

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

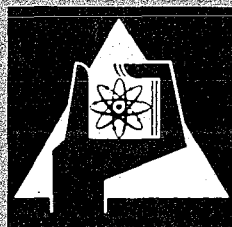
Februar 1972

KFK 1568

Laboratorium für Isotopentechnik

**Der Einfluß verschiedener Kolbenring- und Nutformen
sowie der Nutwerkstoffe auf den Ring- und Nut-Verschleiß
in einem 6-Zylinder-Dieselmotor
(Experimentelle Untersuchungen mit Hilfe von Radioisotopen)**

W. Kaiser



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 1568

Laboratorium für Isotopentechnik
Fachbereich Physik-Maschinenbau

Der Einfluß verschiedener Kolbenring- und Nutformen sowie
der Nutwerkstoffe auf den Ring- und Nut-Verschleiß in einem
6-Zylinder-Dieselmotor

(Experimentelle Untersuchungen mit Hilfe von Radioisotopen)⁺

von

Wilfried Kaiser

Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe

+von der Fakultät für Maschinenbau der Universi-
tät Karlsruhe genehmigte Dissertation

1950-1951

11

1950-1951

1950-1951

1950-1951

1950-1951

1950-1951

1950-1951

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

	Seite
1. EINLEITUNG	1
1.1 Ring- und Nutverschleiß als Kriterien für die Lebensdauer eines Motors	1
1.2 Problemstellung	2
1.3 Entwicklung und Stand der Verschleißmessungen mit Radioisotopen	2
1.4 Ziel der Arbeit	4
2. MESSVERFAHREN	5
2.1 Prinzip des Durchflußmeßverfahrens	5
2.2 Aufbau und Eichung des Meßkopfes	6
2.2.1 Aufbau des Meßkopfes	6
2.2.2 Eichung	7
2.3 Nachweis der γ -Quanten	9
2.3.1 Szintillationskristall und elektronische Verstärkung	9
2.3.2 γ -Energie-Spektren	9
2.3.3 Registrieranordnung und Blockschaltbild	12
2.4 Ermittlung der Verschleißmengen	14
3. VERSUCHSTEILE	16
3.1 Kolbenringe	16
3.2 Kolben	16
3.2.1 Einmetallkolben	17
3.2.2 Ringträgerkolben	17
4. AKTIVIERUNGEN	19
4.1 Aktivierung der Kolbenringe	19
4.1.1 Aktivierung mit thermischen Neutronen	19
4.1.2 Aktivierung der Kolbenringflanken mit Deuteronen	20

	Seite
4.2 Aktivierung der Ringträgerkolben	25
4.3 Aktivierung der Einmetallkolben	29
4.3.1 Untersuchungen zur Aktivierung mit thermischen Neutronen	29
4.3.2 Aktivierung mit α -Teilchen	31
4.3.2.1 Ergebnisse der Aktivierungs- untersuchungen	31
4.3.2.2 Entstehungsreaktionen von ^{22}Na und ^{24}Na	34
4.4 Kennwerte der für die Verschleißmessungen ver- wendeten Radioisotope	34
 5. VERSUCHSEINRICHTUNG UND VERSUCHSDURCH - FÜHRUNG	 36
5.1 Versuchsmotor	36
5.2 Motorprüfstand und Meßkreislauf	37
5.3 Versuchsdurchführung	40
5.3.1 Strahlenschutzmaßnahmen	40
5.3.2 Einbau der Versuchsteile	41
5.3.3 Versuchsprogramme	41
5.3.3.1 Ringträgerkolben-Versuche	41
5.3.3.2 Einmetallkolben-Versuche	42
 6. VERSUCHSERGEBNISSE	 45
6.1 Einfluß von Ölverbrauch und Verschleißver- lust auf den im Öl nachgewiesenen Verschleiß	45
6.2 Ergebnisse der Ringträgerkolben-Versuche	50
6.3 Ergebnisse der Einmetallkolben-Versuche	57
6.3.1 Nutflanken-Verschleiß	57
6.3.2 Ringflanken-Verschleiß	64
6.4 Einfluß der Öltemperatur auf den Verschleiß	69
6.5 Reproduzierbarkeit der Ergebnisse und Fehlerabschätzung	70

	Seite
6.5.1 Reproduzierbarkeit der Ergebnisse	70
6.5.2 Fehlerabschätzung	73
6.5.3 Vergleich des im Öl nachgewiesenen mit dem durch Wägung ermittelten Verschleiß	75
6.6 Beurteilung und Vergleich der Ergebnisse	77
6.6.1 Verschleiß der Kolbenringlaufflächen	78
6.6.2 Verschleiß der Kolbenringflanken	82
6.6.3 Verschleiß der Nutflanken	83
6.6.4 Aussagekraft der Ergebnisse	85
7. ZUSAMMENFASSUNG	87
8. LITERATURVERZEICHNIS	89
9. ANHANG	93

101

102

103

104

105

106

107

108

109

110

111

112

113

114

115

116

117

118

119

120

121

122

123

124

125

126

127

128

129

130

131

132

133

134

135

136

137

138

139

140

Der Einfluß verschiedener Kolbenring- und Nutformen sowie
der Nutwerkstoffe auf den Ring- und Nut-Verschleiß in einem
6-Zylinder-Dieselmotor

(Experimentelle Untersuchungen mit Hilfe von Radioisotopen)

Zusammenfassung

Mit Hilfe von Radioisotopen wird das Verschleißverhalten verschiedener Kolbenring- und Nutformen sowie verschiedener Nutwerkstoffe in einem luftgekühlten 6-Zylinder-Dieselmotor nach dem Durchflußmeßverfahren untersucht. Die Versuchsteile werden im Neutronenfluß eines Reaktors und mit Deuteronen und α -Teilchen eines Zyklotrons aktiviert, so daß bis zu drei Verschleißkomponenten gleichzeitig nachgewiesen werden können. Die Aktivierung mit Deuteronen und α -Teilchen ermöglicht es außerdem, den Verschleiß der unteren und oberen Ring- und Nutflanken getrennt nachzuweisen.

In den Versuchen wird neben dem Einfluß der Öltemperatur vor allem der Einfluß von Drehzahl und Last auf den Verschleiß untersucht. Die Ergebnisse zeigen ein stark unterschiedliches Verschleißverhalten der verchromten Laufflächen von Rechteck- und von Doppeltrapezringen, der Nutflanken von Ringträger- und Einmetallkolben sowie z.T. auch der unteren und oberen Flanken der Kolbenringe und der Kolbenringnuten.

The influence of different designs and materials on the wear of piston ring and piston ring groove in a 6-cylinder diesel engine

(Experimental investigations by means of radioisotopes)

Abstract

By means of radioactive tracer technique the wear behaviour of different piston ring and piston ring groove designs as of different groove materials is investigated in an air cooled 6-cylinder diesel engine. The test parts are activated by neutrons in a thermal reactor and by deuterons and α -particles in a cyclotron. Thus up to three wear components can be determined simultaneously. Furthermore the activation by deuterons and α -particles enables the separate measuring of the wear of the upper and lower sides of piston rings and piston grooves.

Besides the influence of the lubricant oil temperature particularly the influence of speed and load on the wear is investigated. The results show a very different wear behaviour of the plain compression and keystone-rings, of the sides in armoured and not armoured piston grooves and also partially of the upper and lower sides of piston rings and piston ring grooves.

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

1.1 Ring- und Nutverschleiß als Kriterien für die Lebensdauer eines Motors

Temperaturen und Drücke im Zylinder sowie Gleitgeschwindigkeiten und Schmierölversorgung machen den obersten Kompressionsring eines Verbrennungsmotors häufig zu einem der schwierigsten Bauelemente, von dessen richtiger Arbeitsweise auch in den meisten Fällen die richtige und wirtschaftliche Funktion des Motors abhängt.

In Bezug auf die Kolbenringe gilt ein schnellaufender Dieselmotor für die Produktionsfreigabe zunächst als ausreichend entwickelt, wenn Durchblasemenge, Öl- und Kraftstoffverbrauch bei der geforderten Leistung in normalen Grenzen bleiben und Vollastläufe ohne brandige oder steckende Ringe überstanden werden. Dabei ist die Brandspurbildung eine seit etwa 1961/62 bei fast allen europäischen Motorenherstellern verstärkt auftretende Erscheinung, die extrem hohe Verschleißraten und damit einen Ausfall des Motors schon nach wenigen Betriebsstunden zur Folge haben kann [1]. Aber auch wenn man von der Brandspurbildung absieht, sind mit niedrigem Öl- und Kraftstoffverbrauch sowie geringer Durchblasemenge bezüglich des Verschleißverhaltens der Kolbenringe noch nicht alle Probleme gelöst.

Der starke Anstieg des axialen Ringspiels vor allem in der ersten Nut ist häufig der einzige Grund, warum ein Motor nach längerer Laufzeit geöffnet werden muß. Die Lauffläche des zunächst einwandfrei geführten Rings stellt sich nämlich bei zunehmender Vergrößerung des Ringspiels unter Belastung allmählich schräg, wodurch ein stärkerer Verschleiß, vor allem der oberen Kante der Ringlauffläche, verursacht wird [2]. Die hierdurch bedingte größere spezifische Flächenpressung kann zu Schmierfilmunterbrechungen, örtlichen Überhitzungen und erhöhten Durchblasemengen führen, wodurch bei nicht rechtzeitiger Überholung auch schwere Motorschäden durch Kolbenfresser auftreten können. Weiterhin sind das Ausschlagen der

Nuten und starker Flankenverschleiß der Ringe häufig Ursache von Ringbrüchen, die wiederum schwere Motorschäden zur Folge haben können [3,4] .

Neben dem Laufflächenverschleiß von Büchse und Ring und dem dadurch bedingten radialen Ringspiel ist also auch das durch den Nut- und Ringflankenverschleiß verursachte axiale Ringspiel in vielen Fällen wesentliches Kriterium für die Laufzeit eines Motors zwischen zwei Überholungen. Jede Maßnahme, die den Verschleiß in der ersten Ringnut sowie von Ringflanken und Ringlauffläche reduziert, trägt damit direkt zur höheren Lebensdauer eines Motors bei.

1.2 Problemstellung

Die an bestimmten Motoren gewonnenen Ergebnisse über eine in Bezug auf Verschleiß und Herstellungskosten günstige Werkstoffwahl und Formgebung von Kolbenringen und Nuten haben nur selten allgemeine Gültigkeit, so daß sich bei der Neuentwicklung wie auch bei der Weiterentwicklung eines Motors die bereits vorliegenden Erfahrungen nur begrenzt verwerten lassen. Eine günstige Lösung erfordert damit i. a. entsprechende Versuche.

Die vorliegende Arbeit wurde veranlaßt, als bei der Weiterentwicklung eines seit längerer Zeit in Serie laufenden Motors die Frage auftauchte, ob die bisher eingesetzten Kolbenringe und Nuten auch den höheren Anforderungen im neuen Motor genügen würden, oder ob sie geändert werden sollten. Da konventionelle Meßverfahren, die den Verschleiß durch Wägung oder Vermessen der Verschleißteile bestimmen, wegen ihrer geringen Empfindlichkeit lange Versuchsläufe mit großem zeitlichen und finanziellen Aufwand erfordern, sollten diese Versuche mit Hilfe von Radioisotopen durchgeführt werden.

1.3 Entwicklung und Stand der Verschleißmessungen mit Radioisotopen

Nachdem Ferris bereits 1941 die Möglichkeit erkannte,

Radioisotope für Verschleißmessungen einzusetzen [5], dauerte es noch 6 Jahre, bis dieser Gedanke mit neutronenbestrahlten Kolbenringen verwirklicht wurde [6]. In den folgenden Jahren wurde dieses Meßverfahren, begünstigt durch die stetig wachsende Zahl der für die Aktivierungen benötigten Kernreaktoren, in steigendem Maße zunächst in den USA, dann aber auch in vielen anderen Ländern, eingesetzt, und zwar in erster Linie für Verschleißmessungen an Verbrennungsmotoren. Auf Grund der großen Vorteile des Verfahrens - hohe Empfindlichkeit und Genauigkeit, kurze Versuchszeiten, kontinuierliche Verschleißbeobachtungen, Wegfall von Zwischenmontagen - wurden bald auch auf anderen Gebieten Verschleißmessungen mit Hilfe von Radioisotopen durchgeführt, aber Ende der fünfziger Jahre schien eine Grenze für die weitere Anwendung und Entwicklung dieses Verfahrens erreicht: Die Aktivierung im thermischen Neutronenfluß eines Reaktors brachte zwar eine hohe und gleichmäßige spezifische Aktivität des bestrahlten Teils, hatte damit aber bei großen Teilen auch sehr hohe Gesamtaktivitäten zur Folge. Das bedeutete aufwendige Sicherheitsvorkehrungen vor allem bei der Montage, so daß Verschleißuntersuchungen möglichst nur an kleinen Versuchsteilen, wie Kolbenringen, durchgeführt wurden. Zusätzlich ließen sich Verschleißuntersuchungen kaum durchführen, wenn ein Teil verschiedene Verschleißstellen aufwies, wie es z.B. bei einer Nockenwelle der Fall ist: die homogene ^{59}Fe -Aktivität der im thermischen Neutronenfluß bestrahlten Nockenwelle läßt es bei einem Versuchslauf nicht zu, den Verschleiß von Einlaß-Nocken, Auslaß-Nocken und Lagerzapfen zu trennen. Man kann zwar eine bestimmte Stelle, z.B. des Auslaß-Nockens, durch Einsetzen eines radioaktiven Stiftes markieren, aber damit würde eine relativ kleine Stelle als repräsentativ für das Verschleißverhalten einer möglicherweise großen Oberfläche angesehen, wobei diese Markierung auch noch eine Änderung der Oberfläche selbst bedeutet.

Die begrenzten Aktivierungsmöglichkeiten waren einer der Gründe, warum bisher, soweit dem Verfasser bekannt, erst einmal drei Verschleißkomponenten gleichzeitig nachgewiesen worden

sind [7]. Dabei wurde neben einem verchromten Kolbenring als dritte Komponente ein radioaktiver Rhutenium-Stift in die Zylinder-Laufbahn eingesetzt, was jedoch die oben erwähnte Unsicherheit der für den Zylinder-Verschleiß ermittelten Ergebnisse zur Folge hat.

Neue, wesentlich erweiterte Anwendungsgebiete und Meßmöglichkeiten eröffneten sich durch die zunächst mit Deuteronen durchgeführten Aktivierungen mit schweren geladenen Teilchen [8]. Diese an einem Zyklotron durchgeführten Bestrahlungen ergaben die Möglichkeit, bestimmte interessierende Oberflächenzonen eines Teils zu aktivieren, so daß die Gesamtaktivität bei gleicher spezifischer Aktivität der Verschleißstelle bis zu drei Zehnerpotenzen niedriger liegt als bei der Aktivierung mit thermischen Neutronen.

Die in der vorliegenden Arbeit gewonnenen Ergebnisse über die Aktivierung mit schweren geladenen Teilchen und das daraus entwickelte Dünnschicht-Differenz-Verfahren [9] erlauben es heute, zusammen mit der Neutronenaktivierung und dem Durchflußmeßverfahren, praktisch alle an einem Verbrennungsmotor interessierenden Teile mit Hilfe von Radioisotopen auf ihr Verschleißverhalten hin zu untersuchen. Bei Verwendung einer neuen γ -spektrometrischen Anordnung [10] ergibt sich dabei die Möglichkeit, bis zu sechs Verschleißkomponenten gleichzeitig zu messen.

1.4 Ziel der Arbeit

Das Verschleißverhalten verschiedener Kolbenring- und Nut-Varianten sollte in einem luftgekühlten 6-Zylinder-Dieselmotor bei verschiedenen Drehzahl- und Lastzuständen mit Hilfe von Radioisotopen untersucht werden. Die erstmalige Anwendung des neu entwickelten Aktivierungsverfahrens mit Deuteronen sollte es ermöglichen, drei Verschleißkomponenten gleichzeitig zu messen und den Verschleiß der unteren und oberen Ring- und Nutflanken getrennt feststellen zu können. Außerdem sollte eine Möglichkeit gefunden werden, die Nutflanken der Al-Si-Leichtmetallkolben zu aktivieren, so daß ihr Verschleißverhalten ebenfalls untersucht werden konnte.

2. MESSVERFAHREN

2.1 Prinzip des Durchflußmeßverfahrens

Bei Verschleißmessungen mit Radioisotopen wird, sofern ein Schmiermittelkreislauf vorhanden ist, i.a. der Verschleiß über die Aktivität des Schmiermittels gemessen. Sieht man von einer Änderung des internen Schmiermittelkreislaufs ab, so stellt das Durchflußmeßverfahren hierfür die mit Abstand empfindlichste Methode dar[11] und wurde daher auch für die in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Untersuchungen eingesetzt.

Das Prinzip des Durchflußmeßverfahrens geht aus Bild 1 hervor.

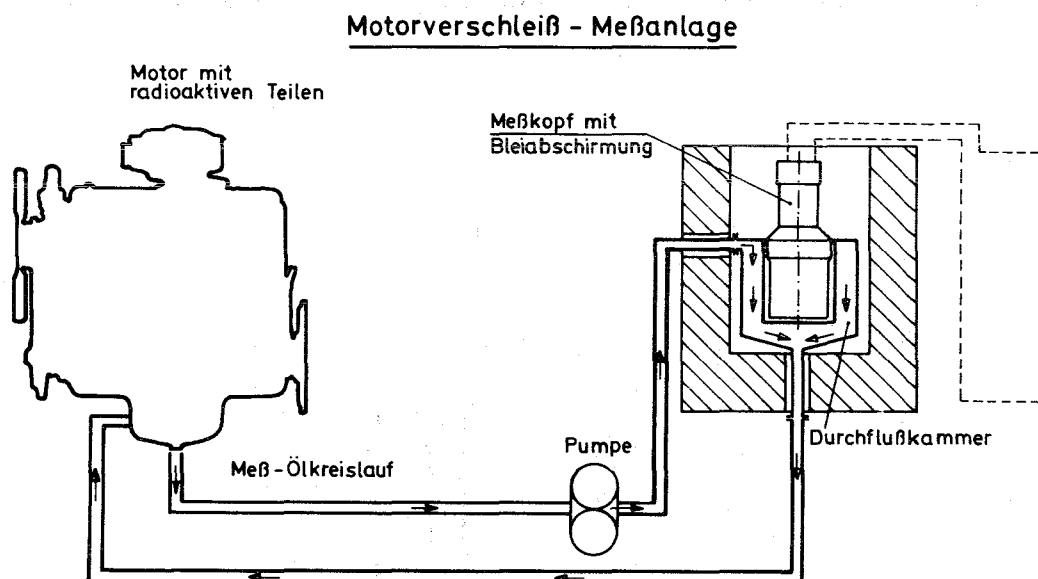


Bild 1. Prinzip des Durchflußmeßverfahrens

Der Abrieb der in dem Motor eingebauten radioaktiven Teile gelangt zunächst in den Schmierölkreislauf. An der tiefsten Stelle der Ölwanne wird das Öl durch eine vom Motor getrennt arbeitende Pumpe abgesaugt und durch eine den Strahlungsdetektor umgebende Meßkammer in den Motor zurückgepumpt. Als Detektor wird ein 3" x 3" NaJ(Tl)-Szintillationskristall verwendet, der bei einem auch für die 3-Komponentenmessungen ausreichenden

Energieauflösungsvermögen eine gute Ansprechwahrscheinlichkeit besitzt. Die im Szintillationskristall nachgewiesene γ -Strahlung erlaubt eine Aussage über die Art und die Menge des im Ölkreislauf vorhandenen Verschleißes. Die Energie der γ -Quanten charakterisiert die Verschleißkomponente, ermöglicht also bei Mehrkomponentenmessungen die Trennung der verschiedenen Verschleißanteile. Die Intensität der Strahlung, d.h. die registrierte Zählrate, ist ein Maß für die Menge des Verschleißes.

2.2 Aufbau und Eichung des Durchflußmeßkopfes

2.2.1 Aufbau des Durchflußmeßkopfes

Den Aufbau des Durchflußmeßkopfes zeigt Bild 2. Ein Kühlwassermantel schützt den temperaturempfindlichen NaJ-Kristall vor den hohen Öltemperaturen. Das Öl wird am oberen Rand des

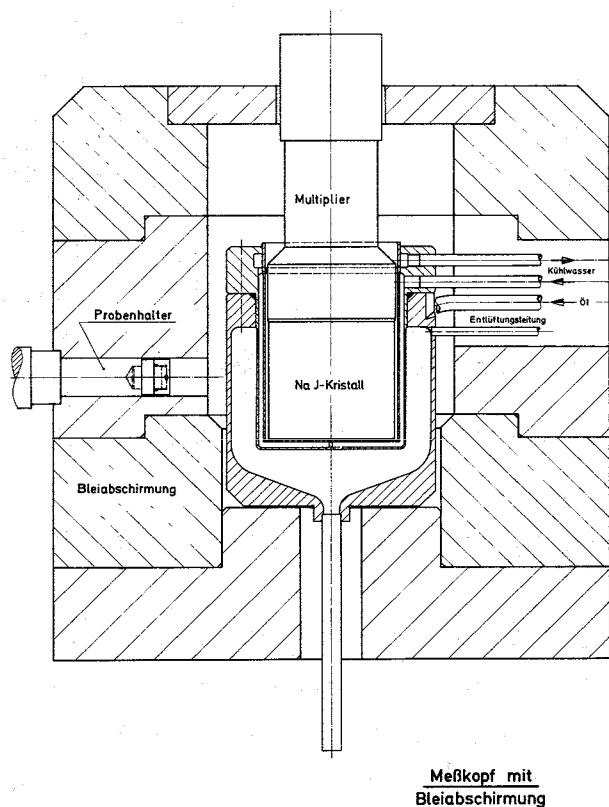


Bild 2. Durchflußmeßkopf

äußeren Behälters tangential zugeführt und fließt nach unten hin ab. Diese Ölzuführung und die trichterförmige Ausbildung des Behälterbodens sollen "Totwasserstellen" und Anlagerungen von Verschleißpartikeln soweit wie möglich verhindern. Das wurde, wie die Versuche zeigten, auch erreicht. Die Entlüftungsleitung sorgt dafür, daß sich in der Durchflußkammer keine Luftsäcke bilden können. Das Volumen der Durchflußkammer beträgt ca. 0,75 l.

Da die Durchflußkammer bei der Eichung mit Säuren und basischen Lösungen gefüllt wurde, ist sie aus V2A Stahl hergestellt. Der gesamte Meßkopf ist von einer 100 mm starken Bleiabschirmung umgeben, um die Untergrund-Strahlung niedrig zu halten. Die Bohrung im Bleimantel dient zur Aufnahme eines Plexiglas-Probenbehälters, so daß der Durchflußmeßkopf gleichzeitig als Strahlenmeßplatz zur Bestimmung der Zählraten fester Proben benutzt werden kann.

2.2.2 Eichung

Um aus der im Meßkopf registrierten γ -Zählrate den Verschleiß bestimmen zu können, muß die für die Meßkopfgeometrie gültige spezifische Zählrate des im Motor eingebauten aktivierten Verschleißteiles bekannt sein. Um diese spezifische Zählrate nicht in jedem Versuch durch Auflösen der mit dem Teil bestrahlten Proben bestimmen zu müssen, wurde die Ansprechwahrscheinlichkeit des Meßkopfes gegenüber einer aufgelösten Probe im Verhältnis zur Ansprechwahrscheinlichkeit gegenüber einer festen Probe in einer bestimmten Anordnung ermittelt. Ist dieses als Meßkopffaktor bezeichnete Verhältnis, das sich aus der Zählrate einer festen Probe und der Zählrate der Probenlösung ergibt, bekannt, so genügt für die weiteren Versuche die Bestimmung der spezifischen Zählraten der festen Proben der Versuchsteile.

Der im Gesamtölkreislauf vorhandene Verschleiß ergibt sich dann aus der im Meßkopf nachgewiesenen Zählrate wie folgt:

$$M' = \frac{Z-U}{X'_S} = \frac{X}{X'_S} \quad (1)$$

$$M = M' \cdot \frac{V}{V'} = \frac{X}{X'_S} \cdot \frac{V}{V'} \quad (2)$$

Mit $X'_S = \text{const.} \cdot X_S$ und $V' = \text{const.} \cdot V_E$ (3)

gilt
$$M = m \cdot \frac{1}{X_S} \cdot \frac{V}{V_E} \cdot X \quad (4)$$

Hierin bedeuten:

- M' = Verschleißmenge im Meßkopfvolumen
- M = Verschleißmenge im Gesamtölvolumen
- Z = im Meßkopf nachgewiesene Zählrate
- U = Untergrund-Zählrate (Nulleffekt)
- X = Netto-Zählrate
- X_S = spezifische Zählrate der festen Probe
- X'_S = spezifische Zählrate der Probenlösung
- V' = Meßkopfvolumen
- V = Gesamtölvolumen (Motor + Meßkreislauf)
- V_E = Volumen der Eichlösung
- m = Meßkopffaktor (Konstante)

Wegen der unterschiedlichen Absorptions- und Rückstreuverhältnisse für die von einer festen Probe und von einer Lösung emittierten γ -Quanten hängt der Meßkopffaktor m von der Energie der im NaJ-Kristall registrierten γ -Quanten ab. Daher war für jedes der in den Versuchen verwendeten Radioisotope eine Eichung in dem auch bei den Versuchen eingestellten Energiebereich notwendig. Die festen Proben wurden in dem in Bild 2 gezeigten Probenhalter ausgezählt, der durch eine Bohrung in der Bleiabschirmung des Meßkopfes fixiert war. Die Geometrieverhältnisse waren so gewählt, daß die Meßkopffaktoren in der Nähe von 1 lagen (0,886 - 1,246).

Berücksichtigt man in Gleichung (4) noch die während der Versuchszeit nach einer e-Funktion abklingende Aktivität des

Versuchsteils und bezieht die spezifische Zählrate auf den Versuchsbeginn, so gilt

$$M = m \cdot \frac{1}{X_S} \cdot \frac{V}{V_E} \cdot X \cdot e^{\lambda t} \quad (5)$$

mit λ = Zerfallskonstante

t = Versuchszeit

2.3 Nachweis der γ -Quanten

2.3.1 Szintillationskristall und elektronische Verstärkung

Die in den NaJ(Tl)-Szintillations-Kristall einfallenden γ -Quanten liefern über Wechselwirkungen in Kristall, Photokathode und Sekundärelektronenvervielfacher elektrische Impulse, die in einem Linearverstärker weiter verstärkt werden. Die Höhen der Ausgangsimpulse dieser Detektoranordnung sind der Energie der im Kristall registrierten γ -Quanten proportional.

2.3.2 γ -Energie-Spektrum

Mit der in 2.3.1 beschriebenen Detektoranordnung lassen sich γ -Spektren in Verbindung mit einem Mehrkanal-Impulshöhenanalysator in der in Bild 3 dargestellten Form aufnehmen.

Die Impulshöhenverteilung des dargestellten Spektrums, d.h. die Verbreiterung der diskreten γ -Energie-Linien von 1,10 und 1,29 MeV zu "Peaks", ergibt sich vor allem daraus, daß die Photonenemission im Kristall, der photoelektrische Prozeß in der Photokathode und die Sekundäremission von Elektronen an den Dynoden des Multipliers statistische Prozesse sind[12]. Das energetische Auflösungsvermögen der verwendeten Spektrometer-Einheit, definiert durch die Halbwertsbreite des 0,662-MeV-Peaks von ^{137}Cs , betrug ca. 8,5%.

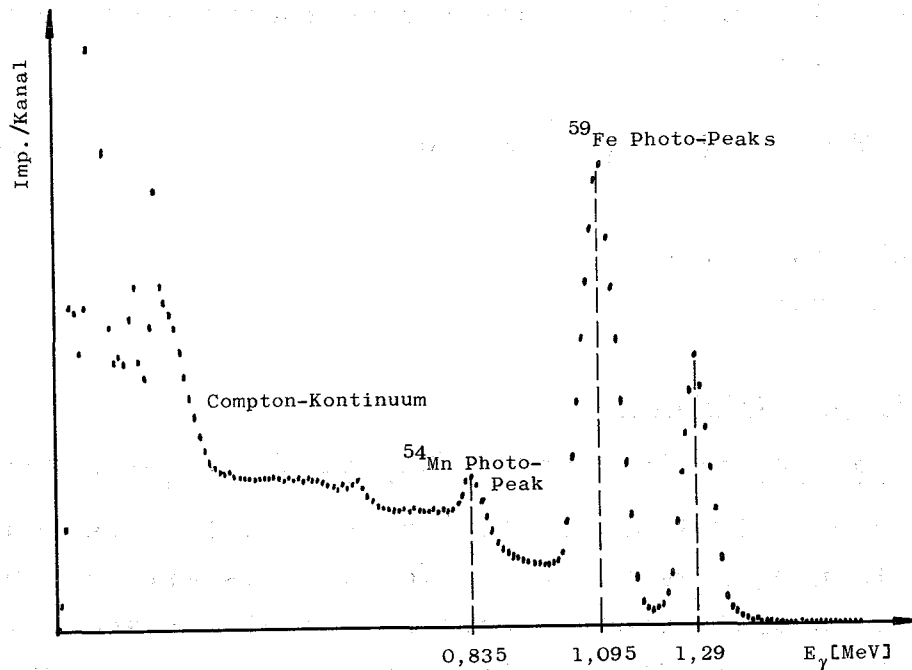


Bild 3. γ -Energie-Spektrum von ⁵⁹Fe (aufgenommen mit 400-Kanal-Impulshöhenanalysator)

Werden γ -Spektren verschiedener Radioisotope gleichzeitig aufgenommen, so ergibt sich die in Bild 4 schematisch dargestellte gegenseitige Beeinflussung der Zählraten (das in Bild 4 gezeigte Spektrum entspricht den γ -Energie-Spektren der 3-Komponenten-Versuche.)

1. Durch das begrenzte Auflösungsvermögen der Spektrometer-Einheit können sich Photopeaks der einzelnen Spektren teilweise oder ganz überlappen (1,04 und 1,24 MeV-Peaks von ⁵⁶Co mit ⁵⁹Fe-Peaks).
2. Bei den Wechselwirkungen der γ -Quanten einer Komponente entsteht durch Comptoneffekt im Meßkristall ein Comptonkontinuum, auf das die für den Nachweis anderer Komponenten verwendeten Photopeaks niedrigerer Energie aufgestockt werden. Gleichen Einfluß hat die Rückstreuung aus der Umgebung des Kristalls.
3. Bei der Aktivierung können aus dem selben Grundmaterial über verschiedene Prozesse verschiedene Radioisotope mit

γ -Strahlung entstehen. (Bei der Aktivierung von Eisen mit thermischen Neutronen entstehen z.B. neben ^{59}Fe vor allem noch ^{54}Mn aus einer (n,p)- und ^{51}Cr aus einer (n, α)-Reaktion als γ -Strahler).

4. Eine zusätzliche gegenseitige Beeinflussung der γ -Spektren kann durch Legierungsbestandteile oder durch chemische Verunreinigungen erfolgen, z.B. durch Spuren von Eisen in Chrom.

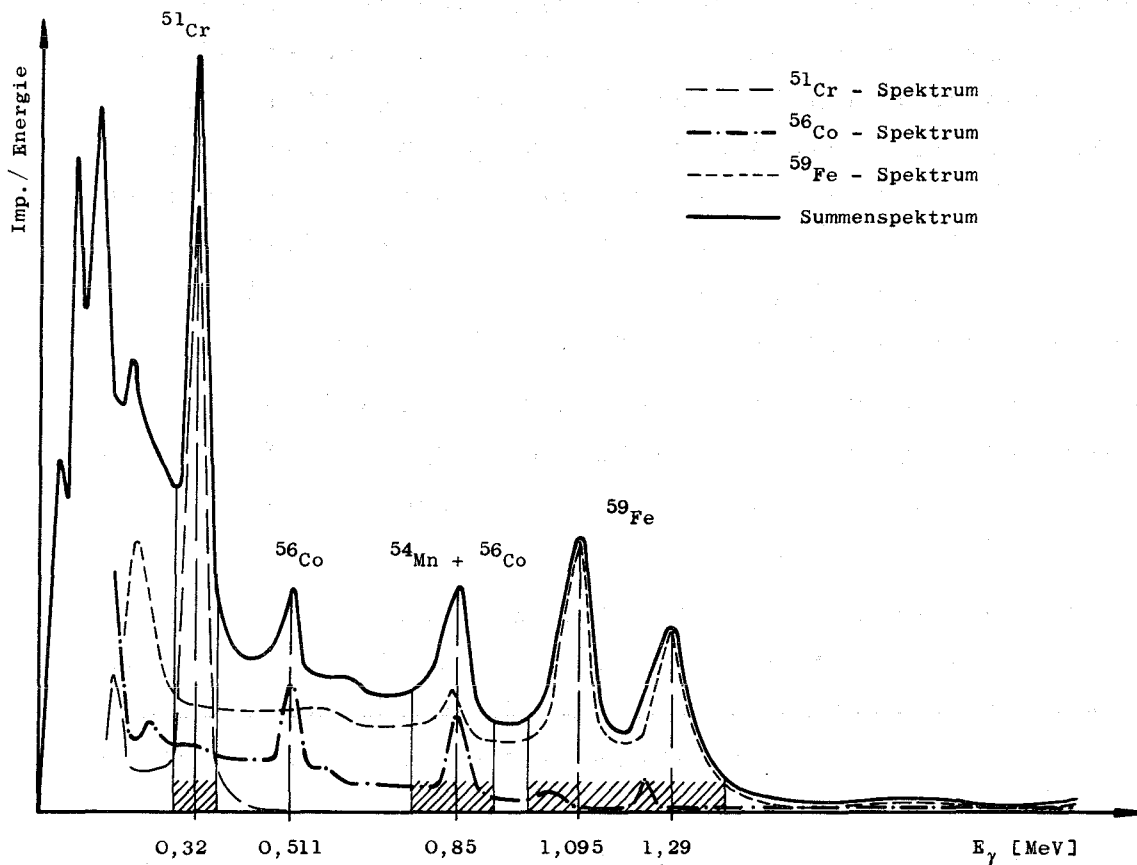


Bild 4. γ -Energie-Spektrum bei gleichzeitigem Nachweis von ^{51}Cr , ^{56}Co , ^{59}Fe .

2.3.3 Registrieranordnung und Blockschaltbild

Die Registrieranordnung für die 3-Komponenten-Messungen ist als Teil des Blockschaltbildes in Bild 5 enthalten. Die vom Szintillationsmeßkopf gelieferten Impulse werden zunächst von einem Linearverstärker verstärkt und an drei Einkanal-Impulshöhenanalysatoren weitergeleitet. Die in den Einkanal-Analysatoren eingestellten Fenster entsprechen den in Bild 4 schraffiert eingezeichneten Energiebereichen und wurden so gewählt, daß sich das günstigste Verhältnis der Zählrate des jeweiligen Photopeaks zum Gesamtuntergrund ergab. (Als Gesamtuntergrund gilt hierbei Raumuntergrund + Einstreuung von anderen Komponenten). Die von den Einkanal-Analysatoren durchgelassenen Impulse werden von den drei angeschlossenen Zählern registriert und an einen Prozeßrechner weitergegeben. Die gewünschte Meßzeit kann durch eine Uhr vorgegeben werden, die Zähler und Rechner steuert. Der Rechner ermittelt aus den anfallenden Zählraten die Verschleißwerte der einzelnen Komponenten (s.2.4), die analog über einen Mehrfachschreiber und digital über einen Fernschreiber ausgegeben werden.

Der im Blockschaltbild eingezeichnete Stabilisator regelt die temperaturbedingten Verstärkungsänderungen des Szintillationsmeßkopfes, wie auch andere Verstärkungsänderungen, über die angelegte Hochspannung aus.

Der hinter den Linearverstärker geschaltete 400-Kanal-Impulshöhenanalysator ermöglicht eine Kontrolle der im Kristall registrierten γ -Spektren und über eine Koinzidenzanordnung eine Kontrolle der in den Einkanal-Analysatoren eingestellten Energiefenster.

Da der Prozeßrechner mit der Meßwertausgabe außerhalb des Prüfstandsraumes aufgestellt war, wurde zusätzlich ein Ratemeter mit Schreiber angeschlossen, um bei den Einkomponenten-Versuchen den Verschleißverlauf auch direkt im Prüfstandsraum überwachen zu können und um bei den 3-Komponenten-Versuchen einen plötzlichen starken Anstieg des Chrom-Verschleißes der Kolbenringaufläachen schnell zu erkennen.

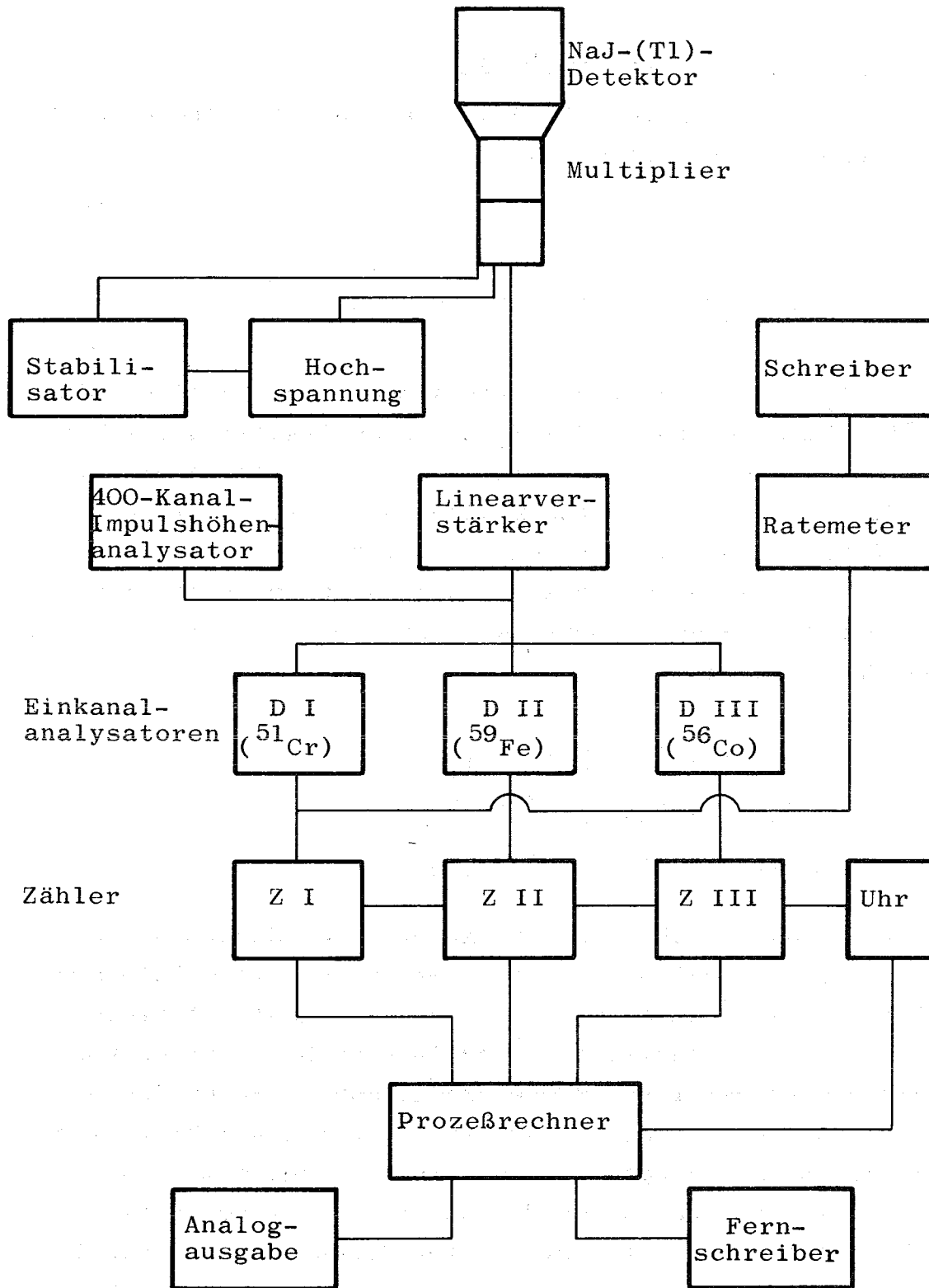


Bild 5 Blockdiagramm der Meßelektronik

2.4 Ermittlung der Verschleißmengen

Die in 2.2.2 abgeleitete Gleichung (5) vereinfacht sich für einen bestimmten Versuch zu

$$M_i = E_i \cdot X_i \cdot e^{\lambda_i t}, \quad (6)$$

da $m_i \cdot \frac{1}{X_{Si}} \cdot \frac{V}{V_E} = E_i = \text{konst. gilt.} \quad (7)$

Der Index "i" kennzeichnet die i-te Komponente. In einem Ein-Komponenten-Versuch können die X_i durch Subtrahieren des Raumuntergrundes direkt bestimmt werden. Bei Mehr-Komponenten-Versuchen müssen jedoch die Netto-Zählraten X_i wegen der gegenseitigen Einstreuung durch Lösen eines linearen Gleichungssystems mit n Unbekannten bestimmt werden, wobei n die Zahl der gleichzeitig nachgewiesenen Komponenten ist. Für die 3-Komponenten-Messungen gilt dann:

$$\left(\begin{array}{ccc|c} 1 & a_{12} & a_{13} & (Z_1 - U_1) \\ a_{21} & 1 & a_{23} & (Z_2 - U_2) \\ a_{31} & a_{32} & 1 & (Z_3 - U_3) \end{array} \right) \quad (8)$$

Z_i ist die im Zähler für die i-te Komponente während der Meßzeit registrierte Zählrate, U_i ist der dazugehörige Untergrund (Nulleffekt). Die Konstanten a_{ij} , d.h. die Einstreufaktoren, erhält man durch Auszählen der einzelnen mitbestrahlten Proben: Beim Messen der i-ten Probe erhält man im i-ten Zähler eine auf 1 normierte Zählrate und in den übrigen Zählern die Faktoren der Einstreuungen in die verschiedenen Komponenten. Da die Einstreufaktoren wegen der unterschiedlichen geometrischen Verhältnisse für die festen Proben und für die im Öl der Meßkammer vorhandenen radioaktiven Partikel verschieden sind, müssen die durch Auszählen der festen Proben ermittelten Faktoren noch mit einem für das jeweilige Radioisotop bei der Eichung bestimmten Korrekturfaktor multipliziert werden.

Die X_i als Lösungsvektor des Gleichungssystems (8) sind die gesuchten Verschleißzählraten der einzelnen Komponenten ohne Untergrund und Einstreuungen.

Die Ermittlung der Verschleißmengen wurde in den Versuchen über einen im on-line-Betrieb arbeitenden Prozeßrechner (Hewlett Packard 2114 A) durchgeführt, wobei auch die Halbwertszeit-Korrektur berücksichtigt wurde. Die Werte wurden digital über einen Fernschreiber und analog über einen Kompensographen ausgegeben. Die Verschleißraten, d.h. die Steigungen der über der Versuchszeit aufgetragenen Gesamtverschleiß-Kurven, wurden jedoch nicht aus den Analogschrieben bestimmt, sondern aus den nach den jeweiligen Versuchen in einem günstigeren Maßstab aufgetragenen Werten des Fernschreibers.

Das in Basic geschriebene Rechenprogramm ist im Anhang 1 aufgeführt und bietet die Möglichkeit, bis zu sechs gleichzeitig gemessene Komponenten rechnerisch zu ermitteln (s.1.3).

Neben den bereits beschriebenen Rechenoperationen wird in einem Unterprogramm bei einer Meßbereichsüberschreitung eine automatische Unterdrückung der Kompensographenanzeige durchgeführt.

3. VERSUCHSTEILE

Für die Versuche wurden jeweils die obersten Kompressionsringe und die Flanken der obersten Kolbenringnuten als Versuchsteile aktiviert. Die Kolben waren weiterhin mit zwei Kompressionsringen mit konischer Lauffläche ohne Chromlaufschicht (Schwachminutenringe) und mit einem unverchromten Schlauchfeder-Ölabstreif-Dachfasenring bestückt.

3.1 Kolbenringe

In den Versuchen wurden zwei Kolbenringformen eingesetzt: Rechteckringe mit einer Höhe von 3,0 mm (DIN 24 910) und Doppelseitige Trapezringe mit einer Höhe von 3,5 mm (DIN 24 914). Die Kolbenringe waren nach dem Einzelgußverfahren hergestellt und formgedreht. Die Laufflächen der Ringe waren verchromt und ballig gehont, die Stärke der Chromlaufschicht betrug nach Herstellerangaben mehr als 0,08 mm. Die wichtigsten Abmessungen und Kennwerte der Kolbenringe sind aus Tafel 1 zu entnehmen.

		Rechteckringe	Doppeltrapezringe
Nenndurchmesser	mm	120	120
Innendurchmesser	mm	110	110
Radiale Wanddicke	mm	$5 \pm 0,12$	$5 \pm 0,12$
Ringhöhe	mm	$3 \begin{smallmatrix} -0,010 \\ -0,022 \end{smallmatrix}$	3,5 ¹⁾
Stoßspiel	mm	$0,4 \pm 0,6$	$0,4 \pm 0,6$
Innenkantenbruch	mm	$0,3 \pm 0,1$	$0,3 \pm 0,1$
Flankenwinkel		-	$7^{\circ}30' +12'$
Tangentialkraft	kp	$2,55 \begin{smallmatrix} +20 \\ -10 \end{smallmatrix} \%$	$2,10 \begin{smallmatrix} +20 \\ -10 \end{smallmatrix} \%$

1) Nennwert; Meßwert in 1,5 mm
Abstand von Lauffläche
 $3,105 \begin{smallmatrix} -0,010 \\ -0,030 \end{smallmatrix}$ mm

Tafel 1. Kenndaten der Kolbenringe

Die Kolbenringe bestanden aus vergütetem Kugelgraphit KV 1 (Goetze Materialspezifikation K 9) folgender chemischer Zusammensetzung:

C : 3,5 - 4,0%	Si: 2,3 - 2,9 %	Mn: 0,2 - 0,5%
P : < 0,3%	S : < 0,05%	Cr: < 0,2%
Ni : < 1,0%	Fe: Rest (~ 92%)	

Andere Elemente können als Verunreinigungen vorhanden sein (Summe < 0,2%). (Ausführliche Materialspezifikation s. Anhang II).

3.2 Kolben

3.2.1 Einmetallkolben

Die Einmetallkolben waren geschmiedet und bestanden aus der übereutektischen Aluminium-Silizium-Kolbenlegierung Mahle 138 (AlSi 18 CuNi). Der Schaft war graphitiert, der Schaftdurchmesser betrug 119,89 mm. Der Flankenwinkel der Doppeltrapeznuten betrug bei Einmetall- und Ringträgerkolben $7^{\circ} 30' \pm 6'$. Die chemische Zusammensetzung der Kolbenlegierung ergibt sich aus folgender Aufstellung:

Si: 17 - 19 %	Cu: 0,8 - 1,5%	Ni: 0,8 - 1,3%
Mg: 0,8 - 1,3%	Mn: (0,2%)	Ti: (0,2%)
Fe: (0,7%)	Al: Rest ~78%	
Zn: (0,2%)		

Die in Klammern gesetzten Werte sind übliche Beimengungen (Verunreinigungen). Weitere Angaben über die Eigenschaften der Kolbenlegierung befinden sich im Anhang III.

3.2.2 Ringträgerkolben

Die Ringträgerkolben bestanden aus der gleichen Legierung Mahle 138 wie die Einmetallkolben, waren jedoch gegossen statt geschmiedet. Es handelte sich um Autothermatik-Kolben mit 4 Regelstreifen im Schaft. Der Schaft war graphitiert, der Schaftdurchmesser betrug 119,93 mm.

Der eingegossene Ringträger für den obersten Kolbenring hatte einen angegossenen Muldenrandschutz (Mahle - ARMAL - Kol-

ben, Bild 6).

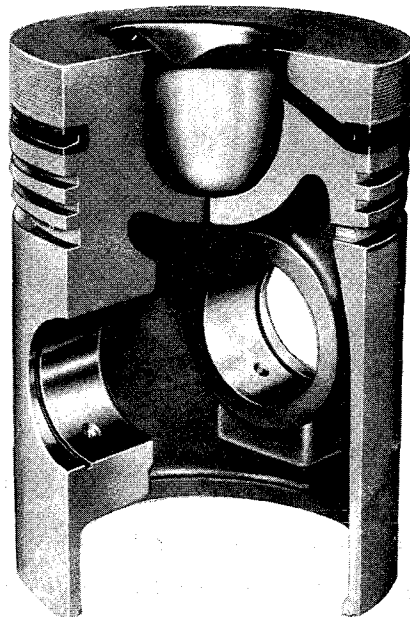


Bild 6. Ringträgerkolben mit Muldenrandschutz

Der Ringträgerwerkstoff war Ni-Resist, ein hochlegiertes austenitisches Gußeisen mit großem linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten, der etwa der Al-Si-Kolbenlegierung entspricht, und folgender chemischer Zusammensetzung:

C : 2,4 - 2,8%	Si: 2 - 2,4%	Mn: 1 - 1,4%
P : 0,1%	S : < 0,1%	Ni: 13 - 15%
Cu: 5 - 7%	(Ni+Cu: < 20%)	Cr: 1 - 1,6%
Fe: Rest (~74%)		

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

4.1 Aktivierung der Kolbenringe

4.1.1 Aktivierung mit thermischen Neutronen

Die Aktivierung der in den 3-Komponenten-Versuchen eingesetzten Kolbenringe erfolgte als Angelschnurbestrahlung im Forschungsreaktor München-Garching (Swimming-Pool-Reaktor). Die bei der Bestrahlung entstehenden, für die Verschleißmessungen wichtigen γ -strahlenden Radioisotope sind ^{51}Cr für die Chromlaufschicht und ^{59}Fe für die Flanken der Kolbenringe. Bestrahlt wurden jeweils zwei oder drei Kolbenringe gleichzeitig. Als Bestrahlungsbehälter dienten Aluminium-Dosen mit aufgeschrumpftem Deckel, die vor der Bestrahlung jeweils auf Gasdichtheit geprüft wurden, um ein Oxydieren der Kolbenringe und eine Verschmutzung des Reaktorwassers zu vermeiden. Diese Art der Bestrahlungsbehälter hat sich in allen Fällen sehr bewährt und bietet vor allem gegenüber zugeschweißten Aluminium-Behältern den Vorteil, daß die Behälter nach der Bestrahlung auf Grund der Konstruktion durch einen Hammerschlag schnell und spanlos geöffnet werden können.

Die bei der Angelschnurbestrahlung auf Grund der Strömung im Swimming-Pool hervorgerufene Bewegung der Bestrahlungsbehälter bewirkte einen Ausgleich des mit wachsendem Abstand vom Reaktorkern abnehmenden Neutronenflusses, so daß die örtliche spezifische Aktivität der Kolbenringe bei den durchgeführten Kontrollmessungen mit einer Ausnahme (s. 6.5.1) um maximal 5% von der spezifischen Aktivität der mitbestrahlten Proben abwich. Als Proben wurden jeweils zwei Proben aus dem Kolbenringmaterial KV 1 und zwei Chrom-Proben von einigen mg Gewicht mitbestrahlt. Die Einstreufaktoren und die spezifischen Aktivitäten wurden dann als Mittelwerte der je zwei Proben bestimmt.

Die gewählte Bestrahlungszeit von 60 Stunden ergab am Bestrahlungsende bei einem thermischen Neutronenfluß von $10^{13}/\text{cm}^2 \text{ sec}$ rechnerische spezifische Aktivitäten von 112 mCi/g für ^{51}Cr und von 0,36 mCi/g für ^{59}Fe [13]. Damit ließ sich 1 mg Eisen im Gesamtölkreislauf zwei Monate nach der Bestrahlung

bei Meßzeiten von 10 Minuten noch mit einem statistischen Fehler $< 2,4\%$ nachweisen. Auf Grund der wesentlich höheren spezifischen Aktivität des ^{51}Cr lagen hier die statistischen Fehler erheblich niedriger, so daß die Kolbenringe der spezifischen Aktivitätsabnahme des ^{59}Fe entsprechend bis zu ca. zwei Monaten nach der Bestrahlung eingesetzt wurden.

Die wichtigsten Kennwerte der Radioisotope ^{51}Cr und ^{59}Fe können aus Tafel 4 entnommen werden (s. Seite 35).

4.1.2 Aktivierung der Kolbenringflanken mit Deuteronen

Der Verschleiß der unteren und oberen Flanken der in den Einmetallkolben-Versuchen eingesetzten Kolbenringe sollte getrennt gemessen werden. Daher wurden die Flanken mit Deuteronen aktiviert, wobei die am Zyklotron des Kernforschungszentrums Karlsruhe durch Bestrahlung von Stahlfolienpaketen gewonnenen Ergebnisse über die Deuteronenaktivierung von Stahl und Gußeisen zu Grunde gelegt werden konnten [8]. Die charakteristischen Daten der bei der Deuteronenaktivierung von Eisen entstehenden Radioisotope ^{52}Mn , ^{56}Co und ^{57}Co und die Entstehungskernreaktionen enthält Tafel 2.

Entstehendes Radioisotop	Halbwertszeit	Energie der γ -Quanten	Haupt-Entstehungskernreaktion
^{52}Mn	5,7 d	0,744; 0,935; 1,434 MeV	$^{54}\text{Fe} (d, \alpha) ^{52}\text{Mn} ^1)$
^{56}Co	77 d	0,847; 1,04; 1,24 ; 1,76; 3,02 ; 2,60; 3,26 MeV	$^{56}\text{Fe} (d, 2n) ^{56}\text{Co}$
^{57}Co	270 d	0,014; 0,122; 0,136; 0,692 MeV	$^{56}\text{Fe} (d, n) ^{57}\text{Co}$

¹⁾: nach [14]. Alle anderen Angaben nach [15]

Tafel 2. Charakteristische Daten der durch Deuteronenbeschuß von Eisen entstehenden Radioisotope ^{52}Mn , ^{56}Co , ^{57}Co

Bei der Deuteronenaktivierung von Stahl ergibt sich die in Bild 7 dargestellte, durch Auszählen der einzelnen Folien mit einem NaJ(Tl)-Kristall ermittelte Abhängigkeit der Aktivität der verschiedenen Radioisotope von der Eindringtiefe der Deuteronen in das Target bzw. von der Energie der Deuteronen. Die mit wachsender Eindringtiefe abnehmende Energie der Deuteronen wurde, ausgehend von einer Anfangsenergie von 50 MeV, errechnet.

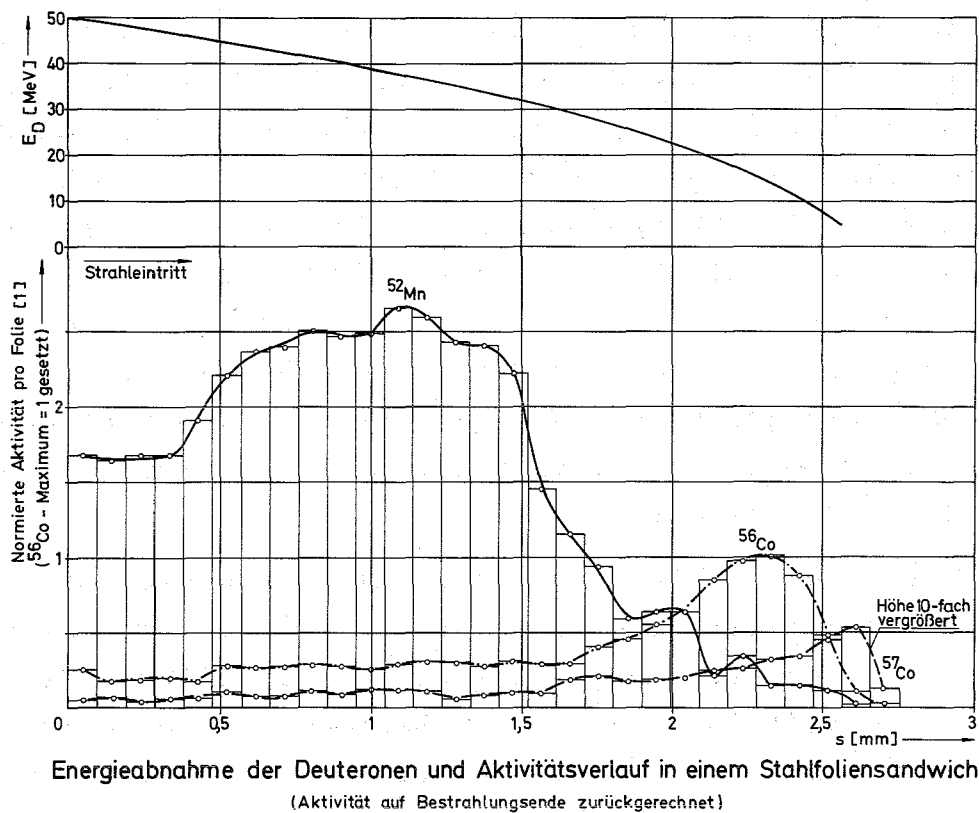


Bild 7.

Die bei den Deuteronenbestrahlungen der Stahlfolien erzielte ^{52}Mn -Aktivität lag im Vergleich zur ^{56}Co -Aktivität höher, als es nach den in der Literatur vorhandenen Angaben über die Wirkungsquerschnitte der Kernreaktionen zu erwarten wäre. Das ist wahrscheinlich auf im Material der Stahlfolien vorhandene Chrom-Anteile zurückzuführen, die über die Kernreaktionen $^{52}\text{Cr} (d,2n) ^{52}\text{Mn}$ und $^{53}\text{Cr} (d,3n) ^{52}\text{Mn}$ ebenfalls ^{52}Mn liefern. Da diese Kernreaktionen hohe Wirkungsquerschnitte

aufweisen, würden schon geringe Unterschiede im Chromgehalt der bestrahlten Teile und der mitbestrahlten Proben zu stark unterschiedlichen spezifischen Aktivitäten des ^{52}Mn führen, so daß die Kolbenringflanken für die Verschleißmessungen so bestrahlt wurden, daß die Oberfläche eine maximale ^{56}Co -Aktivität aufwies. Ein weiterer Vorteil der ^{56}Co - gegenüber der ^{52}Mn -Aktivierung liegt in der größeren Halbwertszeit des ^{56}Co und in der bei gleicher spezifischer Aktivität der Oberfläche um den Faktor 5 niedrigeren Gesamtaktivität des bestrahlten Teils. Der aus Bild 7 ersichtliche Bereich maximaler ^{56}Co -Aktivität wird bei einer Deuteronenenergie von ca. 15 MeV erreicht. Da die Energie des Deuteronenstrahls bei der wegen der Größe der Kolbenringe erforderlichen externen Bestrahlung im Isochron-Zyklotron des Kernforschungszentrums Karlsruhe nicht variiert werden kann und beim Strahlaustritt ca. 50 MeV beträgt, wurden die Kolbenringflanken mit einer in Strahlrichtung 2,3 mm starken Stahlabdeckung versehen, so daß die auf die Flanken auftreffenden Deuteronen die gewünschte Energie von ca. 15 MeV besaßen und ein ca. 0,15 mm tiefer Bereich gleichmäßiger spezifischer Aktivität des ^{56}Co erzielt wurde.

Das Karlsruher Zyklotron liefert einen Deuteronenstrahl mit einer Querschnittsfläche von etwa $1-2\text{ cm}^2$, unsymmetrischer Flächenform und ungleichmäßiger Intensitätsverteilung. Die Strahlungsintensität fällt von einem Maximum, das etwa in Strahlmitte liegt, zum Rand hin ähnlich einer Gauß'schen Funktion auf Null ab. Daher wurden die Kolbenringe mit der in Bild 8 gezeigten Abdeckung auf einer für die Bestrahlungen am Zyklotron gebauten Aktivierungsvorrichtung aufgespannt, die dem zu bestrahlenden Teil eine Dreh- und eine in Millimeter-Schritten einstellbare Hubbewegung erteilt. Dadurch wurde die ganze Oberfläche der Kolbenringflanken vom Deuteronenstrahl überstrichen. Die so erzielte spezifische Aktivität der Flankenoberfläche wies örtliche Abweichungen von bis zu 10% auf, die durch Stromschwankungen des Deuteronenstrahls und vor allem durch ein Abweichen des Strahls von der zu Beginn der Bestrahlung eingestellten Richtung verursacht werden konnten. Daher wurden vier je $30\text{ }\mu\text{m}$ starke Federstahlproben in Abständen von 90° zwischen der Kolbenring-

flanke und der Abdeckung eingeklemmt und die spezifische Aktivität der Flankenoberfläche als Mittelwert aus den vier mitbestrahlten Proben bestimmt, wobei durch Aufschneiden der bestrahlten Proben der Aktivitätsverlauf der Flankenoberfläche in radialer Richtung kontrolliert werden konnte (Bild 9).

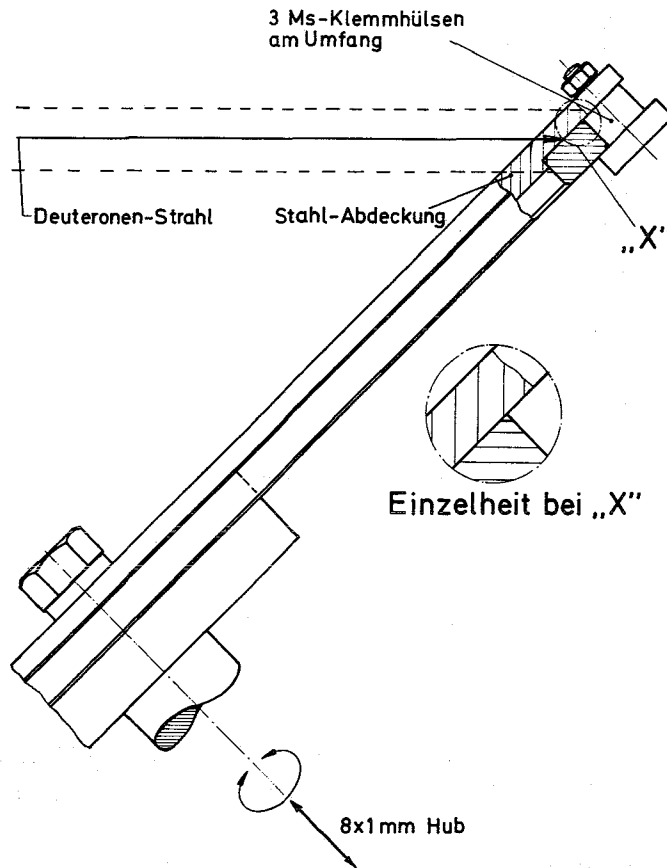


Bild 8. Kolbenringflanken-Bestrahlung

Die über die gesamte Oberfläche der bestrahlten Kolbenringflanke gemittelte spezifische Aktivität konnte so mit einer Genauigkeit von etwa $\pm 4\%$ angegeben werden.

Zuvor durchgeführte Probeaktivierungen hatten gezeigt, daß bei der Deuteronenbestrahlung des Kolbenringmaterials KV 1 und der Federstahlproben unter gleichen Bestrahlungsbedingungen eine gleich hohe ⁵⁶Co-Aktivität entsteht.

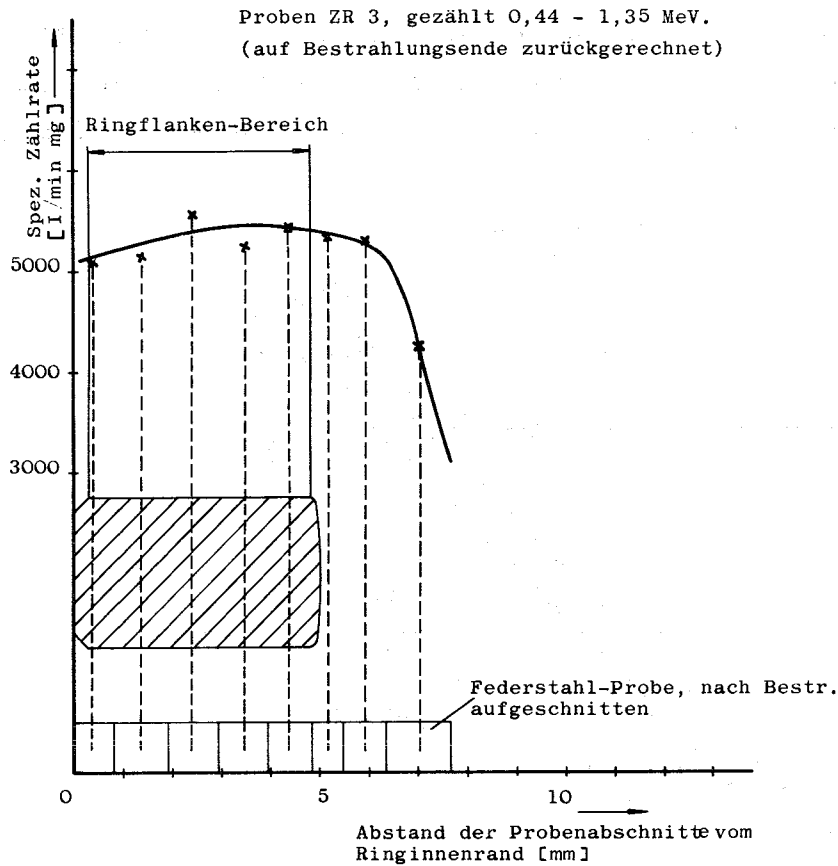


Bild 9. Spezifische Aktivität der Kolbenringflanke in radialer Richtung (Deuteronenbestrahlung)

Die in Bild 8 gezeigte Schrägstellung der Kolbenringe zur Strahlrichtung wurde gewählt, um eine Aktivierung der Chrom-Laufläche zu vermeiden. Die parallel zum Deuteronenstrahl eingezeichneten unterbrochenen Linien geben den Bereich an, den die Strahlmitte aufgrund des eingestellten Hubs der Aktivierungsvorrichtung überstrich.

In den Einmetallkolben-Versuchenzur Bestimmung des Kolbenringflanken-Verschleißes wurden die ^{56}Co -Peaks im Energiebereich zwischen 0,44 und 1,35 MeV verwendet, da sich in diesem Energiebereich das günstigste Verhältnis zwischen Netto-Zählrate und Untergrund ergab. Um einen Flankenverschleiß von 1 mg, wie bei den in den Ringträgerkolben eingesetzten neutronenaktivierten Ringen mit einem statistischen Fehler $< 2,5\%$ nachweisen

zu können, war eine spezifische Aktivität der Flankenoberflächen von ca. 0,2 mCi/g erforderlich. Mit einem im Karlsruher Zyklotron unter normalen Betriebsbedingungen zu erreichenden Strahlstrom von 2,5 μ A ergibt sich nach einer Bestrahlungszeit von ca. 6 min eine spezifische Aktivität von 0,1 mCi/g unter einer Fläche von 1 cm². Unter Berücksichtigung der in Bild 8 dargestellten geometrischen Verhältnisse bei der Bestrahlung war damit ein Stromintegral von 12 μ Ah erforderlich, um die spezifische Aktivität von 0,2 mCi/g zu erzielen, so daß die Bestrahlungszeit entsprechend diesem Stromintegral ausgelegt wurde.

4.2 Aktivierung der Ringträgerkolben

Die Nutflanken der in den 3-Komponenten-Versuchen eingesetzten Ringträgerkolben sollten mit Deuteronen aktiviert werden, da hierbei eine dem Eisen-Anteil des Ni-Resist von ca. 74% entsprechende ⁵⁶Co-Aktivität zu erwarten war. Da jedoch auf Grund der gegenüber dem Federstahl zusätzlichen Legierungsbestandteile, vor allem Nickel, Kupfer und Mangan, bei der Deuteronenaktivierung auch zusätzliche Radioisotope entstehen könnten, wurde zunächst eine Probeaktivierung durchgeführt, indem eine Ni-Resist-Probe mit 32 Federstahl-Bändern von je 0,095 mm Dicke, die jeweils stufenweise gegeneinander versetzt waren, abgedeckt wurde (s. Anhang IV). Die Ni-Resist-Proben wiesen dabei eine von der Deuteronenenergie abhängige ⁵⁶Co-Aktivität auf, die dem in Bild 7 dargestellten Verlauf entspricht, so daß für die Aktivierung der Ringträger-Nutflanken eine in Strahlrichtung 2,3 mm starke Strahlabdeckung, wie schon bei der Deuteronenaktivierung der Kolbenringflanken erläutert (s. 4.1.2), verwendet wurde.

Da der Eisengehalt des Ni-Resist (ca. 74%) etwa 22% niedriger ist als der der Federstahlproben (ca. 95%), wurde auch eine entsprechend geringere spezifische Aktivität des ⁵⁶Co im Ni-Resist erwartet, wenn Ni-Resist und Federstahl unter gleichen Bedingungen bestrahlt wurden. Das traf sowohl bei den Probeaktivierungen wie auch bei den Aktivierungen der Ringträgerkolben

für alle ^{56}Co -Peaks mit Ausnahme des für die 3-Komponenten-Versuche verwendeten 0,847 MeV-Peaks zu: im Energiebereich 0,750 - 0,940 MeV entsprach die spezifische ^{56}Co -Aktivität einer Ni-Resist-Probe genau der einer Federstahlprobe. Da die mit einem NaJ(Tl)-Szintillationskristall aufgenommenen γ -Energie-Spektren zwar den überhöhten 0,847 MeV-Peak einer bestrahlten Ni-Resist-Probe zeigten, aber keine weitere Abweichung vom γ -Energie-Spektrum einer bestrahlten Federstahlprobe aufwiesen, konnte diese Frage erst geklärt werden, als ein Halbleiter-Detektor zur Verfügung stand: im Ni-Resist entsteht zusätzlich das Radioisotop ^{58}Co , das auf Grund des γ -Energie-Spektrums (Haupt- γ -Energie bei 0,810 MeV) mit einem NaJ(Tl)-Kristall nicht vom ^{56}Co zu trennen ist und mit 71 Tagen auch eine ähnliche Halbwertszeit besitzt wie ^{56}Co mit 77 Tagen. (Bild 10 und Bild 11. Der in Bild 11 zu erkennende 0,835 MeV-Peak ist auf eine $^{56}\text{Fe} (d, \alpha) ^{54}\text{Mn}$ -Reaktion zurückzuführen, wobei das Radioisotop ^{54}Mn auch erst durch Messungen mit dem Halbleiter-Detektor nachgewiesen werden konnte.)

Da ^{58}Co nur im Ni-Resist entstand, muß es auf Legierungsbestandteile zurückgeführt werden, die im Federstahl nicht vorhanden sind und gleichzeitig entsprechende Kernreaktionen ermöglichen, was für Mangan mit einem Legierungsanteil von 1-1,4% und Nickel mit einem Legierungsanteil von 13-15% im Ni-Resist zutrifft.

Nach den in der zugänglichen Literatur gefundenen Angaben kommt für die Entstehung von ^{58}Co nur eine $^{55}\text{Mn} (\alpha, n) ^{58}\text{Co}$ -Kernreaktion in Betracht [15; 16], die als Sekundärreaktion mit α -Teilchen aus den Prozessen $^{56}\text{Fe} (d, \alpha) ^{54}\text{Mn}$ [17; 18] und $^{58}\text{Ni} (d, \alpha) ^{56}\text{Co}$ [19; 20] ablaufen müßte. Der in [16] angegebene Wirkungsquerschnitt der $^{55}\text{Mn} (\alpha, n) ^{58}\text{Co}$ -Reaktion von maximal 680 mb bei einer α -Energie von 8,7 MeV erfordert jedoch unter Berücksichtigung der entstehenden ^{56}Co - und ^{58}Co -Aktivität einen α -Fluß, der etwa 5,7 mal so hoch sein müßte wie der Deuteronenfluß, so daß diese Kernreaktionen für die Bildung des ^{58}Co praktisch keine Bedeutung haben können.

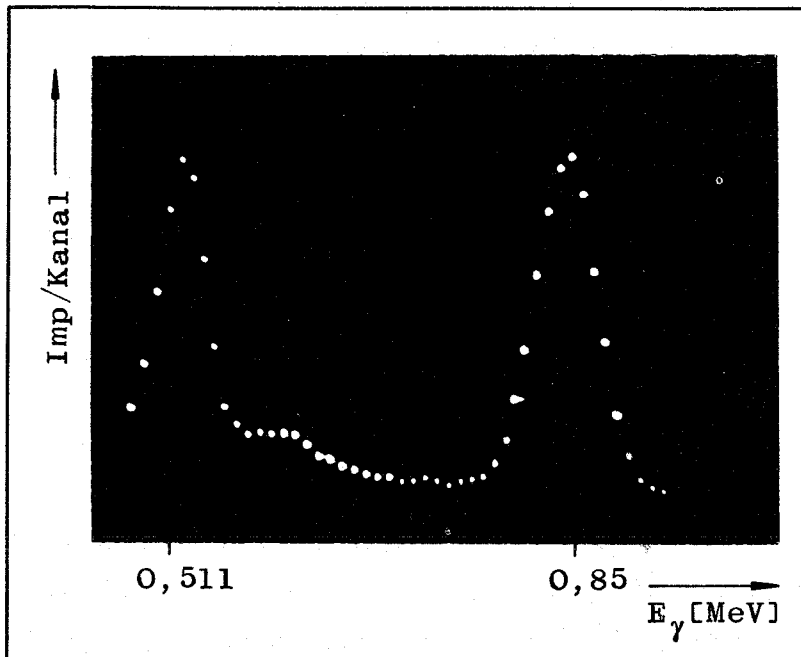


Bild 10.
(NaJ(Tl)-Kristall,
400-Kanal-Impuls-
höhenanalysator)

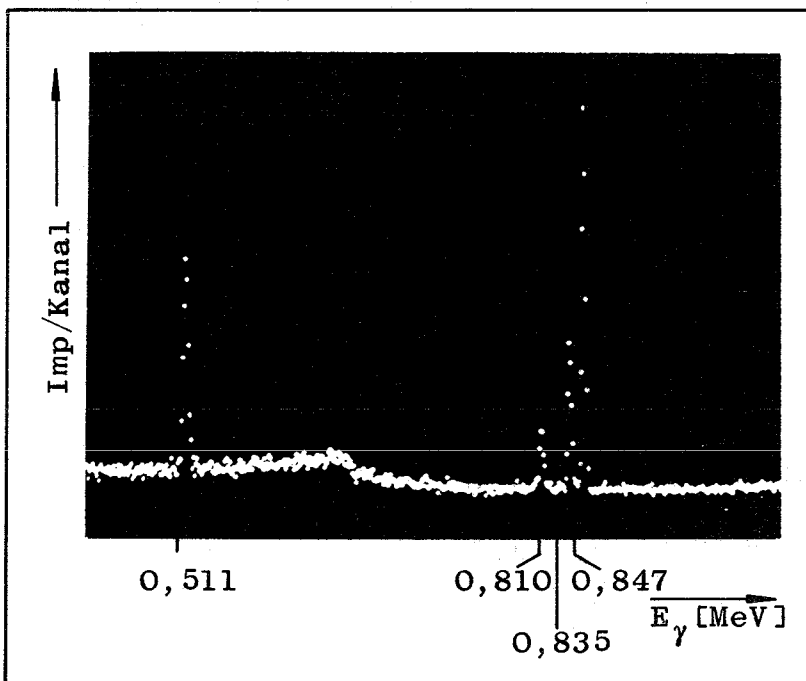


Bild 11.
(Ge(Li)-Detektor,
4000-Kanalimpuls-
höhenanalysator)

Bild 10./11. γ -Energie-Spektren einer Ni-Resist-Probe nach Deuteronenbeschuß.
(Eintrittsenergie der Deuteronen ca. 16 MeV).

Als Haupt-Entstehungs-Kernreaktion für die Bildung des Radioisotops ^{58}Co kommt dann die Reaktion $^{60}\text{Ni} (d, \alpha) ^{58}\text{Co}$ in Betracht. Der mittlere Wirkungsquerschnitt dieser Reaktion müßte im Deuteronenenergiebereich von 0-16 MeV etwa 4 mal so hoch sein wie der der $^{56}\text{Fe} (d, 2n) ^{56}\text{Co}$ -Reaktion, um zu dem gemessenen $^{56}\text{Co}/^{58}\text{Co}$ -Aktivitätsverhältnis zu führen. Allerdings konnten in der Literatur keine Angaben über diese Reaktion gefunden werden.

Da wegen der zusätzlichen ^{58}Co -Aktivität die Einstreufaktoren des bestrahlten Ni-Resists in die Energiebereiche der anderen Verschleißkomponenten von denen der Federstahlproben abweichen, wurde jeweils eine ca. 50 μm starke Ni-Resist-Probe bei den Ringträgerkolben-Aktivierungen mitbestrahlt. Die Gleichmäßigkeit der spezifischen Aktivität der Ringträgerflanken wurde dagegen wie bei den Kolbenringflanken durch Auszählen von jeweils vier mitbestrahlten Federstahlproben kontrolliert, da sich diese sehr viel besser zerschneiden ließen als die Ni-Resist-Proben.

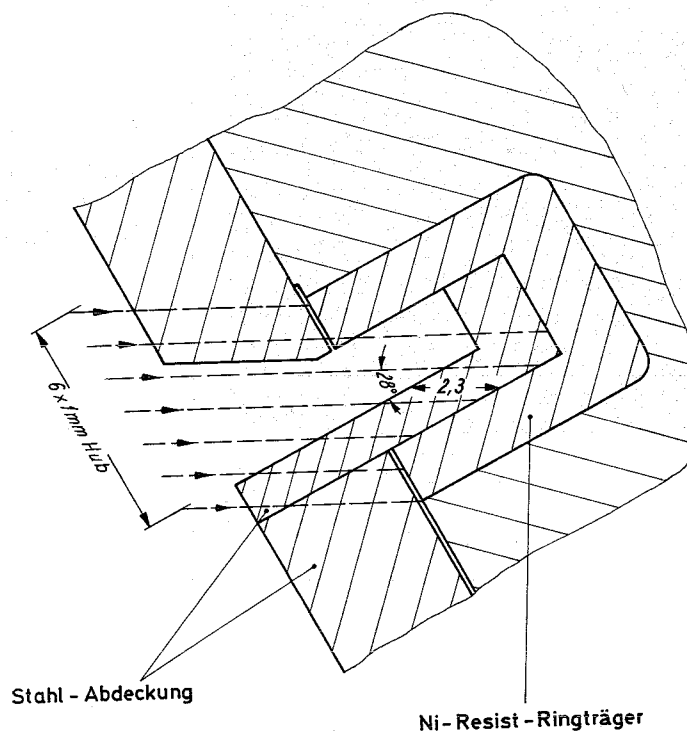


Bild 12. Nutflanken-Aktivierung

Die Anordnung von Kolben und Abdeckung bei der Bestrahlung zeigt Bild 11. Durch eine Hub- und Drehbewegung von Kolben und Abdeckung wurde es wie bei der Ringflanken-Aktivierung erreicht, daß der Deuteronenstrahl den ganzen Flankenbereich überstrich. Die Stahlabdeckung ist über der Flanke in Strahlrichtung ca. 2,3 mm stark, die anderen Bereiche des Kolbens werden durch die stärkere Abdeckung so abgeschirmt, daß die Deuteronenenergie noch in der Abdeckung auf Null absinkt. Probenanordnungen im Nutengrund und am Feuersteg zeigten, daß durch diese Abdeckungen ausschließlich die Nutflanken aktiviert wurden. Die Ringträgerkolben-Nutflanken wurden jeweils möglichst so lange bestrahlt, daß ein Stromintegral von 20 μAh erreicht wurde, was bei einem Strom von 2,5 μA einer Bestrahlzeit von 8 Stunden entspricht. Da der bei der damit erzielten spezifischen Aktivität auftretende statistische Fehler stark von der Einstreuung der anderen Komponenten abhängt, wird eine genauere Abschätzung in 6.5.2.1 durchgeführt.

4.3 Aktivierung der Einmetallkolben

4.3.1 Untersuchungen zur Aktivierung mit thermischen Neutronen

Für die Aktivierung der Einmetallkolben-Nutflanken wurden zunächst Bestrahlungsmöglichkeiten mit thermischen Neutronen in Betracht gezogen. Dabei sollte durch eine entsprechende Cadmium-Abschirmung des Kolbens von 1 mm Stärke, die in einem isotropen Neutronenfeld eine nahezu vollständige Absorption der thermischen Neutronen bewirkt [21], erreicht werden, daß nur die nicht abgeschirmte Nutflanke aktiviert würde. Damit muß ein für die Verschleißmessungen geeignetes Radioisotop folgende Eigenschaften besitzen:

1. Entstehung durch Wechselwirkungen mit thermischen Neutronen.
2. γ -Strahler mit ausreichender Halbwertszeit.
3. Genügend hoher Wirkungsquerschnitt, um in annehmbaren Bestrahlungszeiten eine ausreichende spezifische Aktivität erzielen zu können ($> 0,1 \text{ mCi/g}$).

Diese Bedingungen werden von keinem der in 3.2.1 genannten Elemente der AlSi-Kolbenlegierung gleichzeitig erfüllt. Daher wurde dem Kolbenmaterial Europium zulegiert, wodurch bei einer Aktivierung mit thermischen Neutronen ^{152}Eu entsteht, das alle oben genannten Bedingungen erfüllt. Ein Legierungsanteil von 0,1% reicht dabei auf Grund des sehr hohen Wirkungsquerschnitts aus, um bei einem Neutronenfluß von $10^{13}/\text{cm}^2 \text{ sec}$ nach einer Bestrahlungszeit von 50 h eine spezifische Aktivität des ^{152}Eu von ca. 0,12 mCi/g zu erzielen, die Halbwertszeit beträgt 12,5 Jahre. Aktivierungsanalysen zeigten jedoch, daß die Zugabe von 1% flüssigem Europium zur Kolbenmaterial-Schmelze notwendig war, um eine ausreichend homogene Verteilung des Europiums von ca. $\pm 5\%$ in den Kolben zu erreichen.

Die mit Proben aus diesem Europium-legierten Kolbenmaterial durchgeführten Aktivierungen im Forschungsreaktor Garching brachten die in Bild 13. gezeigten Ergebnisse über den Einfluß der Cadmium-Abschirmung auf den Aktivitätsverlauf in der Probe.

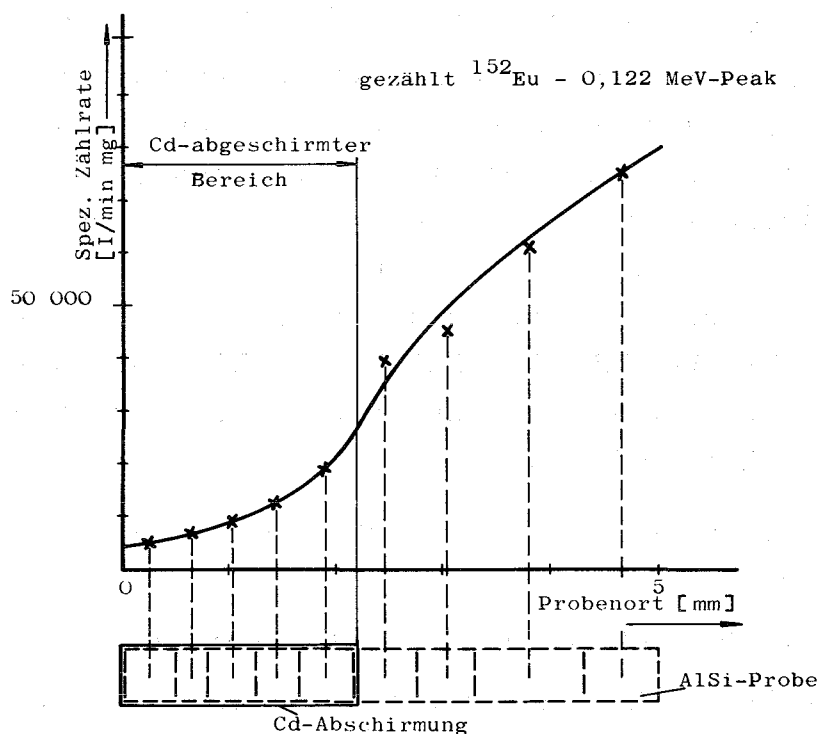


Bild 13. Aktivitätsverlauf in einer teilweise Cd-abgeschirmten Probe

Die angestrebte scharfe Trennung zwischen dem aktiven, nicht abgeschirmten und dem "inaktiven", abgeschirmten Probenbereich konnte nicht erzielt werden. Eine zusätzlich durchgeführte Bestrahlung eines bis auf eine Nutflanke mit Cadmium abgeschirmten Kolbens ergab noch ungünstigere Ergebnisse, da das Cadmium im Bereich der nicht abgedeckten Nutflanke eine sehr starke Neutronenflußverringering bewirkte, so daß die spezifische Aktivität der Flanke nur ca. 5mal so hoch war wie die der abgeschirmten Kolbenbereiche.

Auf Grund dieser Ergebnisse schied die Aktivierung der Einmetallkolben-Nutflanken mit thermischen Neutronen für die Verschleißversuche aus.

4.3.2. Aktivierung mit α -Teilchen

4.3.2.1 Ergebnisse der Aktivierungsuntersuchungen

Die ersten Probeaktivierungen der AlSi-Legierung mit α -Teilchen am Karlsruher Zyklotron erbrachten als wichtigste Radioisotope ^{22}Na und ^{24}Na , deren Kenndaten in Tafel 3 aufgeführt sind.

Radioisotop	Halbwertszeit	Energie [MeV] und Häufigkeit der γ -Quanten
^{22}Na	2,6 y	0,511 (180%, γ^\pm) 1,275 (100%)
^{24}Na	15 h	1,369 (100%) 2,754 (100%)

Tafel 3. Kenndaten der Radioisotope ^{22}Na und ^{24}Na

α -Bestrahlungen von Reinaluminium nach DIN 1712 mit einem Reinheitsgrad von 99,95% ergaben ebenfalls die Radioisotope ^{22}Na und ^{24}Na , so daß die weiteren Versuche über den Aktivitätsverlauf dieser Isotope in Abhängigkeit von der Eindringtiefe bzw. der Energie der α -Teilchen mit diesem Rein-

aluminium durchgeführt wurden. Die in Bild 14 dargestellten Ergebnisse wurden durch externe α -Bestrahlungen von Aluminiumfolien-Paketen im Karlsruher Zyklotron und anschließendes Auszählen der einzelnen Folien wie bei der Deuteronenaktivierung der Stahlfolien-Sandwichs gewonnen (s.4.1.2).

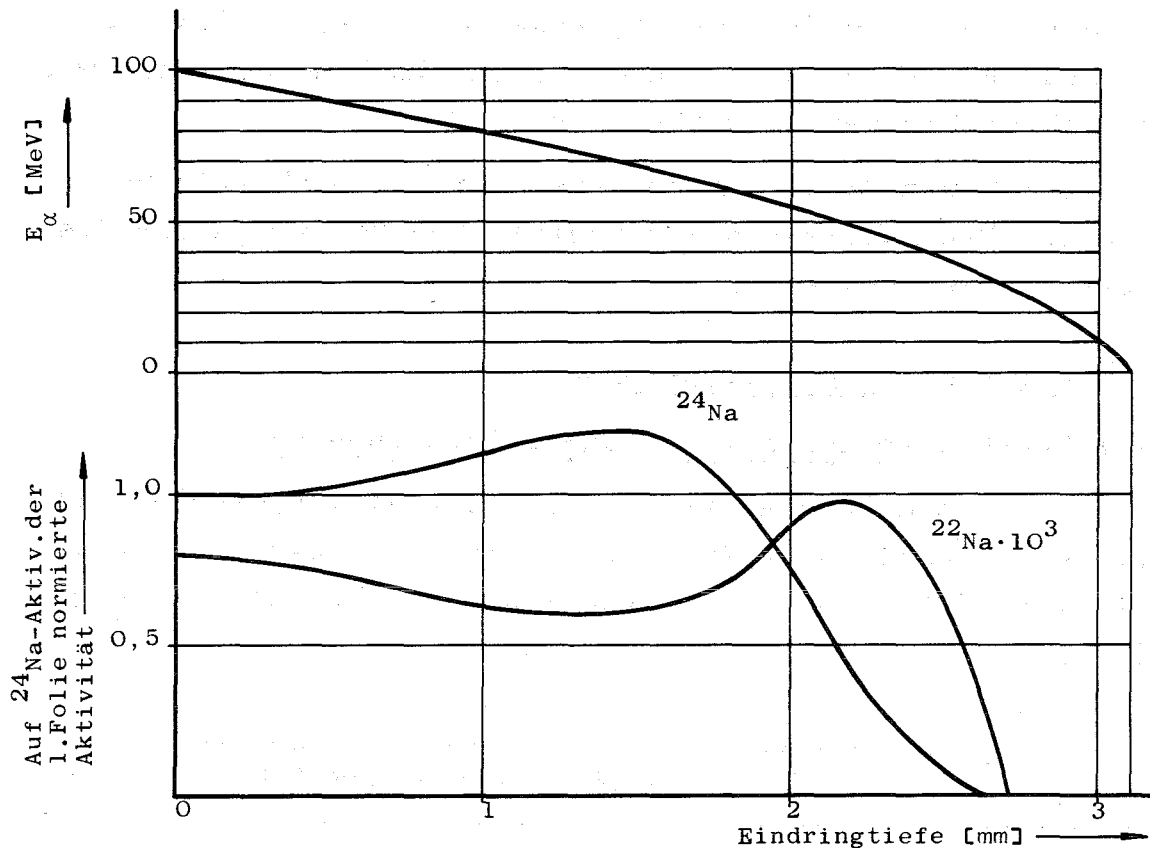


Bild 14. Energieabnahme der α -Teilchen und Aktivitätsverlauf der Radioisotope ^{22}Na und ^{24}Na in Aluminium bei Bestrahlungsende

Die bestrahlten Folien wurden mit einem Ge(Li)-Halbleiter-Detektor und einem 4000-Kanal-Impulshöhenanalysator ausgezählt. Die eingezeichneten Kurven sind die Mittelwerte aus jeweils fünf Bestrahlungen mit Sollstromstärken von 0,25 - 1,75 μA und einer Bestrahlungsdauer von jeweils 15 Minuten. Die ^{22}Na -Aktivitäten wurden vier Wochen nach der Bestrahlung gemessen, da dann die Aktivität des ^{24}Na praktisch völlig abgeklungen war. Die Folienstärke betrug 0,22 mm. Zusätzlich durchgeführte Bestrahlungen von Folienpaketen aus der Kolbenlegierung Mahle 138

ergaben den gleichen Aktivitätsverlauf in Abhängigkeit von der Energie der α -Teilchen, die Ausbeute lag dem geringeren Aluminium-Gehalt der Kolbenlegierung entsprechend niedriger.

Der in Bild 14 dargestellte Aktivitätsverlauf der Radioisotope ^{22}Na und ^{24}Na stimmt gut mit den erst nach Abschluß dieser Untersuchungen von MARTENS und SCHWEIMER [22] veröffentlichten Ergebnissen überein, die die Wirkungsquerschnitte für die Produktion von ^{22}Na und ^{24}Na bei α -Beschluß von Aluminium in Abhängigkeit von der Energie der α -Teilchen angeben.

Der maximale Wirkungsquerschnitt für die ^{22}Na -Produktion liegt bei einer α -Energie von ca. 50 MeV und beträgt etwa 50 mb, für die ^{24}Na -Produktion ergibt sich bei 70 MeV α -Energie ein maximaler Wirkungsquerschnitt von etwa 40 mb. Auf Grund der stark unterschiedlichen Halbwertszeiten der beiden Radioisotope ergibt sich damit bei gleichen Stromintegralen ein Verhältnis der maximalen spezifischen Aktivitäten von ^{24}Na zu ^{22}Na von ca. 1200 : 1. Bei einem 3" x 3" NaJ(Tl)-Kristall ergibt sich jedoch wegen der mit steigender γ -Energie abnehmenden Ansprechwahrscheinlichkeit bei Verwendung des 1,369 MeV ^{24}Na - und des 0,511 MeV- ^{22}Na -Peaks ein Zählratenverhältnis von etwa 250 : 1. Damit ist die Verwendung von ^{24}Na für Verschleißmessungen bei allen Versuchen günstiger, die innerhalb von etwa 8 Halbwertszeiten, d.h. etwa 5 Tage nach der Bestrahlung, durchgeführt werden können.

Da bei den Motorversuchen zwischen Bestrahlungsende und Versuchsende nur etwa 40 Stunden lagen, wurden die Aktivierungen so durchgeführt, daß die Oberflächen der bestrahlten Nutflanken eine maximale spezifische ^{24}Na -Aktivität aufwiesen. Die Bestrahlungsanordnung entsprach bis auf die Stärke der Nutflankenabdeckung der Ringträgerkolbenbestrahlung, die mitbestrahlten Proben waren 0,1 mm starke Folien aus der Kolbenlegierung. Die Kolben wurden mit einem Stromintegral von ca. 12 μAh aktiviert, d.h. bei einem normalerweise zu erreichenden externen α -Strom von 3 μA reichte eine Bestrahlungszeit von 4 Stunden aus. In den Versuchen wurde nur der 1,369 MeV-Peak im Bereich von 1,20-1,52 MeV gezählt, um eine Verfälschung der scheinbaren Halb-

wertszeit durch die Einstreuung von anderen Radioisotopen möglichst gering zu halten. Damit ergab sich für einen Gesamtverschleiß von 1 mg 15 Stunden nach der Bestrahlung ein statistischer Fehler von ca. $\pm 1,5\%$.

4.3.2.2 Entstehungsreaktionen von ^{22}Na und ^{24}Na

Die zunächst in Betracht gezogene Möglichkeit, daß ^{22}Na und ^{24}Na vor allem durch Sekundärneutronen nach den Reaktionen $^{27}\text{Al} (n, 2n\alpha) ^{22}\text{Na}$ und $^{27}\text{Al} (n, \alpha) ^{24}\text{Na}$ entstehen, scheidet aus, da auf Grund einer rechnerischen Abschätzung des möglichen Neutronenflusses die dann entstehenden Aktivitäten nur einige Prozent der nachgewiesenen ausmachen dürften. Diese Abschätzung deckt sich mit den Ergebnissen in [22].

Bei der Bildung des ^{22}Na werden mehrere Reaktionen, wie $(\alpha, 2n\alpha)$, $(\alpha, ^8\text{Be} n)$ oder $(\alpha, ^9\text{Be})$, beteiligt sein [23]. Bisher ist jedoch anhand der vorliegenden experimentellen Daten nicht zu entscheiden, wie groß der Anteil der einzelnen Reaktionen ist.

Die Produktion des ^{24}Na kann bei $E_\alpha > 30$ MeV über Reaktionen wie $(\alpha, \alpha 2pn)$, $(\alpha, \alpha dp)$, $(\alpha, ^7\text{Be})$ oder $(\alpha, \alpha ^3\text{He})$ erfolgen [22, 24, 25]. Nach PORILE [25] erfolgt dabei die Produktion des ^{24}Na bei 40 MeV zu etwa 60% über die $(\alpha, \alpha ^3\text{He})$ -Reaktion. Weitere Angaben über den Anteil der einzelnen Reaktionen konnten nicht gefunden werden. Eine Klärung der Reaktionsmechanismen war jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht beabsichtigt und für die Durchführung der Verschleißversuche auch nicht von Bedeutung.

4.4 Kennwerte der für die Verschleißmessungen verwendeten Radioisotope

Die wichtigsten Daten der in den Versuchen verwendeten Radioisotope sind zusammen mit den Angaben über die zugehörigen Verschleißteile und die γ -Energie-Meßbereiche in Tafel 4 aufgeführt.

Versuch	Verschleißteil	Bestrahlung	Meßisotop	Haupt-Entstehungsreaktion	HWZ	Haupt- γ -Energien [MeV] und Häufigkeit	Zählbereich [MeV] im Versuch
3-Komp.	Kolbenring-Chromlauf-fläche	Reaktor	^{51}Cr	$^{50}\text{Cr}(n, \gamma) ^{51}\text{Cr}$	27,8d	0,320 (9%)	0,27 - 0,36
	Kolbenring-flanken	Reaktor	^{59}Fe	$^{58}\text{Fe}(n, \gamma) ^{59}\text{Fe}$	45 d	1,095 (56%) 1,292 (44%)	1,00 - 1,38
	Ringträger-K. Nutflanke	Zyklotron, d	^{56}Co	$^{56}\text{Fe}(d, 2n) ^{56}\text{Co}$	77 d	0,511 (40% γ^{\pm}) 0,847 (100%)	0,75 - 0,94
1-Komp.	Kolbenring-flanke					1,04 (15%) 1,24 (66%)	0,44 - 1,35
	Einmetall-K. Nutflanke	Zyklotron, α	^{24}Na	$^{27}\text{Al}(\alpha, \alpha^3\text{He}) ^{24}\text{Na}$ $^{27}\text{Al}(\alpha, ^7\text{Be}) ^{24}\text{Na}$	15 h	1,369 (100%) 2,754 (100%)	1,20 - 1,52

Tafel 4. Kennwerte der Meßisotope

5. VERSUCHSEINRICHTUNG UND VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

5.1 Versuchsmotor

Die Verschleißversuche wurden mit einem luftgekühlten 6-Zylinder KHD-Dieselmotor vom Typ F 6 L 413 durchgeführt. Dieser Motortyp entstammt der Baureihe FL 413, die V-Motoren mit 6, 8, 10 und 12 Zylindern umfaßt. Für die gesamte Baureihe wird ein Einheitszylinder mit 1412 cm^3 Hubvolumen verwendet, alle Verschleißteile sind innerhalb der Baureihe gleich. Der Leistungsbereich liegt zwischen 170 PS beim einfachen 6-Zylinder und 500 PS beim aufgeladenen 12-Zylinder-Motor. Die wichtigsten Daten des Versuchsmotors sind folgende:

Hersteller:	Klöckner-Humboldt-Deutz AG, Köln
Typ:	F 6 L 413
Bauart:	V-Motor, einzeln aufgesetzte Zylinder
Zylinderzahl:	6
Bohrung/Hub:	120/125 mm
Hubvolumen:	8472 cm^3
Nennleistung:	170 PS
Nenndrehzahl:	2650 min^{-1}
Max.Drehmoment:	52 mKp bei 1600 min^{-1}
Arbeitsverfahren:	Viertakt
Verbrennungsverfahren:	Direkteinspritzung
Kühlung:	Luft
Schmierung:	Druckumlauf

Um ein Absetzen des radioaktiven Abriebs im Ölkreislauf des Motors soweit wie möglich zu verhindern, wurden folgende Änderungen gegenüber der serienmäßigen Ausführung des Motors vorgenommen:

1. Auf ein Ölfilter wurde verzichtet.
2. Die Ölwanne mit flachem Boden wurde durch eine Ölwanne mit stark geneigten Wänden ersetzt, an deren tiefster Stelle die Saugleitung des Meßkreislaufs angeschlossen war.

3. Der luftgekühlte Ölkühler mit engen Durchlässen wurde durch einen wassergekühlten Ölkühler mit glattem Röhrendurchfluß ersetzt. Diese Änderung war außerdem erforderlich, um die Öltemperatur unabhängig von Last und Drehzahl des Motors konstant halten zu können. Das gesamte Schmierölvolumen erhöhte sich hierdurch einschließlich dem des Meßkreislaufs auf 20 l. (Das Volumen von 20 l gilt für die Raumtemperatur von 20°C und erhöht sich bei der Betriebstemperatur von 100°C dem Wärmeausdehnungskoeffizienten des Schmieröls entsprechend um ca. 5%. Für die Bestimmung der Verschleißwerte muß daher in Gleichung (4) mit einem Ölvolumen von 21 l gerechnet werden.)

Das in den Versuchen eingesetzte Schmieröl war Shell Rotella S der Viskositätsklasse SAE 20 W 20, als Kraftstoff wurde handelsüblicher Dieselkraftstoff der Fa. BP verwendet.

5.2 Motorprüfstand und Meßkreislauf

Der Motor war mit der angekuppelten Wasserwirbelbremse auf einem Beton-Schwingfundament montiert und befand sich in einem vom Kontrollraum getrennten, aber überschaubaren Prüfraum. Über ein Zuluft- und ein Abluftgebläse konnte der Luftdurchsatz im Prüfraum von 0 - 20 000 m³/h geregelt werden, so daß die Raumtemperatur unabhängig vom Belastungszustand des Motors und von der Außentemperatur innerhalb eines bestimmten Temperaturbereiches gehalten werden konnte. Die Zuluft war gefiltert.

Da der Motor während der Versuchsläufe möglichst nicht angehalten werden sollte, wurde der Ölstand über einen an die Ölwanne angeschlossenen, am anderen Ende mit Kurbelgehäusedruck beaufschlagten Sichtschlauch kontrolliert. In einem Eichversuch wurden die bei den verschiedenen Drehzahlen und bei einer Öltemperatur von 100°C im Sumpf sich einstellenden Ölpegel für verschiedene Füllmengen markiert. Dieses Verfahren erlaubte während des Motorbetriebs eine Kontrolle des Ölvolumens im Motor und Meßkreislauf mit einer Genauigkeit von etwa $\pm 0,2$ l.

Frischöl konnte aus einem ebenfalls mit Kurbelgehäusedruck beaufschlagten, ca. 1 m über dem Ölniveau der Wanne stehenden Vorratsbehälter, der an die Ölwanne angeschlossen war, bei laufendem Motor nachgefüllt werden.

Der Meßölkreislauf wurde durch eine elektrisch angetriebene Zahnradpumpe versorgt, die bei den vorliegenden Betriebsbedingungen eine Förderleistung von ca. 9 l/min hatte. Der Meßkreislauf konnte so geschaltet werden, daß Ölkühler und Motorölkreislauf gefüllt und leergepumpt werden konnten. Ein Überströmventil verhinderte bei kaltem Öl einen zu großen Druckanstieg im Meßölbehälter. Der Aufbau des Durchflußmeßkopfes ist aus Bild 2 ersichtlich, den Aufbau des Motorprüfstands mit dem Meßkreislauf zeigt Bild 15.

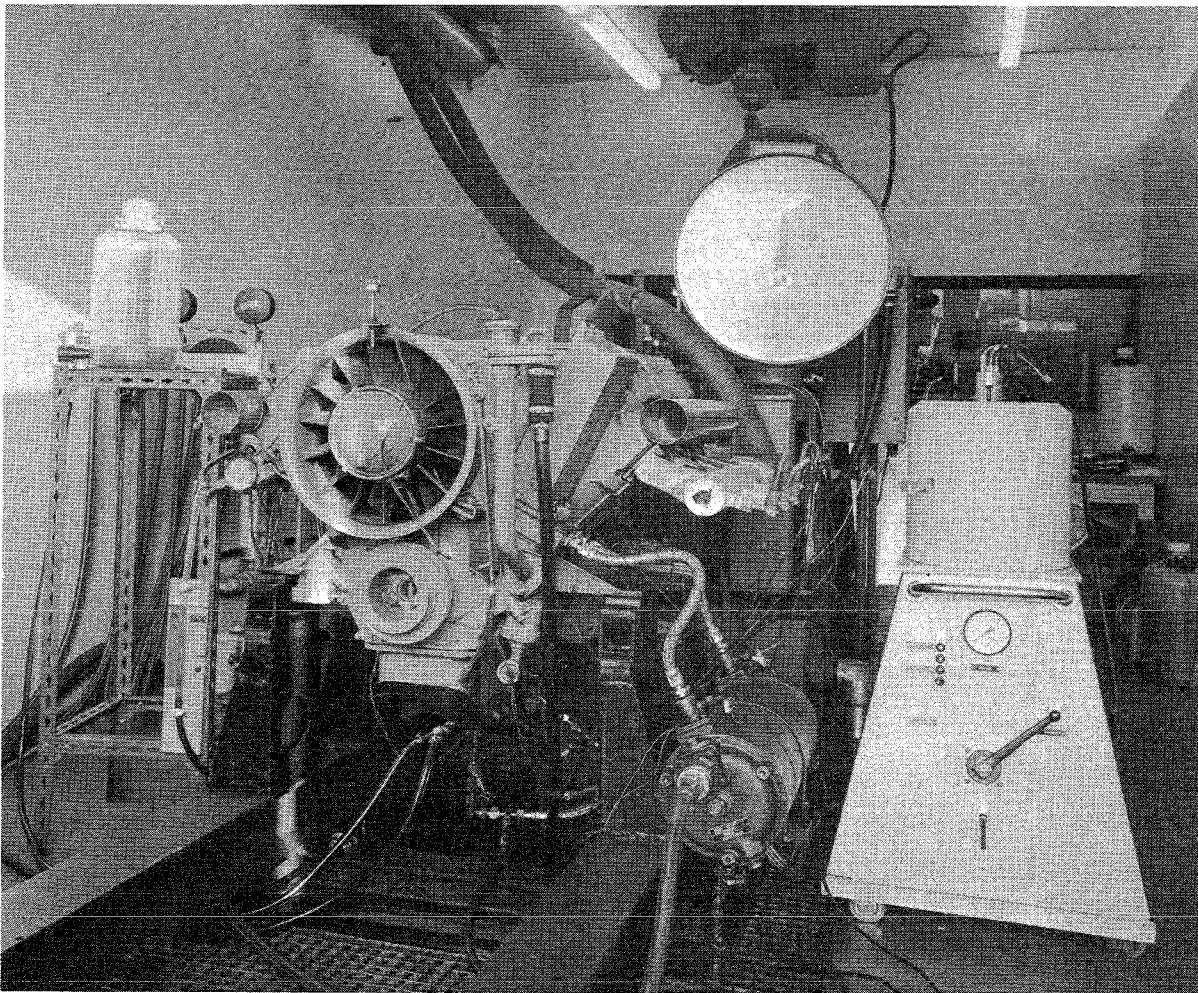


Bild 15. Motorprüfstand mit Meßkreislauf

Am Motor konnten folgende Meßwerte aufgenommen werden:

Drehzahl, Last, Einspritzmenge (Spez.Verbrauch), Durchblasemenge, Schmieröltemperatur am Kühlereintritt und Kühleraustritt, Temperaturen von Kühl- und Ansaugluft, Abgas- und Stegtemperaturen, Temperaturen der Zylinderrohre auf Zuluft- und Abluftseite, Kühlluftdruck, Öldruck und Ölstand.

Die Temperaturen wurden mit Eisen-Konstantan-Thermoelementen gemessen, die Durchblasemengen wurden mit einer an das Kurbelgehäuse angeschlossenen Gasuhr bestimmt.

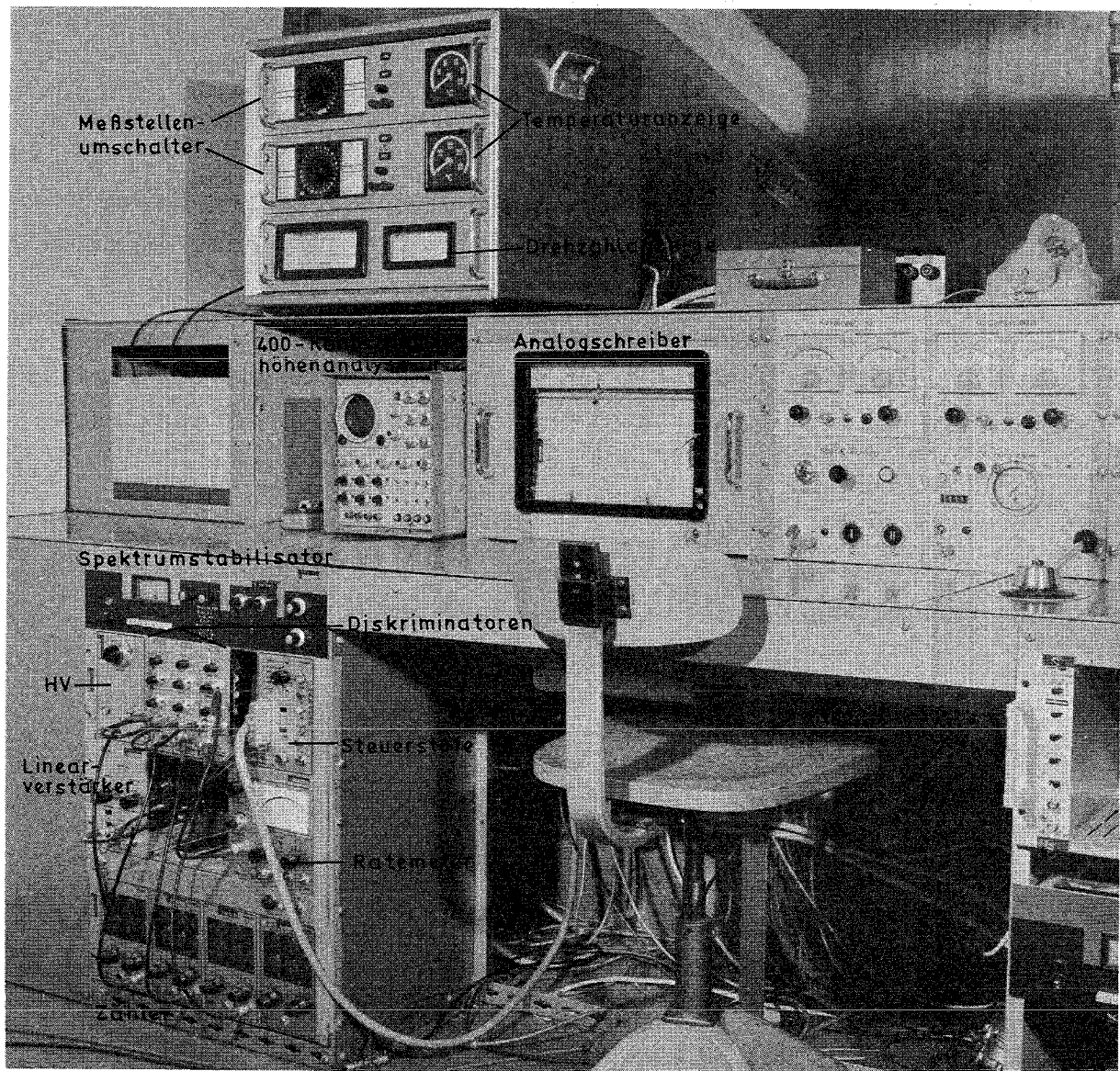


Bild 16. Meßraum mit Strahlenmeßplatz und Motorüberwachungsgeräten

Die Kontroll- und Registriergeräte waren in einem vom Prüfraum getrennten Meßraum aufgestellt oder konnten mit Ausnahme der Ölstandsanzeige vom Meßraum aus abgelesen werden. Auch die Drehzahl- und Lastverstellung war vom Meßraum aus möglich, die Regelung der Öltemperatur über den wassergekühlten Ölkühler erfolgte jedoch im Prüfraum. Die elektronischen Geräte für die Verschleißmessung waren mit Ausnahme des Rechners und der Datenausgabe ebenfalls im Meßraum aufgestellt. Die Anordnung der Motorüberwachungsgeräte sowie des Strahlenmeßplatzes im Meßraum zeigt Bild 16.

5.3 Versuchsdurchführung

5.3.1 Strahlenschutzmaßnahmen

Der Prüfraum war mit abwaschbaren, d.h. leicht dekontaminierbaren Wänden und einem entsprechenden Bodenbelag versehen, das Motorfundament war von einer Blechwanne umgeben, um eventuell auslaufendes radioaktiven Abrieb enthaltendes Öl aufzufangen. Prüf- und Meßraum waren als Kontrollbereich gekennzeichnet, die Strahlenbelastung der in diesem Bereich arbeitenden Personen wurde mit Dosimetern überwacht.

Die stärkste Strahlenbelastung trat bei der Montage der neutronenaktivierten Kolbenring auf, die eine Gesamtaktivität von etwa 100 mCi besaßen, aber trotzdem auch ohne Fernwerkzeuge und Bleischürzen eingebaut werden konnten. Für den Monteur lag dabei die Strahlenbelastung bei ca. 20 mr pro Montage, die den Ausbau eines gefahrenen und den Einbau eines neuen Kolbenrings umfaßte. Damit lag die Strahlenbelastung selbst bei den einmal durchgeführten vier Montagen innerhalb eines Monats noch um den Faktor 4 unter der gesetzlich zulässigen Dosisleistung von 400 mr pro Monat. Die Dosisleistung an der Oberfläche des Motors machte keine zusätzliche Abschirmung oder Absperrung erforderlich. Das Altöl mit dem radioaktiven Verschleiß wurde in Fässern gesammelt, die spezifische Aktivität lag jedoch immer unter den für Trinkwasser zulässigen Werten. Die Abgase konnten ungefiltert ins Freie abgeblasen werden, da die spezifischen Aktivitäten weit unterhalb der Freigrenze lagen.

Die Sauberkeit des Prüf- und Meßraumes wurde mit Wischproben überwacht, eine radioaktive Kontamination konnte jedoch in diesem Bereich nie festgestellt werden.

Die radioaktiven Versuchsteile wurden vor und nach den Versuchsläufen in einem Bleitresor aufbewahrt und nach entsprechendem Abklingen der Aktivität zusammen mit den nicht aktiven, aber möglicherweise kontaminierten Kolben und Zylinderrohren in einem Abstellraum gelagert. Die Teile waren jeweils in Plastikbeutel eingeschweißt.

5.3.2 Einbau der Versuchsteile

Nach dem Abschluß eines Versuchslaufes wurde das aktive Öl abgelassen und ein kurzer Lauf mit Spülöl durchgeführt, bevor die neuen Versuchsteile eingebaut und frisches Öl eingefüllt wurde. Der Einbau der Versuchsteile erfolgte jeweils im 6. Zylinder, da dieser am einfachsten zu montieren war. Die eingebauten Kolben wurden komplett neu bestückt, die Zylinderrohre waren ebenfalls bei jedem Versuchslauf neu.

5.3.3 Versuchsprogramme

5.3.3.1 Ringträgerkolben-Versuche

Die zunächst durchgeführten 3-Komponenten-Versuche mit den Ringträgerkolben wurden nach folgendem Programm gefahren:

- a) 2,5 Stunden Einlauf mit wachsenden Drehzahlen und Lasten (Bild 17).
- b) 9 Stunden Vollast bei 2650 U/min (Nennleistung).
- c) 10 Stunden Vollast, davon je 2 Stunden bei 2800, 2650, 2200, 1600, 1200 U/min.
- d) 10 Stunden Viertellast, davon je 2 Stunden bei 2800, 2650, 2200, 1600, 1200 U/min.
- e) 2 Stunden Wiederholung von Abschnitt b) - Vollast und 2650 U/min - um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse innerhalb eines Laufes zu überprüfen.

Die Dauer eines Laufes betrug damit 33,5 Stunden, die

möglichst ohne Unterbrechung durchgefahren werden sollten.

Die Öltemperatur am Kühlereintritt, die etwa der Temperatur im Ölsumpf entsprach, wurde nach dem Einlauf für alle Betriebszustände auf ca. 100°C gehalten. Die in Abschnitt 5.2 genannten Meßwerte wurden mit Ausnahme der alle 2 Minuten automatisch aufgezeichneten Durchblasemenge stündlich kontrolliert und aufgezeichnet.

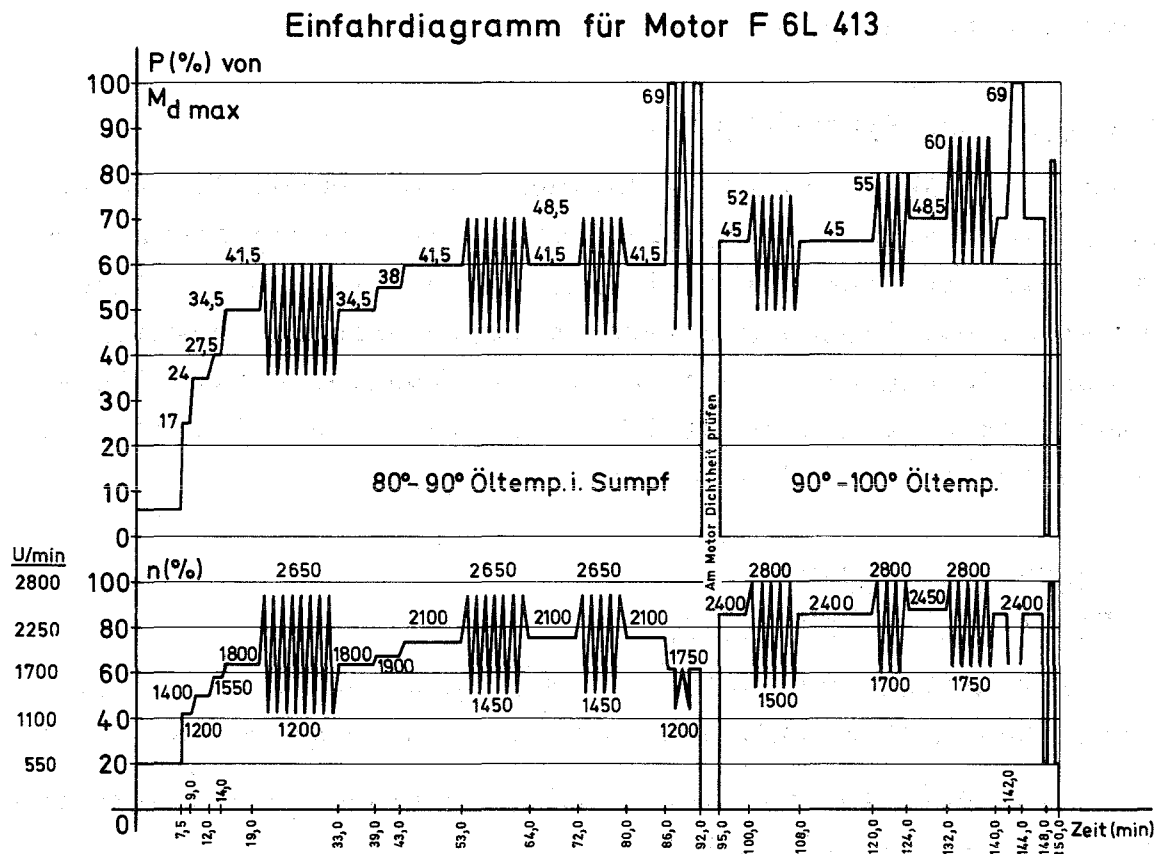


Bild 17.

Die Zählzeiten für die Verschleißbestimmung wurden zunächst auf 4 Minuten festgesetzt, dann jedoch auf 10 Minuten erhöht, da der erste Versuch zeigte, daß hierdurch ohne einen Informationsverlust die Genauigkeit erhöht werden konnte.

5.3.3.2 Einmetallkolben-Versuche

Die Ringträgerkolben-Versuche hatten gezeigt, daß ein

unterschiedliches Verschleißverhalten verschiedener Versuchsteile auch mit einer geringeren Zahl gefahrener Drehzahlen eindeutig festgestellt werden kann, konstante Verschleißraten aber z.T. erst 1 - 1,5 Stunden nach dem Einstellen eines neuen Betriebszustandes erreicht werden. Daher wurden die Einmetallkolben-Versuche nur noch mit zwei verschiedenen Drehzahlen gefahren, die Dauer der einzelnen Betriebszustände jedoch von zwei auf drei Stunden erhöht. Zusätzlich wurde jeder Betriebspunkt zweimal gefahren, um eine bessere Aussage über die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu erhalten. Damit ergab sich folgendes Versuchsprogramm:

- a) 2,5 Stunden Einlauf (Bild 17).
- b) 9 Stunden Vollast bei 2650 U/min.
- c) Jeweils 3 Stunden Vollast und 3 Stunden Viertellast bei 2650 U/min und bei 1600 U/min.
- d) Wiederholung von Abschnitt c).

Die Gesamtzeit pro Versuchslauf erhöhte sich damit auf 35,5 Stunden. Die Kontrolle und Aufzeichnung der Meßwerte erfolgte wie bei den Ringträgerkolben-Versuchen.

Die Einmetallkolben-Versuche sollten ursprünglich als Zwei-Komponenten-Messungen durchgeführt werden. Der Verschleiß der Ring- und der Nutflanken wurde jedoch aus folgenden Gründen in getrennten Ein-Komponenten-Messungen bestimmt: Wegen der kurzen Halbwertszeit des ^{24}Na von 15 Stunden mußten die Nutflanken so stark aktiviert werden, daß auch am Ende der Versuchszeit, d.h. fast drei Halbwertszeiten nach Bestrahlungsende, noch eine ausreichend hohe spezifische Aktivität der Nutflanken vorhanden war. Dadurch hätte sich aber zu Beginn der Versuche eine sehr starke Einstreuung in den ^{56}Co -Zählbereich des Ringflankenverschleißes ergeben. Da außerdem in einer Zwei-Komponenten-Messung nur der 0,847-MeV-Peak des ^{56}Co für die Bestimmung des Ringflankenverschleißes gezählt wird, hätte sich zum Zeitpunkt der maximalen ^{24}Na -Zählrate, die etwa 16 Stunden nach Verschleißbeginn erreicht wurde, der relative statistische Fehler der ^{56}Co -Zählrate von 1,8% in einer Ein-Komponenten-

Messung auf 5,3% in einer Zwei-Komponenten-Messung erhöht! Hierbei wird eine Aktivierung von Kolbenring und Nutflanke mit je 10 μAh angenommen und ein Verschleiß von 2 mg der Nutflanke (^{24}Na) und 1,3 mg der Ringflanke (^{56}Co) 12 Stunden nach Versuchsbeginn. Der relative statistische Fehler der ^{24}Na -Zählrate hätte sich wegen der geringen ^{56}Co -Einstreuung nur unwesentlich erhöht, und zwar am stärksten zu Versuchsende von 1,17% auf 1,23%.

Die Vergrößerung des oben angegebenen relativen statistischen Fehlers der ^{56}Co -Zählraten hätte durch eine entsprechend höhere spezifische Aktivität der Ringflanken ausgeglichen werden können, was etwa dreifache Bestrahlungszeit erfordert hätte. Da jedoch das Karlsruher Zyklotron während der Durchführung der Einmetallkolben-Versuche erhebliche Ausfallzeiten hatte und die zur Verfügung stehenden Bestrahlungszeiten entsprechend knapp bemessen waren, wurden die Versuche als Ein-Komponenten-Messungen durchgeführt.

6. V E R S U C H S E R G E B N I S S E

6.1 Einfluß von Ölverbrauch und Verschleißverlust auf den im Öl nachgewiesenen Verschleiß

Für die Bestimmung der Verschleißmengen nach Gl.(6) wird ein konstantes Ölvolumen vorausgesetzt. Der Ölverbrauch des Motors hat jedoch eine kontinuierliche Volumenverringerung zur Folge, so daß der nach Gl.(6) bestimmte Verschleiß zu hoch wäre. Da aber gleichzeitig ein möglicher Verschleißverlust in Gl.(6) auch nicht berücksichtigt wird, muß zunächst festgestellt werden, wie stark die nach Gl.(6) ermittelten Ergebnisse durch die beiden gegenläufigen Einflüsse Ölverbrauch und Verschleißverlust verfälscht werden und ob eine Korrektur der Ergebnisse notwendig ist.

Ein Verlust von Verschleißpartikeln kann durch folgende Effekte auftreten:

1. Verschleiß kann in die Abgasleitungen gelangen, bevor er in den Ölkreislauf kommt.
2. Im Ölkreislauf können Ablagerungen auftreten.
3. Mit dem verbrauchten Öl kann Verschleiß dem Ölkreislauf entzogen werden.

Für den wirklich entstandenen Verschleiß gilt:

$$M(t) = M_{\text{Öl}}(t) + M_{\text{V}}(t) \quad (9)$$

mit M = wirklicher Gesamtverschleiß zur Zeit t

$M_{\text{Öl}}$ = im Öl vorhandener Verschleiß zur Zeit t

M_{V} = gesamter Verschleißverlust zur Zeit t

Zur Zeit $t + dt$ gilt dann:

$$M + dM = M_{\text{Öl}} + dM_{\text{Öl}} + M_{\text{V}} + dM_{\text{V}} \quad (10)$$

$$dM = dM_{\text{Öl}} + dM_{\text{V}} \quad (11)$$

Um eine Aussage über den wirklichen Verschleiß in Abhängigkeit von dem im Öl vorhandenen Verschleiß machen zu können, muß der

Verschleißverlust bekannt sein. Setzt man den Teil des direkt in die Abgasleitungen gelangenden Verschleißes als vernachlässigbar voraus, so läßt sich der Verschleißverlust durch einen Blindversuch feststellen: die radioaktiven Verschleißteile werden durch inaktive Teile ersetzt, so daß eine Zählratenänderung des aktiven Öls nur auf Ablagerungen, Verschleißverlust mit verbrauchtem Öl und eine Volumenänderung zurückzuführen ist.

Dann gilt mit $dM = 0$ nach Gl.(11):

$$dM_V = -dM_{\text{Öl}} \quad (12)$$

Die Blindversuche wurden bis zu einem Ölverbrauch von 3 l, d.h. auf das Ausgangsvolumen $V_0 = 21$ l bezogen ca. 14%, durchgeführt und ergaben innerhalb des statistischen Fehlers von 0,5% keine Zählratenänderung. Demnach entspricht der Verschleißverlust der durch den Ölverbrauch bedingten Konzentrationserhöhung der radioaktiven Verschleißpartikel im Öl. Daraus kann man schließen, daß der Verschleißverlust durch Ablagerungen wahrscheinlich ebenfalls vernachlässigt werden kann und Verschleiß den Ölkreislauf fast ausschließlich mit verbrauchtem Öl verläßt.

Für die weitere Rechnung ist lediglich das Ergebnis der Blindversuche von Bedeutung, daß die Zählrate konstant und damit vom Ölverbrauch unabhängig ist.

Wird bei der Bestimmung der Verschleißmenge nach Gl.(6) die Abnahme des Ölvolumens durch den Ölverbrauch nicht berücksichtigt, so gilt für die Menge des wirklich im Öl vorhandenen Verschleißes:

$$M_{\text{Öl}} = M_g \cdot \frac{V}{V_0} \quad (13)$$

mit M_g = Menge des gemessenen scheinbaren Verschleißes ohne Berücksichtigung der Volumenänderung zur Zeit t

V = Ölvolumen zur Zeit t

V_0 = Anfangsölvolumen, das dem in Gl.(6) eingesetzten Wert entspricht.

Mit dem Ergebnis der Blindversuche

$$M_g = M_{\dot{O}l} \cdot \frac{V_o}{V} = \text{const.} \quad (14)$$

gilt dann:

$$dM_V = -dM_{\dot{O}l} = -\frac{M_g}{V_o} \cdot dV \quad (15)$$

$$dM_V = -M_{\dot{O}l} \cdot \frac{dV}{V} \quad (16)$$

und mit Gl.(11):

$$dM_{\dot{O}l} = dM + M_{\dot{O}l} \cdot \frac{dV}{V} \quad (17)$$

Das Verschleißverhalten der verschiedenen Versuchsteile sollte nur für die Bereiche konstanter Betriebsbedingungen des Motors und konstanter Verschleißraten dM/dt verglichen werden, so daß Verschleiß und Ölvolumen als lineare Funktionen der Zeit vorausgesetzt werden können. Mit den Anfangsbedingungen $M(t=0)=0$ und $V(t=0)=V_o$ gilt dann:

$$M = m \cdot t \quad (18)$$

mit $\frac{dM}{dt} = m = \text{const.}$ (Verschleißrate) (19)

$$V = V_o - v \cdot t \quad (20)$$

mit $\frac{dV}{dt} = -v = \text{const.}$ (=Ölverbrauchsrate) (21)

und mit Gl.(17):

$$dM_{\dot{O}l} = m \cdot dt - M_{\dot{O}l} \cdot \frac{v \cdot dt}{V_o - v \cdot t} \quad (22)$$

$$\frac{dM_{\dot{O}l}}{dt} + \frac{v}{V_o - v \cdot t} \cdot M_{\dot{O}l} = m \quad (23)$$

mit $M_{\dot{O}l} = y, \quad \frac{v}{V_o - vt} = P(t)$ (24)

erhält man die lineare Differentialgleichung 1. Ordnung (23) in der Form:

$$y' + P(t) \cdot y = m \quad (25)$$

Nach [26] gilt dann:

$$y = e^{-\int P dt} \left(\int m e^{\int P dt} dt + C \right) \quad (26)$$

$$\text{mit } \int P dt = \int \frac{v}{V_0 - vt} dt = -\ln(V_0 - vt) \quad (27)$$

(Die Integrationskonstante von Gl.(27) ist in Gl.(26) berücksichtigt.)

$$\text{Mit } \exp(-\int P dt) = V_0 - vt \quad (28)$$

folgt aus Gl.(26):

$$y = (V_0 - vt) \cdot \left(\int \frac{m}{V_0 - vt} dt + C \right) \quad (29)$$

$$y = M_{\dot{O}l} = (V_0 - v \cdot t) \cdot \left(C - \frac{m}{v} \ln(V_0 - vt) \right) \quad (30)$$

Mit der Anfangsbedingung $M_{\dot{O}l}(t=0) = 0$ folgt

$$C = \frac{m}{v} \ln V_0 \quad (31)$$

$$M_{\dot{O}l} = \frac{m}{v} (V_0 - vt) \cdot \ln \frac{V_0}{V_0 - vt} \quad (32)$$

und mit Gl.(14) und Gl.(16)

$$M_{\dot{O}l} = \frac{V}{V_0 - V} \cdot \ln \frac{V_0}{V} \cdot M \quad (33)$$

In den Versuchen sollte der Ölverbrauch bei einer Volumenabnahme von 10% des Ausgangsvolumens, d.h. $\frac{V}{V_0} = 0,9$, ergänzt werden, so daß dann gilt:

$$M_{\dot{O}l} = 9 \cdot \ln \frac{1}{0,9} \cdot M = 0,9479 M \quad (34)$$

Damit würde sich bei Einsetzen des wirklich vorhandenen Öl-

volumens in Gl. (6) der ermittelte Verschleiß bei einem Ölverlust von 10% des Anfangsvolumens um 5,21% zu niedrig ergeben.

Für den ohne Berücksichtigung der Volumenänderung bestimmten Verschleiß M_g gilt mit Gl. (13) und (30) bei dem gleichen Ölverlust:

$$M_g = \frac{V_o}{V_o - V} \cdot \ln \frac{V_o}{V} \cdot M \quad (35)$$

$$M_g = 10 \cdot \ln \frac{1}{0,9} \cdot M = 1,0532 M \quad (36)$$

In diesem Fall wäre der gemessene Verschleiß also um 5,32% zu hoch.

Nach Gl. (30) kann der wirkliche Verschleiß als $M = M(M_{\dot{O}l})$ für jeden Versuchspunkt berechnet werden, wenn die Funktion $V = V(t)$ vorgegeben ist. Der Ölverbrauch und damit $V(t)$ können jedoch nur näherungsweise für die Bereiche konstanter Drehzahlen und Lasten angegeben werden, eine kontinuierliche Messung des Ölvolumens und die Eingabe der Werte in den Rechner wurden als zu aufwendig für die erzielbare Verbesserung der Ergebnisse betrachtet. Daher wurde die Auswertung ohne Berücksichtigung der Volumenänderung und des Verschleißverlustes durchgeführt und der Fehler von bis zu ca. 5% in Kauf genommen. Beim Vergleich der Ergebnisse der verschiedenen Versuche untereinander kann jedoch der Fehler mit nur ca. 1% geschätzt werden, da nur die Versuchsbereiche mit gleichen Drehzahlen und Lasten verglichen werden sollten und der Ölverbrauch in diesen Bereichen für die verschiedenen Versuchsläufe als annähernd gleich angenommen werden kann.

Die Gleichungen (33) und (35) wurden mit der Anfangsbedingung $M_{\dot{O}l}(t=0) = 0$ gefunden. Für die Zeitintervalle Δt zwischen den Zeitpunkten des Ölnachfüllens gilt dann für die Änderung der Verschleißmenge

$$\Delta M_{\dot{O}l} = \frac{V}{V_o - V} \cdot \ln \frac{V_o}{V} \cdot \Delta M \quad (37)$$

$$\Delta M_g = \frac{V_o}{V_o - V} \cdot \ln \frac{V_o}{V} \cdot \Delta M \quad (38)$$

6.2 Ergebnisse der Ringträgerkolben-Versuche

Die während der Versuchsläufe nach Gl.(6) vom Rechner ermittelten Gesamtverschleißwerte wurden im Anschluß an die Versuche über der Versuchszeit aufgetragen, die Kurven der in den Bildern 18 - 22 dargestellten Ringträgerkolben-Diagramme wurden visuell durch die eingezeichneten Meßpunkte gelegt. Der Verschleißmaßstab wurde dem in den einzelnen Versuchsläufen erzielten Gesamtverschleiß entsprechend gewählt und ist daher nicht in allen Diagrammen gleich! Die Bezeichnungen "R 3,0" und "Tr 3,5" kennzeichnen die 3 mm hohen Rechteckringe und die 3,5 mm hohen Doppeltrapezringe, bzw. die entsprechenden Nutformen, die in Klammern gesetzten Bezeichnungen geben die Nummern der eingebauten aktivierten Teile an.

Neben den Motorbetriebszuständen und den Zeitpunkten des Ölnachfüllens sind in den Diagrammen auch die Bereiche und die Werte der konstanten Verschleißraten eingetragen, die aus den Steigungen der Gesamtverschleißkurven graphisch ermittelt wurden.

Der in Bild 18 dargestellte Versuch wurde nicht als 3-Komponenten-Versuch durchgeführt, da die spezifische Aktivität der bestrahlten Nut-Flanke wegen eines falsch eingestellten Bestrahlungswinkels im Zyklotron viel zu niedrig war. Da ein Termin für eine erneute Bestrahlung unsicher war, wurde der Versuch zunächst nur mit dem aktiven Kolbenring und einem Kolben mit nicht aktivierter Nutflanke als 2-Komponenten-Messung durchgeführt. Der Verschleiß der Nutflanke wurde in einem späteren 1-Komponenten-Versuchslauf bestimmt, nachdem die ursprünglich zu gering aktivierte Nutflanke ein zweites Mal bestrahlt worden war.

Der in Bild 20 gezeigte Versuchslauf mit dem Doppeltrapezring ergab nach dem Einlaufprogramm mit Beginn des Vollast-Laufes eine extrem hohe Verschleißrate der verchromten Ringlauffläche. Die Verschleißrate sank zwar nach zwei 10-minütigen Leerlaufperioden von 11 mg/h auf 5 mg/h, war damit aber immer noch so hoch, daß ein Fressen des Rings befürchtet wurde. Daher wurde der Versuchslauf unterbrochen und nach einem Öl-

wechsel mit einem neuen Einlauf fortgesetzt.

In einem Vorversuch, dessen Ergebnisse in Bild 22 dargestellt sind, sollte geklärt werden, wie hoch die Verschleißraten der einzelnen Versuchsteile bei den verschiedenen Betriebsbedingungen in etwa lagen und welche spezifischen Aktivitäten daher erforderlich wären. Die spezifischen Aktivitäten von Nutflanke und Ringflanken waren jedoch wegen der kurzen Bestrahlungszeiten so niedrig, daß keine Aussage über den Verschleiß dieser Teile gemacht werden konnte. Da außerdem nach dem Versuchslauf eine mangelhafte Bonderung der Zylinderbüchsen festgestellt wurde, kann auch der Laufflächenverschleiß des Kolbenrings, der gemessen werden konnte, nicht als aussagekräftig betrachtet werden. Das Ergebnis dieses Vorversuches wird jedoch trotzdem gezeigt, da auch hier die extreme Chrom-Verschleißrate mit Beginn des Vollastlaufes auftrat.

Auch in einem vierten Versuchslauf mit einem Doppeltrapezring trat nach dem Einlaufprogramm eine extrem hohe Chromverschleißrate von 4,6 mg/h auf, die nach einem Ölwechsel und einer Einlaufwiederholung aber ebenfalls stark abnahm und nach 6 Stunden Laufzeit mit 2650 U/min und Vollast nur noch 200 µg/h betrug. Wegen des defekten Impulszählers für die ⁵⁶Co-Zählrate konnten jedoch die Verschleißwerte von Nutflanke und Ringflanken nicht gemessen werden, und da außerdem eine gebrochene Meßölleitung einen Abbruch des Versuchs erforderte, wird auf die Darstellung der Ergebnisse als Verschleißkurve verzichtet. Die gemessenen Chrom-Verschleißratenwerte werden jedoch in Tafel 5 aufgeführt.

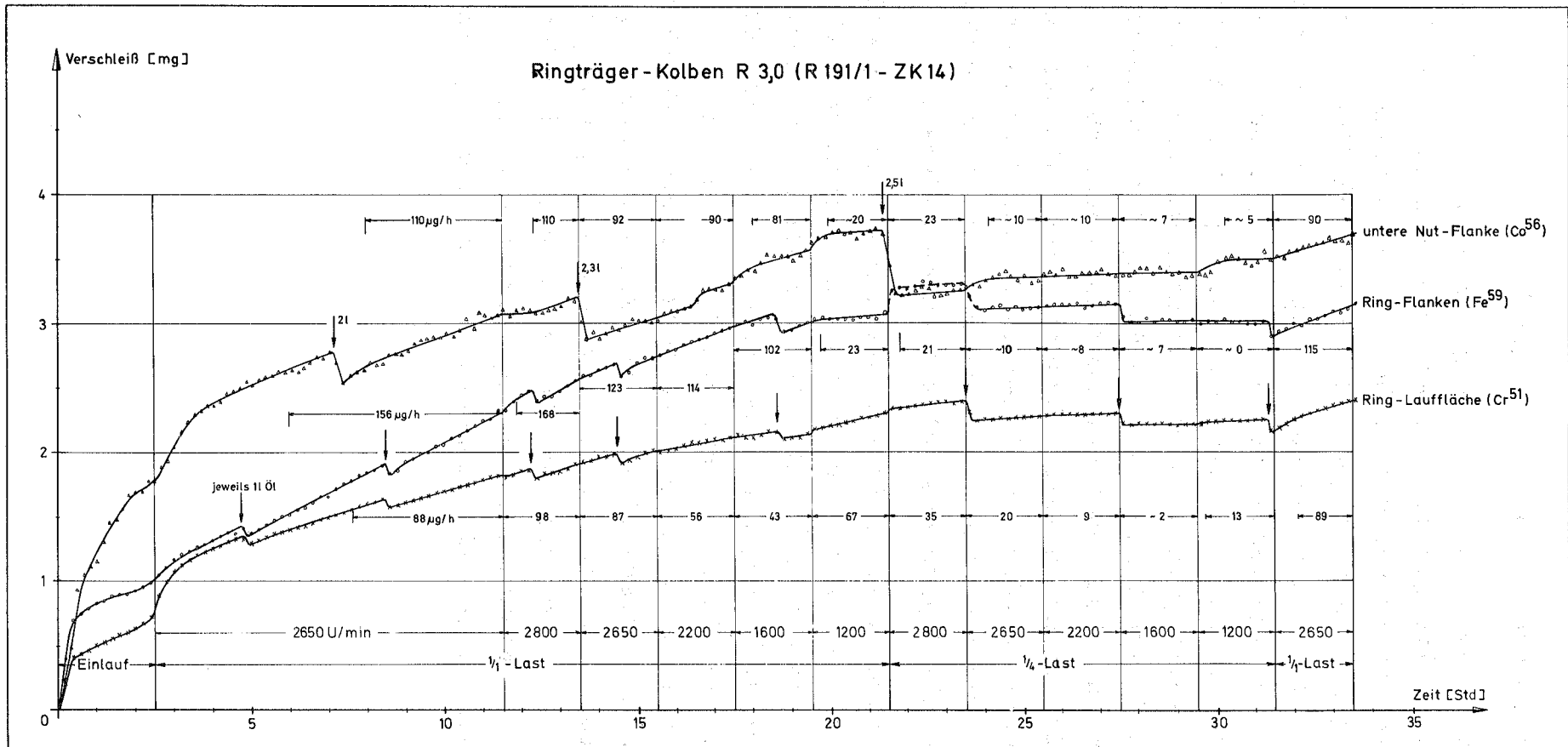


Bild 18.

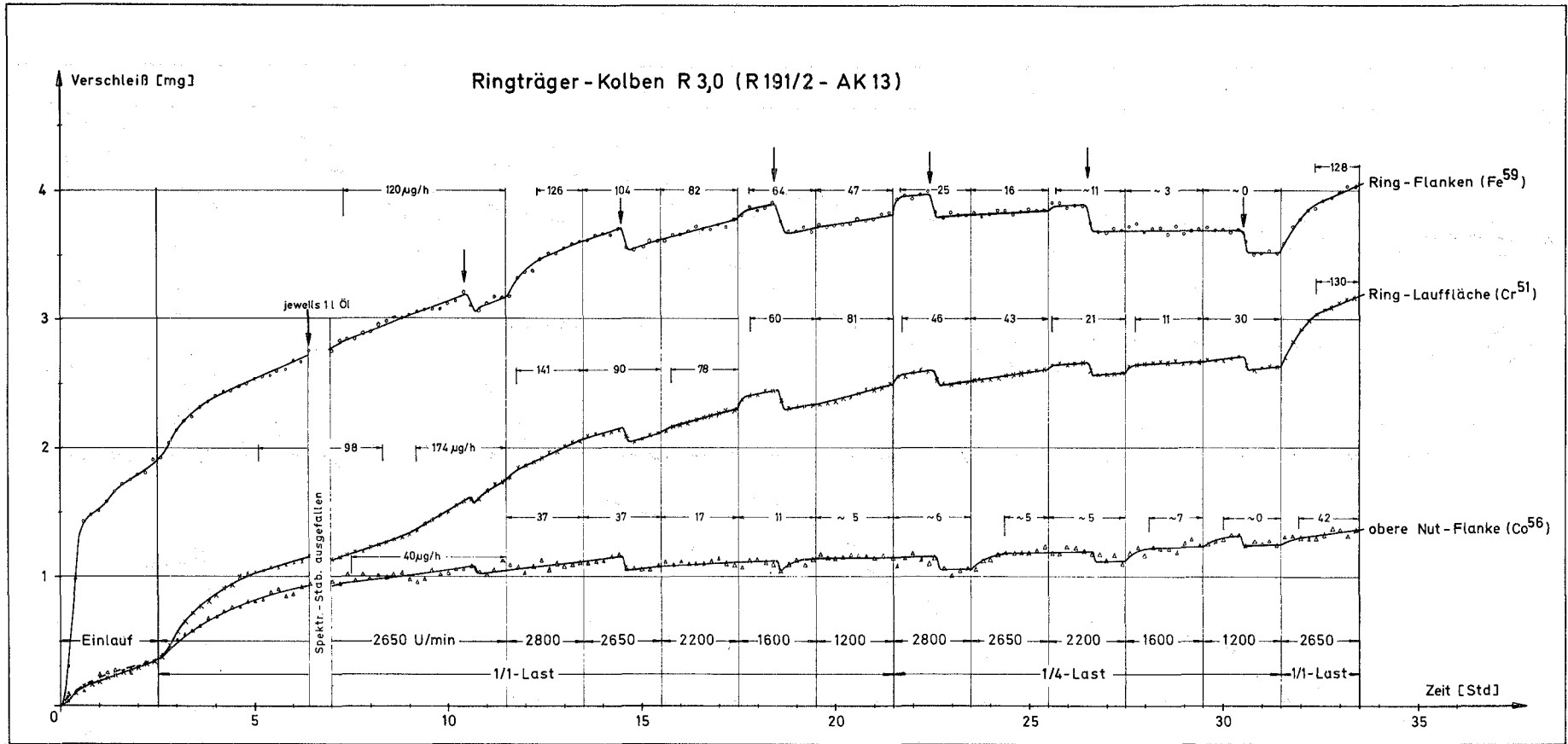


Bild 19.

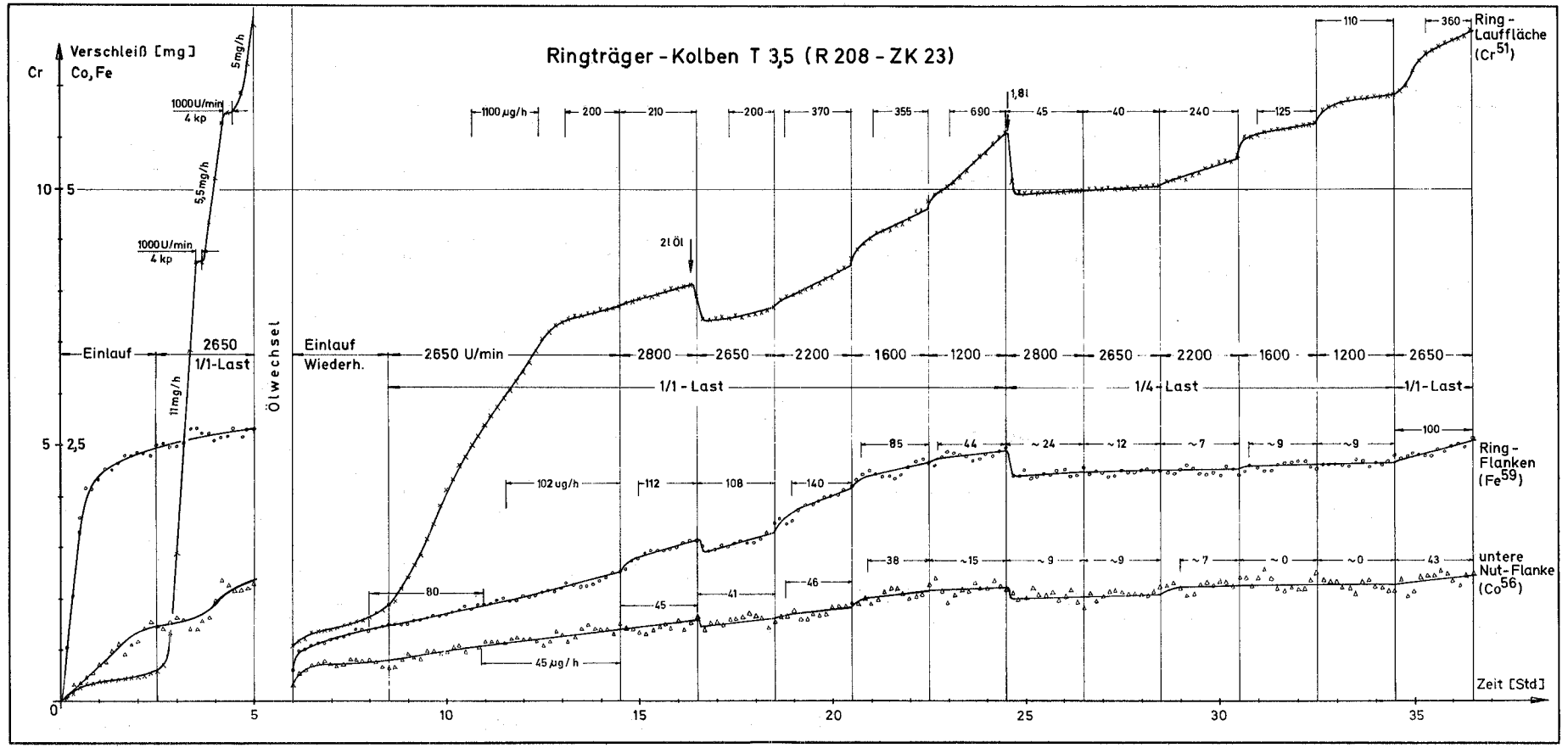


Bild 20.

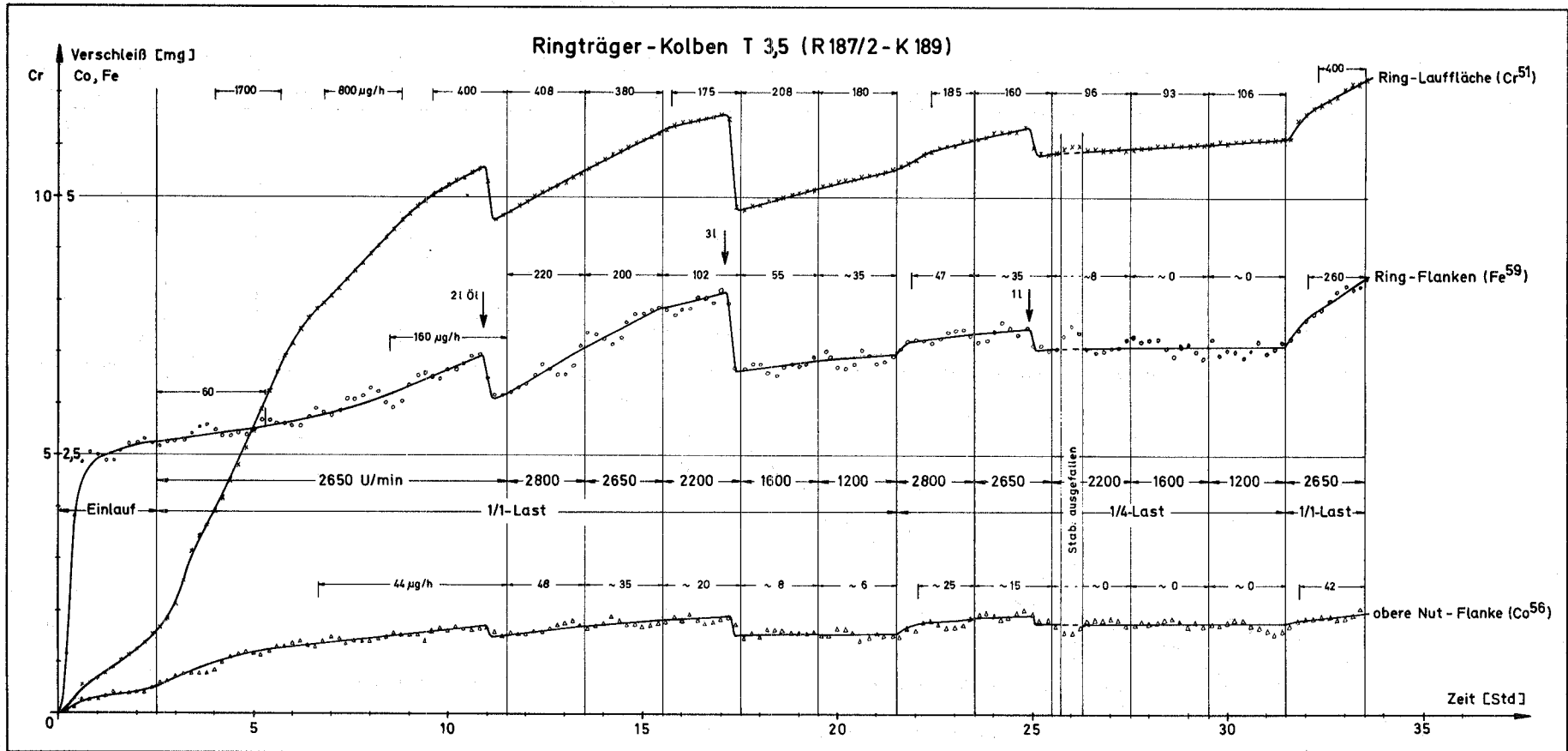


Bild 21.

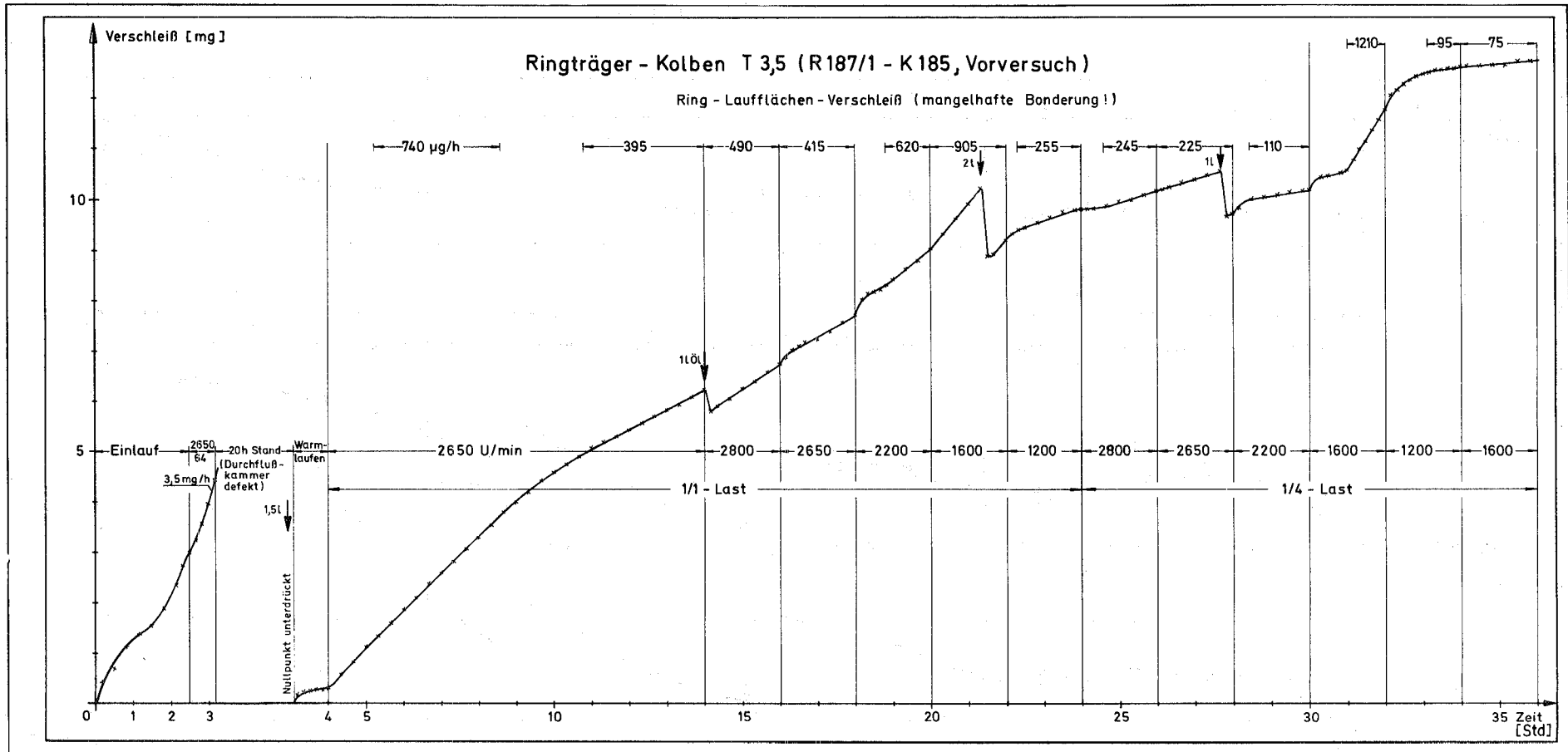


Bild 22.

6.3 Ergebnisse der Einmetallkolben-Versuche

Das Versuchsprogramm der Einmetallkolben-Versuche wurde gegenüber dem der Ringträgerkolben-Versuche geändert (s.5.3.3.2), die Darstellung der Ergebnisse und die Ermittlung der Verschleißraten wurden jedoch beibehalten.

Die Verschleißraten der Nutflanken und der Ringflanken lagen im letzten Betriebspunkt bei 1600 U/min und 17,5 kp Bremslast (=Viertellast) z.T. so niedrig, daß sie in einigen Versuchen auf Grund der statistischen Streuungen nicht mehr nachgewiesen werden konnten. Daher wurde dieser letzte Betriebspunkt in diesen Versuchen nur 1,5 oder 2 Stunden gefahren.

6.3.1 Nutflanken-Verschleiß

Die in den Versuchen gewonnenen Ergebnisse über den Einmetallkolben-Nutflankenverschleiß zeigen die Diagrammeder Bilder 23 - 28. Die Zählzeiten wurden in einigen Versuchen von 10 auf 20 Minuten erhöht, um die statistischen Fehler nicht zu groß werden zu lassen.

In einem zunächst durchgeführten Testlauf, dessen Ergebnis Bild 23 zeigt, sollte festgestellt werden, ob die auftretenden Nutflanken-Verschleißraten auch die Verwendung des langlebigen ^{22}Na als Meßisotop gestatteten, ohne daß die damit erforderlichen Bestrahlungszeiten zu lang würden.

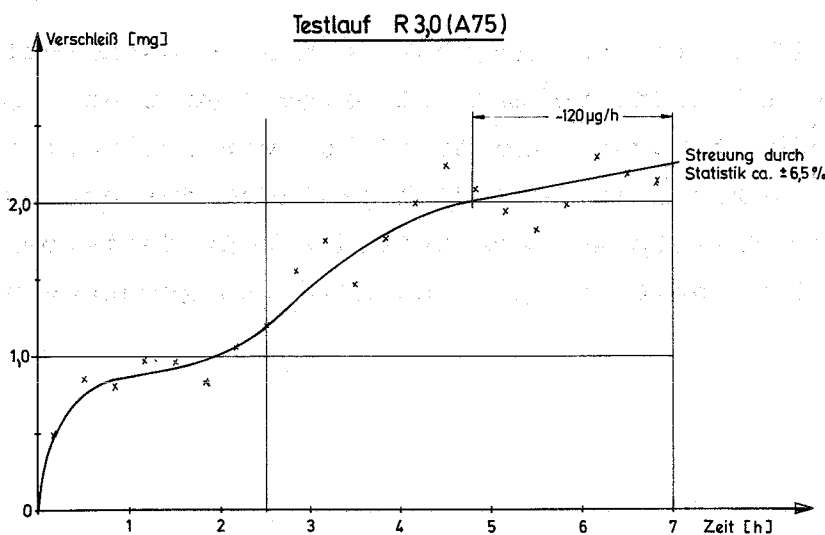


Bild 23. Einmetallkolben, untere Nutflanke

Obwohl die Nutflanke mit einem Stromintegral von $30 \mu\text{Ah}$ aktiviert worden war, wiesen die durch die geringe spezifische Aktivität und den geringen Verschleiß bedingten niedrigen Zählraten selbst bei den 20-minütigen Zählzeiten zu große statistische Schwankungen auf, um eine genügend genaue Aussage über die Verschleißrate machen zu können. Der Verlauf des Gesamtverschleißes weist jedoch trotzdem eine gute Übereinstimmung mit dem in Bild 24 gezeigten Ergebnis auf, das mit ^{24}Na als Meßisotop gewonnen wurde.

In Bild 24 werden die Ergebnisse von zwei Versuchsläufen in einem Diagramm dargestellt, wobei der Lauf mit dem Kolben A 131 eine Wiederholung des mit dem Kolben A 104 gefahrenen Versuches (Bild 25) war. Dieser Versuch (A 104) wurde wiederholt, da wegen des defekten Bestrahlungsapparates ein sehr ungleichmäßiger Verlauf der spezifischen Aktivität der Nutflanke in radialer Richtung erzielt worden war, und zwar stieg die spezifische Aktivität von der Außenkante der Nutflanke bis zum Nutgrund auf den dreifachen Wert an. Da ein gleichmäßiger Verschleiß der Nutflanken in radialer Richtung nicht vorausgesetzt werden kann, bedeutet die ungleichmäßige spezifische Aktivität der Nutflanke eventuell eine Verfälschung des gemessenen Verschleißes. Die beiden Versuchsläufe zeigten jedoch Ergebnisse von guter Übereinstimmung, so daß zumindest für die gefahrenen Versuchszeiten mit einem in radialer Richtung relativ gleichmäßigen Verschleiß der oberen Nutflanke gerechnet werden kann.

In Bild 28 ist das Ergebnis eines Versuchslaufes dargestellt, der mit einem Kolben mit einer 4 mm hohen Doppeltrapeznut durchgeführt wurde. Dieser Kolben war irrtümlich bestrahlt worden, der Versuch wurde jedoch trotzdem durchgeführt, da zumindest eine weitere Aussage über die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse innerhalb eines Versuchslaufes gewonnen werden konnte.

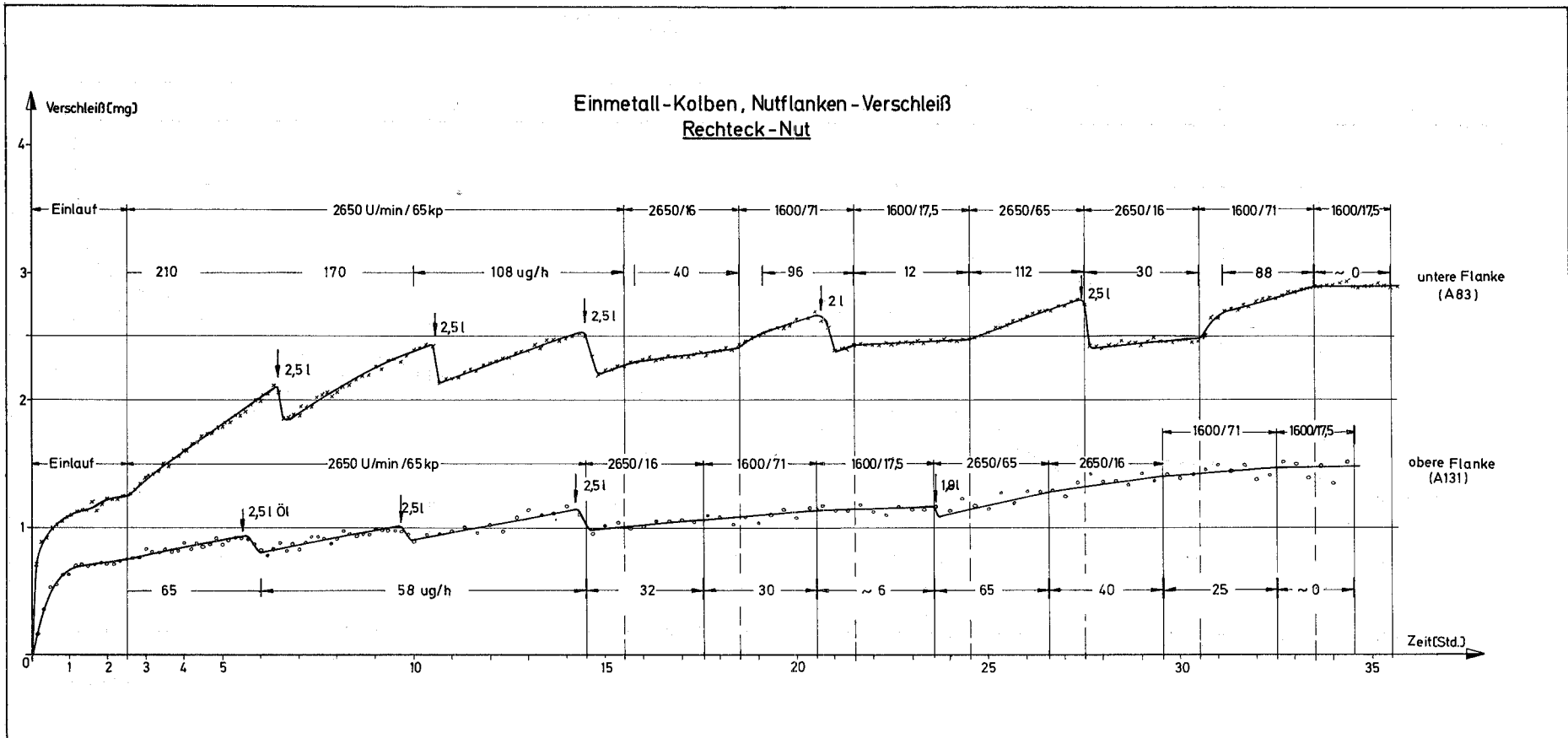


Bild 24.

Einmetall - Kolben, Nutflanken - Verschleiß
 Rechteck-Nut (obere Flanke, A 104)

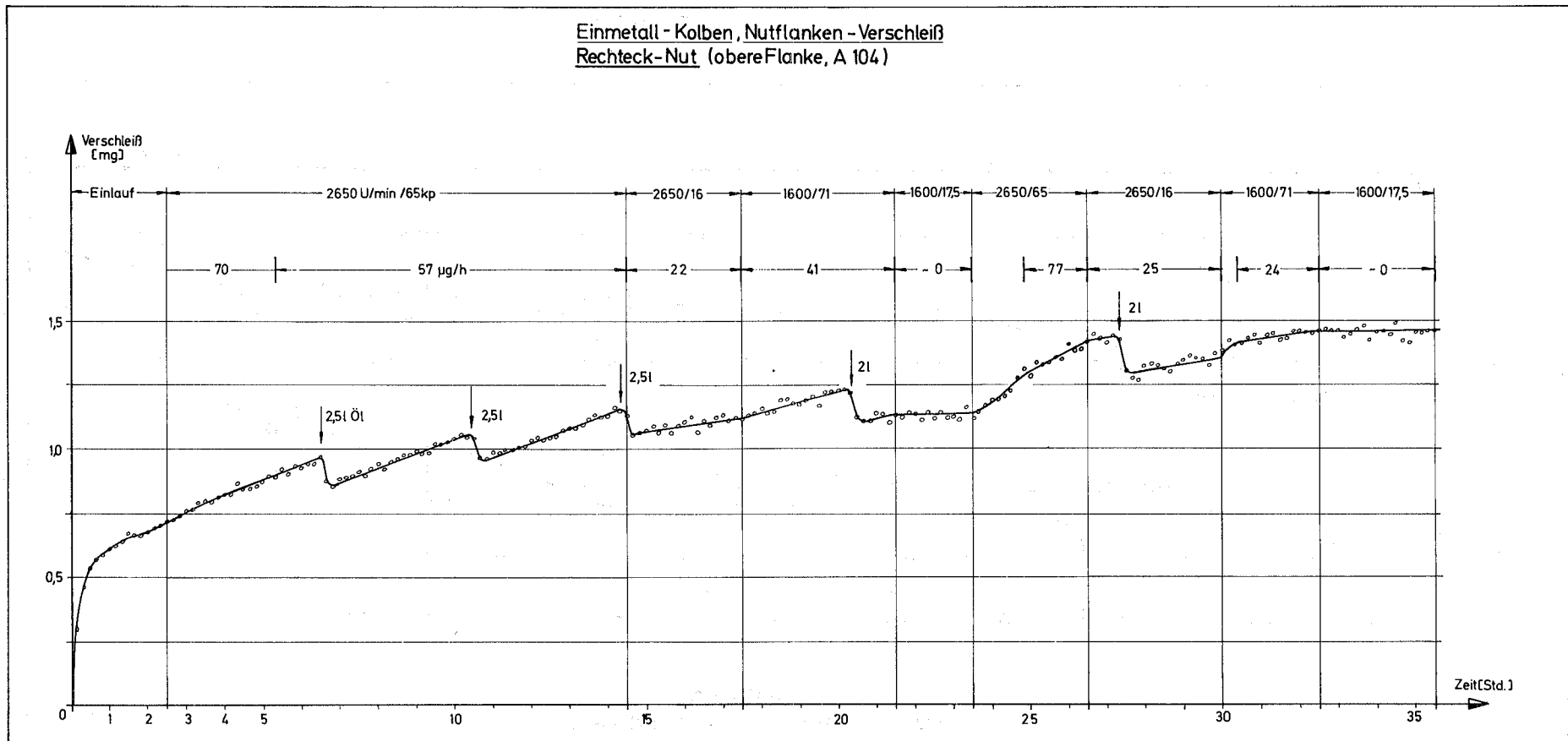


Bild 25.

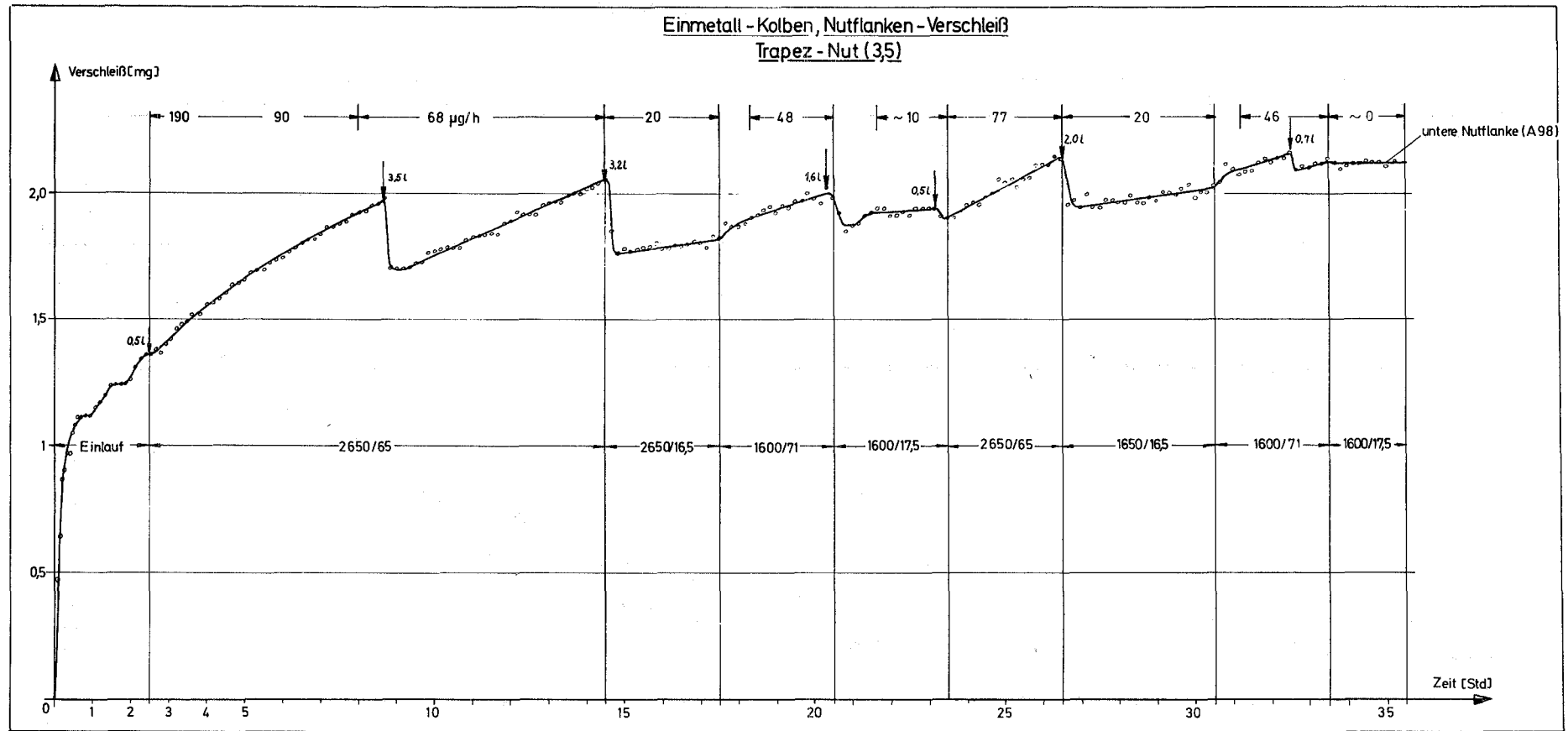


Bild 26.

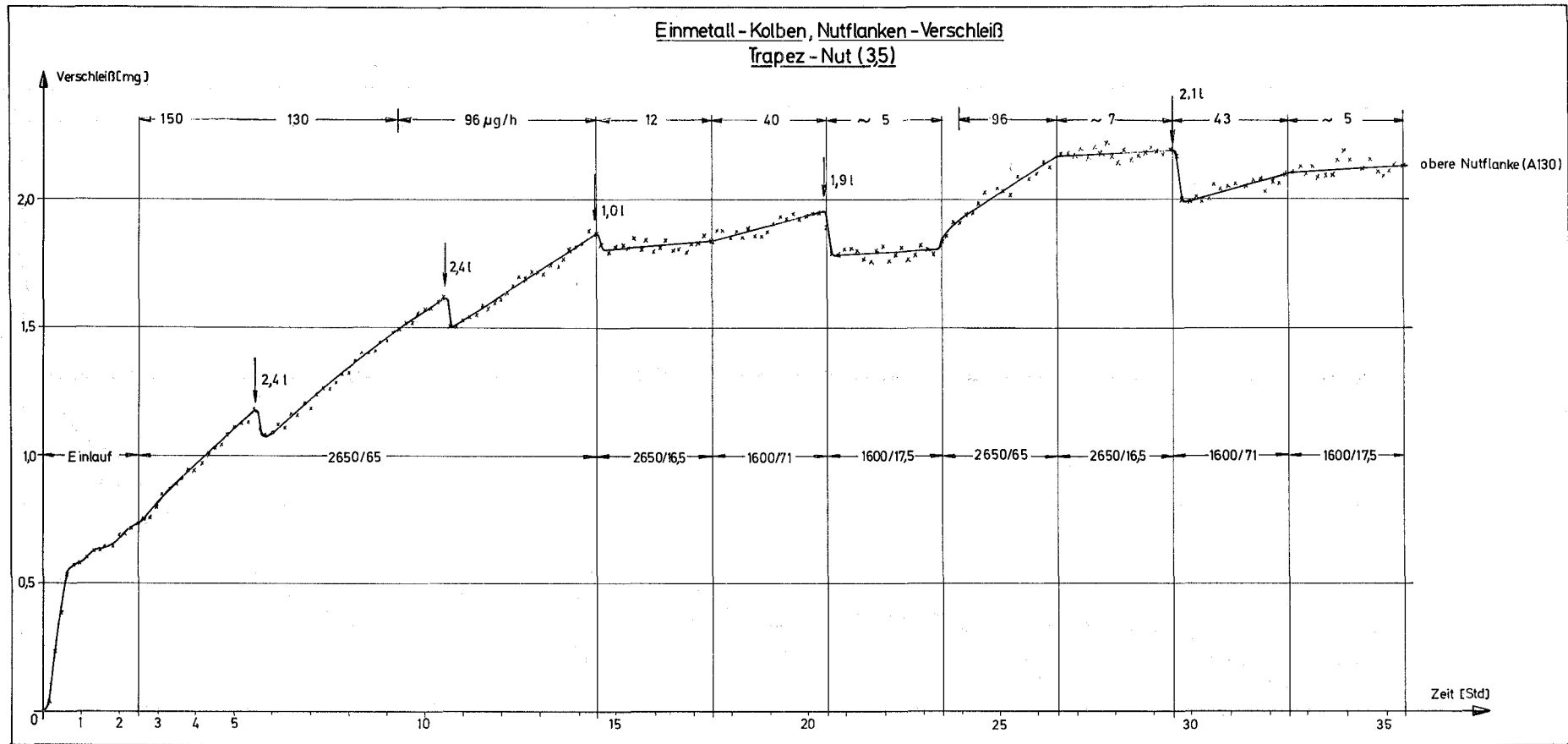


Bild 27.

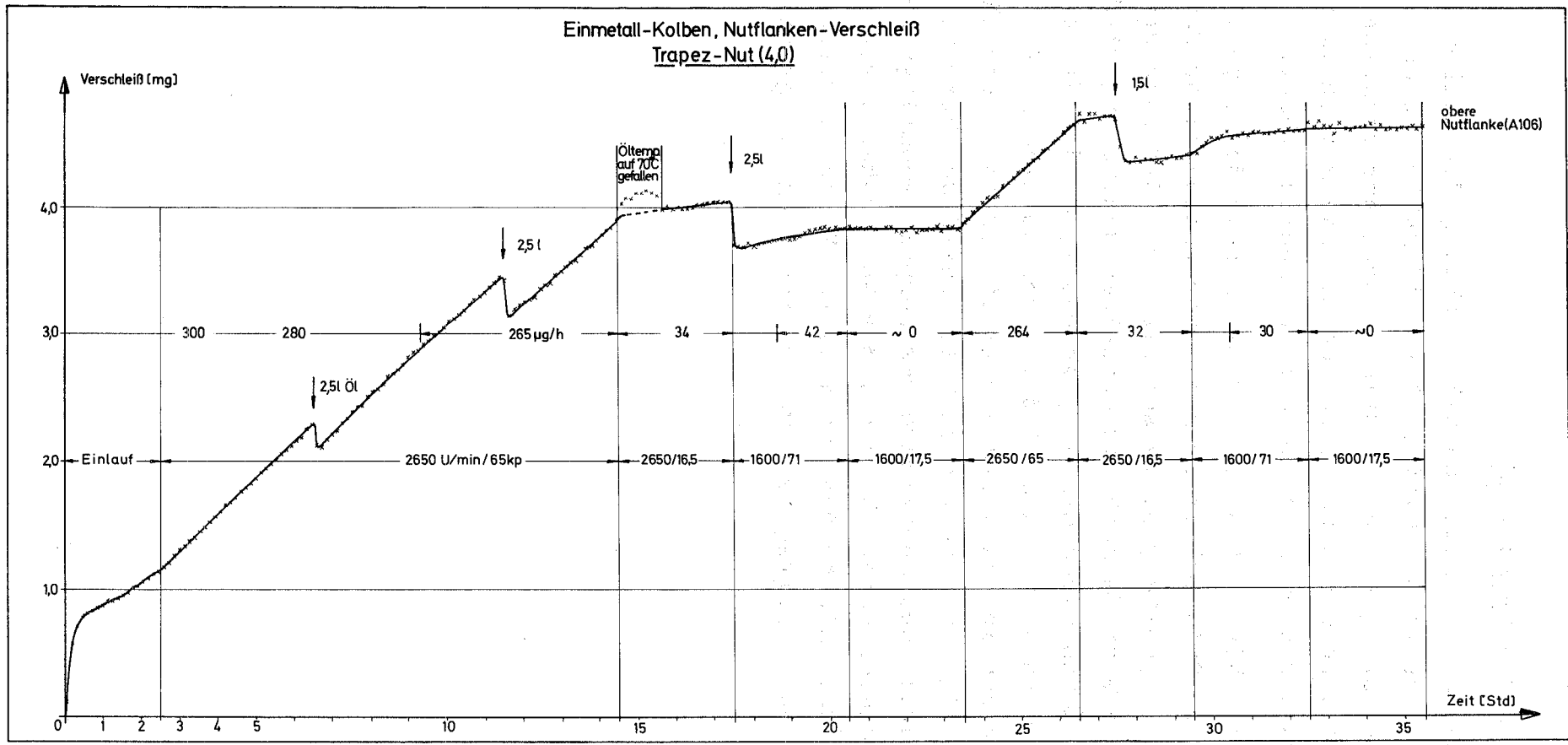


Bild 28.

6.3.2 Ringflanken-Verschleiß

Da das bei der Deuteronen-Bestrahlung der Kolbenringflanken angestrebte Stromintegral von $12 \mu\text{Ah}$ wegen der bei einigen Aktivierungen sehr niedrigen Strahlstromstärken nicht immer erreicht werden konnte, wurden die Zählzeiten im Verlauf einiger Versuche wieder von 10 auf 20 Minuten erhöht.

Die Verschleißraten der unteren Flanke des Doppeltrapezringes AR 125 (Bild 30) stiegen bei der Wiederholung der einzelnen Betriebspunkte jeweils auf die 1,5 - 2-fachen Werte an. Daher wurde dieser Versuch mit derselben Bestückung wiederholt. Im Anschluß daran wurde der Ring gewendet, so daß die aktivierte untere Flanke nach oben kam. Dadurch sollte eine zusätzliche Aussage über den in den Versuchen AR 125 (Bild 30) und AR 111 (Bild 31) festgestellten großen Unterschied der Verschleißraten der Unter- und Oberflanke des Doppeltrapezrings gewonnen werden, da dieser Unterschied bei den Nutflanken-Versuchen nicht aufgetreten war. Die beiden zusätzlichen Versuche wurden nach dem in Bild 32 eingetragenen, verkürzten Programm gefahren.

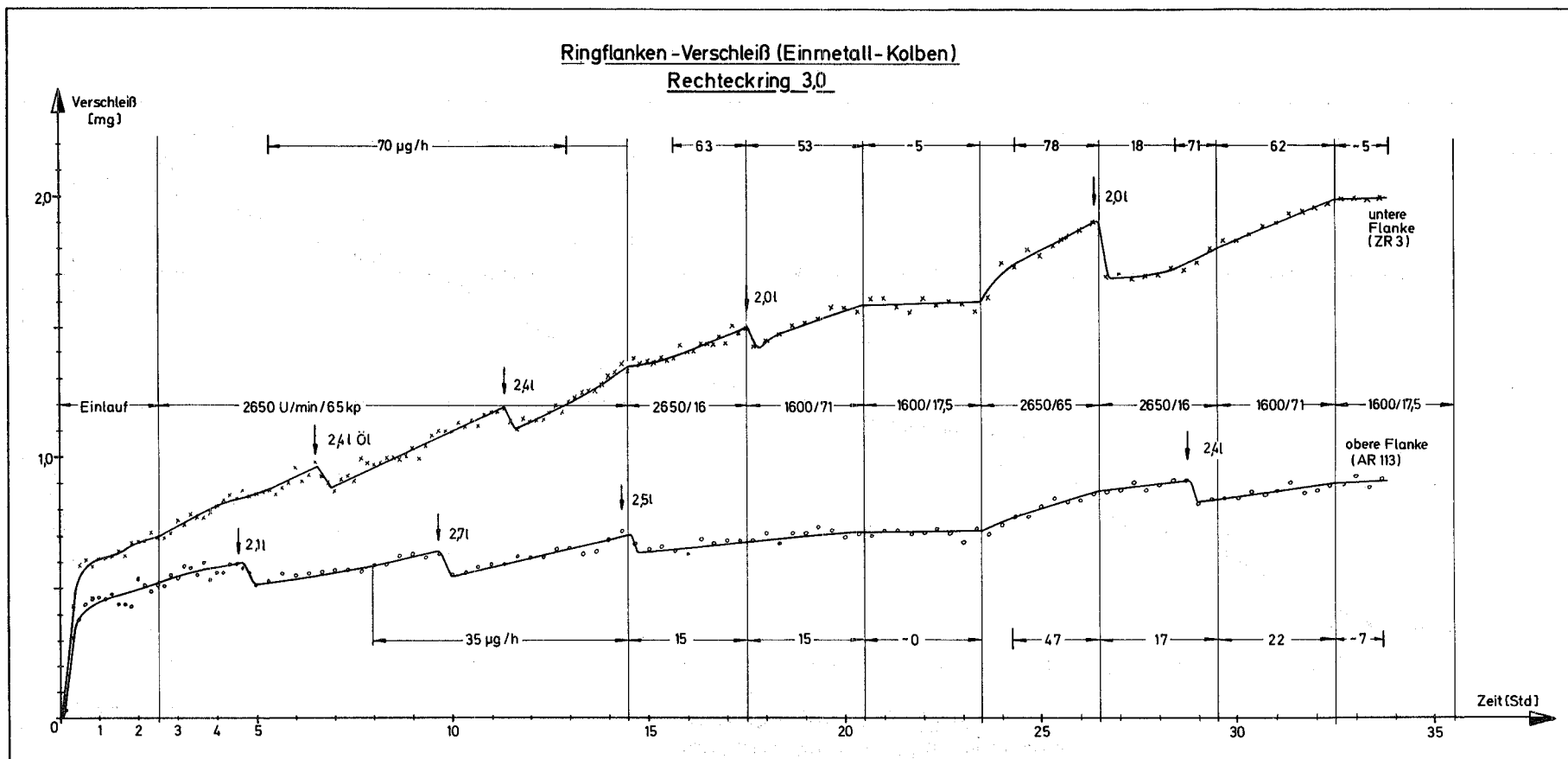


Bild 29.

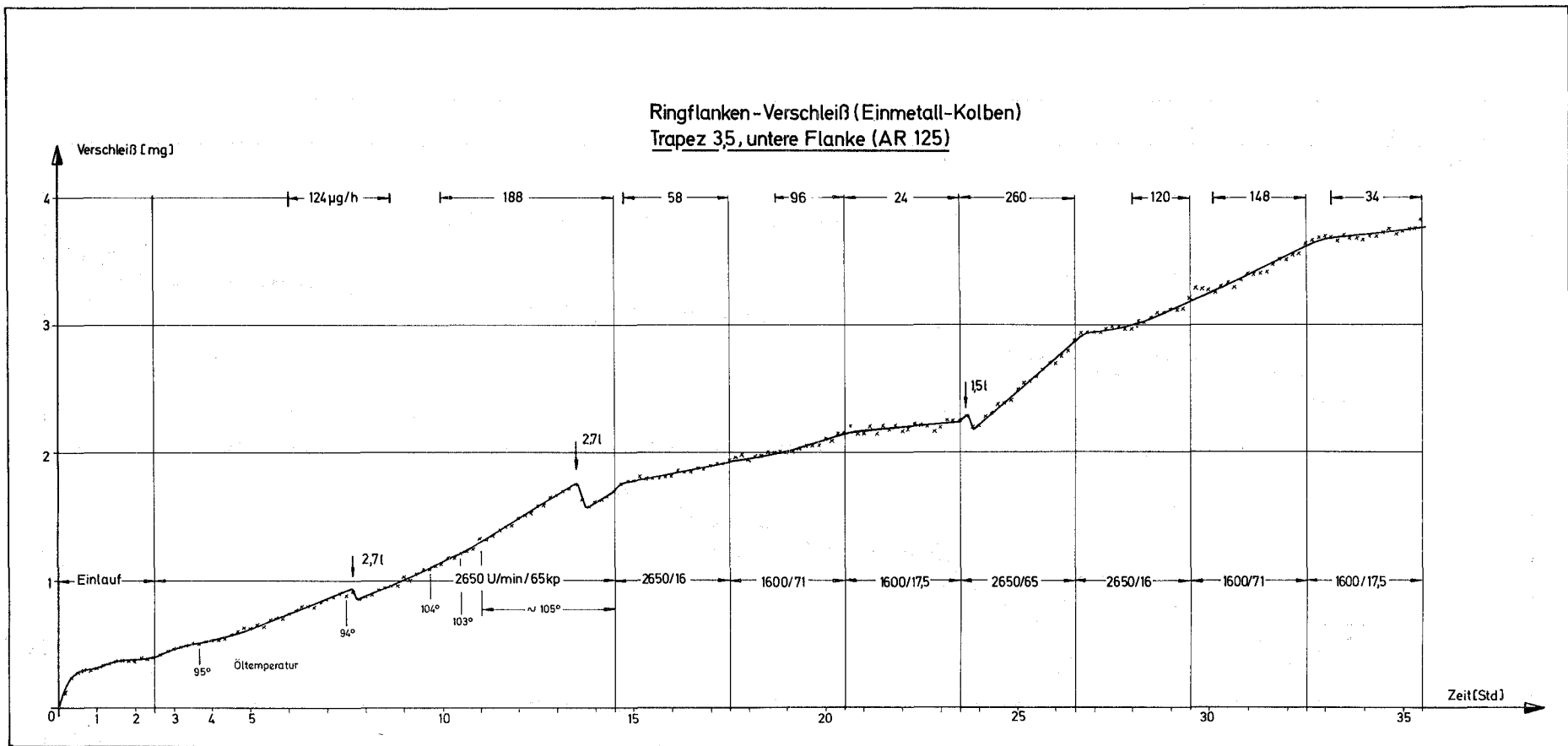


Bild 30.

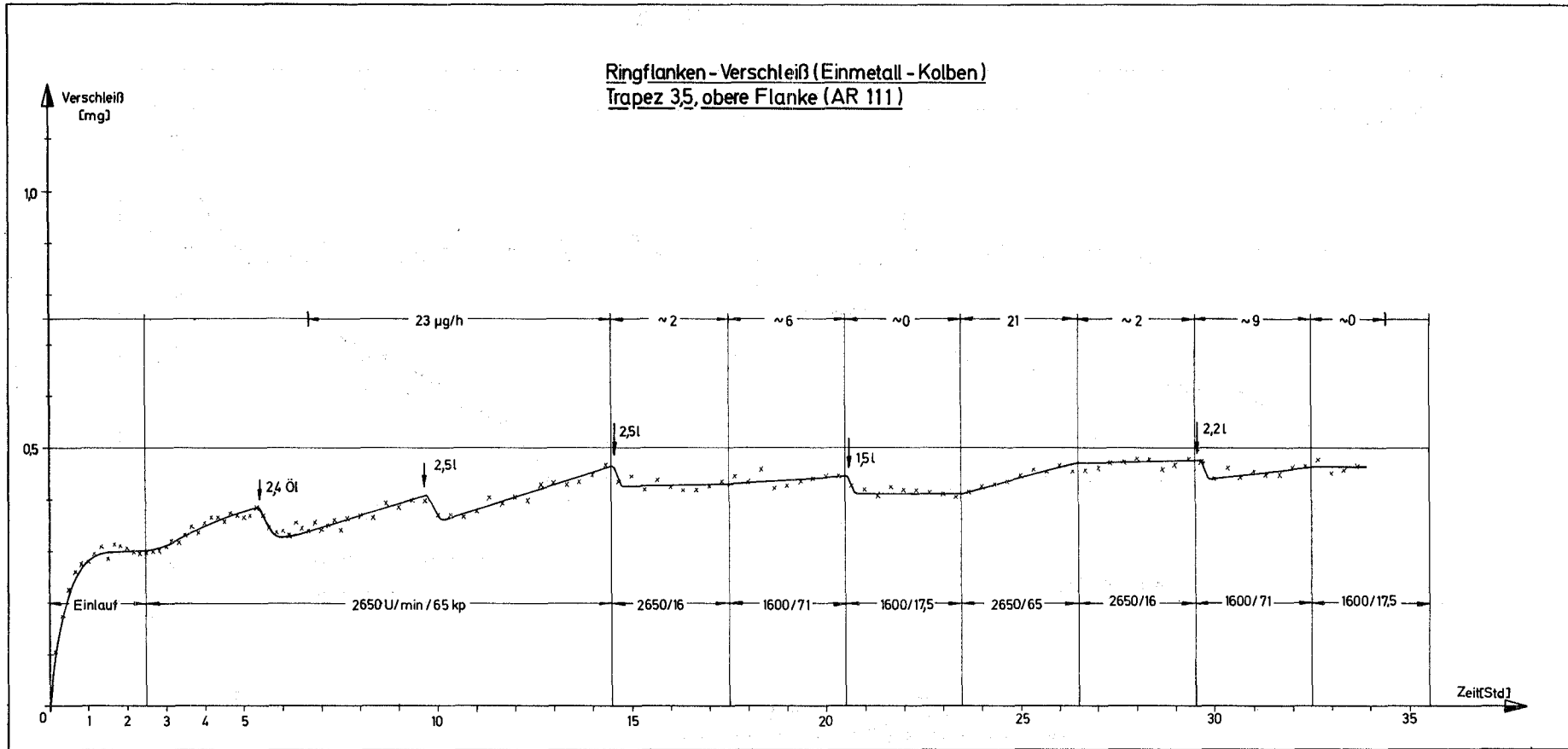


Bild 31.

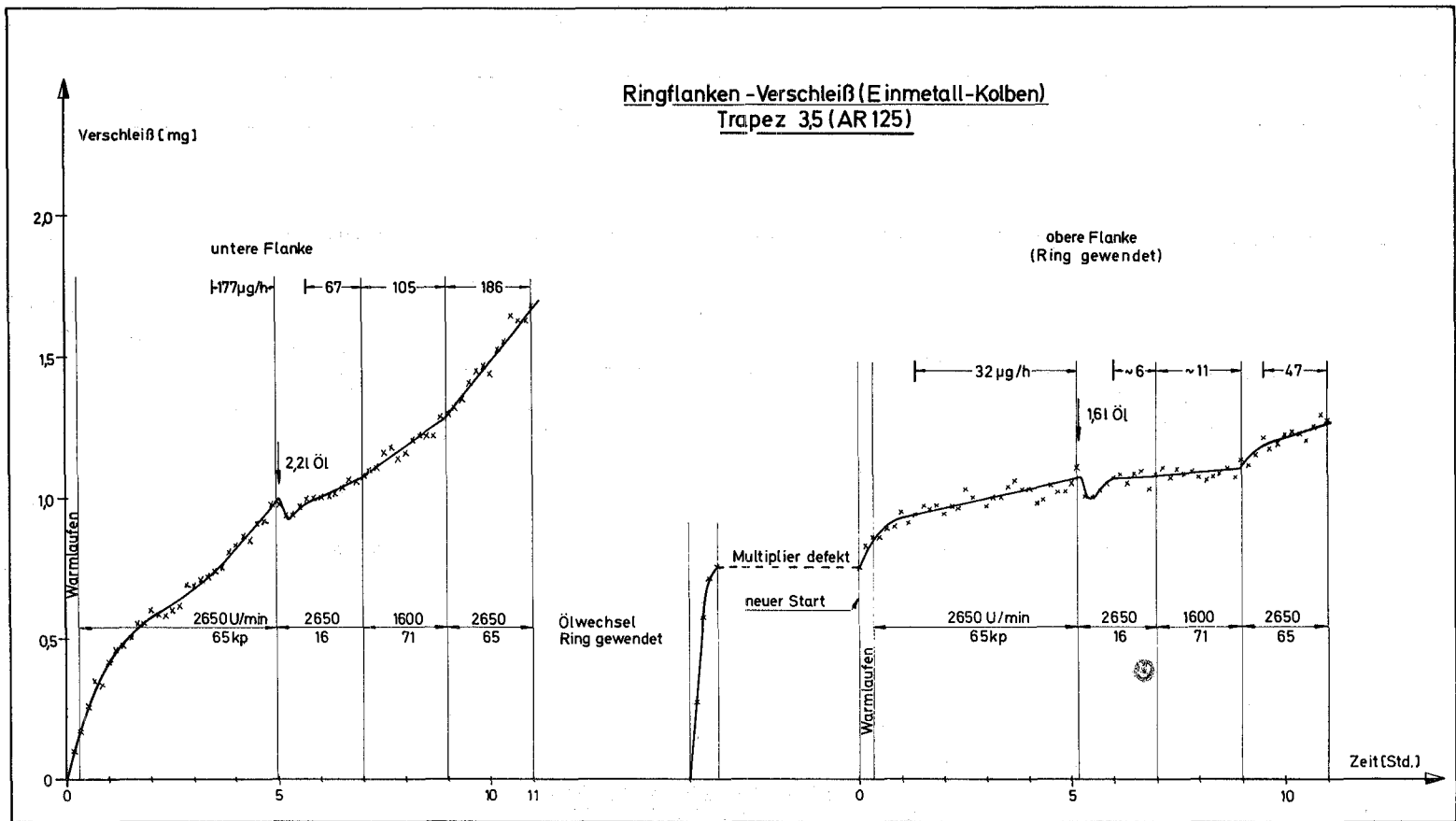


Bild 32.

6.4 Einfluß der Öltemperatur auf den Verschleiß

Da die Öltemperatur während der Versuche nur innerhalb eines Temperaturbereiches von $100 \pm 3^\circ\text{C}$ konstant gehalten werden konnte, wurde im Anschluß an die Ringträgerkolben-Versuche mit den Kolbenringen R 187/2 (T 3,5) und R 191/1 (R 3,0) der Einfluß der Öltemperatur auf die Verschleißraten bestimmt. Die Schmieröltemperatur konnte durch Änderung des Wasserdurchflusses im Ölkühler eingestellt werden und sollte von 60°C bis 120°C variiert werden, bei 2650 U/min und Vollast konnte jedoch mit dem vorhandenen Kühler eine Temperatur von 70°C nicht unterschritten werden. Die Verschleißraten wurden bei 1600 U/min und 2650 U/min und Vollast gemessen, indem diese Betriebspunkte bei den einzelnen Öltemperaturen jeweils zwei Stunden gefahren wurden. Wegen der hohen Chrom-Verschleißraten des Doppeltrapezrings bei 2650 U/min und Vollast und Öltemperaturen von mehr als 105°C wurden diese Betriebspunkte jedoch nur jeweils 30 Minuten gefahren.

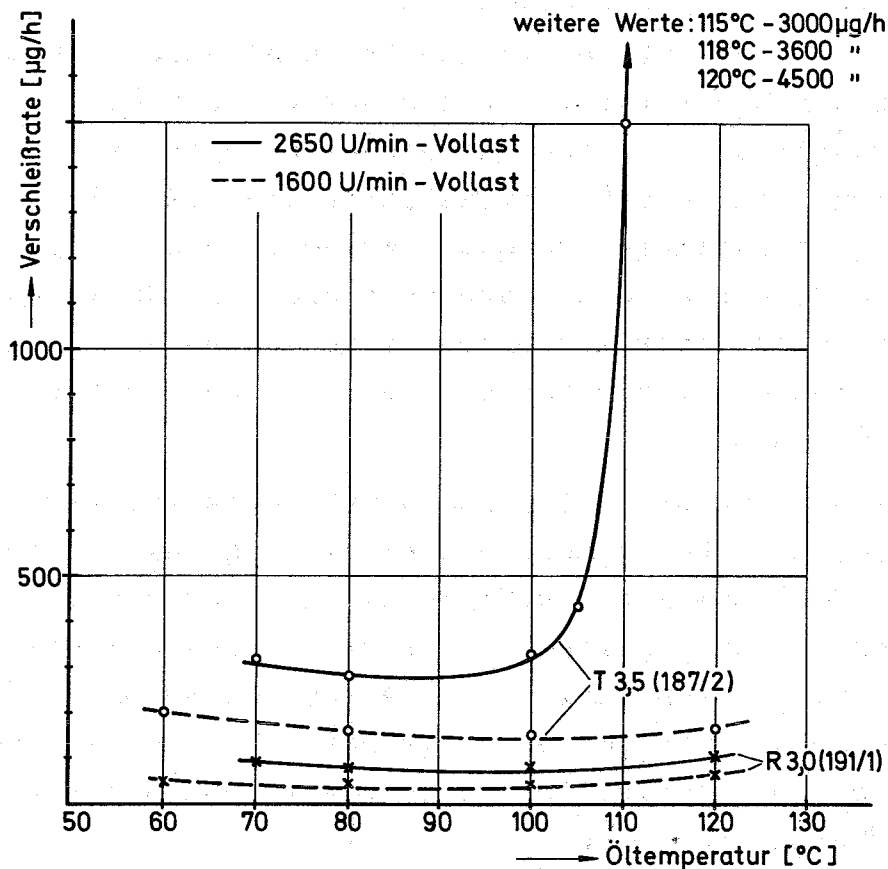


Bild 33. Einfluß der Öltemperatur auf die Verschleißraten der Chromlauffläche eines Rechteck- und eines Doppeltrapezrings.

In den Versuchen konnte keine Abhängigkeit der Ring- und Nutflankenverschleißraten von der Öltemperatur festgestellt werden, die Abhängigkeit der Chromlauflächen-Verschleißraten von der Öltemperatur ist in Bild 33 dargestellt. Der starke Einfluß von Öltemperaturen $> 100^{\circ}\text{C}$ auf den Lauflächenverschleiß des Doppeltrapezrings bei 2650 U/min und Vollast wurde bei 3 Versuchen mit einer Reproduzierbarkeit der Verschleißraten von $\pm 10\%$ gemessen!

Wegen der kurzen Halbwertszeit des ^{24}Na wurden keine Öltemperaturversuche mit Einmetallkolben durchgeführt. Auf Grund der bei den Ringflanken und Ringträgerkolben-Nutflanken gewonnenen Ergebnisse kann jedoch angenommen werden, daß auch der Nutflankenverschleiß der Einmetallkolben in dem betrachteten Temperaturbereich kaum von der Öltemperatur abhängt.

6.5 Reproduzierbarkeit der Ergebnisse und Fehlerabschätzung

6.5.1 Reproduzierbarkeit der Ergebnisse

Bei der Beurteilung der in den Versuchsläufen ermittelten Ergebnisse werden die Verschleißraten aus verschiedenen Versuchsläufen verglichen, so daß durch die Montagen bedingte unterschiedliche Einbauverhältnisse der aktivierten Teile zusätzliche Versuchsparameter bedeuten können. Da die Ergebnisse der Versuchsläufe nur eine Aussage über die Reproduzierbarkeit der Verschleißraten innerhalb eines Laufes zulassen, wurde eine zusätzliche Versuchsserie gefahren, in der auch der Einfluß der Montagen erfaßt wurde.

Die Versuche wurden mit einem neutronenaktivierten Kolbenring mit verchromter Laufläche und einem Ringträgerkolben durchgeführt. Nach dem 2,5-stündigen Einlauf wurde bei 2650 U/min und Vollast solange gefahren, bis die Verschleißraten über mindestens 2 Stunden konstant waren. Anschließend wurde der Kolbenring ausgebaut und wieder eingebaut. Dieses Versuchsprogramm wurde - einschließlich des Einlaufs und der Montage - insgesamt siebenmal gefahren.

Die spezifische Aktivität des Kolbenrings zeigte - wahr-

scheinlich wegen einer fehlenden Drehbewegung des Probenbehälters bei der Bestrahlung - in Umfangsrichtung Abweichungen von ca. $\pm 25\%$ vom Mittelwert, was durch Auszählen einzelner Abschnitte eines mitbestrahlten Federstahlbandes, das den Ring bei der Bestrahlung umschloß, und durch Auszählen des Rings vor einem Bleikollimator, festgestellt wurde. Die mittlere spezifische Aktivität der Ringflanken konnte über das mitbestrahlte Federstahlband einfach bestimmt werden, die mittlere spezifische Aktivität der Chromlaufschicht konnte dagegen erst nach den Versuchen durch Abschleifen eines Teils der Chromlaufschicht von einem Bruchstück des Rings festgestellt werden, und zwar mit einer Genauigkeit von ca. $\pm 2,5\%$. Da die zunächst über die drei mitbestrahlten Chromproben bestimmte und für das Rechenprogramm verwendete spezifische Aktivität zu niedrig war, wurden die in den Versuchen gemessenen Verschleißraten entsprechend korrigiert.

Wegen der in den vorher durchgeführten Versuchen aufgetretenen starken Streuungen und teilweise extrem hohen Werte der Laufflächen-Verschleißraten der Doppeltrapezringe wurden die Versuche mit einem Rechteckring durchgeführt. Nach dem Einlauf trat jedoch ebenfalls eine bis dahin nur bei den Doppeltrapezringen beobachtete extrem hohe Chrom-Verschleißrate von ca. 10 mg/h auf, die nach einem Ölwechsel und einer Wiederholung des Einlaufs erst im Verlauf von 4 Stunden bei 2650 U/min und Vollast allmählich auf ca. 80 $\mu\text{g}/\text{h}$ sank. Da diese Verschleißrate jedoch nur während der letzten 30 Minuten auftrat, und diese Zeit für eine sichere Aussage zu kurz ist, wurde sie als Ergebnis des ersten Versuchslaufes nicht berücksichtigt. Die Flankenverschleißrate von 88 $\mu\text{g}/\text{h}$ im ersten Versuch wurde ebenfalls nicht berücksichtigt, da ein Einfluß eines extrem hohen Laufflächenverschleißes auf den Flankenverschleiß in den Versuchen zwar nicht festgestellt werden konnte, aber nicht sicher ausgeschlossen werden kann. Die Ergebnisse der restlichen 6 Versuchsläufe sind in Bild 34 dargestellt.

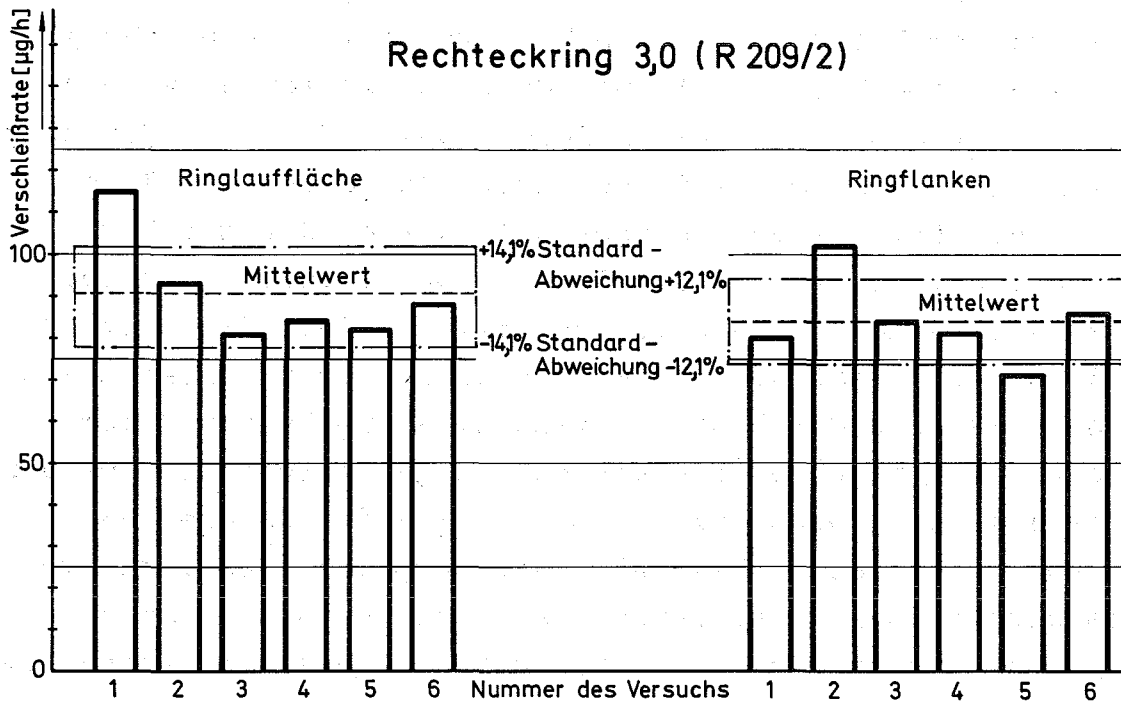


Bild 34. Ergebnisse der Versuche über die Reproduzierbarkeit der Verschleißraten

Die in Bild 34 angegebenen relativen Standardabweichungen wurden nach folgender Gleichung berechnet:

$$\sigma_r = \frac{1}{\bar{X}} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (37)$$

mit σ_r = Standardabweichung (relative)

n = Anzahl der Proben

X_i = Einzelwert

\bar{X} = (arithmetischer) Mittelwert

Zusätzliche Versuche über die Reproduzierbarkeit der Verschleißraten der unteren und oberen Flanken von Kolbenringen und Kolbenringnuten wurden wegen des großen zeitlichen Aufwandes nicht durchgeführt. Es kann jedoch angenommen werden, daß auf Grund der ähnlichen Einbau- und Betriebsbedingungen die Ergebnisse über die Reproduzierbarkeit der Ringflankenverschleißraten, die als Summe der Verschleißraten von Unter- und Ober-

flanke gemessen wurden, auch für die einzelnen Verschleißraten der unteren und oberen Ring- und Nutflanken gelten.

6.5.2 Fehlerabschätzung

Um den bei der Bestimmung des Gesamtverschleißes nach Gl.(5) auftretenden Fehler abzuschätzen, werden zunächst die einzelnen Faktoren der hier noch einmal aufgeführten Umrechnungsgleichung

$$M = m \cdot \frac{1}{V_E} \cdot V \cdot \frac{1}{X_S} \cdot X \cdot e^{\lambda t}$$

gesondert betrachtet:

a. Meßkopffaktor m:

Der Fehler ist durch die Zählstatistik und eventuell nicht vollständiges Auffüllen der Durchflußkammer mit der Eichlösung bedingt. Wiederholte Messungen mit derselben Eichlösung ergaben

$$f_m \leq 1\%$$

b. Eichvolumen V_E :

Der Fehler ist vernachlässigbar ($\leq 0,2\%$)

c. Ölvolumen V:

Da für die Dauer der einzelnen Versuche jeweils mit dem konstanten Anfangsvolumen gerechnet wurde, ergibt sich unter Berücksichtigung des Verschleißverlustes nach Kap. 6.1 bei einem Ölverbrauch von 2 l ein Fehler von

$$f_V = + 5,3\%$$

d. Spezifische Aktivität der Verschleißteile X_S :

Die Fehler bei der Gewichtsbestimmung und beim Auszählen der Proben können gegenüber der Abweichung der mittleren spezifischen Aktivität der Proben von der mittleren spezifischen Aktivität der bestrahlten Teile vernach-

lässigt werden. Geschätzte Abweichung:

$$f_{X_S} \leq \pm 4\%$$

e. Zur Zeit t bestimmte Netto-Zählrate X :

Der durch Hochspannungs- und Netzfrequenzschwankungen sowie Temperaturänderungen bedingte Gerätefehler kann mit ca. 1% angegeben werden.

Der statistische Fehler der Zählraten hängt von der Größe der nachgewiesenen Zählraten ab und damit von der spezifischen Aktivität des Versuchsteiles und der Menge des im Ölvolumen vorhandenen Gesamtverschleißes. Für die Abschätzung des statistischen Fehlers werden die in Kap. 4 angegebenen Sollwerte der spezifischen Aktivitäten und die am Ende der einzelnen Versuchsläufe im Mittel registrierten Gesamtverschleißmengen der einzelnen Komponenten vorausgesetzt.

Unter Berücksichtigung des Gerätefehlers und der Einstreuungen bei den Mehr-Komponenten-Versuchen ergeben sich dann folgende Fehler:

Kolbenringlauffläche (^{51}Cr)	:	$f'_{\text{Cr}} \approx \pm 1\%$
Kolbenringflanken (^{59}Fe)	:	$f'_{\text{Fe}} \approx \pm 2,2\%$
Kolbenringflanke (^{56}Co)	:	$f'_{\text{CoR}} \approx \pm 2,4\%$
Ringträgerkolben-Nutflanke (^{56}Co):		$f'_{\text{CoN}} \approx \pm 5\%$
Einmetallkolben-Nutflanke (^{24}Na)	:	$f'_{\text{Na}} \approx \pm 2\%$

f. Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Halbwertszeit $e^{-\lambda t}$:

Die Halbwertszeiten der Meßisotope wurden durch Auszählen der mitbestrahlten Proben vor und nach den Versuchsläufen kontrolliert. Fehler:

$$f_{\text{HWZ}} \leq 1\%$$

Setzt man voraus, daß für die Werte der einzelnen Faktoren der diskutierten Umrechnungsgleichung eine Normalverteilung gilt

und die Faktoren voneinander unabhängig sind, so ergeben sich als statistische Gesamtfehler für die einzelnen Komponenten:

$$\begin{aligned} f_{Cr} &\approx \pm 6,9\% & f_{Fe} &\approx \pm 7,1\% & f_{CoR} &\approx \pm 7,2\% \\ f_{CoN} &\approx \pm 8,4\% & f_{Na} &\approx \pm 7,1\% & & \end{aligned}$$

Beim Vergleich der Gesamtverschleißmengen der Versuchsteile untereinander fallen die durch Meßkopffaktor und Eichvolumen bedingten Fehler weg, der Fehler durch den Ölverbrauch verringert sich auf ca. 1% (s. 6.1). Damit ergeben sich die Gesamtfehler für den Vergleich:

$$\begin{aligned} f_{VCr} &\approx \pm 4,3\% & f_{VFe} &\approx \pm 4,8\% & f_{VCoR} &\approx \pm 4,9\% \\ f_{VCoN} &\approx \pm 6,6\% & f_{VNa} &\approx \pm 4,7\% & & \end{aligned}$$

Da für die Beurteilung der Versuchsergebnisse die graphisch bestimmten Verschleißraten zu Grunde gelegt werden, ist eine Abschätzung des durch diesen zusätzlichen Fehler bedingten Gesamtfehlers der Verschleißraten beim Vergleich untereinander erforderlich. Für den wichtigsten Betriebspunkt bei 2650 U/min und Vollast (Nennleistung) ergeben sich als statistische Gesamtfehler für die (mittleren) Verschleißraten:

Kolbenringlauffläche	$\approx \pm 6\%$
Kolbenringflanken (3-Komp.)	$\approx \pm 9\%$
Kolbenringflanke (1-Komp.)	$\approx \pm 9\%$
Ringträgerkolben-Nutflanke	$\approx \pm 14\%$
Einmetallkolben-Nutflanke	$\approx \pm 8\%$

Da diese relativen Fehler bei kleineren Verschleißraten größer werden, sind die in den Diagrammen und in den Tafeln 5 - 9 angegebenen Verschleißraten mit einem Fehler $> 30\%$ durch " ~ " gekennzeichnet.

6.5.3 Vergleich des im Öl nachgewiesenen mit dem durch Wägung ermittelten Verschleiß

Wegen der hohen Strahlenbelastung bei der Reinigung neu-

tronenaktivierter Kolbenringe wurde die Verschleißbestimmung durch Wägung auf einen Ring beschränkt. Hierfür wurde der in den Reproduzierbarkeitsversuchen eingesetzte Kolbenring ausgesucht, da bei diesem Versuchsprogramm von insgesamt ca. 60 Stunden der höchste Gesamtverschleiß und damit eine für den Vergleich ausreichend genaue Bestimmung des Gewichtsverlustes erwartet werden konnte.

Die Wägung ergab nach 4 Versuchsläufen einen Gewichtsverlust von 76% und nach Abschluß der Versuchsserie von 7 Läufen einen Gewichtsverlust von 81% des über die Zählrate gemessenen Gesamtverschleißes. Der Ring wurde für die Wägung jeweils mit Tetrachlorkohlenstoff abgewaschen und mit einer Messingbürste gebürstet, jedoch konnten dadurch die Ölkohlenrückstände vor allem in den Drehriefen der Ringinnenseite nur unvollständig beseitigt werden, wodurch die niedrigen Werte des durch die Wägung bestimmten Verschleißes begründet sind.

Die Behandlung des Kolbenrings mit einem Ölkohlenlockermittel - einem Kombinationsprodukt alkalischer Reinigungs- und Lösungsmittel (Hariol EM 13 vom Hamker und Ried, Essen) - ergab nach 24 Stunden und erneutem Bürsten einen gewogenen Verschleiß, der 96% der im Öl nachgewiesenen Verschleißmenge am Ende des letzten Versuchslaufes ausmachte. Wird der durch das Ölvolumen von 18,8 l am Ende des Versuches verursachte Fehler von + 5,6% entsprechend Gl.(35) berücksichtigt, so liegt der gewogene Verschleiß 1,4% über dem im Öl nachgewiesenen, der in diesem Fall mit einem statistischen Gesamtfehler von ca. $\pm 4,5\%$ angegeben werden kann (s.6.5.2).

Die Gewichtsbestimmung des Verschleißes kann aus folgenden Gründen nur mit einer Genauigkeit von ca. $\pm 6\%$ angegeben werden: Die weitere Behandlung des Kolbenrings ergab eine weitere Gewichtsabnahme, die nach 2 Tagen einen etwa konstanten Wert pro Tag erreichte, der auch bei einem daraufhin in der gleichen Weise behandelten neuen Kolbenring vom ersten Tag an beobachtet werden konnte. Mikroskopische Untersuchungen der Kolbenringflanken zeigten eine Strukturveränderung in der Umgebung der Graphitkugeln (Anhang Bild Va - c), die wahrschein-

lich auf das Auswaschen von Graphit durch die Säuberung zurückzuführen ist.

Der Unterschied der Ergebnisse von 1,4% kann auch unter Berücksichtigung der angegebenen Fehler als sehr gut bezeichnet werden und weicht von den aus der Literatur bekannten Ergebnissen ab, die den im Öl nachgewiesenen Verschleiß mit 70 - 86% vom gewogenen Verschleiß angeben (z.B. [11],[27]). Allerdings konnten keine Veröffentlichungen über durchgeführte Blindversuche und die daraus resultierenden Abschätzungen der Einflüsse von Ölverbrauch und Verschleißverlust auf die Meßergebnisse gefunden werden, und wenn Angaben über den Einfluß des Ölverbrauchs gemacht werden, so beziehen sie sich darauf, daß die Abnahme des Ölvolumens korrigiert wird. Damit würde aber der im Öl nachgewiesene Verschleiß unter den in Kap. 6.1 gemachten Voraussetzungen zu niedrig liegen. Da in den Veröffentlichungen auch keine Angaben darüber gemacht werden, ob ein verwendetes Reinigungsmittel eventuell zu große Gewichtsverluste verursachen kann, ist auch darin möglicherweise ein Grund für die größeren Werte der gewogenen gegenüber den im Öl nachgewiesenen Verschleißmengen zu suchen.

Die festgestellte gute Übereinstimmung des im Öl nachgewiesenen mit dem durch Wägung bestimmten Gesamtverschleiß deckt sich aber mit eigenen Ergebnissen, die an einem Einzylinder-Dieselmotor (Typ KD 12 E) durchgeführt wurden: hierbei wurden die nach dem Durchlaufmeßverfahren ermittelten Ergebnisse mit den nach dem Dünnschicht-Differenzverfahren gewonnenen verglichen, die Unterschiede waren bei drei verschiedenen Versuchen $\leq 3\%$ [9] .

6.6 Beurteilung und Vergleich der Ergebnisse

Für die Diskussion der Ergebnisse werden in erster Linie die in den Tafeln 5 - 9 angegebenen, aus den Versuchsdiagrammen der Bilder 18 - 32 entnommenen Werte der konstanten Verschleißraten zu Grunde gelegt. Die Tafeln enthalten zusätzlich in der 2. Spalte die nach dem 2,5-stündigen Einlauf gemessenen Gesamtverschleißmengen. Die Bezeichnungen R 3,0 und T 3,5 kenn-

zeichnen wieder die Ring- und Nutform, die Buchstaben "u" und "o" bezeichnen die untere bzw. obere Flanke. Sind einem Versuchsteil für einen Betriebspunkt mehrere Verschleißraten zugeordnet, so geben diese die bei wiederholtem Fahren dieses Betriebspunktes innerhalb eines Versuchslaufes gemessenen Werte an.

Der in den Versuchen aufgetretene hohe Anfangsverschleiß und der häufig auch bei einem Drehzahl-Lastwechsel beobachtete starke Verschleißanstieg der Kolbenringlaufflächen und -flanken wird in vielen Arbeiten erwähnt und darf als bekannt vorausgesetzt werden. Das Verschleißverhalten der Nutflanken ist zwar - soweit dem Verfasser bekannt - an anderer Stelle noch nicht mit Hilfe von Radioisotopen untersucht worden, entsprach aber in den oben genannten Betriebspunkten etwa dem Verschleißverhalten der Ringflanken und wird daher auch nicht ausführlicher erläutert.

6.6.1 Verschleiß der Kolbenringlaufflächen

Die in Tafel 5 aufgeführten Verschleißraten der Ringlauffläche zeigen bei den Rechteckringen eine eindeutige Abhängigkeit von der Motordrehzahl und -belastung. Der z.T. auch bei den Doppeltrapezringen aufgetretene Anstieg der Verschleißraten bei niedriger Drehzahl wurde auch in anderen Untersuchungen, wie in [28], [29] und [30], festgestellt und ist wahrscheinlich durch die bei niedrigen Drehzahlen schlechtere Schmierölversorgung der Zylinderlaufbahnen bedingt.

Die im Vergleich zum Ring R 191/1 höheren Verschleißraten des Rings R 191/2 und der nach 8 Stunden Laufzeit eingetretene Verschleißratenanstieg von $98 \mu\text{g/h}$ auf $174 \mu\text{g/h}$ (s. Bild 19) sind sehr wahrscheinlich auf Brandspurbildung zurückzuführen, die nach dem Versuch am ganzen Ringumfang als schwache bis mittlere Verfärbung im oberen Drittel der Ringlauffläche festgestellt werden konnte. Eine erhöhte Durchblasemenge wurde nicht beobachtet, und da die Verschleißraten im weiteren Verlauf des Versuches wieder niedriger wurden, lag wahrscheinlich nur ein kurzfristiges Durchblasen vor und die Brandspuren wurden

wieder "geheilt". Die Lauffläche zeigte jedoch mehr und stärkere Riefen als die des Rings R 191/1. Die Übereinstimmung der Versuchsergebnisse kann jedoch trotzdem als gut bezeichnet werden.

Kolbenring	Einlauf-Verschleiß nach 2,5 h	Verschleißrate [$\mu\text{g/h}$] im Betriebspunkt									
		Volllast					Viertellast				
		2800	2650	2200	1600	1200	2800	2650	2200	1600	1200
R 3,0 (R 191/1)	0,76 mg	98	88 87 89	56	43	67	35	20	9	~2	13
R 3,0 (R 191/2)	0,36 mg	141	98 90 130	78	60	81	46	43	21	11	30
R 3,0 ¹⁾ (R 209/2)	0,35 mg		91 ¹⁾								
T 3,5 (R 208)	0,60 mg	210	200 200 360	370	355	690	45	40	240	125	110
T 3,5 (R 187/2)	1,60 mg	408	400 380 400	175	208	180	185	160	91	93	106
T 3,5 ²⁾ (R 192/1)	0,34 mg	340	230								
T 3,5 ³⁾ (R 187/1)	2,95 mg	490	395 ³⁾ 415	620	905	255	245	225	110	1210 ³⁾ 75	95

¹⁾ Reproduzierbarkeitsversuche. Die Verschleißrate ist der Mittelwert aus 6 Versuchen (s.6.5.1).

²⁾ Der Versuch mußte vorzeitig abgebrochen werden (s.6.2).

³⁾ Vorversuch, mangelhafte Bonderung der Zylinderbüchsen (s.6.2)! Wegen der hohen Verschleißrate bei 1600 U min-Viertellast wurde dieser Betriebspunkt statt 2650 U min-Volllast wiederholt.

Tafel 5. Verschleißraten der Kolbenring-Chromlaufflächen (Ringträgerkolben)

Die gute Reproduzierbarkeit der Laufflächenverschleißraten der Rechteckringe konnte bei den Doppeltrapezringen nicht erzielt werden, und in den Diagrammen der Bilder 20 - 22 fallen vor allem die teilweise extrem hohen Verschleißraten auf. Die im Vorversuch (Bild 22) zuerst beobachtete hohe Verschleißrate wurde zunächst auf Brandspurbildung zurückgeführt, eine sofort durchgeführte Demontage zeigte jedoch ein einwandfreies Laufbild von Büchse und Ring. Auch bei den anderen Doppeltrapezringen konnten nach den Versuchsläufen keine Brandspuren festgestellt werden, und die Laufbilder, die lediglich leichte Riefen aufwiesen, entsprachen denen der Rechteckringe

R 191/1 und R 209/2. Ein Anstieg der Durchblasemenge konnte ebenfalls nicht beobachtet werden.

Über ähnlich extreme Verschleißraten verchromter Ringlaufflächen ohne Anzeichen von Brandspuren wird auch von ABOWD [31] , PIKE et.al. [32] und in der sehr ausführlichen Untersuchung von CHARLESWORTH und BROWN [33] berichtet. ABOWD und PIKE et.al. stellten auch gleichzeitig eine extreme Erhöhung der Ringflanken-Verschleißraten fest, die in den eigenen Versuchen aber nicht beobachtet wurde. Die Autoren der drei vorgenannten Arbeiten konnten keine Erklärung für die extremen Verschleißraten finden, die Ergebnisse der in Kap. 6.4 geschilderten Versuche über den Einfluß der Öltemperatur auf den Ringlaufflächenverschleiß bestätigen aber für die Doppeltrapezringe die Vermutung von CHARLESWORTH und BROWN, daß mechanische Einflüsse zusammen mit ungünstigen Schmierverhältnissen die Ursache der hohen Verschleißraten sind: das größere axiale Spiel des Doppeltrapezringes im Bereich des O.T. ermöglicht eine größere Schrägstellung der Ringlauffläche und kann damit unter ungünstigen Schmierverhältnissen - wie hoher Motorbelastung und hoher Schmieröltemperatur - eine Schmierfilmdurchbrechung zur Folge haben. Das Absinken der Verschleißraten bei unveränderten Betriebsbedingungen wäre dann auf die Ausbildung eines günstigeren Laufflächenprofils zurückzuführen.

Die bei den Rechteckringen nur im ersten Lauf der Reproduzierbarkeitsversuche aufgetretene extreme Verschleißrate ist wahrscheinlich auf die Verwendung des bereits ca. 50 Stunden gelaufenen Ringträgerkolbens zurückzuführen und soll für den Vergleich der Ergebnisse nicht herangezogen werden, da der Kolbenring in den weiteren 6 Versuchen dieser Serie ein normales Verschleißverhalten zeigte (s.6.5.1).

Damit ergibt sich ein eindeutig günstigeres Verschleißverhalten der Rechteckringe, und selbst wenn man von den in Tafel 5 nicht aufgeführten extremen Verschleißraten der Doppeltrapezringe absieht, liegen die Werte bei Nennleistung im Mittel mehr als 3 mal so hoch, in den anderen Betriebspunkten bis zu 10 mal so hoch wie bei den Rechteckringen.

6.6.2 Verschleiß der Kolbenringflanken

In den Ringträgerkolben-Versuchen wurde der Verschleiß der unteren und oberen Ringflanken zusammen gemessen, die Verschleißraten zeigt Tafel 6. Die in Tafel 7 aufgeführten Verschleißraten der unteren und oberen Ringflanken in den Einmetallkolben-Versuchen sind für einen Vergleich in den letzten drei Zeilen der Tabelle als Summen aufgeführt.

Kolbenring	Einlauf-Verschleiß nach 2,5 h	Verschleißrate [µg/h] im Betriebspunkt									
		Volllast					Viertellast				
		2800	2650	2200	1600	1200	2800	2650	2200	1600	1200
R 3,0 (R 191/1)	1,00 mg	168	156 123 115	114	102	23	21	~10	~8	~7	~0
R 3,0 (R 191/2)	1,90 mg	126	120 104 128	82	64	47	25	16	~11	~3	~0
R 3,0 ¹⁾ (R 209/2)	(0,45 mg) ²⁾		88 ¹⁾								
T 3,5 (R 208)	2,30 mg	112	102 108 100	140	85	44	~24	~12	~7	~9	~9
T 3,5 (R 187/2)	2,63 mg	220	160 200 260	102	55	~35	47	~35	~8	~0	~0

¹⁾ Reproduzierbarkeitsversuche. Die Verschleißrate ist der Mittelwert aus 6 Versuchen (s.6.5.1).

²⁾ Der Kolben war nicht neu, sondern bereits ca. 50 Stunden gelaufen.

Tafel 6. Verschleißraten der Kolbenringflanken im Ringträgerkolben.

Die Verschleißraten der Rechteckringflanken sind bei Volllast in beiden Kolben etwa gleich, bei Viertellast im Einmetallkolben ca. 6 mal höher.

Die Verschleißraten der Doppeltrapezringe sind bei Volllast im Einmetallkolben ca. 1,5 mal, bei Viertellast ca. 3 mal so hoch wie im Ringträger-Kolben.

Dieser höhere Verschleiß der Ringflanken im Einmetallkolben ist wahrscheinlich auf die harten Si-Kristalle in der übereutektischen Al-Si-Kolbenlegierung zurückzuführen.

Der Vergleich der Verschleißraten der unteren und oberen Ringflanken in Tafel 7 zeigt einen sehr viel stärkeren Ver-

schleiß der Unterflanken, der bei den Rechteckringen 2 - 3 mal, bei den Doppeltrapezringen 6 - 10 mal so hoch ist wie der Verschleiß der Oberflanken.

Kolbenring- flanke	Einlauf- Verschleiß nach 2,5 h	Verschleißrate [$\mu\text{g/h}$] bei			
		Vollast		Viertellast	
		2650	1600	2650	1600
R 3,0 u (ZR 3)	0,69 mg	70	53	63	~5
		78	62	71	~5
R 3,0 o (AR 113)	0,52 mg	35	15	15	~0
		47	22	17	~7
T 3,5 u (AR 125)	0,40 mg	188	96	58	24
		260	148	120	34
1) Wiederholung (AR 125)		177			
		186	105	67	
T 3,5 o (AR 111)	0,30 mg	23	~6	~2	~0
		21	~9	~2	~0
T 3,5 o 2) (AR 125)		32			
		47	~11	~6	
R 3,0 u+o	1,21 mg	95	68	78	~5
		125	84	88	~12
T 3,5 u+o	0,70 mg	211	102	60	~24
		281	157	122	~34
T 3,5 u+o 3)		209			
		233	116	73	

1) Bestückung neu montiert (s.6.3.2).

2) Bestückung von T 3,5 u, aber Ring AR 125 gewendet (s.6.3.2).

3) Summe der Verschleißraten von 1) und 2).

Tafel 7. Verschleißraten der Kolbenringflanken im Einmetallkolben

Dieses Verschleißverhalten entspricht bei den Rechteckringen dem der Rechtecknutflanken, bei den Doppeltrapezringen dagegen weicht es stark von dem der Nutflanken ab. Die Wiederholung des Versuches brachte jedoch mit guter Übereinstimmung die gleichen Verschleißraten, so daß dieses Ergebnis als gesichert angesehen werden kann.

Die Versuche zeigten bei beiden Ringformen einen z.T.

sehr viel niedrigeren Verschleiß im Ringträgerkolben, die Verschleißraten beider Ringformen waren im Ringträgerkolben etwa gleich.

6.6.3 Verschleiß der Nutflanken

Die in den Tafeln 8 und 9 aufgeführten Nutflanken-Verschleißraten zeigen für beide Nutformen und Nutwerkstoffe einen stärkeren Einfluß der Gaskräfte (Last) auf die unteren, der Massenkräfte (Drehzahl) auf die oberen Nutflanken. Dieser Einfluß ist besonders deutlich bei der 4 mm hohen Doppeltrapeznut zu erkennen, die bei 2650 U/min etwa 3-fachen, bei 1600 U/min dagegen etwa gleichen Verschleiß aufweist wie die mit einem ca. 16% leichteren Ring versehene, 3,5 mm hohe Doppeltrapeznut. Bei den Ringflankenverschleißraten kann dieser Einfluß von Gas- und Massenkräften z.T. ebenfalls festgestellt werden (Tafel 6 und 7).

Nutflanke	Einlauf-Verschleiß nach 2,5 h	Verschleißrate [$\mu\text{g/h}$] im Betriebspunkt									
		Vollast					Viertellast				
		2800	2650	2200	1600	1200	2800	2650	2200	1600	1200
R 3,0 u (ZK 14)	1,77 mg	110	110 92 90	90	81	~20	23	~10	~10	~7	~5
R 3,0 o (AK 13)	0,36 mg	37	40 37 42	17	11	~5	~6	~5	~5	~7	~0
T 3,5 u (ZK 23)	0,74 mg	45	45 41 43	46	38	~15	~9	~9	~7	~0	~0
T 3,5 o (K 189)	0,26 mg	48	44 35 42	20	~8	~6	~25	~15	~0	~0	~0
R 3,0 u+o	2,13 mg	147	150 129 132	107	92	~25	~29	~15	~15	~14	~5
T 3,5 u+o	1,00 mg	93	89 76 85	66	46	~21	~34	~24	~7	~0	~0

Tafel 8. Verschleißraten der Ringträgerkolben-Nutflanken

Der Verschleiß der Rechtecknut ist im Einmetallkolben bei Vollast ca. 1,3 mal, bei Viertellast bis zu 5 mal so hoch wie im Ringträgerkolben. Dieses Ergebnis entspricht, wie auch

der Unterschied zwischen unterem und oberem Flankenverschleiß, dem Verschleißverhalten der Rechteckringflanken.

Nutflanke	Einlauf- Verschleiß nach 2,5 h	Verschleißrate [$\mu\text{g/h}$] bei			
		Vollast		Viertellast	
		2650	1600	2650	1600
R 3,0 u (A 83)	1,24 mg	108	96	40	~12
		112	88	30	~0
R 3,0 o ¹⁾ (A 104)	0,71 mg	57	41	22	~0
		77	24	25	~0
R 3,0 o (A 131)	0,75 mg	58	30	32	~6
		65	25	40	~0
T 3,5 u (A 98)	1,36 mg	68	48	20	~10
		77	46	20	~0
T 3,5 o (A 130)	0,73 mg	96	40	12	~5
		96	43	7	~5
T 4,0 o (A 106)	1,16 mg	265	42	34	~0
		264	30	32	~0
R 3,0 u+o ²⁾	1,99 mg	166	126	72	~18
		177	113	70	~0
T 3,5 u+o	2,09 mg	164	88	32	~15
		173	89	~27	~5

1) Nutflanke war ungleichmäßig aktiviert (s.6.3.1). Daher Wiederholung mit neu aktiviertem Kolben A 131.

2) Summe der Verschleißraten von A 83 und A 131.

Tafel 9. Verschleißraten der Einmetallkolben-Nutflanken

Der Verschleiß der Doppeltrapeznut ist im Einmetallkolben bei Vollast etwa 2 mal so hoch wie im Ringträgerkolben, bei Viertellast kann er wegen der Meßgenauigkeit nur als höher bezeichnet werden. Auch dieses Ergebnis stimmt mit dem der Ringflankenversuche überein. Der Verschleiß der unteren und oberen Nutflanke ist allerdings nicht so unterschiedlich wie der der Ringflanken.

Da in den Versuchen die Verschleißmasse bestimmt wurde, muß für den Vergleich der Verschleißraten von Ringträger- und Einmetallnut die geringere spezifische Dichte der Al-Si-Le-

gierung berücksichtigt werden. Damit liegt der auf das Volumen bezogene Verschleiß der Einmetallnuten 3 -15 mal so hoch wie der Verschleiß der Ringträgernuten. Dieses Ergebnis entspricht in der Größenordnung den auf Verschleißprüfmaschinen erzielten Werten[34] und deckt sich auch mit den Ergebnissen, die inzwischen bei Dauerläufen mit Motoren der gleichen Baureihe ermittelt wurden.

Als günstigste Variante stellte sich auf Grund der Versuche die Doppeltrapeznut im Ringträgerkolben heraus, die bei Vollast und Drehzahlen > 1200 U/min ca. 50 - 60% niedrigere Verschleißraten als die Rechtecknut aufweist, in den anderen Betriebspunkten waren die Verschleißraten innerhalb der Meßgenauigkeit etwa gleich.

6.6.4 Aussagekraft der Ergebnisse

Sieht man vom Laufflächenverschleiß der Doppeltrapezringe ab, so brachten die Versuche Ergebnisse von guter, z.T. sogar erstaunlich guter, Reproduzierbarkeit, obwohl die Abmessungen und Werkstoffeigenschaften der Versuchsteile nur den serienmäßigen Toleranzen entsprachen. Auf eine Auswahl von Teilen mit möglichst gleichen Abmessungen und Eigenschaften wurde verzichtet, da damit der Versuchsaufwand erheblich gestiegen, eine geringere Streuung der Ergebnisse aber nicht zu erwarten gewesen wäre, wie eine Reihe von Veröffentlichungen zeigt (z.B. [11] , [28], [35]). So ergaben auch die eigenen Versuche innerhalb desselben Laufes größere Abweichungen der Verschleißraten bei der Wiederholung eines Betriebspunktes als bei der Wiederholung des Versuches mit neuen Teilen.

Da die vorliegenden Ergebnisse in relativ kurzen Versuchsläufen erzielt wurden, stellt sich die Frage nach der Gültigkeit bei längeren Laufzeiten, wie sie in der Praxis vorkommen. Die Wiederholung der einzelnen Betriebspunkte ergab keine Tendenz der Verschleißraten zu höheren oder niedrigeren Werten im Laufe der einzelnen Versuche, die Reproduzierbarkeitsversuche, die sich über insgesamt 60 Stunden erstreckten, ließen eine solche Tendenz ebenfalls nicht erkennen, und auch Ölver-

brauch und Durchblasemenge blieben von der Mitte der ersten Vollastperiode an bis zum Ende der Versuchsläufe innerhalb der Meßgenauigkeit konstant. Zusammen mit den Ergebnissen von BATZOLD et.al. [36], die eine Übereinstimmung der in kurzen Prüfstandsläufen mit Radioisotopen erzielten Ergebnisse mit denen aus später durchgeführten Fahrversuchen erbrachten, gibt es damit zwar Anhaltspunkte für ein ähnliches Verschleißverhalten der Teile auch bei langen Laufzeiten, doch kann die oben gestellte Frage erst durch entsprechende Versuche sicher beantwortet werden.

Diese Versuche könnten durch die Verwendung bereits gelaufener Teile ebenfalls mit Radioisotopen ohne großen zeitlichen Aufwand durchgeführt werden, für einen Vergleich verschiedener Varianten scheidet diese Möglichkeit jedoch aus, da der Verschleißzustand der Teile einen zusätzlichen, kaum zu bewertenden Parameter darstellt.

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

Das Ziel der Arbeit bestand darin, das Verschleißverhalten von verchromten Rechteck- und Doppeltrapezringen sowie der entsprechenden Nutformen in Einmetall- und Ringträgerkolben eines 6-Zylinder-Dieselmotors mit Hilfe von Radioisotopen zu untersuchen.

Durch die Aktivierung mit thermischen Neutronen und Deuteronen war es möglich, zum ersten Mal drei Verschleißkomponenten gleichzeitig ohne zusätzliche Legierung oder Markierung eines Teiles nachzuweisen und den Verschleiß der Ringträger-Nutflanken sowie der einzelnen Ringflanken, der sich mit konventionellen Meßmethoden nur sehr schlecht bestimmen läßt, zu messen. Aktivierungsuntersuchungen der Al-Si-Einmetallkolben ergaben die Möglichkeit, die Nutflanken mit α -Teilchen zu bestrahlen, die Verwendung von Cd-Abdeckungen für die Aktivierung der Nutflanken im thermischen Neutronenfluß eines Reaktors erwies sich als unbrauchbar.

Die Versuche ergaben ein sehr ungünstiges Verschleißverhalten der Doppeltrapezring-Laufflächen, die in allen Versuchen zeitweise extrem hohe Verschleißraten aufwiesen. Als Grund wird eine Schrägstellung der Ringlauffläche und eine dadurch verursachte Schmierfilmdurchbrechung vermutet, da eine reproduzierbare Abhängigkeit dieser extremen Verschleißraten von der Schmieröltemperatur festgestellt werden konnte. Die Verschleißraten der Doppeltrapezringlaufflächen lagen aber auch bei "normalem" Verhalten im Mittel mehr als dreimal so hoch wie die der Rechteckringlaufflächen.

Sowohl bei den Ringen als auch bei den Nuten wurde ein z.T. deutlich höherer Verschleiß der unteren Flanke gemessen. Der auf das Volumen bezogene Verschleiß der Einmetallnuten war 3 - 15 mal so hoch wie bei den Ringträgernuten, und auch der Ringflankenverschleiß war im Einmetallkolben bis zu 6 mal so hoch wie im Ringträgerkolben. In Bezug auf den Flankenverschleiß ergab sich der Doppeltrapezring im Ringträgerkolben als günstigste Variante.

Berücksichtigt man den Verschleiß von Ringflanken, Ringlaufläche und Nutflanken, so zeigte der Rechteckring im Ringträgerkolben das bei weitem günstigste Verschleißverhalten.

Die Versuche brachten Ergebnisse von guter Reproduzierbarkeit, der Vergleich des im Öl nachgewiesenen mit dem durch Wägung bestimmten Verschleiß ergab eine sehr gute Übereinstimmung.

Durch den Einsatz eines im on-line-Betrieb arbeitenden Prozeßrechners konnte auch in den Mehrkomponenten-Messungen das Verschleißverhalten der verschiedenen Teile direkt beobachtet werden, durch einen inzwischen angeschlossenen Plotter hat sich auch die graphische Bestimmung der Verschleißraten wesentlich vereinfacht. Zusammen mit den Aktivierungen durch schwere geladene Teilchen und dem Dünnschichtdifferenzverfahren ergibt sich damit heute die Möglichkeit, das Verschleißverhalten praktisch aller interessierenden Teile eines Verbrennungsmotors mit Hilfe von Radioisotopen in Ein- oder Mehrkomponentenmessungen schnell und genau zu untersuchen.

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

- 1: Wiemann, L.: Die Bildung von Brandspuren auf den Lauf-
flächen der Paarung Kolbenring-Zylinder in
Verbrennungsmotoren.
MTZ 32 (1971), Nr.2
- 2: Leitgeb, W.: Einfluß der Ringhöhe auf den Verschleiß
von Ring und Ringnut
Arbeitsgespräch 16./17.11.1967, Goetze-
werke AG, Burscheid:
"Flattern und Brechen von Kolbenringen"
- 3: Löhr, H.: Erfahrungen über Ringbrüche bei MAN-LKW-
Motoren
Arbeitsgespräch 16./17.11.1967, Goetze-
werke AG, Burscheid:
"Flattern und Brechen von Kolbenringen"
- 4: Barth, H.: Einiges über Kolbenschäden, deren Ursachen
und Verhinderung
Mahle Technische Information, Folge 8,
Aug. 1969
- 5: Ferris, S.W.: Wear Test Method and Composition,
U.S. Patent No.2315845, Oct.15, 1941
- 6: Pinotti, P.L., Application of Radioactive Tracers to
Hall, D.E., Improvement of Fuels Lubricants and Engines.
Mc Langhlin, E.J. SAE Quarterly Transactions, Vol.3.Oct.49,p.634
- 7: Fogagnolo, B., On the application of gamma ray spectro-
Galotto, C.P., metry to the simultaneous recording of wear
Lo Conte, U., from chromed piston rings and cylinder
Mannone, C.: liners.
Energia Nucleare, 10 (1963), 29
- 8: Gervé, A., Zur Deuteronenaktivierung von Maschinen-
Kamm, H., teilen aus Stahl und Gußeisen
Katzenmeier, G.: Forschungsvereinigung Verbrennungskraft-
maschinen e.V., Frankfurt/Main, Heft 89,
1968
- 9: Kaiser, W.: Die Anwendung der Dünnschichtaktivierung
für Verschleißmessungen an Verbrennungs-

motoren

Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V., Frankfurt/Main, Heft R 192, 1971

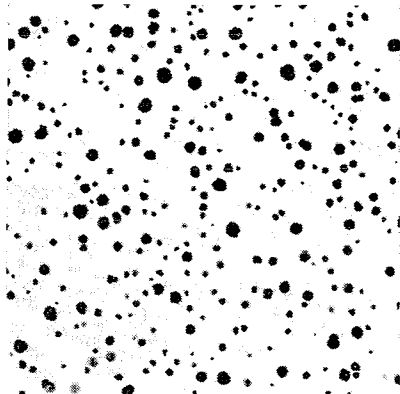
- 10: Gervé, A.: Eine γ -spektrometrische Anordnung zur gleichzeitigen Messung mehrerer Verschleißkomponenten
Dissertation, Universität Karlsruhe 1970
- 11: Kaspar-Sickermann, W.,
Stegemann, D.: Methoden und Ergebnisse der Verschleißmessung an Kolbenringen mit Hilfe radioaktiver Isotope
Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V., Frankfurt/Main, Heft 18, 1961
- 12: Fünfer, E.,
Neuert, H.: Zählrohre und Szintillationszähler
Verlag G. Braun, Karlsruhe, 1959
- 13: Baumgärtner, F.: Tabelle zur Neutronenaktivierung
Verlag K. Thiemig KG, München, 1967
- 14: Mc Gowan, F.K.,
Milner, W.T.,
Kim, H.J.: Nuclear Cross Sections for Charged-Particle Induced Reactions Mn, Fe, Co.
Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee
- 15: Lederer, C.M.,
Hollander, J.M.,
Perlman, I.: Table of Isotopes, Sixth Edition,
John Wiley a. Sons, Inc. New York, 1967
- 16: Lange, J.,
Münzel, H.: Abschätzung unbekannter Anregungsfunktionen.
Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe, KFK-Bericht 767, Mai 1968
- 17: Livingood, J.J.,
Seaborg, G.T.: Physical Review 54, S.775 (1938)
- 18: Deutsch, M.,
Elliot, L.G.: Physical Review 65, S.211 (1944)
- 19: Cook, C.S.,
Mc Daniel, P.W.: Physical Review 62, S.412 (1942)
- 20: Deutsch, M.,
Elliot, L.G.: Physical Review 64, S.321 (1943)

- 21: Bensch, F., Fleck, C.M.: Neutronen-Physikalisches Praktikum I, Hochschultaschenbücher-Verlag, Bibliographisches Institut, Mannheim, 1968
- 22: Martens, U., Schweimer, G.W.: Production of ^7Be , ^{22}Na , ^{24}Na and ^{28}Mg by Irradiation of ^{27}Al with 52 MeV Deuterons and 104 MeV Alpha Particles
Gesellschaft für Kernforschung mbH.
Karlsruhe, KFK-Bericht 1083, Nov.1969
- 23: Lindsay, H.R., Carr, R.J.: He-Ion Induced Reactions of Aluminium and Magnesium
Physical Review 118, S. 1293 (1960)
- 24: Lindner, M., Osbone, R.N.: The Cross Section for the Reaction $^{27}\text{Al}(\alpha, \alpha 2\text{pn})^{24}\text{Na}$ from Threshold to 380 MeV
Physical Review 91, S. 342 (1953)
- 25: Porile, N.T.: Study of the $^{27}\text{Al}(\alpha, ^7\text{Be})^{24}\text{Na}$ Reaction from Threshold to 41 MeV
Physical Review 127, S. 224 (1962)
- 26: Bronstein, I.N., Taschenbuch der Mathematik, 3. Auflage, Harri Deutsch, Frankfurt/Main, 1962, S.378
- 27: Robbins, B.A., Pinotti, P.L., Jones, D.R.: The use of Radioactive Tracer Techniques to determine the effect of operating variables on Engine Wear.
SAE Transactions, Vol.68, 1960, p.298
- 28: Kaspar-Sickermann, W., Sitzler, H.-D.: Das Verschleißverhalten eines Kolbenringes innerhalb des Betriebskennfeldes eines Dieselmotors
Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V., Frankfurt/Main, Heft 30, 1962
- 29: Cavileer, A.C.: Investigation of Piston Ring Wear Using Radioactive Tracer Techniques
SAE Preprint No. S.345, 1962.
- 30: Eliava, A.Ch.: Methode für die Anwendung radioaktiver Isotope zur Untersuchung des Verschleißes von Teilen eines Vergasermotors.
Automobilnaja Promyslennost, Heft 9, 1960, S. 30 (russ.).

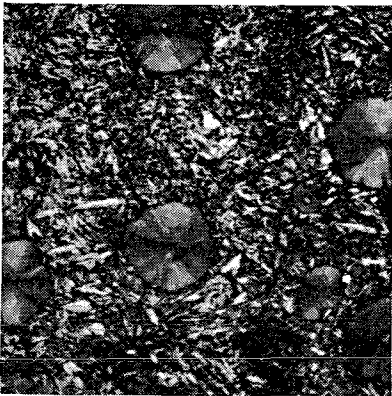
- 31: Abowd, R.G.: Chrome Face versus Iron Side Wear. An
Analysis of Some Radioactive Piston-Ring
Wear Studies.
ASLE Preprint No. 57 LC-3, Oct. 1957
- 32: Pike, W.C., Wear Phenomena of Chromium Plated
Pywell, R.F., Rings as Revealed by Radioactive Tracers
Rudston, S.G.: SAE Paper 690773 (1970)
- 33: Charlesworth, W.H., Wear of Chromium Piston Rings in Modern
Brown, W.L.: Automotive Engines
SAE Transactions, Vol.76 (1968), p.386
- 34: Anonym: Mahle Kolbenkunde, 2.Auflage, Mahle KG,
Stuttgart, 1964, S.31
- 35: Englisch, C.: Kolbenringe, Band I, S.75
Springer-Verlag, Wien, 1958
- 36: Batzold, J.S., Continuous Radiotracer Monitoring
Clarke, J.V., Shows How Piston Rings Wear in Service.
Kunc, J.F.: SAE Transactions, Vol.66, 1958, p.602

9. A N H A N G

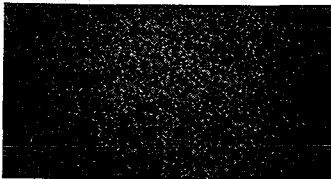
```
LIST
10 PRINT
15 PRINT "VIEL - KOMPONENTEN - MESSUNG GESAMTVERSCHEISS"
20 PRINT
25 READ N
30 PRINT "ANZAHL DER KOMPONENTEN ";N
35 PRINT
40 DIM A[6,6],B[6,6]
45 DIM U[6],E[6],Y[6],X[6],T[6],M[6],F[6]
50 MAT READ A[N,N]
52 MAT B=ZER[N,N]
55 PRINT "EINSTREUFAKTOREN"
60 MAT PRINT A
65 MAT B=INV(A)
70 PRINT "INVERSE MATRIX"
75 MAT PRINT B
80 MAT READ U[N],E[N],T[N]
85 PRINT "UNTERGRUND EICHPAKTOREN HALBWERTSZEIT"
90 PRINT " IMP/MIN GR/IMP/MIN MIN"
95 FOR I=1 TO N
100 PRINT "U";I;"=";U[I];" E";I;"=";E[I];" T";I;"=";T[I]
105 NEXT I
110 PRINT
115 MAT READ M[N],F[N]
120 PRINT "ANZEIGE KOMPENSOGRAF MESSBEREICHUNTERDRUECKUNG"
125 PRINT " GR/CM FAKTOR"
130 FOR I=1 TO N
135 PRINT "M";I;"=";M[I];" F";I;"=";F[I]
137 LET W[I]=0
140 NEXT I
143 LET H9=0
145 PRINT
147 PRINT
150 LET Z=0
160 PRINT "MESSZEIT(MIN) VERSCHLEISS(GR)"
175 CALL (1,X1,X2)
180 LET Z0=(X1+X2*10000)/1000
185 LET Z=Z+Z0
186 PRINT Z;
190 FOR J=1 TO N
200 CALL (1,X1,X2)
205 LET Y[J]=X1+X2*10000
210 LET Y[J]=Y[J]/Z0-U[J]
212 PRINT Y[J];
215 NEXT J
216 PRINT
220 FOR I=1 TO N
225 LET X[I]=0
230 FOR J=1 TO N
235 LET X[I]=X[I]+Y[J]*B[I,J]
240 NEXT J
245 LET X[I]=X[I]*E[I]/EXP(-Z*.693147/T[I])
250 PRINT " X";I;"=";X[I]
252 LET C[I]=X[I]
255 LET X[I]=X[I]*255/(21*M[I])-F[I]*255
260 IF X[I]<255 THEN 280
265 PRINT "MESSBEREICHSUEBERSCHREITUNG IN KANAL";I
270 PRINT "UNTERDRUECKUNGSFAKTOR UM 1 ERHOEHET",F[I]+1
275 LET F[I]=F[I]+1
280 NEXT I
282 LET H=Z
290 IF H <= 1520 THEN 300
295 LET H=H-1520
300 LET H=(H/1520)*9999
305 FOR I=1 TO N
307 PRINT "PLTL"
310 LET V=(C[I]/5)*9999
315 LET V=V*1000
317 PRINT INT(H9);INT(W[I])
320 PRINT INT(H);INT(V)
325 LET W[I]=V
327 PRINT "PLTT"
330 NEXT I
335 LET H9=H
350 PRINT
355 LET B=0
360 CALL (7,X[1],X[2],X[3],X[4],X[5],X[6],B)
365 IF B=0 THEN 355
370 GOTO 175
500 DATA 3
505 DATA 1,.648,.405
510 DATA 1.00000E-04,1,.51
511 DATA 1.00000E-04,.64,1
515 DATA 1000,100,100
516 DATA 6.70000E-07,1.70000E-06,1.40000E-06.
520 DATA 40032.,111312.,64800.
525 DATA 2.00000E-04,2.00000E-04,2.00000E-04,0,0,0
5600 END
```

ungeätzt |——| = 0,1 mm



geätzt mit HNO₃ |——| = 0,01 mm



tiefgeätzt |——| = 1 mm

Material: KV 1, Kugelgraphit vergütet

Verwendungszweck: hochbruchfeste Kolbenringe

Chemische Zusammensetzung in %:

C: 3,5–4,0	Si: 2,3–2,9	Mn: 0,2–0,5	P: < 0,3
S: < 0,05	Cr: < 0,2	Mo:	V:
Cu:	Ni: < 1,0		

Andere Elemente können als Verunreinigung vorhanden sein.
Summe: < 0,2%

Gefügeausbildung:

Graphit: sphärolithisch, flockig

Grundgefüge: Martensit vergütet, mit kleinen punktförmigen Karbiden

Härte:

HRB: 104–112

HRC:

HB: 266–353

Festigkeit:

σ_{bB} : > 130 kp/mm²

σ_{zB} : > 60 kp/mm²

E-Modul: 15 000–17 000 kp/mm²

Wärmeausdehnung in mm/mm °C × 10⁻⁶:

25–100° C 10,0

25–200° C

25–300° C

25–400° C

25–500° C

25–600° C

Spezifisches Gewicht:

7,3 g/cm³

Koerzitivkraft:

≈ 10 Oersted

Wärmeleitfähigkeit:

0,07 cal/cm sec °C

Spez. Widerstand:

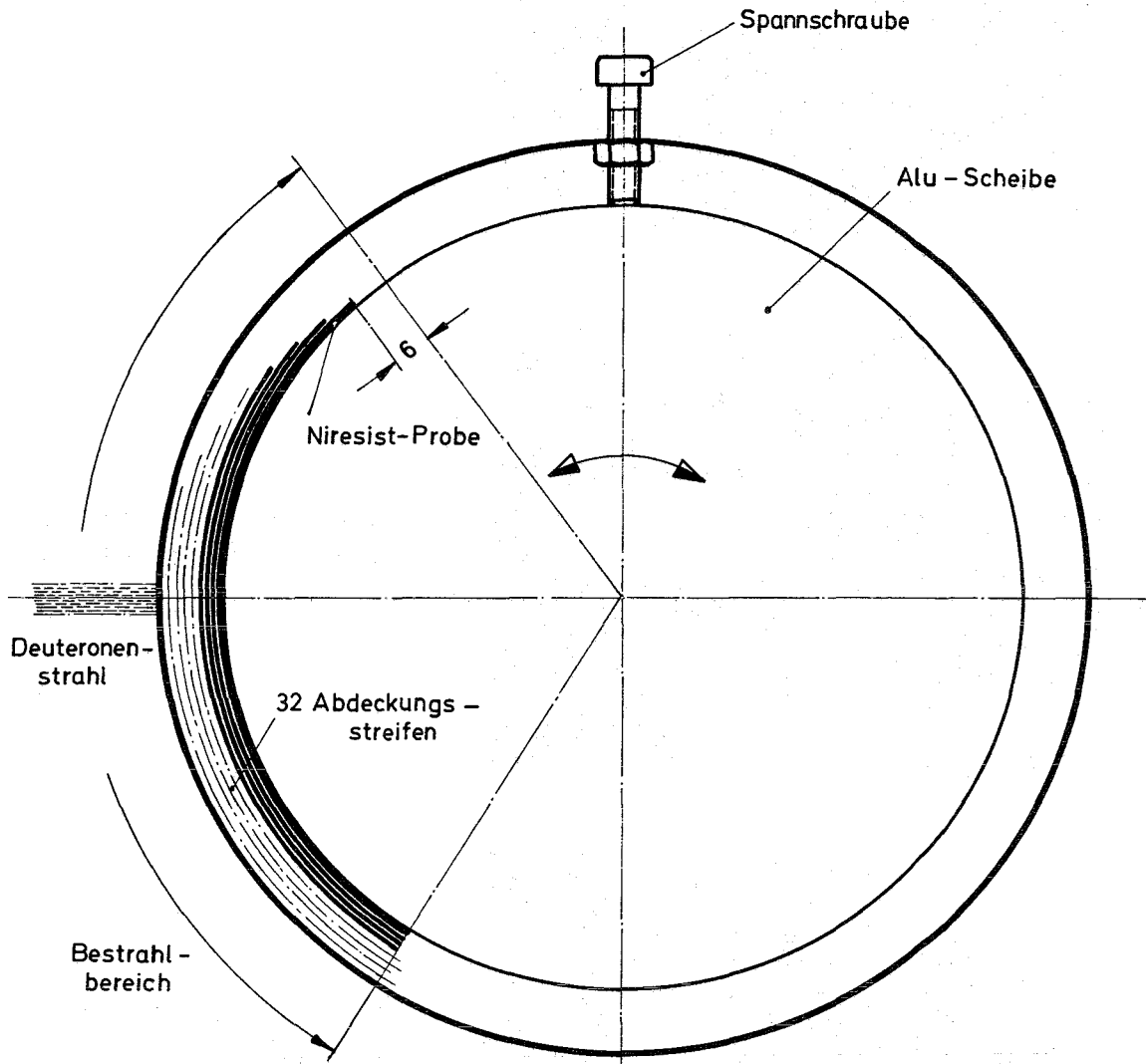
0,5–0,7 Ohm mm²/m

Bemerkungen: Die zugelassenen **Analysengrenzwerte** dienen der Berücksichtigung der Wandstärke. Abweichungen können toleriert werden, wenn dadurch eine Verbesserung der Eigenschaften zu erzielen ist. Die **Härteangaben** sind Mittelwerte aus drei Messungen an einem Ring. 1. Messung: am Stoß; 2. Messung: 90° vom Stoß entfernt; 3. Messung: im Ringrücken. Härteprüfung nach DIN 50103.

Grundmetall		Aluminium	
Legierungsgruppe		AlSi 18 Cu Ni	
Zustand		Kokillenguß	gepreßt
Zusammensetzung %	Si	17	- 19
	Cu	0,8	- 1,5
	Ni	0,8	- 1,3
	Mg	0,8	- 1,3
	Fe	(0,7)	
	Mn	(0,2)	
	Ti	(0,2)	
	Zu	(0,2)	
	Al	Rest	
() = übliche Beimengungen, Verunreinigungen			
Zugfestigkeit	kp/mm ²		
1)	bei 20°C	18-22	23-30
2)	bei 150°C	17-20	20-24
	bei 250°C	10-14	11-17
Streckgrenze	kp/mm ² 1)	17-20	22-26
Bruchdehnung	5% 1)	0,2-0,7	0,5-1,5
Brinellhärte	kp/mm ²	90-125	
	bei 20°C		
Wärmehärte	bei 150°C	70-90	
	bei 250°C	35-45	30-45
Biegewechselfestigkeit	kp/mm ² 1)	8-11	9-12
Elastizitätsmodul	kp/mm ²	8000	
	(bei 200°C)		
Dichte	g/cm ³	2,68	
Mittlere lineare Wärmeausdehnung (20-200°C)	cm/cm °C · 10 ⁻⁶	18,5-19,5	
1) Bei gegossenen Legierungen für getrennt in Kokille gegossene Probestäbe			
2) Nach Erwärmung auf Prüftemperatur zwischen 20 und 100 h			
3) Nach 250 Stunden Erwärmung auf Prüftemperatur			

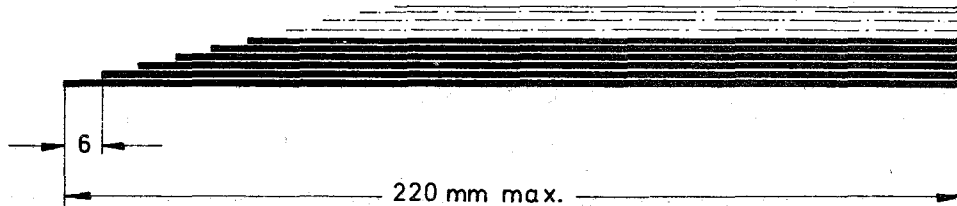
Zusammensetzung und Eigenschaften der Kolbenlegierung Mahle 138 (aus Mahle Kolbenkunde, Mahle KG, Stuttgart-Bad Cannstatt, 1964)

Anhang III

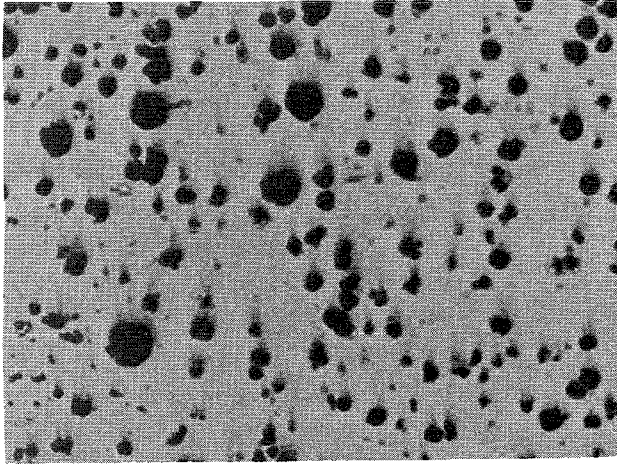


Markierung übereinstimmend, Beschriftung : 1 bis 32

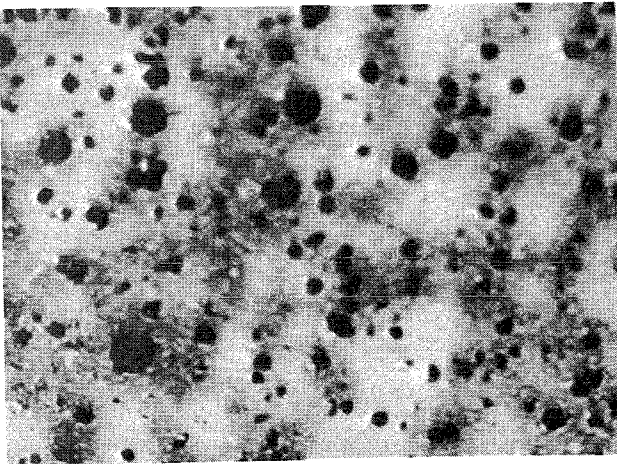
32 Streifen, 12 mm breit



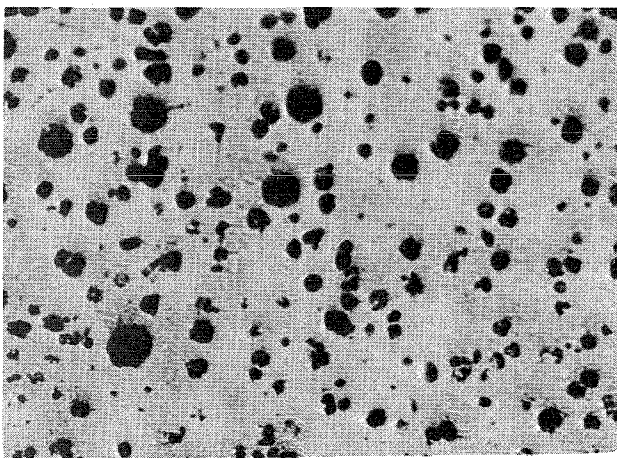
Anhang IV



Va. Vor Säuberung



Vb. Nach 48 h in Hariol
(trocken gewischt)



Vc. Wie Vb, aber Oberfläche
neu poliert

— 0,1 mm

Bild Va - c: Ringflanken-Oberfläche (Sphäroguß) vor und nach der Säuberung mit Hariol. Jeweils gleicher Oberflächenausschnitt und gleiche Vergrößerung. Ungeätzt.

Anhang V