reibmoment. Dadurch wird die Turbine abgebremst bis zur Drehzahl, bei der wieder Schlupf entsteht usw.. Bild 32 zeigt das Verschleißverhalten für diesen Fall.

Einlaufverschleiß der Kugeln

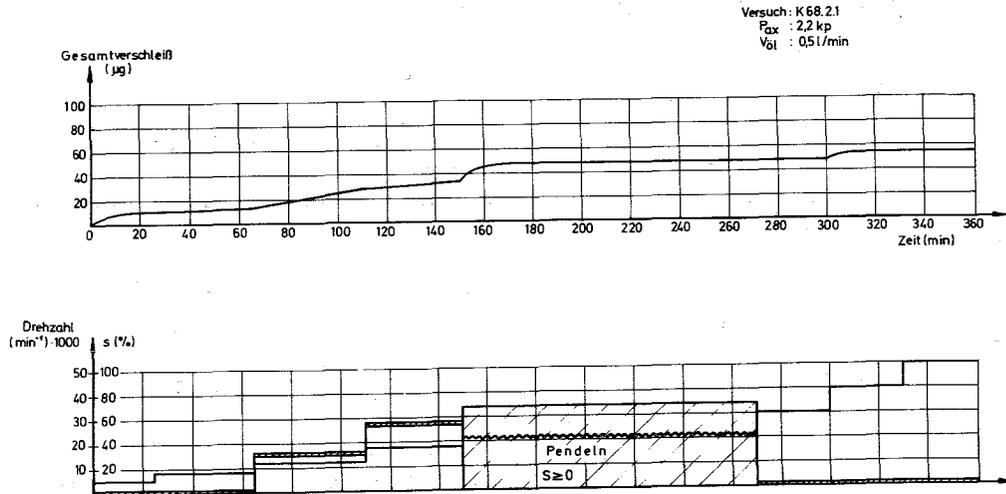


Bild 32.

Man bemerkt an dem noch nicht eingelaufenen Lager Verschleißzunahme im Schlupfgebiet und einen etwa 20-minütigen Einlaufeffekt im Bereich des Schlupfzusammenbruchs. Der selbsttätige Ablauf eines (a)-(b)-Zyklus dauert etwa 20 Sekunden. Somit erfolgt in 2 Stunden 360 mal der Schlupfzusammenbruch. Der Verschleiß pro Zusammenbruch mag zu gering sein, um deutlich nachgewiesen zu werden. Deshalb wurde die hydraulische Belastungseinrichtung mit einem einstellbaren Pulsator versehen, der durch Be- und Entlasten des Lagers von 0,5 - 20 kp eine (a)-(b)-Periode von ca. 2 Sekunden ermöglichte. Damit wurden in 2 h 3600 Schlupfzusammenbrüche erreicht, zusätzlich verbunden mit der stoßartigen Lagerbelastung. Aber auch dabei trat abgesehen von Einlaufeffekten wie oben dargestellt, kein dauerhafter Verschleiß auf, bzw. der Abrieb war kleiner $1 \mu\text{g}/\text{h}$.

Das im Schlupfgebiet gemessene Verschleißverhalten ist überraschend. Setzt man hydrodynamische Schmierung voraus, dann sind die hohen Verschleißraten unverständlich, nimmt man dagegen die Gleitreibung als Ursache des Verschleißes an, so bleibt unklar, weshalb der anfänglich hohe Verschleiß trotz Schlupf so gering wird. Aber beide Vorstellungen zusammen können eine Erklärung des Phänomens abgeben.

Theyse [24] hat in einer experimentellen Arbeit an

ölgeschmierten Kugellagern durch Widerstandsmessung zwischen Innen- und Außenring folgende Ergebnisse erhalten:

Einstellwerte		Gemessene Größen	
Drehzahl	Belastung	Metallische Berührung	Käfigschlupf
1) niedrig	klein	ja	nein
2) höher	klein	nein	bis 100%
3) wie 2)	größer 2)	nein	nein
4) wie 2)	größer 3)	ja	nein

Danach ist ein trennender Ölfilm zwischen Wälzkörpern und Ringen bei Schlupf und auch bei kinematischem Rollen möglich.

Nach den Meßergebnissen in dieser Arbeit hat der Käfig einen wesentlichen Anteil am Kugelverschleiß. Das zeigt u. a. der Einfluß des Käfigmaterials auf den Kugelverschleiß (vgl. 6.1.2.5) sowie das Ergebnis, daß nach dem Auswechseln des Käfigs eines eingelaufenen Lagers gegen einen neuen Käfig ähnliche Einlauferscheinungen an den Kugeln wie mit einem neuen Lager gemessen wurden.

Hirano [13] hat experimentell ermittelt, daß die Kugeln bei Käfigschlupf Kreiselbewegungen ausführen. Diese dem Rollen überlagerten Drehungen bewirken, daß sich die Laufspur einer Kugel bei Schlupf ständig ändert. So sind auch auf der ganzen Kugeloberfläche Verschleißspuren sichtbar.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß der Kugelverschleiß im Schlupfgebiet auf einem Einlaufvorgang beruht, der sehr von der Beschaffenheit des Käfigs abhängt.

6.1.2.3 Verschleiß bei Laststeigerung

Die Versuche mit Laststeigerung wurden durchgeführt mit einer Drehzahl, welche bei geringer Last Schlupf ermöglicht, ca. 18 - 20 000 U/min, sowie der höheren Drehzahl von 40 000 U/min.

Im Schlupfgebiet sind mit dem noch nicht eingelaufenen

Lager Verschleißerscheinungen zu erkennen (Bild 33). Dagegen ist bei weiterer Laststeigerung bis 50 kp kein Zuwachs festgestellt worden. Das gleiche gilt auch für die Versuche mit der Drehzahl von 40 000 U/min, bei denen kein dauerhafter Verschleiß gemessen wurde.

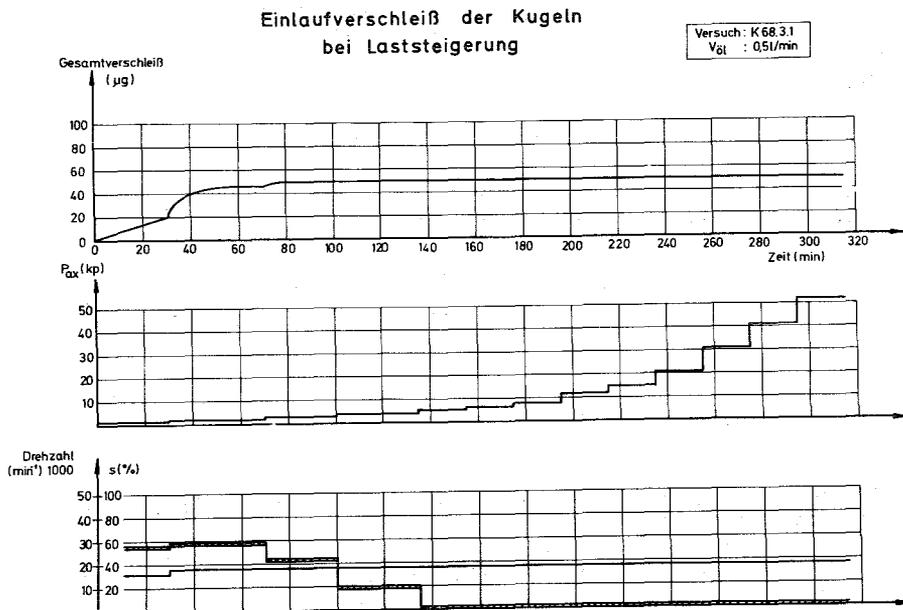


Bild 33.

6.1.2.4 Verschleiß bei geringer Ölzufuhr

Nachdem festgestellt worden war, daß in Abhängigkeit von der Axiallast unterhalb einer gewissen Schmierölzufuhr nur noch geringer Schlupf auftritt, wurde auch bei geringer Ölzufuhr Verschleiß gemessen. Dazu ist allerdings zu bemerken, daß die Verschleißmessung bei geringem Öldurchsatz meßtechnisch problematisch wird. Das Verfahren der Durchflußmessung ist auf einen genügenden Volumenstrom angewiesen, da sich sonst die Verschleißteilchen im Kreislauf besonders leicht ablagern können und nicht zum Meßkopf transportiert werden. So kommt es vor, daß während der Messung mit der kleinen Ölzufuhr von 0,1 l/min keine Verschleißzunahme festgestellt wird, daß aber bei anschließendem Durchspülen des Kreislaufs mit 0,5 l/min ein Anstieg der Zählrate erfolgt. Aus dem Resultat der Messung ist dieser Spüleinfluß zu erkennen (Bild 34).

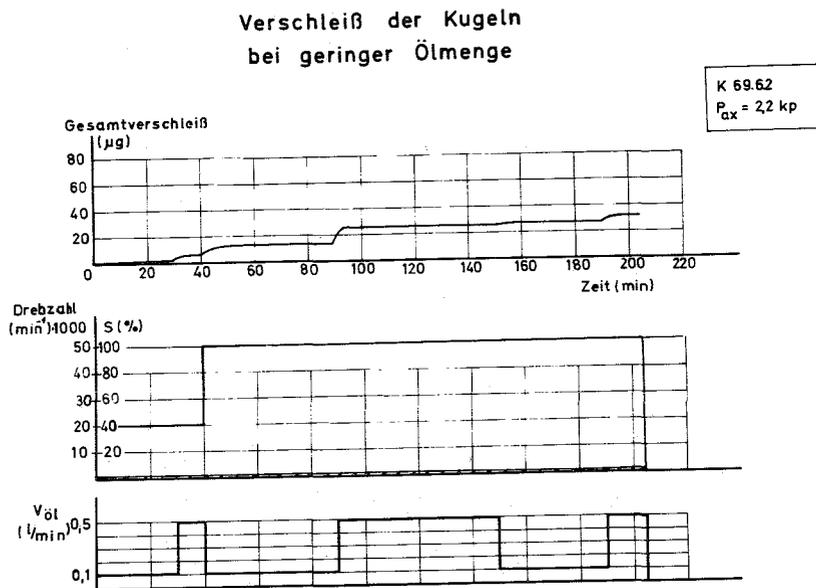


Bild 34.

6.1.2.5 Einfluß des Käfigmaterials auf den Kugelverschleiß

Bei einem Lager war statt des üblichen Bronzekäfigs ein Käfig aus Baustahl gleicher Abmessungen eingebaut. Damit ergab sich ein etwa 5 mal höherer Gesamteinlaufverschleiß der Kugeln gegenüber Lagern mit Bronzekäfig. Die Verschleißraten des neuen Lagers betragen im Schlupfgebiet bis zu 1000 µg/h. Der Stahlkäfig wirkt sich ungünstig auf den Kugelverschleiß aus, aber auch dieses Lager lief nach dem Einlauf ohne nachweisbaren Kugelverschleiß.

6.1.3 Außenringverschleiß

Keines der 3 Lager mit den aktivierten Außenringlaufbahnen zeigte besondere Verschleißerscheinungen im Schlupfgebiet. Das ist verständlich, weil trotz Käfigschlupf die Kugeln im Außenring ohne Schlupf abrollen können. Bei der Untersuchung von Rollenlagern und der Analyse des Rollenschlupfs in [25] wurden solche Erscheinungen festgestellt. Bild 35 zeigt den ersten Versuch mit einem Außenring, der hohen Einlaufverschleiß aufwies. Einer etwa linearen Zunahme des Verschleißes bis 40 000 U/min folgt ein zunächst kurzzeitiger steiler Anstieg bei 45 000 U/min. Im Schlupfgebiet und im Bereich des

Schlupfzusammenbruchs trat kein höherer Verschleiß auf.

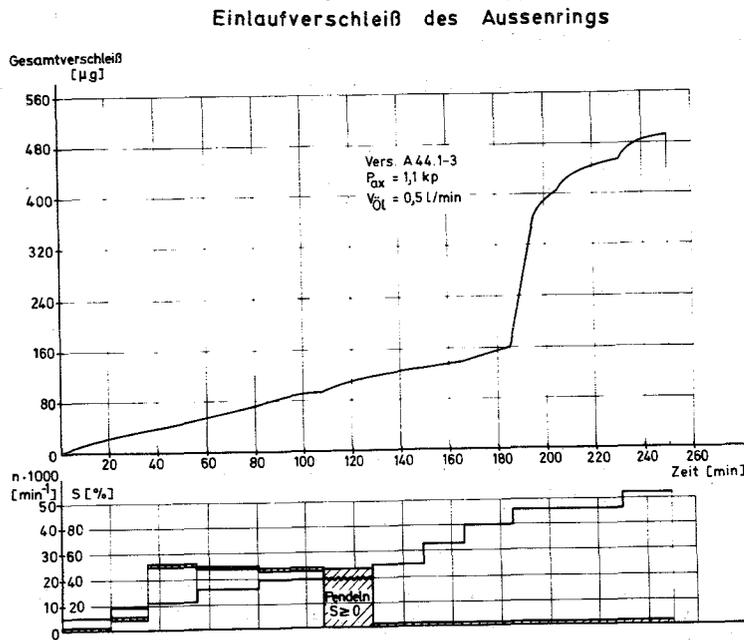


Bild 35.

Bei den Versuchen mit Laststeigerung bis 50 kp bei 20 000 U/min und 40 000 U/min war, abgesehen von Einlaufeffekten, kein dauernder Verschleiß festgestellt worden.

Dagegen ergab sich reproduzierbarer Verschleiß bei Versuchen mit der geringen Ölzufuhr von 0,1 l/min bei Drehzahlen größer 30 000 U/min. Dabei wurden bei dem vorher bereits eingelaufenen obigen Lager A 44 Verschleißraten von 100 - 400 µg/h festgestellt. Das ist die Größenordnung des nur einmalig und kurzzeitig auftretenden Verschleißanstiegs in Bild 35. Ein solcher Betrieb mit Mangelschmierung ist also mit bis zu hundertfach höherem Außenringverschleiß verbunden gegenüber den Laufbedingungen eines eingelaufenen Lagers mit guter Schmierung.

Bei der Darstellung des Gesamtverschleißes in Bild 39 ist der durch geringe Ölzufuhr verursachte Verschleiß bei den betreffenden Lagern durch waagrechte Pfeile besonders gekennzeichnet.

6.1.4 Innenringverschleiß

Einer der beiden untersuchten Innenringe hatte erhöhten Verschleiß im Schlupfgebiet gegenüber anderen Laufbereichen, aber nur während der Einlaufperiode. (Bild 36).

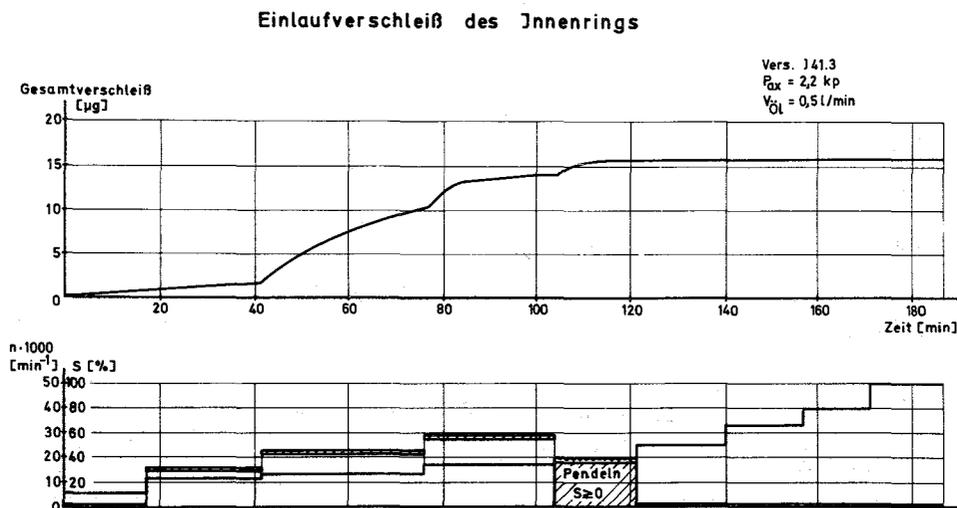


Bild 36.

Man erkennt deutlich den Vorgang des Einlaufs bei den einzelnen Drehzahlstufen. Das 2. Lager sei ebenfalls aufgeführt, weil hier eine Besonderheit gezeigt werden kann. Dieses Lager war bei der Aktivierung infolge Stromstärkeschwankungen des Zyklotrons heiß geworden und nach der Bestrahlung violett verfärbt. Bild 37 zeigt den ersten Versuch mit diesem Lager.

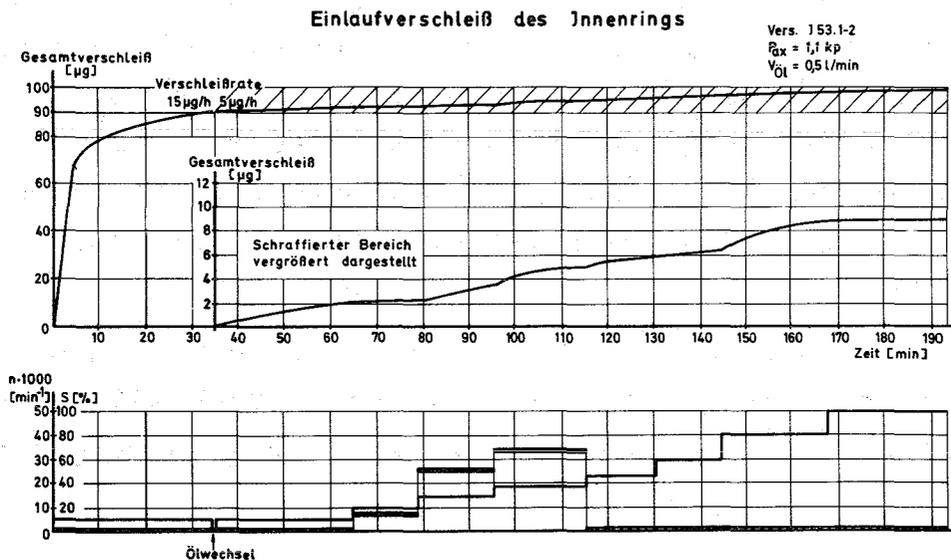


Bild 37.

In den ersten Laufminuten wurde vermutlich die infolge der Erhitzung entstandene oxydische Oberflächenschicht in der Lauf- rille abgerieben, was zu dem starken Verschleißanstieg zu Be- ginn des Versuches führte. Wegen der hohen Gesamtaktivität im Ölkreislauf wurde nach 35 Minuten das Öl gewechselt, da sich bei hohen Zählraten infolge der Statistik geringe Zuwachsraten nicht deutlich abheben. Nach dem Ölwechsel wurde der gleiche Betriebspunkt (5000 U/min) wieder eingestellt und die Ver- schleißrate von vorher 15 $\mu\text{g}/\text{h}$ betrug nur noch 5 $\mu\text{g}/\text{h}$. Die ab- geriebenen Teilchen hatten vermutlich selbst stark am Ver- schleißvorgang teilgenommen. Der weitere Verschleißvorgang ist zur Verdeutlichung des Verschleißverlaufs zusätzlich ver- größert herausgezeichnet.

Bei den Versuchen mit konstanter Drehzahl und Last- steigerung bis 50 kp wurde - ebenso wie bei den Außenringen - kein dauerhafter Verschleiß gemessen.

Dagegen sind abweichend von den Ergebnissen der Außen- ringe bei den Versuchen mit geringer Ölzufuhr (0,1 l/min) keine erhöhten Verschleißraten festgestellt worden. Der Grund dafür ist wohl die für den Innenring günstige Art der Ölzufuhr, wo- bei das Öl mit 2 Düsen in den Spalt zwischen Käfig und abge- schliffener Innenringschulter direkt auf die Laufbahn gespritzt wird.

6.1.5 Käfigverschleiß

Von den beiden untersuchten Käfigen bestand der eine aus Baustahl, mit den gleichen Abmessungen wie die üblichen Bronzekäfige, der zweite aus Zollernbronze mit einer Zulegierung von 0,1% Iridium.

Die Versuche mit dem aktivierten Stahlkäfig ergaben nach 20 Minuten Lauf den geringen Einlaufverschleiß von 40 μg . Bei allen weiteren damit durchgeführten Messungen war keine Ver- schleißzunahme mehr festzustellen.

Im Gegensatz dazu hatte der iridiumlegierte neue Bronzekäfig heftige Einlauferscheinungen mit anfänglich hohen Verschleißraten von mehreren hundert $\mu\text{g}/\text{h}$.

Einlaufverschleiß des Bronzekäfigs

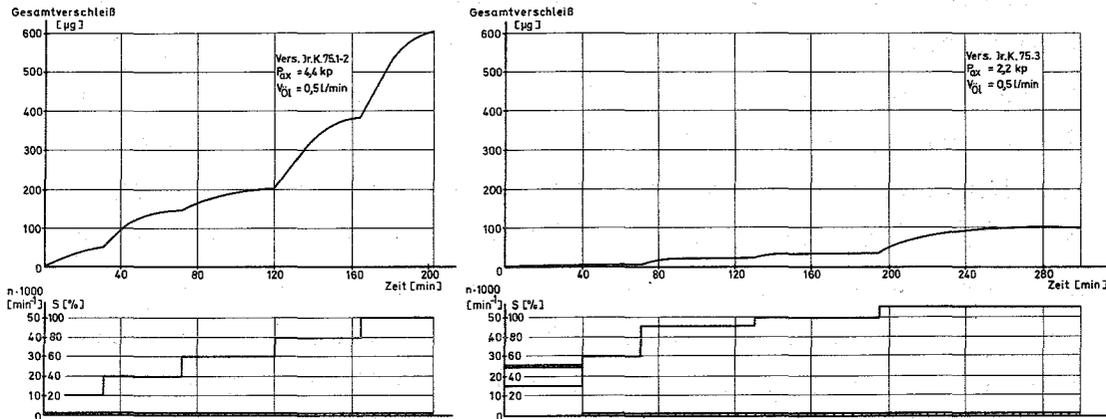


Bild 38.

Im linken Teil von Bild 38 ist bei jeder Drehzahlerhöhung des ersten Versuchs ein ausgeprägter Einlauf zu erkennen. Infolge der Axialbewegung der Ringe wandern der Käfig axial und die Kugeln radial in ihren Bohrungen und erzeugen jeweils neue Laufspuren. Der Vergleich mit dem zweiten Versuch rechts im Bild zeigt, wie bei der Wiederholung bis einschließlich 50 000 U/min nur etwa 30 µg/ gegenüber 600 µg Verschleiß im ersten Versuch auftrat. Aus dem weiteren Verlauf war ersichtlich, daß ein Betriebspunkt, bei dem ein Einlauf des Käfigs erfolgt war, bei einer späteren Wiederholung keinen Verschleiß mehr aufwies.

Der Käfig ist außenringgeführt und ein Teil des Verschleißes entstand auch durch die Reibung am Außenring. Die Erfassung dieses Verschleißes wäre nur möglich durch eine Aktivierung des Käfigs an der äußeren Mantelfläche mit geladenen Teilchen.

Die Versuche mit der geringen Ölzufuhr von 0,1 l/min, welche mit den bereits eingelaufenen Lager unternommen wurden, ergaben nochmals Verschleißraten in der Größenordnung des ersten Versuchs mit dem neuen Lager.

6.1.6 Vergleich der Gesamtverschleißmengen

Wie aus den Darstellungen über den Ablauf der Ver-

schleißversuche hervorgeht, handelt es sich, abgesehen von einigen Versuchen mit geringer Ölzufuhr, um Einlaufvorgänge, bei denen anfänglich hohem Verschleiß von mehreren hundert $\mu\text{g}/\text{h}$ Laufzeiten mit abnehmendem und nicht mehr nachweisbarem Verschleiß folgen. Die Nachweisgrenze liegt bei $1 \mu\text{g}/\text{h}$. In keinem Fall wurde an einem Lagerteil Dauerverschleiß in der Größenordnung des Einlaufverschleißes festgestellt. Deshalb sind auch schwerlich Angaben über Verschleißraten der einzelnen Lagerteile für bestimmte Betriebsbedingungen anzugeben, aus denen etwa eine maximale Lebensdauer aufgrund einer Spielvergrößerung errechnet werden könnte.

Die Zeitdauer, die ein Lager geprüft wurde, betrug bis zu 50 Laufstunden, wobei jeweils versucht wurde, kritische Parameter herauszufinden. Das geschah durch wiederholtes Anfahren von Betriebspunkten insbesondere des Schlupfgebietes sowie solchen, die durch einen ungewöhnlichen Verschleißanstieg, wie z.B. in Bild 35, aufgefallen waren.

Eine Übersicht über die Einlaufverschleißmengen für die verschiedenen Lagerteile zeigt die Darstellung 39.

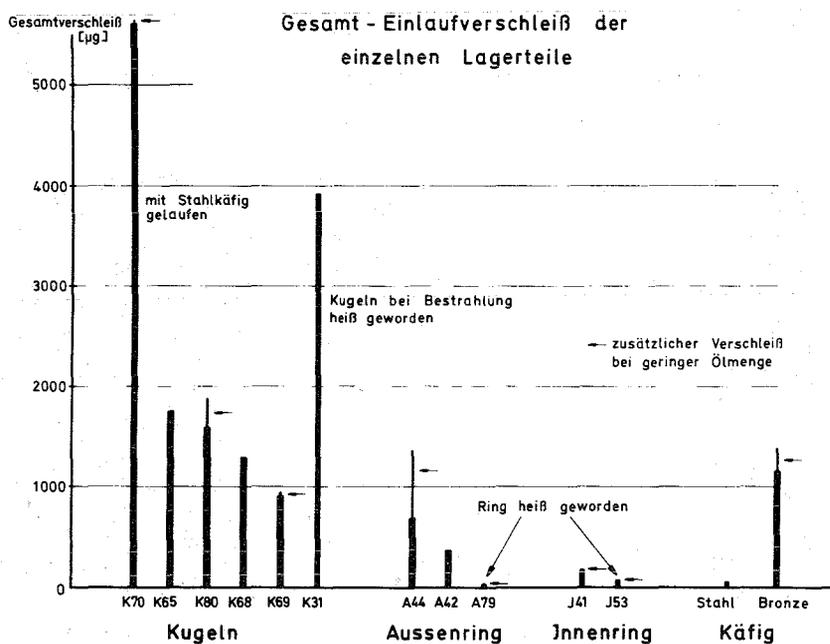


Bild 39.

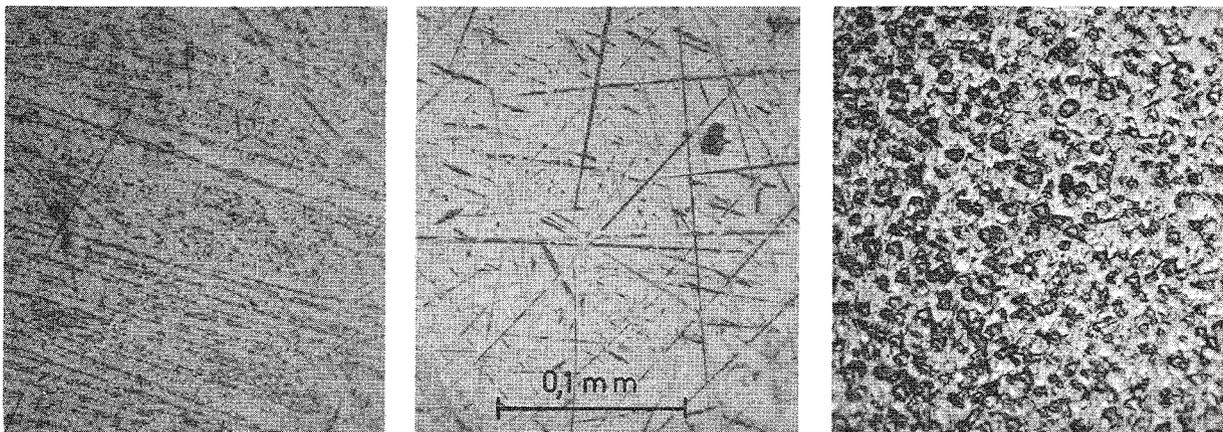
Auffällig ist der hohe Verschleiß von 5600 μg der Kugeln, die mit einem Stahlkäfig gelaufen waren, sowie der geringe Verschleiß des untersuchten Stahlkäfigs. Der Verschleiß des Bronzekäfigs ist etwa so hoch wie der Kugelverschleiß.

Die bei den Versuchen mit der geringen Ölzufuhr von 0,1 l/min entstandenen Verschleißmengen sind in Bild 39 durch waagrechte Pfeile gekennzeichnet.

Abweichende Ergebnisse zeigten Kugeln, die bei der Reaktoraktivierung zu heiß geworden waren, durch hohen Verschleiß, sowie ein Innen- und ein Außenring, die bei der Zyklotronbestrahlung zu heiß wurden, durch sehr niedrigen Verschleiß. An der Oberfläche dieser Kugeln wurden Veränderungen in Form kleiner Krater oder Mulden festgestellt, während im Laufbild der entsprechenden Ringe keine Unterschiede zu anderen Lagerteilen aufgetreten sind. In Bild 40 sind vergrößerte Kugeloberflächen aufgeführt, mit:

- a) neue Kugel
- b) Kugel nach Betrieb
- c) Kugel nach Betrieb, bei Aktivierung heiß geworden

Abgesehen von Fall c) konnten bei mikroskopischer Betrachtung keine Unterschiede zwischen gelaufenen aktivierten und unbestrahlten Lagerteilen festgestellt werden.



a) neu

b) gelaufen

c) gelaufen, bei Aktivierung heiß geworden

Bild 40. Oberflächen von Kugeln

6.1.7 Geometrische Veränderungen aufgrund des Verschleißes

Bei einem axial belasteten Schrägkugellager haben alle Kugeln in der Drucklinie Berührung mit Innen- und Außenring, und somit kann von einer Radialspielvergrößerung aufgrund des Verschleißes - wie z.B. bei Rollenlagern- nicht gesprochen werden.

Die Verschleißmengen in μg sind jedoch eine wenig anschauliche Größe. Um eine Vorstellung von den geometrischen Veränderungen zu geben, ist angenommen, daß der Verschleiß in einer Breite von 1 mm an den Laufbahnen der Ringe entsteht. Bei den Kugeln sind unter dem Mikroskop auf der ganzen Oberfläche Verschleißspuren zu erkennen. Zur Abschätzung ist ein gleichmäßiger Abtrag auf der Kugeloberfläche angenommen. Unter diesen Annahmen ergeben sich Durchmesseränderungen Δd der Lagerteile aufgrund der angegebenen Einlaufverschleißmengen.

Lagerteil	Einlaufverschleiß	Durchmesseränderung	Nachweisgrenze 1 $\mu\text{g}/\text{h}$ bedeutet:
Außenring	700 μg	$\Delta d = 1,37 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$	$1,96 \cdot 10^{-6} \text{ mm/h}$
Innenring	200 μg	$\Delta d = 0,54 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$	$2,7 \cdot 10^{-6} \text{ mm/h}$
Kugeln	1500 μg	$\Delta d = 0,26 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$	$2,6 \cdot 10^{-6} \text{ mm/h}$

6.1.8 Diskussion der Ergebnisse

Zunächst stellt sich die Frage nach der Zuverlässigkeit dieses Meßverfahrens, denn die Vertrauenswürdigkeit der quantitativen Aussagen ist davon abhängig, ob die im Lager entstehenden Verschleißteilchen vollständig zum Meßkopf transportiert werden.

Bei der konstruktiven Ausbildung der Meßanlage und der Ölführung ist dafür Sorge getragen, daß sich die Teilchen nicht in Toträumen festsetzen. Auch ist bei der Größenordnung der Verschleißteilchen die Sinkgeschwindigkeit so gering (ca. 5mm/h), daß mit Absetzerscheinungen in dem ständig in Bewegung befindlichen Ölstrom kaum zu rechnen ist. Trotzdem ist nicht auszuschließen, daß an den aufgrund der Bearbeitung nicht glatten Oberflächen Teilchen hängenbleiben können. So wurde an dem ausgebauten Stahlkäfig, der mit aktiven Kugeln gelaufen war, eine Aktivität festgestellt, die einem Verschleiß von 8 μg ent-

sprach. Der Gesamtverschleiß der Kugeln betrug 5600 μg . Im Meßkopf wurden Anlagerungen in der Größenordnung von 10 - 15 μg festgestellt bei Verschleißmengen im Öl von 400 - 650 μg . Die angegebenen Gesamtverschleißmengen können also einige Prozent zu niedrig sein aufgrund dieser Erscheinungen. Bei den großen Streuungen des Gesamtverschleißes der einzelnen Lager untereinander ist dem keine besondere Bedeutung beizumessen.

Bei Versuchen mit Teflon wurde festgestellt, daß an diesem Material die Ablagerung von Teilchen nur ein Viertel gegenüber Stahl beträgt, so daß eine Teflonauskleidung von Meßeinrichtungen Vorteile verspricht.

6.2 Meßergebnisse Rollenlager

Bei den Verschleißversuchen mit Rollenlagern ist ebenso wie bei den Kugellagern eine Tendenz zum Einlauf der einzelnen Lagerteile festzustellen. Im Gegensatz zu den Kugellagern ist der Verschleiß der Rollenlager auch nach den ersten Versuchen mit hohem Verschleiß noch deutlich meßbar.

6.2.1 Versuchsprogramm

Bei konstanter Belastung von 1,4; 3,3; 10 und 19,5 kp wurde die Drehzahl in Stufen erhöht und bei jeder Stufe ca. 30 Minuten Verschleiß gemessen. Bei bestimmten Betriebspunkten wurden die Betriebsbedingungen bis zu 5 h konstant gehalten, um Einlaufvorgänge festzustellen.

6.2.2 Rollenverschleiß

2 Lager wurden untersucht, bei denen die Rollen im Reaktor aktiviert waren. Da die Rollen ganz aktiviert sind, ist bei diesen Versuchen eine Trennung von Mantel- und Stirnflächenverschleiß nicht möglich.

Versuchsergebnisse Lager Nr. RR 199

Lagerspiel 39 μm , Einbauspiel 32 μm .

Vor Fertigstellung der Einrichtung zur radialen Belastung der Lager wurden Versuche ohne Belastung gefahren. Das Lager mit 32 μ Einbauspiel gehört zu der Gruppe, die besondere Schlupf-

schwankungen aufwiesen, wie in 3.3.1 beschrieben ist. In Bild 41 ist der erste Versuch dargestellt.

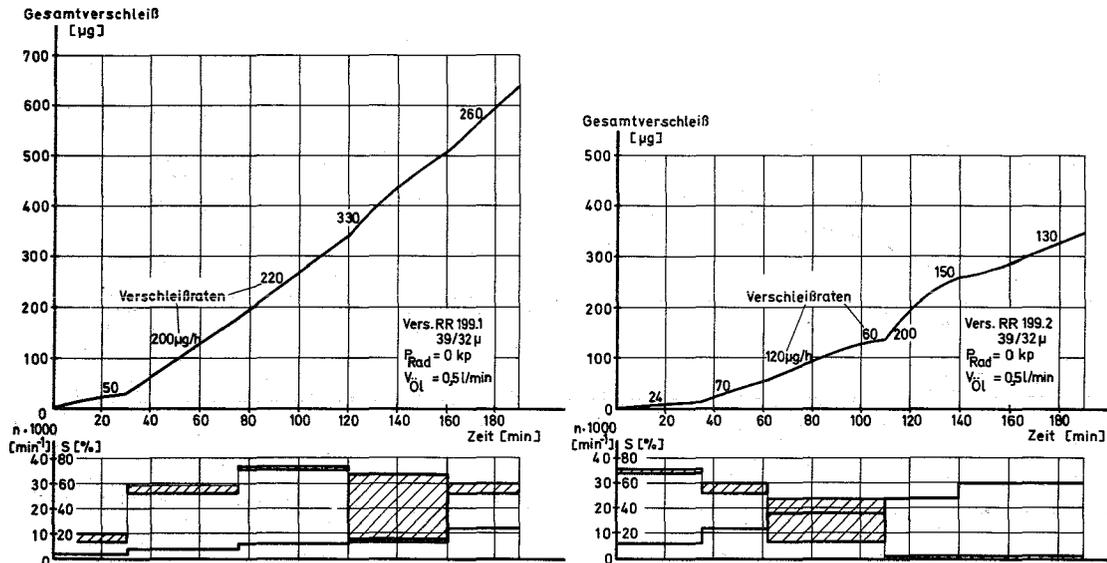


Bild 41. Einlaufverschleiß der Rollen

Aus versuchstechnischen Gründen ist der Versuch in 2 Abschnitte aufgeteilt worden, wobei nach dem 1. Abschnitt ein Ölwechsel vorgenommen wurde. Man erkennt im Versuchsprogramm Betriebspunkte mit hohem gleichmäßigem Schlupf, mit zusätzlichen Schlupfchwankungen und ohne Schlupf. Im ersten Lauf erfolgt ein etwa linearer Verschleißanstieg ohne erkennbaren Einfluß der Drehzahl oder des Schlupfes. Im 2. Lauf wurden zunächst 2 bereits gemessene Drehzahlen (6000 und 12 000 U/min) gefahren. Die Verschleißraten sind wesentlich niedriger, was auf einen bereits erfolgten Einlauf und vielleicht auch auf den Ölwechsel zurückgeführt werden kann.

Es sei angemerkt, daß niedrigere Verschleißraten nach einem Ölwechsel nicht immer aufgetreten sind, sondern daß auch bei Wiedereinstellen desselben Betriebspunktes die Verschleißraten nach einem Ölwechsel bis auf ca. $\pm 10\%$ den alten Wert aufwiesen.

Das Versuchsergebnis verdeutlicht, daß im Gegensatz zu den Resultaten der Kugellager der Verschleiß im Schlupfbereich gegenüber anderen Laufbereichen nicht ausgezeichnet ist.

Der dritte Lauf mit diesem Lager ist in Bild 42 dargestellt.

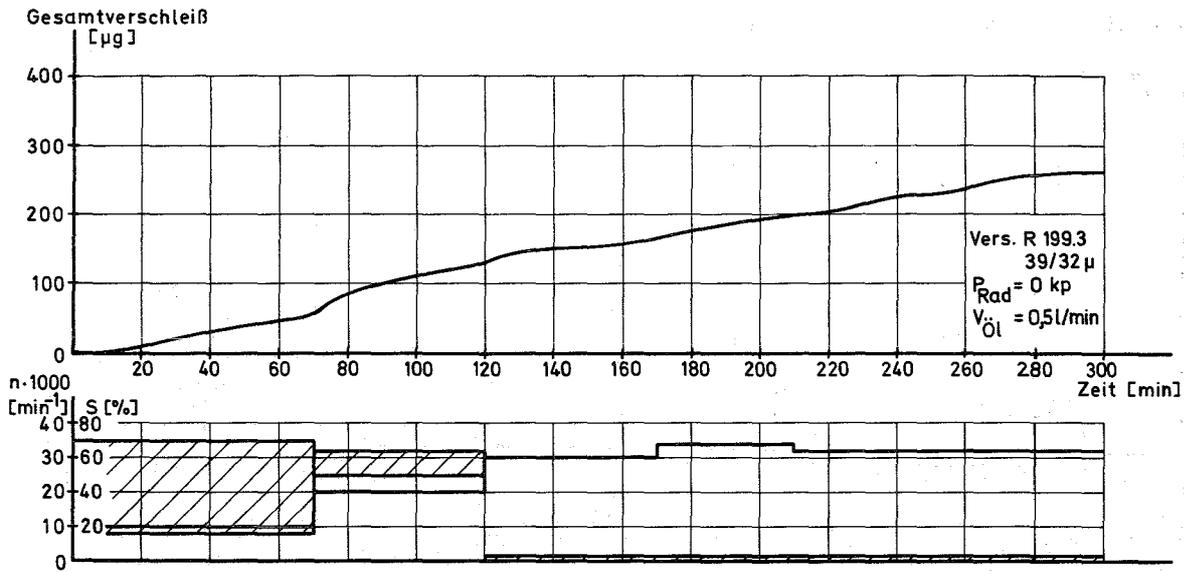


Bild 42. Einlaufverschleiß der Rollen

Eine eindeutige Zuordnung der Verschleißraten zu den einzelnen Betriebspunkten ist nicht erkennbar. Um eine Übersicht über die Verschleißversuche zu geben, wurde für jeden Versuch eine mittlere Verschleißrate aus dem Gesamtverschleiß und der Versuchszeit gebildet. (Bild 43). Die Versuche sind in der zeitlichen Reihenfolge aufgeführt, die Wiederholung eines Versuchs ist ebenfalls angegeben. Man erkennt besonders den geringeren Verschleiß bei der Wiederholung eines Versuchs, z.B. Versuch Nr. 9 ist eine Wiederholung von Versuch Nr. 4 - 5.

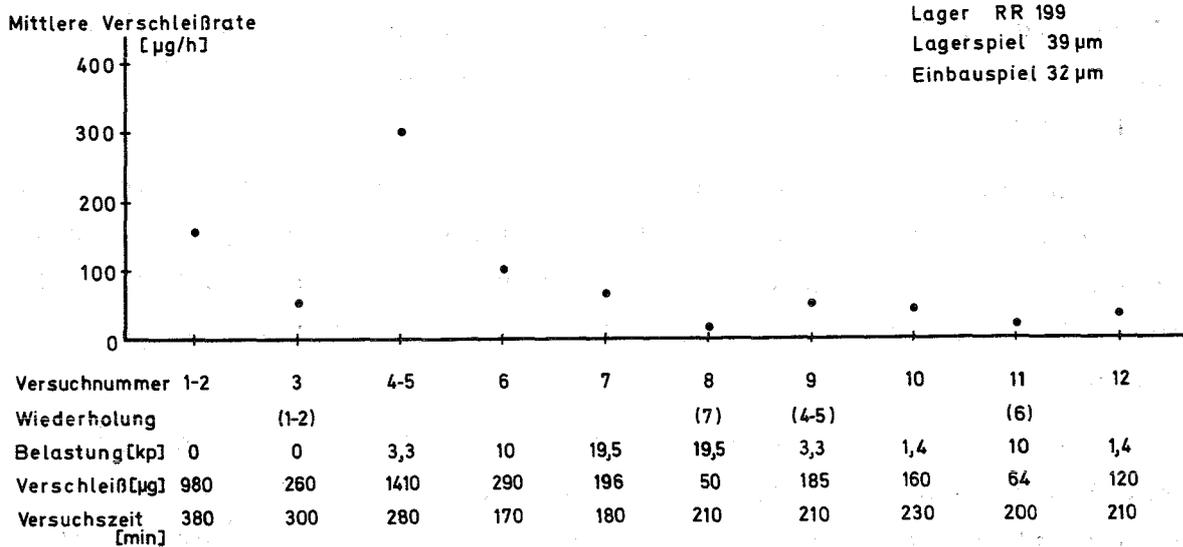


Bild 43. Mittlere Verschleißrate der Rollen

Versuchsergebnisse Lager RR 200

Lagerspiel 27 μm , Einbauspiel 19 μm .

Die Rollen dieses Lagers waren im Reaktor und ein Bord des Außenrings am Zyklotron aktiviert worden. Für die Zweikomponentenverschleißmessung werden an Geräten zusätzlich ein Einkanaldiskriminator, eine Zähler-Uhr und ein Drucker benötigt. Jeder der beiden Diskriminatoren erfaßt einen geeigneten Peak der zu messenden Isotope. (Rollen ^{59}Fe , Außenringbord ^{56}Co). Aufgrund des Comptonkontinuums und der Überlagerung von Peaks im Energiespektrum der beiden Isotope sind die gemessenen Zählraten Z_{Fe} und Z_{Co} den Verschleißmengen nicht direkt proportional, wie das bei Einkomponentenmessungen der Fall ist. Die gegenseitige Einstreuung der Isotope wird berücksichtigt im folgenden Gleichungssystem für die beiden unbekanntes Zählraten Z'_{Fe} und Z'_{Co} , die das Maß für den Verschleiß darstellen.

$$Z_{\text{Fe}} - U_1 = K_{11} Z'_{\text{Fe}} + K_{12} Z'_{\text{Co}}$$

$$Z_{\text{Co}} - U_2 = K_{21} Z'_{\text{Fe}} + K_{22} Z'_{\text{Co}}$$

gemessen	berechnet
Z_{Fe} Zählrate in Kanal 1	Z'_{Fe} Z'_{Co}
U_1 Untergrund in Kanal 1	$K_{11} = K_{22} = 1$
Z_{Co} Zählrate in Kanal 2	K_{12} K_{21} Einstreufaktoren
U_2 Untergrund in Kanal 2	werden bestimmt mit Hilfe der
	Eichproben [26]

Bei der Verschleißmessung werden für jeden Meßpunkt, z.B. in Schritten von 4 Minuten, die Werte Z'_{Fe} und Z'_{Co} errechnet. Durch Multiplikation mit den Eichfaktoren des Meßkopfes ergeben sich die Verschleißmengen. Im vorliegenden Fall waren die Zähler an einem entsprechend programmierten Prozeßrechner angeschlossen, der diese Rechenschritte ausführte.

Bei der Durchführung des Zweikomponentenversuches zeigte sich, daß der Rollenverschleiß gegenüber dem Bordverschleiß so groß war, daß letzterer nicht nachgewiesen werden

konnte. Geringere Verschleißraten des Bords waren erwartet worden und deshalb wurde der Bord mit der doppelten spezifischen Aktivität der Rollen versehen. Diese Aktivität war noch nicht ausreichend und es müßte also bedeutend höher aktiviert oder eine Einkomponentenmessung durchgeführt werden.

Die Ergebnisse des Rollenverschleißes sind in Bild 44 angegeben.

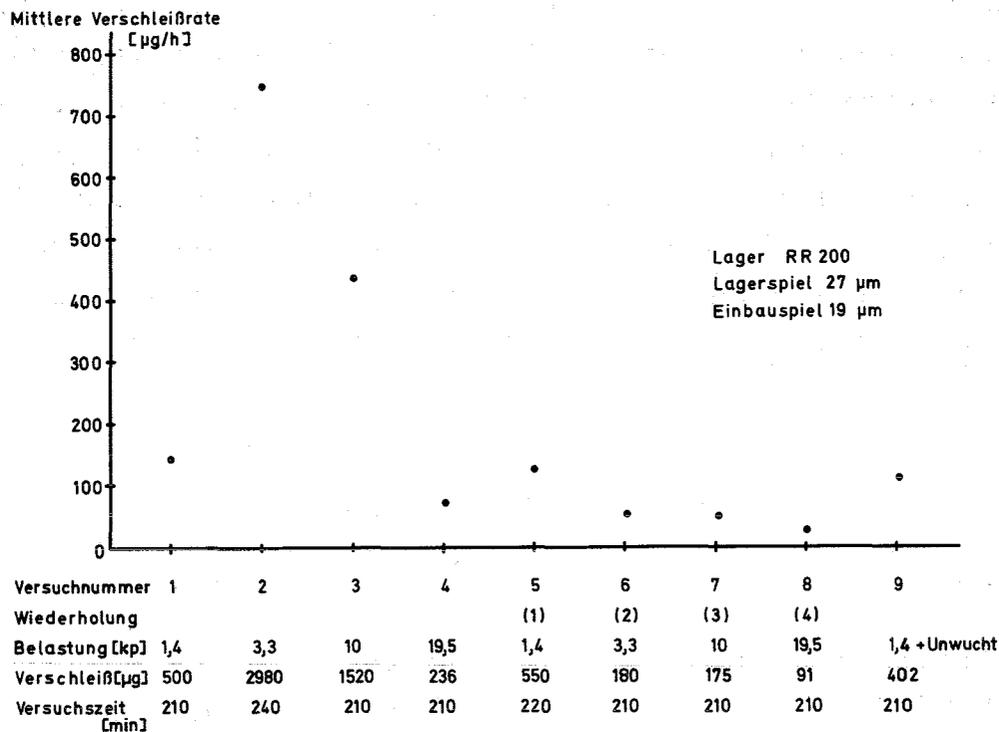


Bild 44. Mittlere Verschleißrate der Rollen

6.2.3 Rollenstirnflächenverschleiß

Versuchsergebnisse Lager Nr. RRSt 191

Lagerspiel 44 µm, Einbauspiel 34 µm.

Da bei neutronenaktivierten Rollen eine Aufteilung des Verschleißes nach Mantel- und Stirnfläche nicht möglich ist, wurden für ein Lager alle Rollen auf einer Stirnseite mit Deuteronen aktiviert. Den ersten Versuch mit diesem Lager zeigt Bild 45.

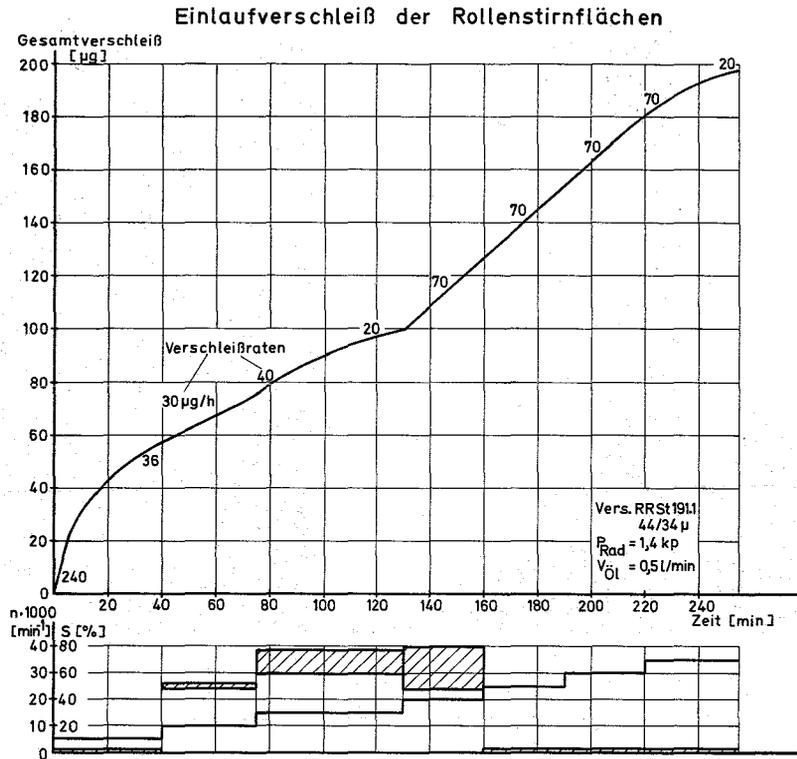


Bild 45.

Geringe Herstellungsungenauigkeiten des Käfigs bewirkten, daß die Rollen nicht völlig gleichmäßig geführt wurden, wie die Laufbilder verschiedener Rollenstirnflächen von Photo 46 verdeutlichen. (Vgl. auch Anhang 2). Typischer Einlaufverschleiß entsteht im ersten Lauf, wenn "drückende Stellen" abgerieben werden. So betrug der Gesamtverschleiß im 1. Versuch ca. 200 µg, bei einer späteren Versuchswiederholung unter gleichen Bedingungen nur noch 18 µg (Versuch Nr.1 und 4 in Bild 47).

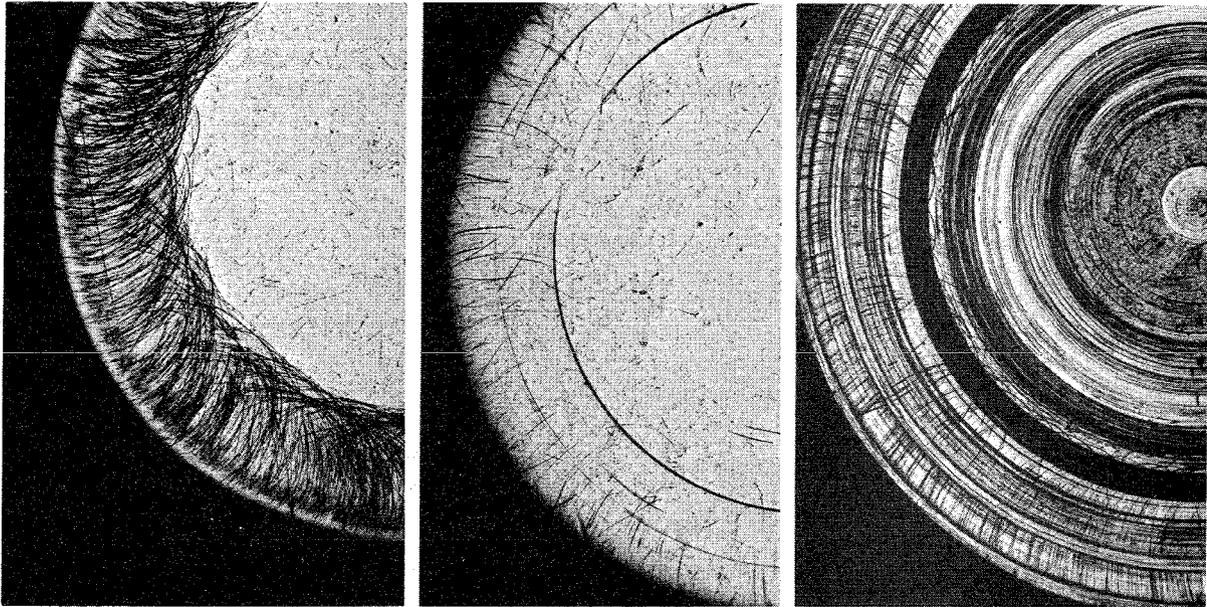


Bild 46. Abnutzung von Rollenstirnflächen

Die mittleren Verschleißraten betragen etwa 1/10 der Werte von ganz aktivierten Rollen. Dabei ist zu berücksichtigen, daß nur eine Seite der Rollen aktiviert war, der gesamte Stirnflächenverschleiß also wahrscheinlich doppelt so hoch ist.

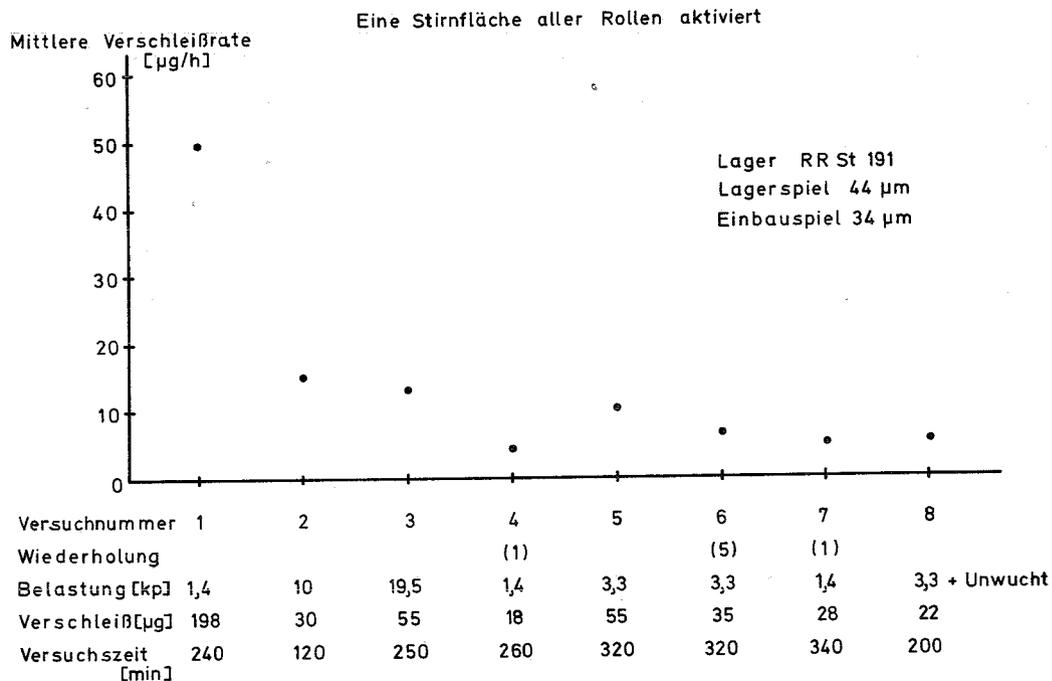


Bild 47. Mittlere Verschleißraten der Rollenstirnflächen

6.2.4 Verschleiß der Innenringe

Auch bei den Innenringen konnten keine reproduzierbaren Verschleißvorgänge festgestellt werden, die auf eine kritische Betriebsbedingung zurückzuführen wären. Die Schlupf-schwankungen des Lagers mit dem größeren Lagerspiel führten ebenfalls nicht zu besonders hohem Verschleiß. Die Versuchsergebnisse für die beiden Lager sind ähnlich und in Bild 48 aufgeführt.

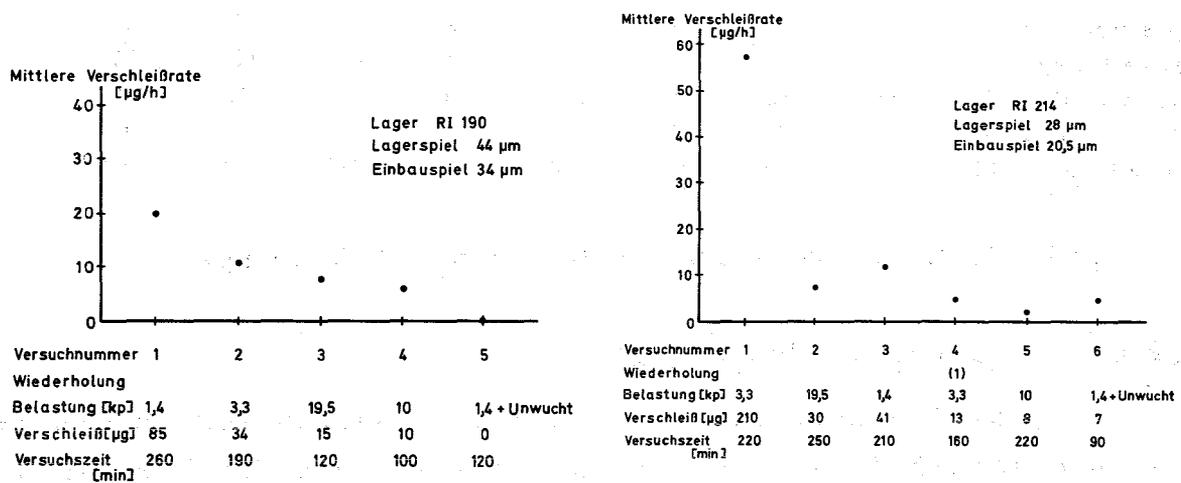


Bild 48. Mittlere Verschleißraten der Innenringe

6.2.5 Verschleiß des Außenrings

Am Außenring war nur die Laufbahn, nicht aber die beiden Borde aktiviert. Die Verschleißraten der Außenringlaufbahn liegen in der gleichen Größenordnung wie beim Innenring (Bild 49).

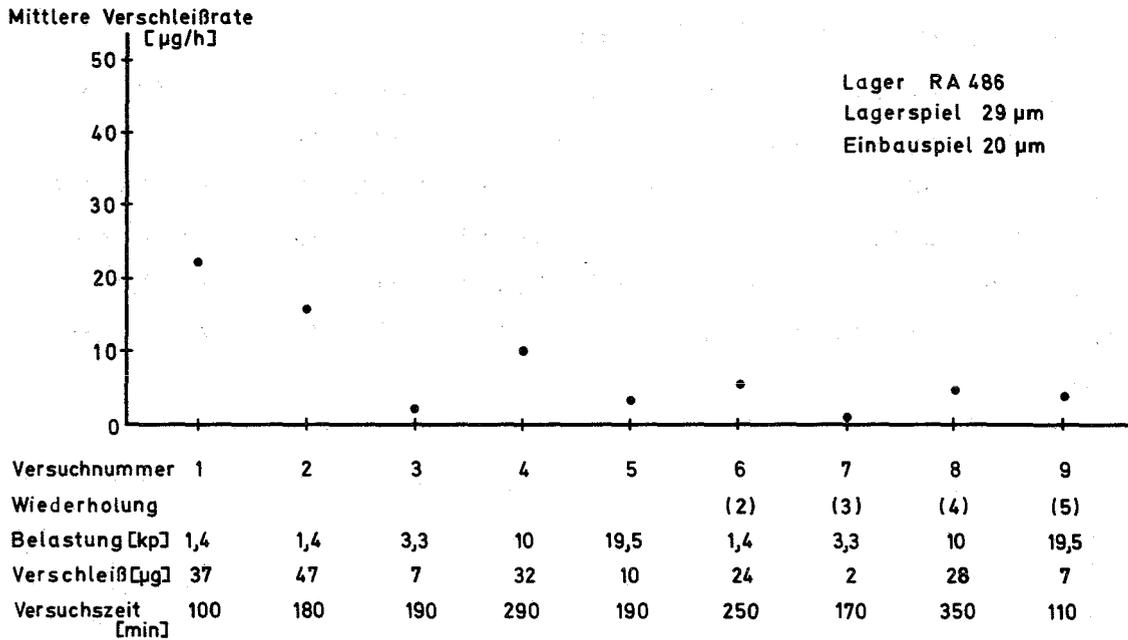


Bild 49. Mittlere Verschleißrate des Außenrings

6.2.6 Verschleiß des Käfigs

Das Einlaufverhalten des Rollenlagerkäfigs ähnelt dem des Kugellagerkäfigs. Man erkennt im 1. Versuch den kräftigen Verschleißzuwachs bei jeder Drehzahlerhöhung. (Bild 50). Die Ergebnisse aller Versuche sind in Bild 51 zusammengefaßt.

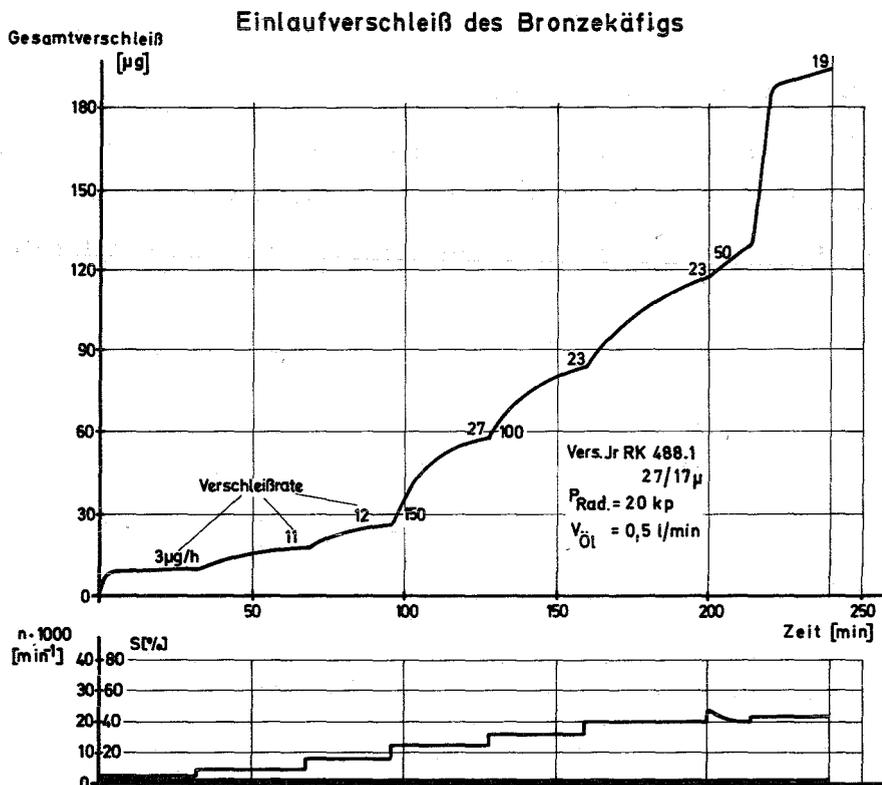


Bild 50.

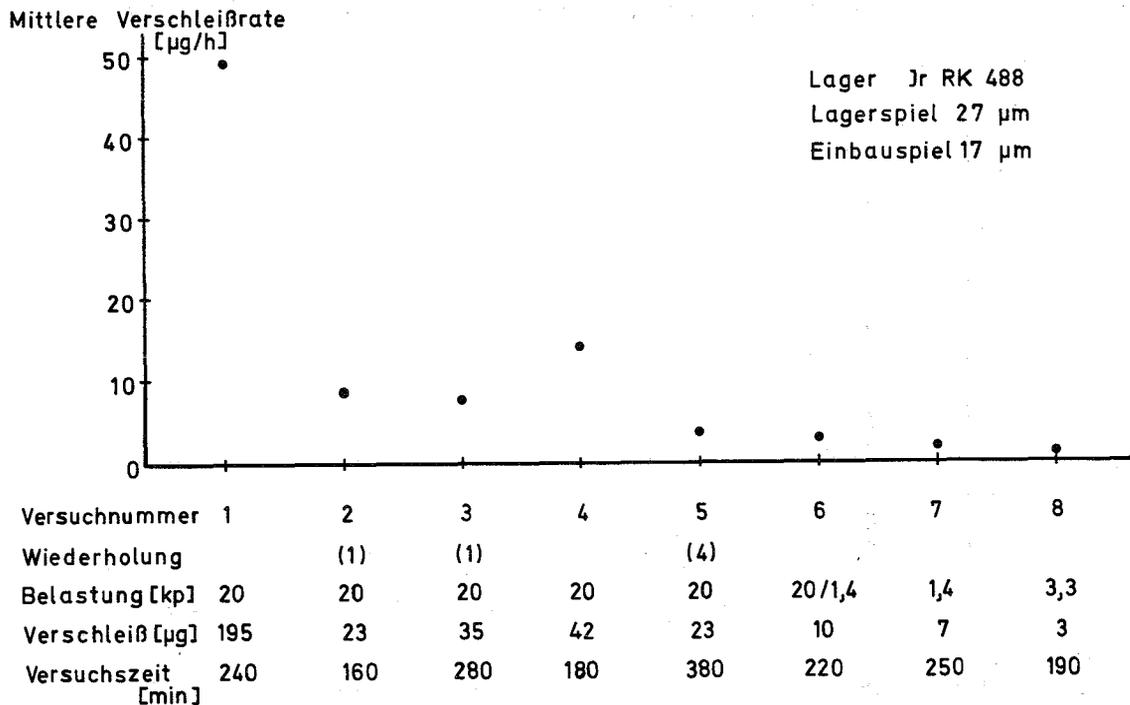


Bild 51. Mittlere Verschleißrate des Käfigs

Die mittleren Verschleißraten liegen in der Größenordnung der Werte, die für die Ringe gefunden wurden. Infolge eines Defekts in der Antriebsanlage wurden bei den ersten 3 Versuchen nur ca. 20 000 U/min erreicht. Nach der Behebung des Schadens wurde in Versuch Nr.4 die Drehzahl von 30 000 U/min wieder erreicht. Das ergab für diese Drehzahl einen Einlaufeffekt entsprechend den Ergebnissen beim ersten Versuch mit dem Käfig (vgl. Bild 50). Dort war bei jeder Drehzahlerhöhung ein kräftiger Verschleißanstieg erfolgt. Demgemäß ergab sich in Versuch 4 bei 30 000 U/min ein starker Einlaufverschleiß, so daß auch die mittlere Verschleißrate höher lag als bei den Versuchen 2 und 3.

6.2.7 Vergleich der Gesamtverschleißmengen

In Bild 52 sind die Gesamtverschleißmengen angegeben, die mit den einzelnen Lagerteilen ermittelt wurden. Die Versuche wurden abgebrochen, wenn mit den gewählten Lasten von 1,4; 3,3; 10; 19,5 kp das Drehzahlprogramm durchfahren war und die Versuche wiederholt waren, die den höchsten Verschleiß ge-

bracht hatten. Für die einzelnen Lager ergaben sich deshalb die in Bild 52 eingetragenen unterschiedlichen Versuchszeiten.

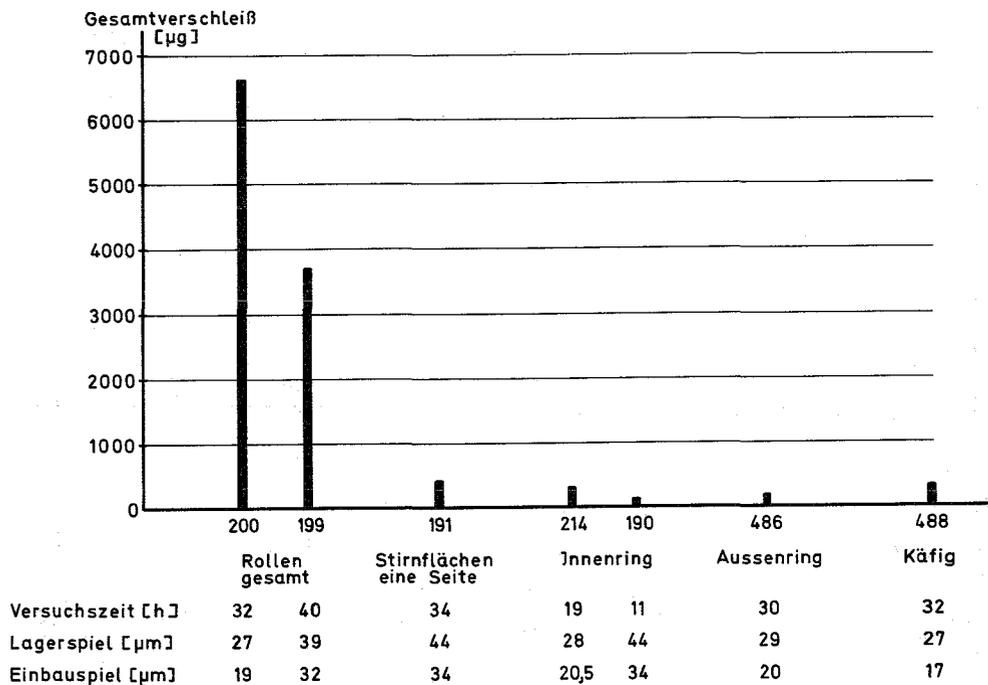


Bild 52. Gesamtverschleiß der einzelnen Lagerteile

Die "mittleren Verschleißraten" lagen bei Beendigung der Versuche für Ringlaufbahnen, Rollenstirnflächen und Käfig unter $10 \mu\text{g/h}$, für die ganz aktivierten Rollen unter $50 \mu\text{g/h}$, wie aus den vorher aufgeführten Bildern hervorgeht. Dabei muß berücksichtigt werden, daß diese mittleren Verschleißraten mit Versuchszeiten von ca. 3 - 5 Stunden gebildet wurden. Wie jedoch aus den Verschleißversuchen zu ersehen ist, verringern sich die Verschleißraten während des Versuchs, so daß bei Langzeitversuchen geringere Verschleißraten als die "mittleren Verschleißraten" zu erwarten sind.

Der Vergleich des Gesamtverschleißes von 2 Lagern ähnlichen Einbauspiels (199 und 191) zeigt, daß der Stirnflächenverschleiß von $2 \times 440 \mu\text{g}$ etwa $1/4$ des Rollengesamtverschleißes von $3800 \mu\text{g}$ beträgt.

Der Verschleiß der Innenringe und der Außenringlaufbahn ist etwa gleich groß. Auffällig ist der niedrige Käfigverschleiß. Bei den Kugellagern war er etwa so groß wie der Kugelverschleiß.

6.2.8 Geometrische Veränderungen aufgrund des Verschleißes

Der Abrieb an den Lagerteilen äußert sich in einer Veränderung des Lagerspiels. In der folgenden Tabelle sind die Durchmesseränderung der Ringe und der Rollen aufgrund des gemessenen Gesamtverschleißes zusammengestellt. Dabei wurde entsprechend den beschriebenen Ergebnissen der Verschleißmessungen für die Rollen 3/4 des Verschleißes auf die Mantelfläche und 1/4 auf die Stirnfläche bezogen. Bei der Veränderung der Rollenzlänge aufgrund des Stirnflächenverschleißes wurde ein gleichmäßiger Abtrag angenommen. Die Nachweisgrenze von $1 \mu\text{g/h}$ ist auf die Durchmesser- bzw. Längenänderungen der einzelnen Lagerteile umgerechnet.

Lager Nr.	200	199	191	214	190	486	Nachweisgrenze
Δd Rolle [μ]	1,02	0,57					$2,6 \cdot 10^{-6} \text{ mm/h}$
Δl Rolle [μ]	0,83	0,46	0,44				$0,5 \cdot 10^{-6} \text{ mm/h}$
Δd Innenring [μ]				0,165	0,077		$0,5 \cdot 10^{-6} \text{ mm/h}$
Δd Außenring [μ]						0,076	$0,36 \cdot 10^{-6} \text{ mm/h}$

6.3 Lagertemperatur

Die Überwachung der Lagertemperatur ist ein vielverwendetes Hilfsmittel zur Beurteilung des Laufverhaltens. So können Drehzahländerungen an der registrierten Lagertemperatur leicht erkannt werden. Für die untersuchten Kugel- und Rollenlager bestand eine etwa lineare Abhängigkeit der Außenringtemperatur von der Drehzahl, wie Bild 53 verdeutlicht. Es handelt sich um Beharrungstemperaturen, die etwa 30 Minuten nach Einstellen der entsprechenden Drehzahl erreicht wurden. Die Temperatur des dem Lager zugeführten Schmieröls wurde auf 30°C konstant gehalten, während das aus dem Prüfstand austretende Öl mit geringen Abweichungen von ca. $0 - 3^\circ\text{C}$ der Temperatur des Außenrings folgte.

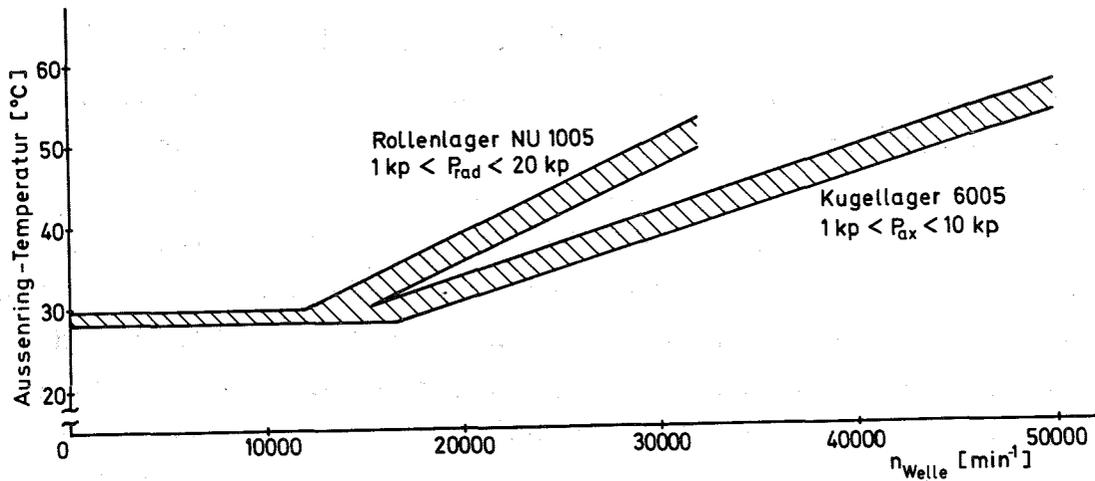


Bild 53. Abhängigkeit der Außenringtemperatur von der Drehzahl

6.4 Einfluß von Wasser auf den Verschleiß

Der Nachweis des Einflusses von Wasser auf den Verschleiß von Wälzlagern ist ein Beispiel für den vorteilhaften Einsatz der Isotopenmeßmethode. Geringe Wassermengen in der Größenordnung von wenigen Promille des Ölinhalts, die während des Betriebs in den Ausgleichsbehälter (vgl. 5.1) eingegeben wurden, verursachten ein plötzliches Ansteigen des Verschleißes. Die Anzeige erfolgte innerhalb einer Minute nach Zugabe des Wassers.

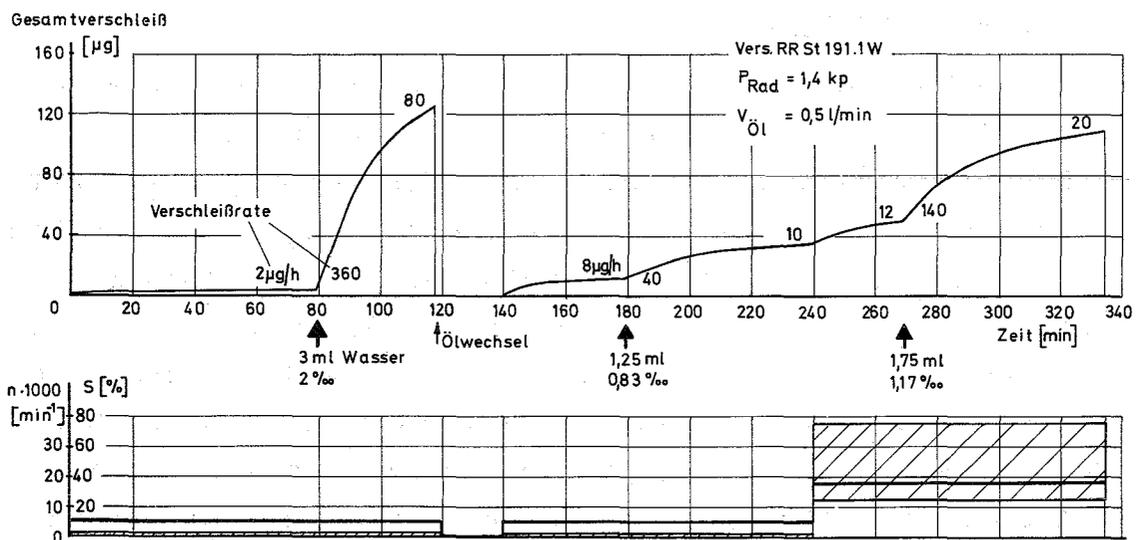


Bild 54. Einfluß von Wasser auf den Verschleiß der Rollenstirnflächen

Bild 54 zeigt die Auswirkungen des Wassers auf den Verschleiß der Rollenstirnflächen. Bei diesen Versuchen wurden Wassermengen von 1,25 Milliliter bis 7,5 ml (0,83% bis 5%) dem Öl zugemischt. Dabei konnte ein systematischer Zusammenhang zwischen der zugegebenen Wassermenge und dem entstehenden Verschleiß nicht festgestellt werden. So wurden bei 5 Versuchen mit jeweils 2,5 ml Wasser Verschleißraten um das 5 bis 190-fache gemessen.

Der Einfluß des Wassers war nicht so ausgeprägt auf den Verschleiß der neutronenaktivierten Rollen (RR 199), bei denen sich die Verschleißraten nur um das 1,5 bis 10-fache erhöhten. Die Gleitbewegung der Rollenstirnflächen gegenüber Käfig und Ringborden begünstigt den Abtrag von korrodierten Schichten. Aufgrund der in Kap. 6.2.8 beschriebenen Aufteilung des Verschleißes auf Mantel- und Stirnflächen ist deshalb die Verschleißzunahme der ganz aktivierten Rollen weniger deutlich.

Das Verschleißverhalten der aktivierten Außenringlaufbahn (AR 486) unterstützt die Vorstellung, daß die Verschleißpartner mit rollender Reibung weniger auf das Wasser reagieren. Bei 8-maliger Wasserzugabe wurde nur in einem Fall eine Verschleißerhöhung beobachtet.

Mit dem Bronzekäfig (Ir RK 488), der ebenfalls nur gleitender Reibung unterliegt, ergab sich bei jeder Wasserzugabe eine Verschleißzunahme. Bild 55 zeigt ein Ergebnis der Messungen mit diesem Lager.

Aus den Versuchen ging hervor, daß nach anfänglich hohen Verschleißraten bei Wasserzugabe der Verschleißzuwachs wieder geringer wurde. Nach ca. 1/2 bis 2 h Lauf stellten sich die vorherigen Verschleißraten wieder ein.

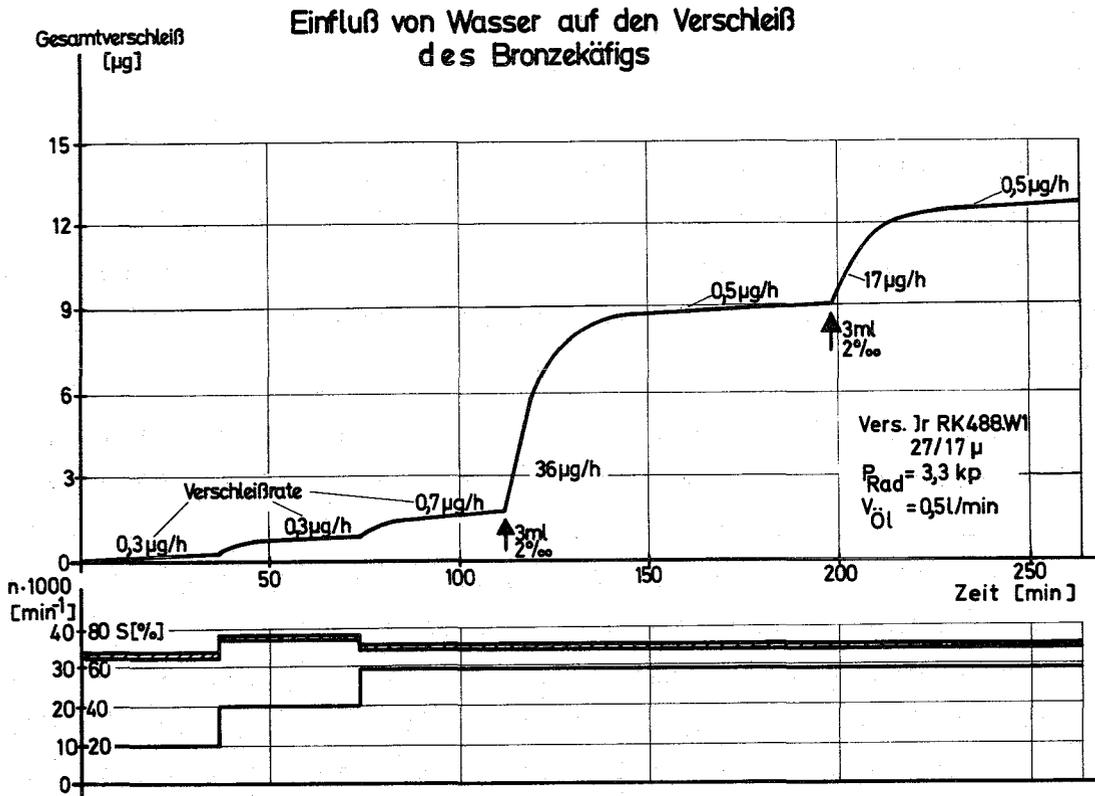


Bild 55.

Es bleibt zu erörtern, welcher Verschleißmechanismus von dem Wasser ausgelöst wird. Der Einfluß von Wasser enthaltenen Schmiermitteln auf den Verschleiß und die Lebensdauer von Wälzkörpern ist verschiedentlich untersucht worden. Die im Öl löslichen Wassermengen betragen bis zu mehreren Hundert ppm [27]. Bei Versuchen mit 100 ppm Wasser erniedrigte sich die Lebensdauer von Kugeln um 36 - 48% gegenüber wasserfreiem Öl. Dabei wurde angenommen, daß das gelöste Wasser in Mikrorissen der belasteten Zone kondensiert und Korrosion verursacht.

Ebenfalls korrosiver Verschleiß wurde festgestellt in Versuchen mit feuchter Luft in verschiedenen Schmiermitteln und an mehreren Materialpaarungen [28]. Dabei wurden als Verschleißpartikel Eisenoxyde und Hydroxyde ermittelt. Korrosiver Verschleiß entsteht demnach innerhalb von Minuten unter dynamischen Bedingungen, wie Roll- und Gleitbewegungen, auch an im üblichen Sinne rostfreien Stählen und Legierungen, mit Ausnahme von Gold. Die Verwendung von korrosionsverhindernden Zusätzen hob

die schädliche Wirkung des Wassers wieder auf.

Eine Untersuchung mit einem Zusatz von 3% Wasser im Öl, also mit übersättigtem Schmierstoff, zeigte, daß sich in den belasteten Zonen von Wälzkörpern Wasserstoff anlagert [29]. Mit verschiedenen Meßmethoden, bei denen inaktives und tritiertes Wasser verwendet wurde, konnte nachgewiesen werden, daß der angelagerte Wasserstoff in der Hauptsache vom Schmierstoff und nicht aus dem Wasser herrührt. Der Wasserstoff, der bis zu einer Tiefe von ca. 1 µm im Material nachgewiesen wurde, führt zu einer Versprödung und entsprechendem Verschleiß. Auch hier konnte durch Verwendung von Antikorrosions-Zusätzen der Einfluß des Wassers beseitigt werden [29].

Unter Berücksichtigung dieser Ergebnisse sind die beobachteten Verschleißerscheinungen bei Wasserzugabe wahrscheinlich auf eine dynamische Korrosion zurückzuführen. Die durch den Einfluß des Wassers spontan [29] korrodierenden Oberflächenschichten werden durch Gleitbewegungen abgerieben und das freigelegte Metall kann jeweils neue Reaktionen eingehen. Wenn man davon ausgeht, daß nur eine maximal mögliche Anzahl dieser Reaktionen aufgrund der aktivierten und reibenden Gleitflächen stattfinden kann, und die dazu nötige Mindestmenge Wasser vorhanden ist, so bringt eine weitere Erhöhung der Wassermenge keinen zusätzlichen Verschleiß.

Diese Vorstellung bestätigt eine Arbeit [30], in der Wälzlager mit einer 40% Wasser-in-Öl-Emulsion untersucht wurden. Die Abnahme der Lebensdauer betrug 33% gegenüber dem wasserfreien Referenzöl. Das ist aber auch die Größenordnung der Lebensdauererniedrigung mit dem Wasserzusatz von nur 100 ppm [27].

7. Z U S A M M E N F A S S U N G

Die vorliegende Arbeit besteht aus zwei Teilen: der Entwicklung von Verfahren zur Messung kinematischer Größen und des Verschleißes von Wälzlagern sowie der Erprobung dieser Verfahren an schnellaufenden und leichtbelasteten Kugel- und Rollenlagern. Zum 1. Teil gehört die Entwicklung eines Verfahrens zur Rollendrehzahlmessung mit Hilfe von Radioisotopen. Die Umdrehungen einer punktförmig radioaktiv markierten und geeignet abgeschirmten Rolle wurden mit einem außerhalb des Prüfstands angeordneten Nachweisdetektor für γ -Strahlen erfaßt. Damit wurden Drehzahlen bis zu 95 000 U/min gemessen, insbesondere konnten Schlupferscheinungen an Rollen während einer Käfigumdrehung nachgewiesen werden.

Die Drehzahl des Lagerkäfigs wurde optisch mit einem aus Lichtquelle und Photozelle bestehenden Geber gemessen. Die untersuchten Kugellager 6005 und Rollenlager NU 1005 zeigten hohen Käfigschlupf bei leichter Axial- bzw. Radialbelastung bis zu ca. 2% der Lagertraggzahl. Bei den Kugellagern brach der Schlupf plötzlich zusammen, wenn bestimmte Drehzahlen überschritten wurden. Die Rollenlager mit höherem Lagerspiel wiesen Schlupfchwankungen auf, die von unregelmäßigen Wellenverlagerungen begleitet waren. Die Wellenbewegung wurde mit kapazitiven Gebern gemessen. Das Schlupfverhalten beider Lagertypen konnte durch Belastung und Ölzufuhr beeinflußt werden.

Der 2. Teil des Berichts beschreibt die an allen Teilen der Kugel- und Rollenlager durchgeführten Verschleißmessungen. Wälzkörper und Käfig waren im Reaktor mit Neutronen, die Laufflächen der Lagerringe und der Bord eines Rollenlageraußenrings am Zyklotron mit Deuteronen bestrahlt worden. Die Rollen eines Lagers waren an der Stirnfläche ebenfalls mit Deuteronen aktiviert worden.

Die Kugellager zeigten Einlauferscheinungen an allen Lagerteilen im untersuchten Drehzahlbereich bis 50 000 U/min. Den größten Einlaufverschleiß wiesen die Kugeln auf. Während der Einlaufperiode war der Kugelverschleiß im Schlupfgebiet bis

zu hundertfach höher gegenüber Laufbereichen ohne Schlupf. Von den anderen Lagerteilen wurde nur an einem Innenring ein ähnlicher Zusammenhang beobachtet. Ein Stahlkäfig verursachte mehrfachen Kugelverschleiß gegenüber den Bronzekäfigen. Nach dem Einlauf war an allen Kugellagerteilen kein Verschleiß mehr nachweisbar, d.h. er lag in der Größenordnung der Meßempfindlichkeit von $1 \mu\text{g}/\text{h}$. Das gilt auch für die Kugeln im Schlupfgebiet. Die Nachweisgrenze von $1 \mu\text{g}/\text{h}$ bedeutet $2 \cdot 10^{-6} \text{ mm}/\text{h}$ für den Außenring.

Die Neigung der Rollenlager zum Einlaufen war nicht so ausgeprägt. Der Rollenverschleiß ist auch bei Versuchswiederholungen noch deutlich nachweisbar und liegt in der Größenordnung von $10\text{-}40 \mu\text{g}/\text{h}$. Der Verschleiß der anderen Rollenlagerteile ist eine Größenordnung niedriger. Der Verschleiß der Rollenstirnflächen betrug etwa $1/4$ des Rollenverschleißes. Im Gegensatz zu den Ergebnissen an Kugellagern war der Verschleiß der Rollen im Schlupfgebiet gegenüber anderen Laufbereichen nicht höher.

Die geringen Verschleißraten, welche nach dem Einlauf an den einzelnen Lagerteilen festgestellt wurden, lassen Lebensdauern der untersuchten Wälzlager von zehntausend Stunden und mehr erwarten, wenn günstige Schmier- und Betriebsbedingungen gewährleistet werden können.

Die modernen Aktivierungsverfahren mit geladenen Teilchen und der kontinuierliche Nachweis geringster Verschleißmengen sind ein neues Hilfsmittel zur Untersuchung von Maschinen und zur Ermittlung kritischer Betriebsbedingungen. Auch die Eigenschaften von Schmiermitteln und Ölzusätzen in bezug auf den Verschleiß können mit diesen Methoden zeitsparend untersucht werden.

Anhang 1

Wälzlagerstahl: 0,95 - 1,05% C; 1,40 - 1,65% Cr; 0,25 - 0,40% Mn; 0,15 - 0,35% Si; max 0,030% P; max 0,025% S; max 0,35% Ni; max 0,25% Cu; max 0,08% Mo.

Zollernbronze SMB m: 86,5 - 90,0% Cu; 8,0 - 9,0% Al; 1,0% Fe; 0,8% Ni; 1,5 - 3,0% Mn; 0,4% Si; 0,5% Zn.

Aktivierung von Wälzlagerkugeln

Bestrahlzeit T = 2 Tage, Neutronenfluß $\phi = 1 \cdot 10^{13} \frac{n}{cm^2 sec}$

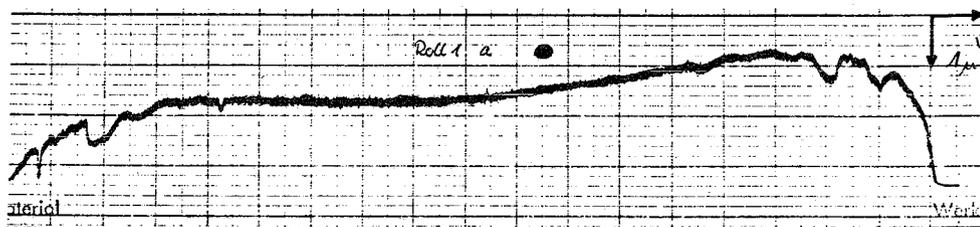
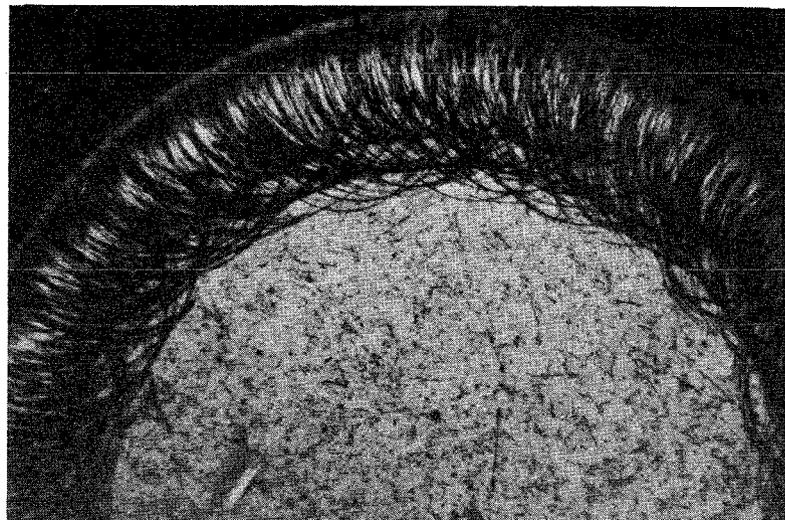
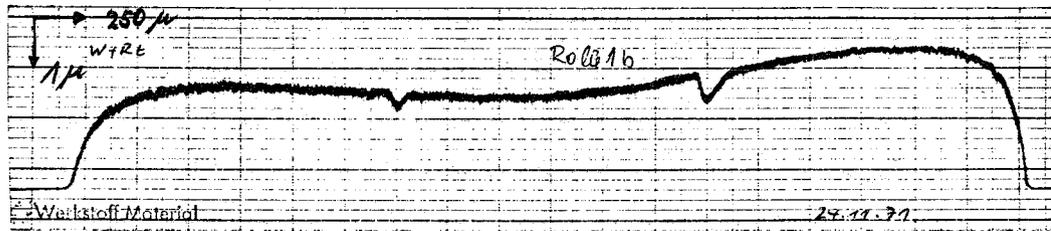
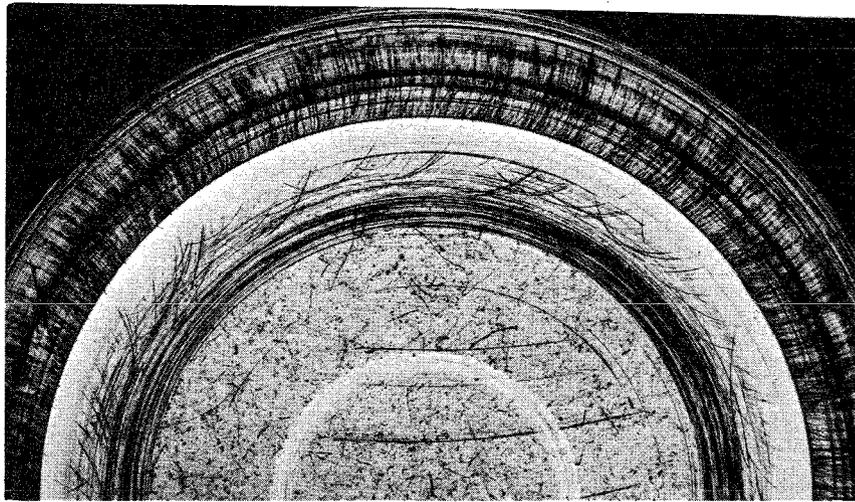
15 Kugeln G = 10 g.

Aufgeführt sind die Isotope mit einer Halbwertszeit > 1 h bei obigen Aktivierungsdaten und Legierungsbestandteilen.

Element	Reaktion	Isotop	Halbwertszeit	γ -Energie MeV Häufigkeit (%)	Aktivität mC
Fe 98%	n, γ	⁵⁹ Fe	45 Tage	1,1(56%)	2,92
				1,29(44%)	
	n, p	⁵⁴ Mn	303 Tage	0,84(100)	4,94 · 10 ⁻³
				⁵⁶ Mn	2,58h
	n, α	⁵¹ Cr	27,8 Tage	0,32(9)	31,6 · 10 ⁻³
Cr 1,5%	n, γ	⁵¹ Cr	27,8 Tage	0,32(9)	13,9
Mn 0,4%	n, γ	⁵⁶ Mn	2,58h	0,85(99)1,8(29)	3,15 · 10 ³
				⁵⁴ Mn	303 Tage
Si 0,3%	n, γ	³¹ Si	2,6 h	1,26(0,07)	1,2
P 0,03%	n, p	³¹ S	2,6 h	0,511(200)	0,96
				1,26 (0,07)	
S 0,025%	n, α	³¹ Si	2,62h	0,511(200) 1,26 (0,07)	72,5 · 10 ⁻³
Ni 0,35%	n, γ	⁶⁵ Ni	2,6 h	1,115(16)	3,1
				1,48 (25)	

Element	Reaktion	Isotop	Halbwertszeit	γ -Energie MeV Häufigkeit (%)	Aktivität mC
Ni 0,35%	n, 2n	⁵⁷ Ni	36 h	0,511(92) 0,127(14) 1,37 (86)	0,063 · 10 ⁻³
	n, p	⁵⁸ Co	71 Tage	0,511(30) 0,81 (99)	0,18 · 10 ⁻³
	n, p	⁶⁰ Co	5,2Jahre	1,33(100) 1,17(100)	91 · 10 ⁻⁶
	n, α	⁵⁹ Fe	45 Tage	1,1(56)1,29(44)	15,4 · 10 ⁻⁶
Cu 0,25%	n, γ	⁶⁴ Cu	12,8h	0,511(38) 1,34 (0,5)	280
	n, α	⁶⁰ Co	5,2Jahre	1,33 (100) 1,17 (100)	23,2 · 10 ⁻⁶
Mo 0,08%	n, γ	^{93m} Mo	6,9h	0,264(58) 0,685(100) 1,479(100)	25,6 · 10 ⁻³
	n, γ	⁹³ Mo	>100 Jahre	Röntgenstrahlen	1,21 · 10 ⁻³
	n, γ	⁹⁹ Mo	67 h	0,181(7) 0,740(12) 0,780(4)	0,58
	n, p	⁹² Nb	10 Tage	0,93	28,5 · 10 ⁻³
	n, p	⁹⁵ Nb	35 h	0,765(100)	8,5 · 10 ⁻⁶
	n, α	⁸⁹ Zr	79 h	0,511(44) 0,91 (99)	18 · 10 ⁻⁶

Anhang 2



Stirnflächen einer Rolle

9. L I T E R A T U R V E R Z E I C H N I S

- 1 H.H. Coe Evaluation of Electron-Beam Welded
R.J. Parker Hollow Balls for High-Speed Ball
H.W. Scibbe Bearings
Trans. ASME Vol. 93 Series F, Januar 1971
- 2 P.F. Brown Bearing Material for Modern Jet Engines
Trans. ASLE 13, 225-239, 1971
- 3 H.W. Scibbe Diskussion zu 2
W.J. Anderson Trans. ASLE 13, 235, 1971
- 4 V. Zaretzky Preliminary Determinations of Temperature
W.J. Anderson Limitations of Ester, Ether and Hydro-
carbon Base Lubricants in 25 mm Bore Ball
Bearings.
NASA TN D-4146 Sept. 1967
- 5 T.A. Harris On the Effectiveness of Hollow Balls in
High Speed Ball Bearings
Trans. ASLE Vol. 11, No.4, Oct. 1968
- 6 R.J. Boness Diskussion zu 1
Trans. ASLE 13, Vol. 93, Series F
Januar 1971
- 7 T. Noto Die Wälzlager für hohe Drehzahlen in den
Ladegebläsen von Brennkraftmaschinen
Übersetzung aus der japanischen Zeit-
schrift "Nainenkikan" (Die Brennkraft-
maschine) Bd.5, Heft 53, Nov. 1966,
Seite 50-56
- 8 C.F. Smith Some Aspects of the Performance of High
Speed Lightly loaded Cylindrical Roller
Bearings
Proc.Inst.Mech.Engrs., Vol. 166, No.22,
1962
- 9 R.J. Boness Cage and Roller Speed in High-Speed
Roller Bearings
Journal Mech.Engrs.Science, Vol. 11,
No.2, 1969

- 10 T.A. Harris An Analytical Method to Predict
Skidding in High Speed Roller Bearings
Trans. ASLE 9, 229-241, 1966
- 11 T.A. Harris An Analytical Method to Predict Skidding
in Thrust-Loaded, Angular Contact Ball
Bearings
Trans. ASME, Vol.93, Series F, N 1,
January 1971
- 12 W.M. Kacmarsky Effect of a High Traction Fluid on
L.O. Hewko Skidding in a High Speed Roller Bearing
Trans. ASME Vol.93, Series F, Janaur 1971
- 13 F. Hirano Motion of a Ball in a Ball Bearing
H. Tangué Wear 4, 1961, 177-197
- 14 F. Hirano Motion of a Ball in a Angular-Contact
Ball Bearing
Trans. ASLE, 8, 425-434, 1965
- 15 A.B. Jones Ball Motion and Sliding Friction in Ball
Bearings
Trans. ASME, March 1959
- 16 P. Eschmann Das Leistungsvermögen der Wälzlager
Springer Verlag 1964
- 17 K. Detzer Radiometrische Verschleiß-Untersuchungen
an axial belasteten Kugellagern
Diss. TH München 1963
- 18 A. Gervé Zur Deuteronenaktivierung von Maschinen-
H. Kamm teilen aus Stahl und Gußeisen
G. Katzenmeier Forschungsbericht der Forschungsvereinigung
Verbrennungskraftmaschinen e.V., 2-213/10,
Heft 77, 1968
- 19 G. Essig Isotopenanwendung zur Messung der Dreh-
zahl von Wälzlagerrollen
Forschungsbericht der Forschungsvereinigung
Verbrennungskraftmaschinen e.V., Heft 109,
1970

- 20 G. Brüne
Schlupfberechnungen für schnellaufende
und leichtbelastete Schrägkugellager
unter axialer Last
IMF-Bericht Nr. 143/1968 TU Braunschweig
- 21 O. Lutz
Probleme schnellaufender Wälzlager
IMF-Bericht Nr. 162, TU Braunschweig
- 22 F. Baumgärtner
Tabelle zur Neutronenaktivierung
Buchreihe der Atomkernenergie, Band 4
Verlag Karl Thieme KG, München
- 23 R.G. Berggren
W.J. Stelzmann
Radiation Hardening and Embrittlement
in ASTM A 533-B Class 1 steel
ASTM Special Technical Pub. 1969
- 24 F.H. Theyse
Some Aspects of the Influence of Hydro-
dynamic Film Formation on the Contact
Between Rolling-Sliding Surfaces
Wear 9, 1966, 41-59
- 25 F. Tessenow
Wälzlagerforschung
Forschungsbericht der Forschungsvereinigung
Verbrennungskraftmaschinen e.V., Heft 116,
1971
- 26 A. Gervé
Moderne Möglichkeiten der Verschleißmessung
mit radioaktiven Isotopen
Zeitschrift für Werkstofftechnik, 3 Jhg.,
Heft 2 (1972) 81-86
- 27 P. Schatzberg
I.M. Felsen
Effects of Water and Oxygen during Rolling
contact lubrication
Wear 12, 1968, 331-342
- 28 J.K. Appeldorn
I.B. Goldmann
E.F. Tao
Corrosive Wear by Atmospheric Oxygen and
Moisture
ASLE Trans. 12, 1969, 140-150
- 29 L. Grundberg
D.I. Jamieson
D. Scott
Hydrogen Penetration in Water accelerated
Fatigue of Rolling Surfaces
Phil.Mag. 1963, 8 (No.93) 1553-1568
- 30 R.A. Hobbs
G.W. Mullet
Effects of Some Hydraulic Fluid
Lubricants on the Fatigue Lives of Rolling
Bearings
Tribology Convention 1969 Paper 4,
Inst.Mech.Engrs. London

