

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM  
KARLSRUHE**

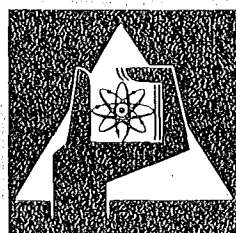
Juli 1975

KFK 2182

Laboratorium für Isotopentechnik

**Verschleißmessungen mit Hilfe von Radionukliden  
nach dem Durchflußmeßverfahren**

B. Herkert



**GESELLSCHAFT  
FÜR  
KERNFORSCHUNG M.B.H.**

**KARLSRUHE**

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.  
KARLSRUHE

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KFK 2182

Laboratorium für Isotopentechnik  
Fachbereich Physik-Maschinenbau

Verschleißmessungen mit Hilfe von Radionukliden  
nach dem Durchflußmeßverfahren

von

Bernhard Herkert

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H. , Karlsruhe



# Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Zusammenfassung	1
2. Einleitung	2
3. Durchflußmeßverfahren	3
3.1 Meßprinzip	3
3.2 Meßelektronik	3
3.3 Meßkopfeichung	4
4. Zusammenhang zwischen Aktivität und Zählraten	6
4.1 Ansprechwahrscheinlichkeit und Peak/Total Verhältnis	6
4.2 Berechnung von $\gamma$ -Spektren	7
4.3 Einkomponentenverschleißmessungen	9
4.4 Mehrkomponentenverschleißmessungen	10
5. Meßgenauigkeit und spezifische Aktivität	12
5.1 Statistische Größen	12
5.2 Genauigkeit einer Verschleißmessung	14
5.3 Beispiele zur Berechnung der spezifischen Aktivität	16
6. Aktivierung von Bauteilen	20
6.1 Neutronenaktivierung	20
6.2 Aktivierung mit geladenen Teilchen	21
7. Praktische Anwendung des Meßverfahrens	22
7.1 Einsatzbereich des Meßverfahrens	22
7.2 Strahlenschutz, Umgangsgenehmigung	24
7.3 Einführung radionuklidtechnischer Methoden in der Industrie	24
8. Bildanhang	26
9. Literaturverzeichnis	32

## 1. Zusammenfassung

Der überwiegende Teil der Verschleißmessungen mit Radionukliden wird mit dem Durchflußmeßverfahren vorgenommen.

Das Meßverfahren und die Meßkopfeichung werden beschrieben, die zur Durchführung einer Verschleißmessung wichtigen Größen werden behandelt. Der Bericht zeigt, wie man die für eine Verschleißmessung nötige Aktivität eines Bauteils berechnen kann, unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Zerfallseigenschaften von Radionukliden. Beispiele zur Aktivitätsberechnung werden aufgeführt; die Berechnungen dazu enthalten alle wichtigen Versuchsbedingungen der Verschleißmessung.

Der Bericht wendet sich in erster Linie an Ingenieure, die sich mit dieser Meßtechnik vertraut machen wollen. Aus diesem Grund sind einige - dem Physiker selbstverständliche Größen - ziemlich ausführlich behandelt.

## Wear Measurements by Means of Radionuclides

### A b s t r a c t

Oil transport of wear particles is the most frequently used method of wear measurements by means of radionuclides.

The measuring method, the calibration and all essential factors governing wear measurements are treated. It is shown how the activity of the machine parts can be computed, the wear of which shall be measured. The  $\gamma$ -spectra of the involved radionuclides and all relevant measuring conditions are taken into account.

## 2. Einleitung

Der Bereich der Radionuklid-Verschleißuntersuchungen für Forschungsaufgaben im Maschinenbau wurde durch die Tätigkeit des LIT in den letzten Jahren wesentlich erweitert. Die beiden gebräuchlichen Verschleißmeßverfahren, das Durchfluß- und das Dünnschichtdifferenzverfahren, sind von Gervé in [ 1 ] beschrieben worden. In diesem Bericht wird ausführlich auf den Umgang mit dem Durchflußmeßverfahren eingegangen. Nach einer kurzen Beschreibung des Meßprinzips wird die Eichung des Meßkopfs erläutert. Anhand der Nachweiseigenschaften des Detektors werden die Messung von Aktivitäten und die Bestimmung von Zählraten für mono- und multienergetische  $\gamma$ -Spektren behandelt. Daran anschließend wird unter Berücksichtigung des statistischen Charakters des radioaktiven Zerfalls abgeleitet, wie groß die notwendige spezifische Aktivität eines Bauteils sein muß, um den Verschleiß mit einer vorgegebenen Genauigkeit zu messen. Schließlich werden einige Anwendungen beschrieben.

In erster Linie ist dieses Meßverfahren ein Hilfsmittel für den mit Verschleißproblemen befaßten Ingenieur im Maschinenbau, der i.a. kein Spezialist für Kernstrahlmeßtechnik ist. Aus diesem Grunde sind im vorliegenden Bericht eine Reihe von Diagrammen und Beispiele aufgenommen, anhand derer die Anwendung dieser Meßtechnik verdeutlicht wird.

Meßanlagen dieses Typs sind dem Laborstadium entwachsen. Sie werden seit 1973 von einem Lizenznehmer [ 2 ] der GfK angeboten. Die Aktivierung von Bauteilen kann über das Labor für Isotopentechnik abgewickelt werden.

### 3. Durchflußmeßverfahren

#### 3.1 Meßprinzip

In einem ölgeschmierten Prüfstand werden die zu untersuchenden und vorher aktivierten Bauteile, z.B. die Kugeln eines Kugellagers, eingebaut. Während des Testlaufes gelangen neben anderem Abrieb auch die radioaktiven Verschleißpartikel der Kugeln in das Öl. Ein Teil des Öls wird ständig durch die an den Ölsumpf angeschlossene Meßanlage gepumpt. In der Anlage befindet sich ein Meßkopf mit einem Kristalldetektor, der die  $\gamma$ -Strahlung des mit dem Öl durchfließenden Verschleißes registriert (vgl. Bild 1). Die  $\gamma$ -Quanten werden in Form von Zählimpulsen einem Zähler zugeführt und in Abständen von einer oder mehreren Minuten ausgedruckt oder in einem Rechner weiterverarbeitet. Demnach ergeben sich als direktes Ergebnis dem im Schmieröl enthaltenen Gesamtverschleiß proportionale Zählraten. Die Physik der Messung von  $\gamma$ -Spektren ist in Lehrbüchern behandelt [ 3, 4 ]. In [ 4 ] findet man eine sehr ausführliche Darstellung über den Nachweis von  $\gamma$ -Strahlung mit Na-J-Detektoren sowie einen Katalog von  $\gamma$ -Spektren.

#### 3.2 Meßelektronik

Bild 2 zeigt eine bewährte Zusammenstellung elektronischer Meßgeräte zur Verschleißmessung. Es ist möglich, statt mit mehreren Einkanaldiskriminatoren und einem Zählsystem, mit einem Vielkanalanalysator zu messen. Der Vielkanalanalysator ist zwar sehr bedienerfreundlich, doch läßt seine Zuverlässigkeit im Langzeitbetrieb noch zu wünschen übrig. Er ist für andere Verwendungszwecke als den hier angesprochenen konzipiert und mit einer Reihe von hier nicht benötigten Einrichtungen versehen. Bei Mehrkomponentenmessungen ist zur Einstellung der Geräte eine Sichtkontrolle des Spektrums vorteilhaft. Für solche Fälle wird die Verwendung eines kleinen (preiswerten) Vielkanalanalysators vorgeschlagen.



### 3.3 Meßkopfeichung

Die Zuordnung der Zählraten zur Verschleißmasse wird über die Eichung hergestellt. Der Verschleiß wird nach folgender Gleichung ermittelt:

$$M_t = K \cdot V \cdot \frac{M_p}{Z_p} \cdot (Z_t - U) e^{1n 2 \cdot \frac{t}{T}} \quad (1)$$

$M_t$ (g)	Gesamtverschleiß zur Zeit $t$
$K$ ( $\frac{1}{\text{Liter}}$ )	Meßkopffaktor "fest-flüssig"
$V$ (Liter)	Gesamtvolumen des Meßkreislaufs
$M_p$ (g)	Masse der Eichprobe
$Z_p$ (Imp/min)	Zählrate der Eichprobe zur Zeit $t = 0$
$Z_t$ (Imp/min)	Zählrate aufgrund von Verschleiß und Untergrund zur Versuchszeit $t$
$U$ (Imp/min)	Untergrundzählrate. Sie ist konstant und keine Funktion der Zeit
$t$	abgelaufene Versuchszeit (nicht zu verwechseln mit der Meßzeit $\tau$ , vgl. S. 14)
$T$	Halbwertszeit des Radionuklids

Der Meßkopffaktor wird bei der "Ureicherung" ermittelt

$$K = \frac{M_1 \cdot Z_{p1}}{Z_1 \cdot M_{p1} \cdot V_1} \quad (2)$$

$M_1$ (g)	Masse der aufgelösten Eichprobe
$Z_1$ (Imp/min)	Zählrate der Eichflüssigkeit
$M_{p1}$ (g)	Masse der festen Eichprobe
$Z_{p1}$ (Imp/min)	Zählrate der festen Eichprobe
$V_1$ (Liter)	Volumen der Eichflüssigkeit

Ein kleines Gedankenexperiment verdeutlicht die Zusammenhänge. Mit den Kugeln zusammen werden 2 Proben aus dem Kugelmaterial von jeweils einigen Milligramm aktiviert. Diese Proben  $M_1$  und  $M_{p1}$  besitzen die gleiche spezifische Aktivität wie die Kugeln.  $M_1$  wird in Säure aufgelöst, die Lösung mit Wasser verdünnt ( $V_1$ ) und im Meßkopf die Zählraten  $Z_1$  für mehrere Energiebereiche des Spektrums bestimmt. Nachdem der Meßkopf wieder entleert ist, werden an einer definierten Stelle des Meßkopfs in der Nähe des Detektors mit der Probe  $M_{p1}$  die Zählraten  $Z_{p1}$  für die gleichen Energiebereiche wie zuvor bestimmt. Der damit bestimmte "Meßkopffaktor" besitzt aufgrund von Compton, Rückstreu- und Schwächungseffekten für  $\gamma$ -Energien kleiner 400 keV eine starke Abhängigkeit von der  $\gamma$ -Energie. Mit dem so geeichtem Meßkopf braucht bei späteren Verschleißmessungen nur noch die bei den Aktivierungen mitbestrahlte Eichprobe  $M_p$  an der erwähnten Stelle (Position des Probenhalters) gemessen werden.

Bild 3 zeigt den Verlauf des mit den Radionukliden  $^{56}\text{Co}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{59}\text{Fe}$  und  $^{51}\text{Cr}$  bestimmten Meßkopffaktors.

Beispiel 1:

gegeben: Der nach einem Verschleißversuch im Meßkreislauf befindliche Verschleiß von  $^{52}\text{Mn}$  ist zu bestimmen.  
Ölvolumen 5 Liter, Meßkopffaktor  $0,43 \text{ 1/L U} = 500 \text{ Imp/min}$ ,  
 $Z_p/M_p = 8000 \text{ Imp/min mg}$ , Zeit zwischen Messung der Eichprobe und Versuchsende 3 Tage, Zählrate bei Versuchsende  
 $Z_t = 4000 \text{ Imp/min}$ ,  $T = 5,7 \text{ Tage}$

Der Verschleiß wird nach der Gl. 1 errechnet:

$$M_t = 0,43 \frac{1}{\text{L}} \cdot 5 \text{ L} \cdot \frac{\text{min mg}}{8000 \text{ Imp}} \cdot (4000-500) \frac{\text{Imp}}{\text{min}} \cdot e^{\ln 2 \cdot \frac{3}{5,7}}$$

$$M_t = 1,35 \text{ mg}$$

---

#### 4. Z u s a m m e n h a n g   z w i s c h e n

#### A k t i v i t ä t   u n d   Z ä h l r a t e n

##### 4.1 Ansprechwahrscheinlichkeit und Peak/Total Verhältnis

Man erkennt aus dem Eichvorgang, daß für Verschleißversuche mit einem bereits aktivierten Bauteil die Kenntnis der spezifischen Aktivität (mC/g) oder auch der Gesamtaktivität (mC) nicht benötigt wird, wenn eine Eichprobe vorhanden ist. Aktivitätsangaben in Curie ( $1 \text{ C} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Zerf./s}$ ) sind jedoch erforderlich für den Strahlenschutz, die Umgangsgenehmigung, die Berechnung der Aktivierung etc. .

Die Zuordnung zwischen den Zählraten und der Aktivität wird hergestellt über die Ansprechwahrscheinlichkeit des Detektors und die  $\gamma$ -Häufigkeit(en) der verwendeten Radionuklide.

Die Ansprechwahrscheinlichkeit des Detektors ist das Verhältnis der in einem Detektor nachgewiesenen zu den von einer Aktivität emittierten  $\gamma$ -Quanten. Diskrete Werte dieser Funktion wurden mit verschiedenen käuflichen Eichstandards bekannter Aktivität für den infrage kommenden Energiebereich von ca. 100-1400 keV und die Position des Probenhalters bestimmt. Eine weitere wichtige Größe ist das Peak/Total Verhältnis, das ist das Verhältnis der Zählrate des Photopeaks zur Zählrate des gesamten Spektrums bestehend aus Comptonkontinuum und Photopeak. Dieses Verhältnis wurde ebenfalls mit Hilfe der Standards gemessen.

Es gelten folgende Beziehungen:

$$Z_{\text{ph}} = A \cdot h \cdot E \quad (3)$$

$$T = \frac{Z_{\text{ph}}}{Z_{\text{T}}} \quad (4)$$

$Z_{ph}$	Zählrate für den Photopeak
A	Aktivität des Eichstandards
h	$\gamma$ -Häufigkeit
E	Ansprechwahrscheinlichkeit (Efficiency) des Detektors
T	Peak/Total-Verhältnis
$Z_T$	Zählrate für den Photopeak + Comptonkontinuum

Bild 4 zeigt die Ansprechwahrscheinlichkeit des Detektors im Durchflußmeßkopf, aufgenommen für die Position des Probenhalters.

Bild 5 zeigt das Peak/Total-Verhältnis, ebenfalls aufgenommen für die Position des Probenhalters.

Mit Hilfe von Ansprechwahrscheinlichkeit und Peak/Total Verhältnis können für beliebige Radionuklide, deren Zerfallseigenschaften z.B. aus [ 5 ] oder [ 6 ] entnommen werden können, die Zählraten für einzelne Peaks oder auch für das ganze  $\gamma$ -Spektrum errechnet werden. Die meisten Radionuklide besitzen mehrere Peaks, z.B.  $^{59}\text{Fe}$ ,  $^{56}\text{Co}$ ,  $^{52}\text{Mn}$ , nur einen Peak haben z.B.  $^{51}\text{Cr}$  und  $^{54}\text{Mn}$ . Bei gleichen Aktivitäten ergeben sich somit sehr unterschiedliche Zählraten, wie im nächsten Abschnitt gezeigt wird.

#### 4.2 Berechnung von $\gamma$ -Spektren

In den folgenden Beispielen wird gezeigt, welche Zählraten am Durchflußmeßkopf für verschiedene Radionuklide gleicher Aktivität zu erwarten sind.

Die Berechnung der Zählraten wird nach den Gleichungen (3) und (4) vorgenommen. Die Zählrate von multienergetischen Spektren setzt sich additiv aus den einzelnen Peaks und den zugehörigen Comptonkontinua zusammen.

Daher gilt:

$$Z_T = \sum_1^n Z_{Ti} \quad (5) \quad n \text{ Zahl der } \gamma\text{-Energien}$$

Unter Berücksichtigung der Gln. (3) und (4) ergibt sich:

$$Z_T = A \cdot \sum_1^n \frac{h_i E_i}{T_i} \quad (6)$$

Die Daten für  $h_i$  können [ 5 ] oder [ 6 ] , die Werte von  $E_i$  und  $T_i$  den Bildern 4 und 5 entnommen werden.

Beispiel 2 :

Die Aktivität von jeweils 1  $\mu\text{C}$  der Nuklide  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{56}\text{Co}$  soll in der Position des Probenhalters gemessen werden. Welche Zählraten sind für die einzelnen Photopeaks ( $Z_{ph}$ ) und für das Spektrum integral ( $\sum Z_{Ti}$ ) zu erwarten ?

gegeben nach					berechnet nach		
Literatur [5]		Bild 4	Bild 5	Gl. 3		Gl. 6	Gl. 6
Nuklid	$\sigma_i$  keV	$h_i$  %	$E_i$  1	$T_i$  1	$Z_{ph}$  Imp/s	$h_i E_i / T_i$  1	$Z_{Ti}$  Imp/s
$^{51}\text{Cr}$	320	9	0,0275	0,7	91	0,00353	131
$^{54}\text{Mn}$	835	100	0,0102	0,335	377	0,03044	1126
$^{56}\text{Co}$	511	40	0,0165	0,51	244	0,01294	479
	847	100	0,01	0,33	370	0,03030	1121
	1040	15	0,0084	0,28	47	0,00450	166
	1240	66	0,0072	0,24	176	0,01980	733
	1760	15	0,0052	0,15	29	0,00520	192
						$\Sigma$ 0,07274	$\Sigma$ 2691

Ergebnis:

Die Zählraten betragen 131 Imp/s für  $^{51}\text{Cr}$ , 1126 Imp/s für  $^{54}\text{Mn}$  und 2691 Imp/s für  $^{56}\text{Co}$  .

Im Abschnitt 5.3 ist ersichtlich, daß Rechnungen nach diesem Schema zur Bestimmung der notwendigen spezifischen Aktivität eines Bauteils durchgeführt werden müssen.

#### 4.3 Einkomponentenverschleißmessungen

Zur Durchführung von Einkomponentenmessungen muß nur ein Bauteil aktiviert werden, z.B. ein Kolbenring einheitlicher Zusammensetzung, Lagerkugeln, eine Gleitlagerschale etc. Die Aktivierungsplanung, die Versuchsdurchführung und -auswertung sind dann besonders einfach. In den meisten Fällen kann das ganze  $\gamma$ -Spektrum statt nur einzelner Peaks zur Messung herangezogen werden. Gegenüber Mehrkomponentenmessungen sind deshalb meist geringere Aktivitäten erforderlich. Die Versuchsplanung ist einfach, da es nicht erforderlich ist, die Aktivierung und auch die Aktivität mehrerer Bauteile aufeinander abzustimmen. Auch ein Gemisch von Radionukliden im bestrahlten Bauteil kann ohne Schwierigkeiten gemessen werden. Die Halbwertszeit des Gemisches braucht nicht bekannt sein, falls die Versuchszeit klein gegen die Halbwertszeiten der einzelnen Nuklide ist. Der Zeitaufwand für die notwendige Eichung beträgt nur wenige Minuten. Zur on-line Registrierung genügt ein Schreiber, ein Rechner ist meist nicht erforderlich.

Es sei noch darauf hingewiesen, daß bei einem Gemisch von 2 Radionukliden aus einem Bauteil der Anteil der beiden Nuklide auch getrennt erfaßt werden kann. Eine solche Messung erlaubt Aussagen über das möglicherweise unterschiedliche Verschleißverhalten einzelner Legierungsbestandteile eines Reibpartners.

#### 4.4 Mehrkomponentenverschleißmessungen

Im allgemeinen sind bei Verschleißerscheinungen mindestens 2 Reibpartner beteiligt, und deren gleichzeitige Messung kann aus technischen oder ökonomischen Gründen erwünscht sein. Falls als Unterscheidungsmerkmal von Nukliden nur ihre  $\gamma$ -Energie zur Messung herangezogen wird, können i.a. zwei, in Einzelfällen auch 3 Verschleißkomponenten gemessen werden. Die Entscheidung darüber hängt von den  $\gamma$ -Spektren der beteiligten Nuklide ab. Als Beispiel für eine Dreikomponentenmessung zeigt Bild 6 die Spektren der 3 Nuklide  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{59}\text{Fe}$ ,  $^{56}\text{Co}$ . Dabei handelt es sich um einen verschliffenen, mit Neutronen aktivierten Kolbenring:  $^{51}\text{Cr}$  aus der Chromlauffläche,  $^{59}\text{Fe}$  aus den Ringflanken, und um eine Zylinderbüchse aus Grauguß, deren Lauffläche mit Deuteronen bestrahlt wurde:  $^{56}\text{Co}$ .

Mit Hilfe von 3 Einkanaldiskriminatoren werden die drei Energiebereiche I, II, III erfaßt. Die im Fenster I gemessene Zählrate setzt sich aus dem zu messenden Nuklid  $^{51}\text{Cr}$  und dem in den Energiebereich I fallenden Anteil der Comptonkontinua der beiden anderen Nuklide  $^{56}\text{Co}$  und  $^{59}\text{Fe}$  zusammen. Diese gegenseitige Einstreuung der 3 Nuklide wird durch ein lineares Gleichungssystem beschrieben:

$$\begin{aligned} Z_{\text{I}} - U_{\text{I}} &= k_{11} Z_1 + k_{12} Z_2 + k_{13} Z_3 \\ Z_{\text{II}} - U_{\text{II}} &= k_{21} Z_1 + k_{22} Z_2 + k_{23} Z_3 \\ Z_{\text{III}} - U_{\text{III}} &= k_{31} Z_1 + k_{32} Z_2 + k_{33} Z_3 \end{aligned} \quad (7)$$

$k_{ij}$  Einstreufaktoren, werden bei der Eichung ermittelt.

$Z_{\text{I}}, Z_{\text{II}}, Z_{\text{III}}$  Während des Verschleißversuches gemessene Zählraten in den 3 Energiebereichen

$U_{\text{I}}, U_{\text{II}}, U_{\text{III}}$  Untergrund, wird vor dem Versuch gemessen

$Z_1, Z_2, Z_3$  Nettoimpulsraten für die 3 Verschleißkomponenten. Sie werden mit einem Prozessrechner während des Versuchs ermittelt. Der Verschleiß der 3 Komponenten beträgt damit:

$$\begin{aligned}
 M_{t1} &= K_I \cdot V \cdot \frac{M_{p1}}{Z_{p1}} \cdot Z_1 \cdot e^{\ln 2} \cdot \frac{t}{T_1} \\
 M_{t2} &= K_{II} \cdot V \cdot \frac{M_{p2}}{Z_{p2}} \cdot Z_2 \cdot e^{\ln 2} \cdot \frac{t}{T_2} \\
 M_{t3} &= K_{III} \cdot V \cdot \frac{M_{p3}}{Z_{p3}} \cdot Z_3 \cdot e^{\ln 2} \cdot \frac{t}{T_3}
 \end{aligned} \tag{8}$$

Bestimmung der Einstreufaktoren:

Die  $k_{ij}$  werden vor Beginn der Versuche mit Hilfe von 3 Eichproben ermittelt. Die Eichproben werden aufgelöst und die Lösungen im Meßkopf gemessen. Man mißt nacheinander die aufgelösten Proben im Meßkopf.

Für die 1. Probe gilt:

$$\begin{aligned}
 Z_I - U_I &= k_{11} Z_1 + k_{12} 0 + k_{13} 0 & k_{11} &= 1 \\
 Z_{II} - U_{II} &= k_{21} Z_1 + 0 + 0 & k_{21} &= \frac{Z_{II} - U_{II}}{Z_I - U_I} \\
 Z_{III} - U_{III} &= k_{31} Z_1 + 0 + 0 & k_{31} &= \frac{Z_{III} - U_{III}}{Z_I - U_I}
 \end{aligned} \tag{9}$$

Entsprechend ergibt sich mit den beiden anderen Proben für die weiteren  $k_{ij}$  :

$$\begin{aligned}
 k_{12} &= \frac{Z_I - U_I}{Z_{II} - U_{II}} & k_{13} &= \frac{Z_I - U_I}{Z_{III} - U_{III}} \\
 k_{22} &= 1 & k_{23} &= \frac{Z_{II} - U_{II}}{Z_{III} - U_{III}} \\
 k_{32} &= \frac{Z_{III} - U_{III}}{Z_{II} - U_{II}} & k_{33} &= 1
 \end{aligned}$$



## 5. Meßgenauigkeit und spezifische Aktivität

### 5.1 Statistische Größen

Betrachtet man den Zerfall eines Radionuklides während einer endlichen Zeit  $\tau$  ( $\tau \ll T$ ) und zählt einige Male nacheinander die in dieser Meßzeit  $\tau$  anfallenden Impulse mit einer geeigneten Meßanordnung, so wird man statistische Schwankungen der gemessenen Impulszahlen feststellen. Das Wahrscheinlichkeitsgesetz, das auf den radioaktiven Zerfall angewendet werden kann, ist die Poisson Verteilung. Ein geeignetes Maß für die Beschreibung der Schwankungen der Impulszahlen ist die Standardabweichung, die für die Poisson-Verteilung eine besonders einfache Form hat:

$$\sigma_c = \pm \sqrt{C} \quad (10)$$

$\sigma_c$  Standardabweichung

C gemessene Impulszahl

In vielen Fällen wird nicht der Mittelwert der Impulszahl bekannt sein, sondern nur ein einziger Meßwert für C vorliegen. Dann sollte  $C > 100$  betragen, damit der Mittelwert gut angenähert wird [3].

Beispiel 3 : Es werden  $C = 10000$  Impulse in 5 Minuten gezählt

$$\sigma_c = \pm \sqrt{10000} = 100 \text{ Imp}$$

Dieser Wert entspricht einer relativen Genauigkeit von 1%, da

$$\frac{\sigma_c}{C} = \frac{\pm \sqrt{C}}{C} = \pm \frac{1}{\sqrt{C}} \quad (11)$$

Wie bereits in Kap. 3.3 am Beispiel der Eichung ersichtlich, wird außer mit den Impulszahlen C oft mit den auf die Meßzeit  $\tau$  bezogenen Zählraten Z gerechnet

$$Z = \frac{C}{\tau} \quad (12)$$

Für das Beispiel :  $Z = \frac{10000}{5} = 2000 \text{ Imp/min}$

Wir führen nun eine neue Rechengröße ein, die Standardabweichung der Zählrate. Diese Größe wird im nächsten Kapitel benötigt.

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma_c}{\tau} = \frac{\pm \sqrt{C}}{\tau} \quad (13)$$

Im Beispiel :  $\tilde{\sigma} = \frac{100}{5} = 20 \text{ Imp/min}$

Die Standardabweichung der Zählrate ist nach (13) von der Zählzeit abhängig und kann für dieselbe Zählrate je nach der gewählten Zählzeit unterschiedliche Werte annehmen. Diese Standardabweichung ist nicht die Wurzel aus der Zählrate, sondern nach der Vorschrift (13) zu bestimmen.

Anmerkung : Wendet man auf die durch C und  $\sigma_c$  gekennzeichnete Poisson-Verteilung die lineare Transformation  $Z = \tau^{-1} \cdot C$  an, so folgt daraus:  $\tilde{\sigma} = \sigma_c / \tau$  [ 7 ] .

Bezieht man wie in Gl.(11) die Standardabweichung der Zählrate auf die Zählrate Z

$$\frac{\tilde{\sigma}}{Z} = \frac{\pm \sqrt{C} / \tau}{C / \tau} \quad (14)$$

so ergibt sich wiederum wie in (11)

$$\frac{\tilde{\sigma}}{Z} = \pm \frac{1}{\sqrt{C}} \quad (15)$$

und damit gilt

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma_c}{C} \quad (16)$$

Nach Gl. (11) oder (15) hängt die relative Genauigkeit einer Messung also nur vom Wert C ab .

Nach (12) gilt

$$C = \tau \cdot Z \quad (17)$$

Soll bei einer Messung also eine hohe statistische Genauigkeit erreicht werden, so muß man die Faktoren  $\tau$  und oder  $Z$  möglichst groß wählen. Die Meßzeit  $\tau$  ist i.a. frei wählbar; z.B. Meßzeiten von 2, 4, 10 Minuten sind in diesem Zusammenhang übliche Werte. Die Zählrate  $Z$  ist meist einer zu messenden Aktivität proportional; sie ist durch eine entsprechende Aktivierung und durch die Meßbedingungen beeinflussbar. Ist die zu messende Zählrate  $Z$  dagegen die Untergrundzählrate, so kann die Genauigkeit nur durch die Meßzeit  $\tau$  beeinflusst werden.

## 5.2 Genauigkeit einer Verschleißmessung

Es soll die Aufgabe gelöst werden, einen bestimmten Mindestverschleiß mit einer vorgegebenen Genauigkeit nachzuweisen. Wir betrachten dazu die Gleichung (1). Neben den anderen Größen hängt der zu messende Verschleiß  $M_t$  von den Zählraten ( $Z_t - U$ ) ab .

$$Z_{tn} = Z_t - U \quad (18)$$

Die Nettozählrate  $Z_{tn}$  ist proportional der  $\alpha$ -Strahlung der Verschleißmasse, die sich im ölgefüllten Meßkopf befindet.

Die Standardabweichungen der Zählraten  $Z_t$  und  $U$  betragen

$$G_t = \frac{\sqrt{c_t}}{\tau} \quad (19)$$

$$G_u = \frac{\sqrt{c_u}}{\tau} \quad (20)$$

$\tau$  Meßzeit (bleibt während der Versuchszeit konstant und wird am Zählsystem eingestellt, z.B. 1, 4, 10 Minuten).

$c_t$  Impulszahl aufgrund von Verschleiß und Untergrund, gemessen im Zeitintervall  $\tau$  zur Zeit  $t$

$Z_t = \frac{c_t}{\tau}$  Zählrate aufgrund von Verschleiß und Untergrund (rechnerische Größe)

$C_u$  Impulszahl aufgrund des Untergrunds

$U = \frac{C_u}{\tau}$  Zählrate des Untergrundes. Sie wird vor Beginn des Versuches bestimmt, wenn sich noch kein Verschleiß im Meßkopf befindet (rechnerische Größe, vgl. S. 4).

Nach dem allgemeinen Satz für die Varianz der Summe unabhängiger Werte gilt :

$$A = B \pm C \pm D \pm \dots\dots\dots$$

$$\sigma_A = \sqrt{(\sigma_B^2 + \sigma_C^2 + \sigma_D^2 + \dots)}$$

Damit ergibt sich für die Standardabweichung der Zählrate  $Z_{tn}$

$$\sigma = \sqrt{\sigma_t^2 + \sigma_u^2} \quad (21)$$

Nach den Gleichungen (1) und (18) gilt für den Verschleiß

$$M_t \sim Z_{tn} \quad (22)$$

Den statistischen Abweichungen  $\Delta Z_{tn}$  des Wertes  $Z_{tn}$  vom Mittelwert entsprechen Abweichungen  $\Delta M_t$  der Angabe des Verschleißwertes  $M_t$ . Die Standardabweichung  $\sigma$  (vgl. Gl.(21)) ist das Maß für  $\Delta Z_{tn}$ . Bezieht man die Abweichung auf die Meßwerte, so ergibt sich (die Proportionalitätsfaktoren kürzen sich) :

$$\frac{\Delta M_t}{M_t} = \frac{\sigma}{Z_{tn}} \quad (23)$$

Ersetzt man in den Gleichungen (19, 20) die Impulszahlen durch die Zählraten ( $C = \tau \cdot Z$ ) so gewinnt die Gl.(21) in Verbindung mit (23) die für jede Versuchszeit geltende Form :

$$\frac{\sigma}{Z_n} = \sqrt{\frac{1}{\tau \cdot Z_n} \left(1 + 2 \frac{U}{Z_n}\right)} \quad (24)$$

Damit ist die Lösung der angegebenen Aufgabe gefunden.

Die Untergrundzählrate  $U$  für den Durchflußmeßkopf liegt bei ca. 200 - 1500 Imp/min, je nach dem verwendeten Meßbereich. Für einige beispielhaft ausgewählte Werte von Untergrund  $U$  und Meßzeit  $\tau$  als feste Parameter wurde  $\sigma/Z_n$  nach Gl.(24) bestimmt und aus Gründen einer übersichtlichen Darstellung über dem Zählratenverhältnis  $Z_n/U$  aufgetragen (Bilder 7, 8, 9). Man kann aus den so gewonnenen Diagrammen den Einfluß von  $U$  und  $\tau$  auf die relative Genauigkeit ablesen. So läßt sich bei Vorgabe einer relativen Genauigkeit die Nettozählrate  $Z_n$  bestimmen.

Beispiel 4 :  $\Delta M_t/M_t = 1\%$  ,  $U = 1000$  Imp/min ,  $\tau = 4$  min

Aus Bild 9 liest man ab  $Z_n/U = 3,8$

Damit ergibt sich  $Z_n = 3,8 \cdot 1000 = 3800$  Imp/min .

Mit Hilfe der Nettozählrate kann die erforderliche spezifische Aktivität eines Bauteils berechnet werden, wie im nächsten Kapitel gezeigt wird.

### 5.3 Beispiele zur Berechnung der spezifischen Aktivität

Im Abschnitt 4.2 wurde gezeigt, zu welcher unterschiedlichen Zählraten die gleiche Aktivität verschiedener Nuklide führen kann. Die Zählrate ist abhängig von der Ansprechwahrscheinlichkeit des Detektors für den in Frage kommenden Energiebereich, vom gemessenen Energieintervall, von den Zerfallseigenschaften des Radionuklids. Die von einer Verschleißmasse im Meßkopf verursachte Zählrate ist proportional der spezifischen Aktivität des Verschleißes, das ist die auf ein Gramm bezogene Aktivität :

$$a = \frac{A}{M} \quad (25)$$

$a$  spezifische Aktivität

$A$  Aktivität

$M$  Masse

Man benötigt also bei praktischen Anwendungen sehr unterschiedliche spezifische Aktivitäten. Die Größenordnung der im LIT verwendeten spezifischen Aktivitäten liegen im Bereich von:

$$^{59}\text{Fe} : a = 0,05 - 0,4 \text{ mC/g}$$

$$^{51}\text{Cr} : a = 1 - 100 \text{ mC/g}$$

$$^{56}\text{Co} : a = 0,03 - 0,4 \text{ mC/g}$$

Beispiel 5:

gegeben: Geringster nachzuweisender Verschleiß  $M_t = 3 \text{ mg}$   
Ölvolumen im Meßkreislauf  $V = 5 \text{ Liter}$   
Meßnuklid  $^{56}\text{Co}$   $T = 77 \text{ Tage}$ , Zeit zwischen  
Aktivierungsende und Verschleißmessung  $t = 20 \text{ Tage}$ .

- a) Nur der Peak von 847 keV soll gemessen werden  
 $U = 200 \text{ Imp/min}$ ,  $K = 0,53 \text{ l/L}$
- b) Das Spektrum soll integral gemessen werden  
 $U = 1000 \text{ Imp/min}$ ,  $K = 0,48 \text{ l/L}$

gefordert: Der Verschleiß soll mit einer Standardabweichung von 2% bei einer Meßzeit von  $\tau = 1 \text{ Minute}$  nachgewiesen werden. Wie groß muß nach a) und b) die spezifische Aktivität sein.

Lösung: Aus Bild 7 entnimmt man für  $\sigma/Z_n = 2\%$   
im Falle a)  $Z_n/U = 14$   $Z_n = 14 \cdot 200 \text{ Imp/min}$   
 $Z_n = 2800 \text{ Imp/min}$

---

im Falle b)  $Z_n/U = 3,9$   $Z_n = 3,9 \cdot 1000 \text{ Imp/min}$   
 $Z_n = 3900 \text{ Imp/min}$

---

Die spezifische Zählrate der Eichprobe wird aus der Gl. (1) errechnet. Auflösung der Gleichung nach  $Z_p/M_p$ :

$$\frac{Z_p}{M_p} = \frac{K \cdot V \cdot (Z_t - U) e^{\ln 2 \cdot \frac{t}{T}}}{M_t} \quad (26) \quad \text{mit } Z_t - U = Z_n$$

Mit den bekannten Größen ergeben sich für :

$$a) \quad \frac{Z_p}{M_p} = \frac{0,53 \cdot 5 \cdot 2800 \cdot e^{0,693} \cdot \frac{20}{77}}{3}$$

$$\frac{Z_p}{M_p} = 2961 \frac{\text{Imp}}{\text{min mg}}$$

=====

$$b) \quad \frac{Z_p}{M_p} = \frac{0,48 \cdot 5 \cdot 3900 \cdot e^{0,693} \cdot \frac{20}{77}}{3}$$

$$\frac{Z_p}{M_p} = 3735 \frac{\text{Imp}}{\text{min mg}}$$

=====

Im Fall a) wird nur einer der Photopeaks des Spektrums gemessen.

Er leistet allein den Beitrag zu  $Z_p$ , also gilt:  $\frac{Z_p}{M_p} = \frac{Z_{ph}}{M}$

Die spezifische Aktivität ergibt sich aus den Gleichungen (3) und (25)

$$a = \frac{Z_{ph}}{h \cdot E \cdot M} \quad (27)$$

h und E werden aus der Tabelle von Beispiel 2 in Abschnitt 4.2 entnommen.

$$a = 2961 \frac{\text{Imp}}{\text{min mg}} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \cdot \frac{1 \text{ Zerf}}{1 \cdot 0,01 \text{ Imp}} \cdot \frac{1 \mu\text{C} \cdot \text{s}}{37000 \text{ Zerf}}$$

$$a = 0,12 \frac{\mu\text{C}}{\text{mg}} \quad a = 0,12 \frac{\text{mC}}{\text{g}}$$

=====

Im Falle b) wird das ganze Spektrum bestehend aus allen Peaks und Comptonkontinuum gemessen

$$\text{d.h.} \quad \frac{Z_p}{M_p} = \frac{Z_T}{M}$$

Die spezifische Aktivität ergibt sich aus den Gln. (6) und (25)

$$a = \frac{Z_T}{M \cdot \sum \frac{h_i E_i}{T_i}} \quad (28)$$

$\sum \frac{h_i E_i}{T_i}$  wird aus der Tabelle von Beispiel 2 entnommen

Für andere als in der Tabelle beispielhaft durchgerechnete Radionuklide können die benötigten Werte nach dem dort angegebenen Schema berechnet werden:

$$a = 3735 \frac{\text{Imp}}{\text{min mg}} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \cdot \frac{1 \text{ Zerf}}{0,07274 \text{ Imp}} \cdot \frac{1 \text{ } \mu\text{C} \cdot \text{s}}{37000 \text{ Zerf}}$$

$$a = 0,023 \frac{\mu\text{C}}{\text{mg}} \quad a = 0,023 \frac{\text{mC}}{\text{g}}$$

=====

Es sei noch einmal darauf hingewiesen, daß auch die Meßzeit  $\tau$  eine Rolle spielt. So ist z.B. bei einer Meßzeit von  $\tau = 10 \text{ min}$  statt  $\tau = 1 \text{ min}$  im Beispiel b) die notwendige spezifische Aktivität nur noch  $a = 0,0038 \text{ mC/g}$ , wie eine entsprechende Rechnung zeigt.

Die Berechnung der spezifischen Aktivität für Einkomponentenverschleißmessungen kann nach dem angegebenen Schema durchgeführt werden.

Man wird bei Messungen "integral" vgl. Beispiel 5 b) das Spektrum nicht immer ab der Energie "Null" erfassen (Rauschen, hoher Rückstreupeak). Die spezifische Aktivität muß dann entsprechend etwas höher als im Beispiel b) angesetzt werden.

Die Berechnung der notwendigen spezifischen Aktivitäten für Mehrkomponentenverschleißmessungen kann mit Hilfe eines am LIT entwickelten Rechenprogramms durchgeführt werden. Bei dieser Rechnung müssen außer dem Untergrund noch die Einstreuungen berücksichtigt werden.



## 6. Aktivierung von Bauteilen

### 6.1 Neutronenaktivierung

Wir haben gesehen, daß für die Anwendung des Durchflußmeßverfahrens der nachzuweisende Verschleiß eine bestimmte spezifische Aktivität aufweisen muß. Die Bauteile, deren Verschleiß gemessen werden soll, müssen also vorher entsprechend aktiviert werden. Die Aktivierung kann in einem Reaktor mit Hilfe von Neutronen erfolgen, wobei die Teile in ihrer ganzen Masse gleichmäßig aktiv werden. Die Aktivierungsbedingungen können nach Baumgärtner [ 8 ] errechnet werden.

Die Gesamtaktivität eines Bauteils sollte einige Millicurie nicht überschreiten, um Montagearbeiten nicht zu erschweren. Diese Forderung bedeutet, daß nur kleinere Maschinenteile, bis ca. einige zehn Gramm schwer, mit Neutronen aktiviert werden können. Beispiele für die Aktivierung sind Kolbenringe, Wälzlager-Kugeln, Klemmkörper von Freiläufen.

In Sonderfällen ist es auch möglich, Bauteile mit Kadmiumblech so zu umhüllen, daß nur einzelne Zonen dem Neutronenfluß ausgesetzt sind. Aufgrund des hohen Wirkungsquerschnittes von Cd für thermische Neutronen wird im wesentlichen nur der nichtabgedeckte Teil radioaktiv.

Da thermische Neutronen i.a. nur mit niedrigem Fluß ( $\phi \sim 10^{10} - 10^{12}$  n/s cm<sup>2</sup>) zur Verfügung stehen, müssen lange Bestrahlungszeiten in Kauf genommen werden. Gute Ergebnisse wurden bei der Aktivierung von verchromten Teilen erzielt [ 9 ] .

## 6.2 Aktivierung mit geladenen Teilchen

Heute werden für die Anwendungen im Maschinenbau häufiger Aktivierungen mit geladenen Teilchen am Zyklotron als mit Neutronen im Kernreaktor durchgeführt, da hierbei keine Beschränkungen in der Größe der zu aktivierenden Maschinenteile bestehen.

Der in der Zyklotronmaschine auf hohe Energien (ca. 10-50 MeV) beschleunigte Teilchenstrahl von Protonen, Deuteronen oder  $\alpha$ -Teilchen, wird über verschiedene Ablenkeinrichtungen aus der Maschine herausgeführt und auf das zu aktivierende Maschinenteil gerichtet, d.h. es wird "in Luft" bestrahlt.

Die geeignete Wahl der Teilchenenergie gestattet die Aktivierung einer dünnen Schicht (ca. 0,05-0,5 mm). Die zu aktivierende Fläche liegt bei den üblichen Anwendungen im Bereich von Quadratzentimetern. Somit werden i.a. nur wenige Gramm eines Bauteils aktiviert, und die Gesamtaktivität ist meist deutlich kleiner als 1 Millicurie. Einzelheiten über die aktivierbaren Metalle und die Berechnung der Aktivierungsbedingungen mit geladenen Teilchen finden sich in [10]. Beispiele für die Aktivierung mit geladenen Teilchen sind Zylinderbüchsen, Nockenwellen, Ventile, Kolbenringe, Wälz- und Gleitlager etc.

Während die Aktivierung mit Neutronen an vielen Forschungsreaktoren möglich ist, sind die Einrichtungen zur Bestrahlung von Maschinenteilen mit geladenen Teilchen in Deutschland bisher nur am Zyklotron des Kernforschungszentrums Karlsruhe vorhanden. In begrenztem Umfang können Aktivierungen auch für externe Kunden über das LIT abgewickelt werden.

Zur Zeit werden in einer Arbeit von Kronenberger die theoretischen Grundlagen der Aktivierung in umfangreichen Rechenprogrammen verarbeitet, wobei auf die in diesem Gebiet von der physikalischen Forschung erarbeiteten Ergebnisse (in Form von einigen tausend Anregungsfunktionen) zurückgegriffen wird. Das Ziel ist die Berechnung der optimalen Aktivierungsbedingungen (Auswahl zwischen d, p,  $\alpha$ , Festlegung der Teilchenenergie) für ein beliebiges Target bekannter Le-

gierungszusammensetzung. Die mit Hilfe des vorliegenden Berichts berechenbare Aktivität von Beuteilen wird als Input in dem erwähnten Rechenprogramm benötigt.

## 7. P r a k t i s c h e   A n w e n d u n g   d e s M e ß v e r f a h r e n s

### 7.1   Einsatzbereich des Meßverfahrens

Die ersten Verschleißmessungen mit aktivierten Bauteilen wurden bereits in den vierziger Jahren durchgeführt, wobei die Aktivierung meist mit Neutronen vorgenommen wurde. In den fünfziger Jahren wurde an vielen Stellen in Forschungslabors und Industrie diese Meßtechnik eingesetzt, aber häufig nach einiger Zeit auch wieder aufgegeben. Die Gründe dafür lagen einerseits in der Unzuverlässigkeit der überdies teuren Meßgeräte auf Röhrenbasis, andererseits in der hohen Aktivität der neutronenaktivierten Bauteile.

Mit der Entwicklung der vergleichsweise preiswerten und zuverlässigen Meßelektronik, der Möglichkeiten der Dünnschichtaktivierung und der im LIT durchgeführten Arbeiten zur Verbesserung der Aktivierung und Meßtechnik erscheint nun die routinemäßige Durchführung radionuklid-technischer Verschleißmessungen in der Industrie möglich. Entscheidungshilfen für die Einführung dieser Meßtechnik in die Industrie gibt die Arbeit von Emrich [ 11 ], in der am Beispiel der Motorenentwicklung eine Untersuchung über den Nutzen der RNT durchgeführt wurde. Anhand einer Analyse der auftretenden Verschleißprobleme werden konventionelle und RNT-Meßverfahren verglichen, wobei die technische Leistungsfähigkeit, Kosten und Wirtschaftlichkeit berücksichtigt sind.

Vom technischen Standpunkt aus hat sich das Verfahren bei folgenden Untersuchungen bewährt:

- 1) Verbrennungsmotoren: Kolbenringe, Zylinderbüchsen [ 12 ] ,  
Gleitlager, Nockenwellen.

Bauliche Veränderungen am Motor sind nicht erforderlich. Die Verschleißmeßanlage wird an der Ölwanne angeschlossen. Im Einzelfall muß geprüft werden, ob Versuche ohne Ölfilter durchgeführt werden können. Ansonsten wird der im Filter zurückgehaltene Verschleiß gesondert erfaßt.

- 2) Prüfstände: Gleitlager [ 13 ] , Wälzlager [ 14 ] , Freiläufe,  
Zahnräder, Getriebe [ 15 ] , Kolbenringe zur Abdichtung rotierender Wellen.

In vielen Fällen enthalten Prüfstände bereits einen Ölbehälter, an den die Verschleißmeßanlage angeschlossen werden kann. Im allgemeinen sind nur geringe Prüfstandsänderungen erforderlich. Das Ölvolumen des Prüfstandes sollte möglichst ständig in Bewegung gehalten werden, damit die Verschleißteilchen in der Schwebe gehalten werden. Die in Einzelfällen beobachtete Ablagerungsbildung von Verschleißteilchen kann durch "Blindversuche" ermittelt werden. Blindversuche sind Prüfstandsläufe ohne radioaktives Bauteil, jedoch mit radioaktivem Verschleiß im Schmieröl.

- 3) Schmierölprüfung, Wirkung von Additiven.

Die Untersuchung des Verschleißverhaltens eines Bauteils unter verschiedenen Betriebsparametern war bisher eine der Hauptanwendungen dieser Meßtechnik. Neben den Materialeigenschaften ist u.a. die Schmierölqualität wichtig für die sichere Funktion einer Maschine. Die Meßmethode gestattet besonders leicht den Vergleich des Verschleißschutzes verschiedener Öle, welche in Prüfständen oder Motoren mit bekanntem Verschleißverhalten getestet werden. So wurden interessante Ergebnisse über das Verschleißverhalten von Mehrbereichsölen in Gleitlagern und Motoren erzielt [ 16 ] . Auch die Wirkung von Öladditiven läßt sich auf diese Weise bestimmen [ 17 ] . Bei solchen Untersuchungen muß sorgfältig auf den gleichen Referenzzustand einer Prüfanlage geachtet werden.

## 7.2 Strahlenschutz, Umgangsgenehmigung

Unter Strahlenschutz versteht man Maßnahmen zur Abwendung von Schäden durch die Strahlen radioaktiver Stoffe. Im wesentlichen bedeutet diese Forderung, daß bestimmte, vom Gesetzgeber in der 1. Strahlenschutzverordnung [ 18 ] festgelegte Regeln beim Umgang mit radioaktiven Stoffen eingehalten werden und daß bestimmte Strahlendosen nicht überschritten werden dürfen.

In dieser Verordnung ist weiterhin vorgeschrieben, daß für den Umgang mit radioaktiven Stoffen eine Umgangsgenehmigung erforderlich ist, die von den zuständigen Landesbehörden ausgestellt wird. Für Baden-Württemberg ist das Arbeits- und Sozialministerium in Stuttgart zuständig. Diese Genehmigung ist notwendig für den Umgang mit Aktivitäten größer als 1-10  $\mu\text{C}$ . Für die Durchführung der hier behandelten Verschleißmessungen ist das also der Fall. Im allgemeinen muß gegenüber der Behörde die nötige Fachkunde über den Strahlenschutz nachgewiesen werden. Kenntnisse darüber werden z.B. in regelmäßig abgehaltenen Kursen der "Schule für Kerntechnik" am Kernforschungszentrum Karlsruhe vermittelt.

## 7.3 Einführung radionuklidtechnischer Methoden in der Industrie

In der Bundesrepublik und auch im Ausland ist das beschriebene Meßverfahren in verschiedenen Firmen der Automobil- und Mineralölindustrie im Einsatz. In der BRD beschäftigt sich das LIT mit der Weiterentwicklung und Anwendung dieses und anderer radionuklidtechnischer Verfahren. Mit Hilfe eines am LIT vorhandenen Meßwagens können in begrenztem Maße Verschleißuntersuchungen auch in Industrieunternehmen durchgeführt werden. Doch soll die Industrie angeregt werden, mit eigenen Meßanlagen Verschleißuntersuchungen durchzuführen. Eine Beratung darüber kann über das LIT und die Firma AVIATEST [ 2 ] erfolgen.

Ein letztes Wort zur Gefährlichkeit des Umgangs mit radioaktiven Maschinenteilen. So wird oft die Frage gestellt, ob ähnlich dem Vorgang der Aktivierung, die von diesen Teilen ausgehende Strahlung den Menschen selbst radioaktiv machen kann. Das ist jedoch deshalb völlig ausgeschlossen, da die von den aktiven Teilen emittierte  $\alpha$ - und  $\beta$ -Strahlung so niedrige Energien besitzt, ca 0,01 bis 2 MeV, daß eine Aktivierung nicht ausgelöst werden kann. Dazu wären Energien ab ca. 8 MeV erforderlich, die wiederum nur in Beschleunigern erreicht werden können.

Dagegen beruht die Wirkung der  $\alpha$ - und  $\beta$ -Strahlen auf Effekten der Ionisation des menschlichen Organismus - und dabei ist wesentlich die aufgenommene Dosis. Bei den relativ niedrigen Aktivitäten, die bei diesen Anwendungen benötigt werden, ist die Einhaltung der Strahlenschutzbestimmungen meist nicht einmal mit besonderen Vorkehrungen verbunden. Die Strahlendosis ist in den meisten Fällen so gering, daß auf den zu Überwachungszwecken getragenen Dosimetern und Plaketten keine meßbaren Veränderungen ausgelöst werden.

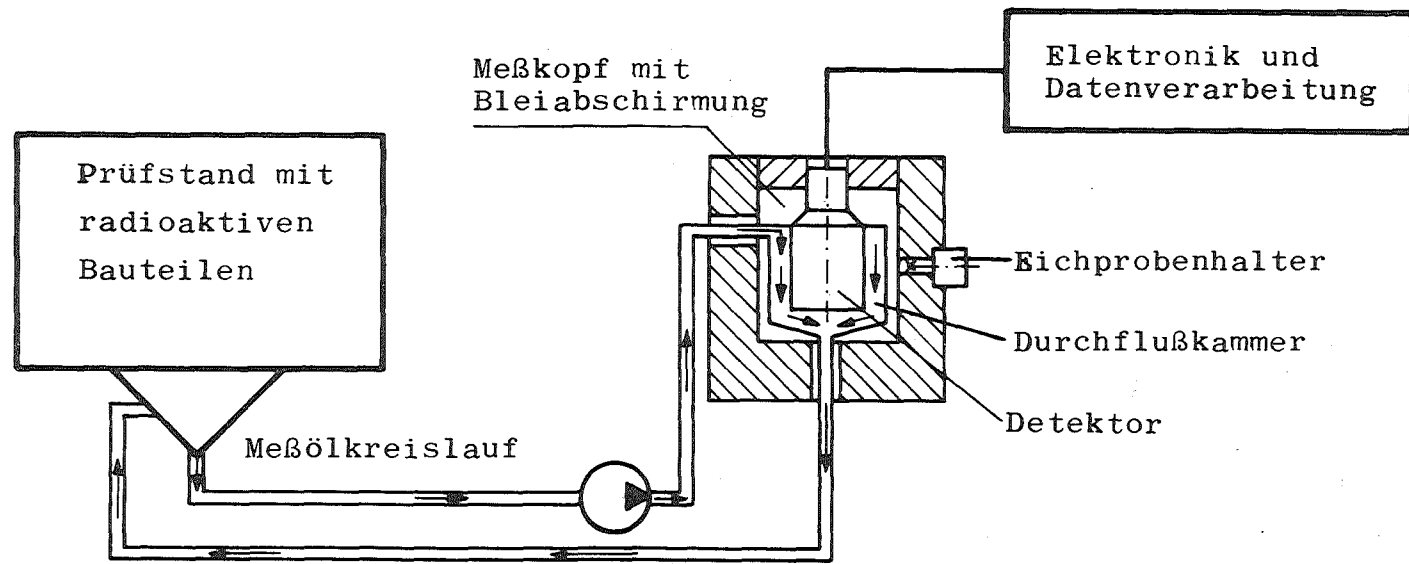


Bild 1: Prinzip des Durchflußmeßverfahrens

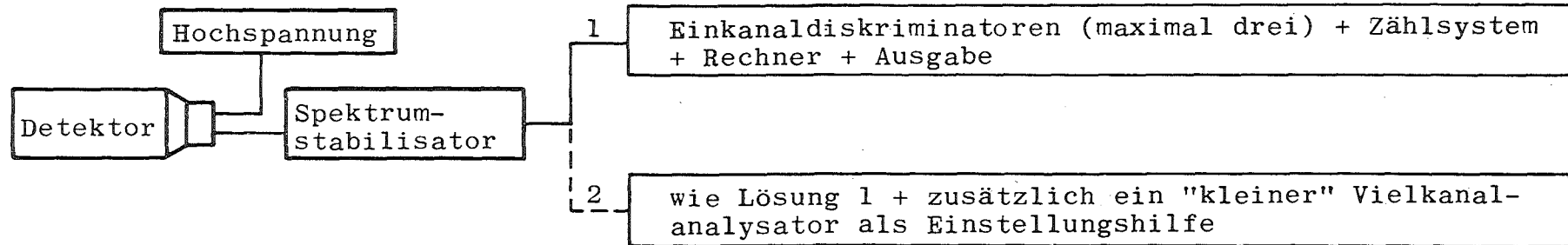


Bild 2: Elektronik und Datenverarbeitung für Verschleißmessungen

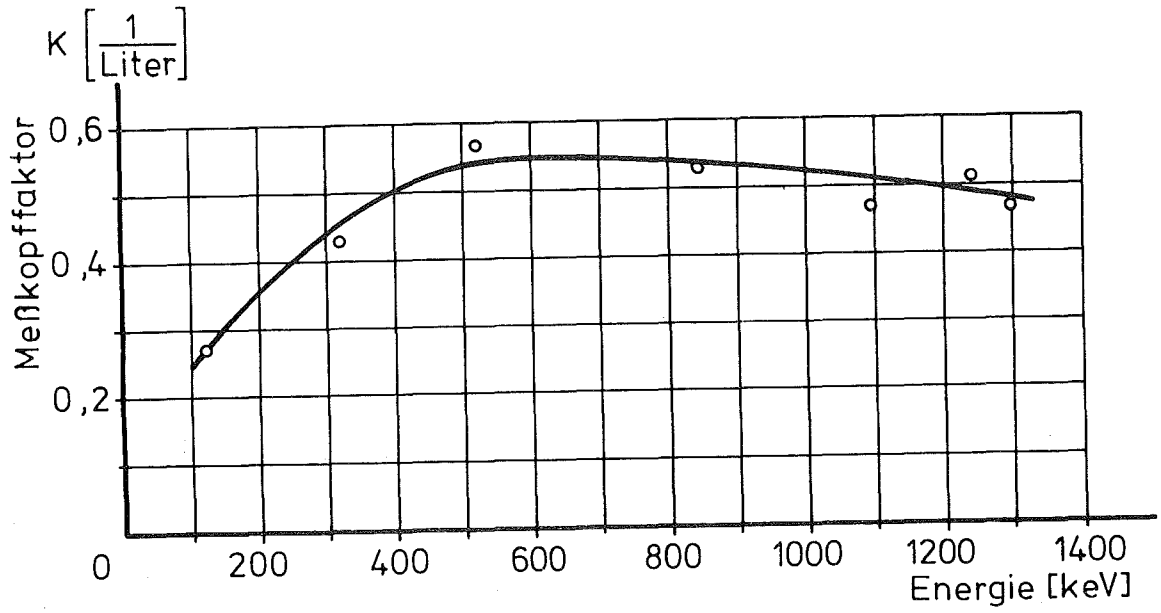


Bild 3 : Meßkopffaktor für den Durchflußmeßkopf

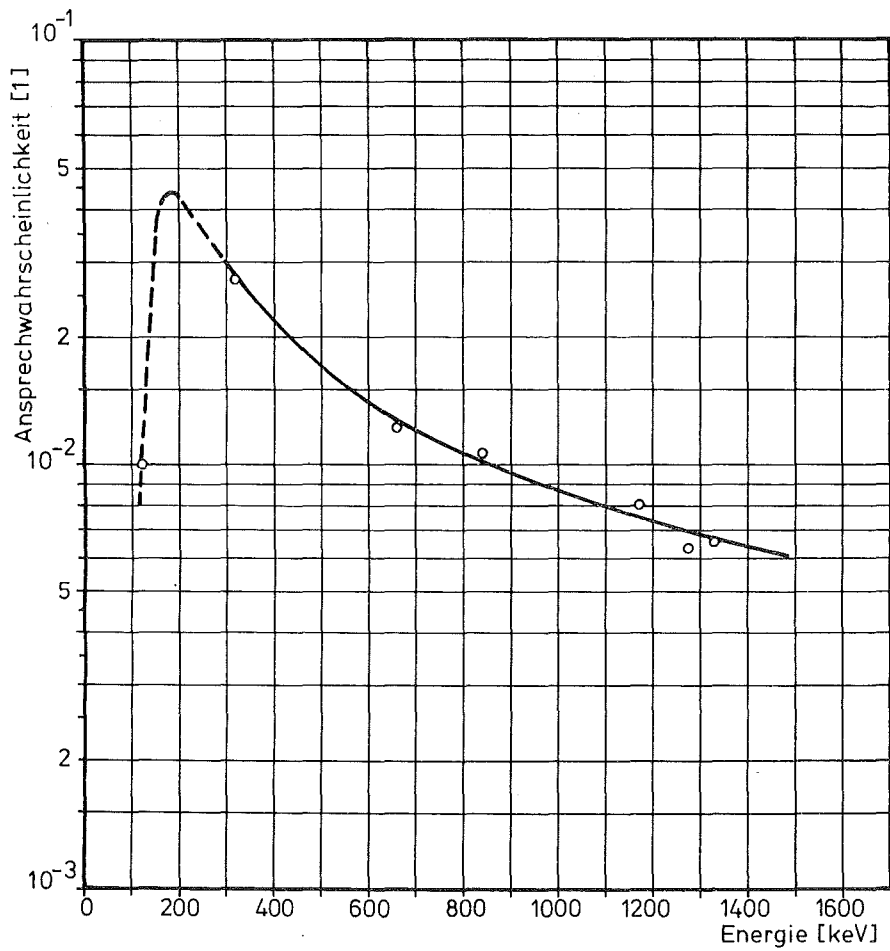


Bild 4 : Ansprechwahrscheinlichkeit des Durchflußmeßkopfes für die Position des Probenhalters .



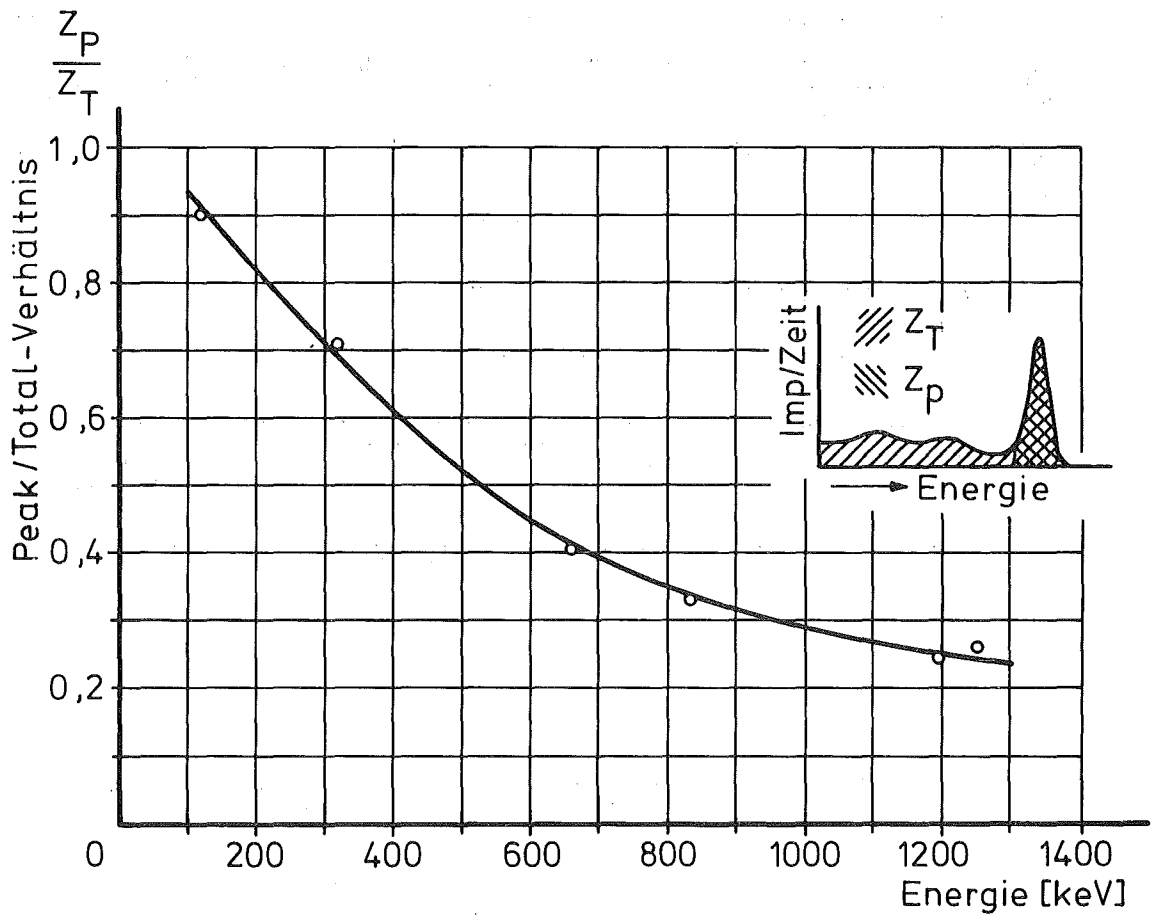


Bild 5 : Peak/Total-Verhältnis für die Position des Probenhalters

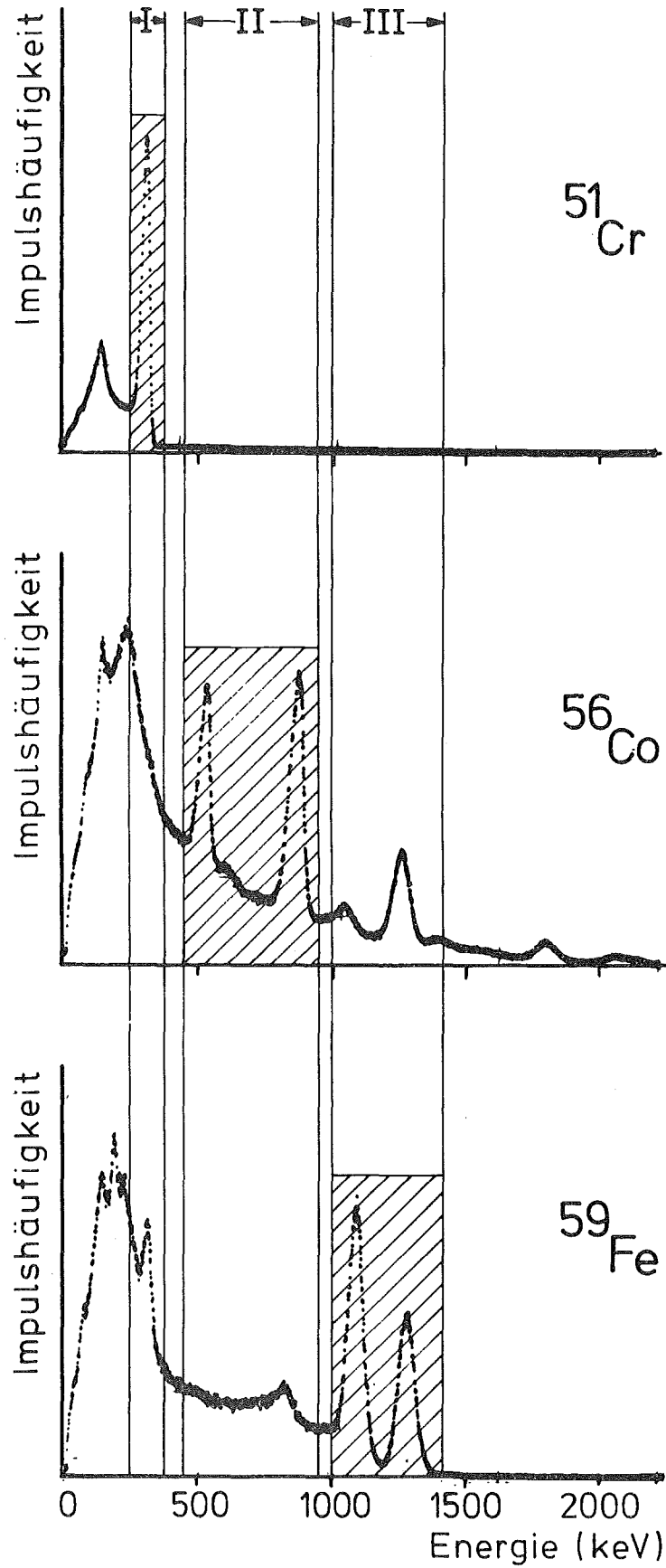


Bild 6:  $\gamma$ -Spektren und Energiebereiche für eine Dreikomponentenmessung mit  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{56}\text{Co}$ ,  $^{59}\text{Fe}$

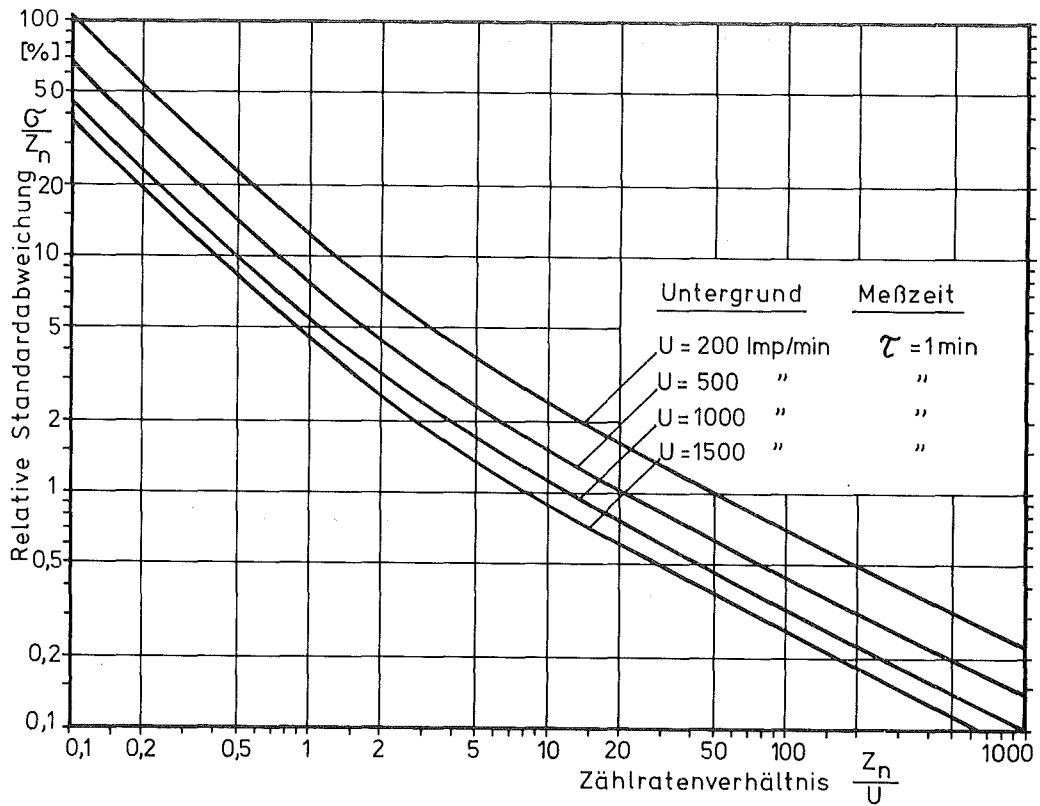


Bild 7 : Zusammenhang zwischen Standardabweichung und Zählratenverhältnis

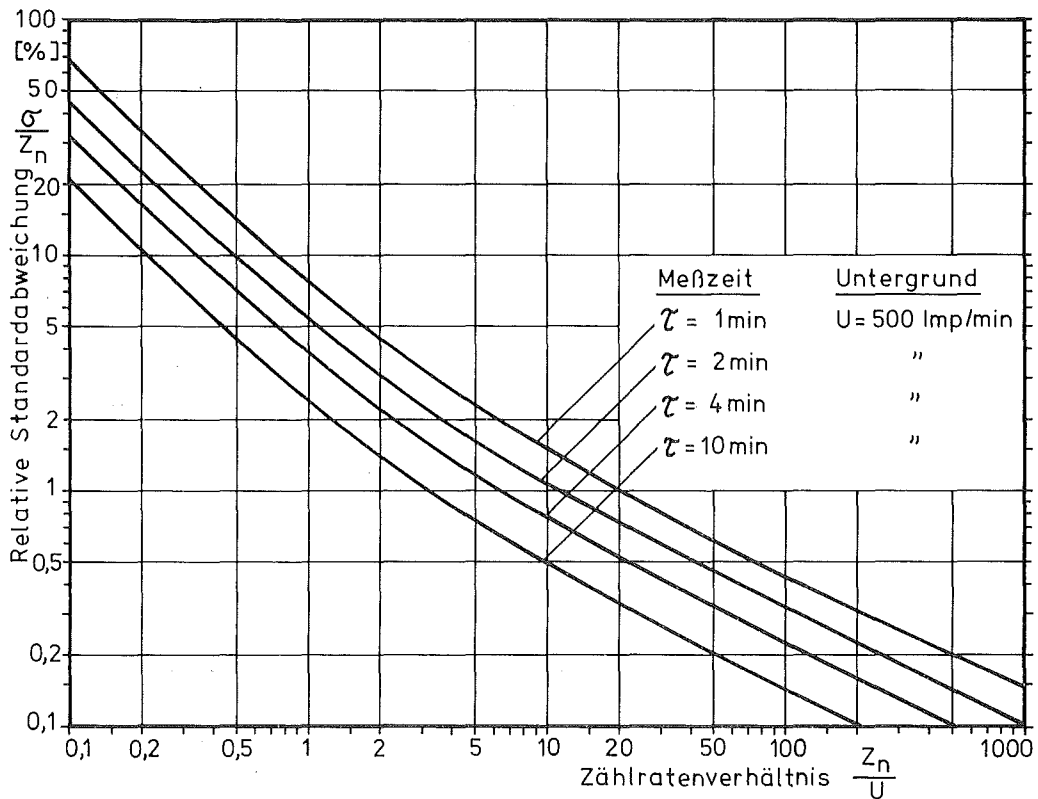


Bild 8 : Zusammenhang zwischen Standardabweichung und Zählratenverhältnis

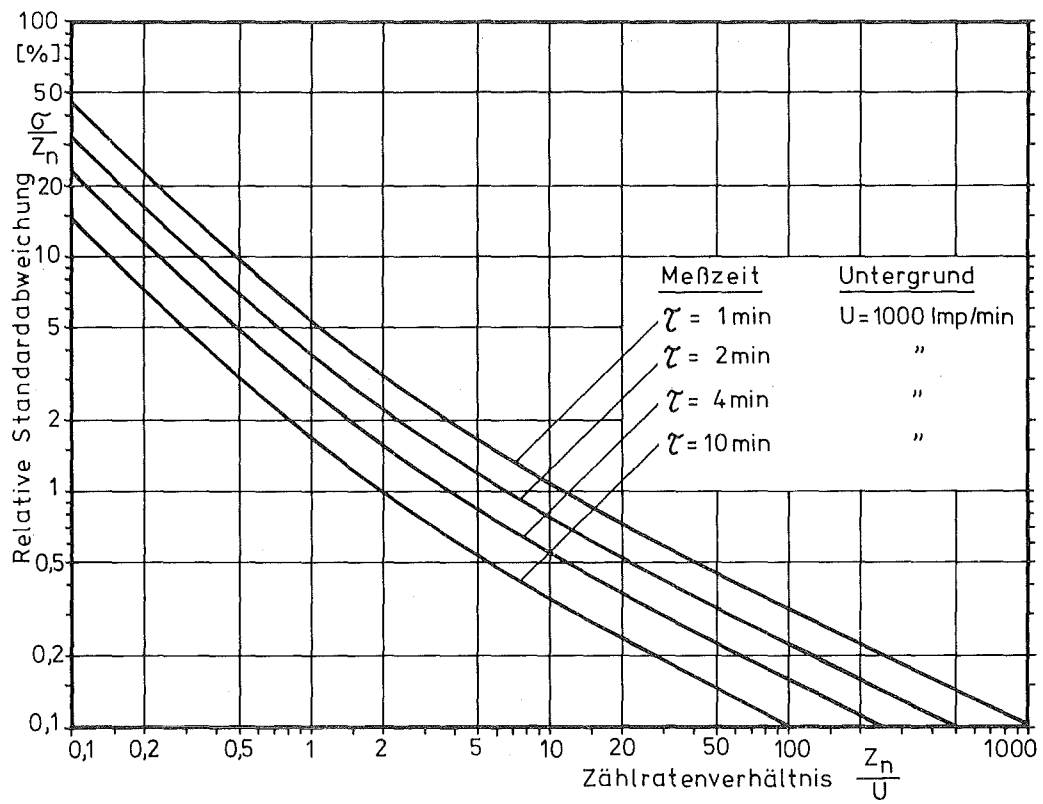


Bild 9 : Zusammenhang zwischen Standardabweichung und Zählratenverhältnis

9. L i t e r a t u r v e r z e i c h n i s

1. Gervé A. Die wichtigsten Verschleißmeßmethoden  
der Isotopentechnik  
Kerntechnik 14 , 1972 S. 204-209
2. Firma Aviatest GmbH 4 Düsseldorf , Rather Str. 49
3. Kruger P. Principles of Activation Analysis  
Verlag John Wiley u. Sons, Inc.  
New York 1971
4. Heath R.L. Scintillation Spectrometry  
AEC Report No. IDO 16880 - 1  
2nd Ed. , 1964
5. Lederer, Hollander,  
Perlmann Table of Isotopes  
John Wiley and Sons, Inc.
6. Erdmann G. , Die  $\gamma$ -Linien der Radionuklide  
Soyka W. Jül - 1003 - AC  
Kernforschungsanlage Jülich
7. Kreyszig E. Statistische Methoden und ihre  
Anwendungen  
Verlag Vandenhoeck & Ruprecht
8. Baumgärtner F. Tabelle zur Neutronenaktivierung  
Verlag Karl Thiemig KG München 1967
9. Herkert B. Die Aktivierung verchromter Maschinen-  
teile mit Neutronen bei Verwendung  
einer Kadmiumabschirmung  
LIT - interner Bericht 1974

10. Herkert B. Die Aktivierung von metallischen Maschinenteilen mit geladenen Teilchen zur Durchführung von Verschleißmessungen  
KFK-Bericht 2096 , Mai 1975  
Gesellschaft für Kernforschung Karlsruhe
11. Emrich F. Technisch wirtschaftliche Analyse des Einsatzes der RNT-Verschleißmeßverfahren zur Beurteilung des Verschleißverhaltens von Bauteilen in der Motorentwicklung  
Dissertation UNI Karlsruhe 1975
12. Kaiser W. Radioisotopenversuche über den Kolbenring- und Nutverschleiß in einem Sechszylinder Dieselmotor  
MTZ Nr. 4/73 S. 1 - 8
13. Katzenmeier G. Radioisotopenversuche über den Einfluß der Oberflächengestaltung auf den Verschleiß und die Tragfähigkeit von Gleitlagern  
MTZ Nr. 6/1973
14. Herkert B. Untersuchungen über Verschleiß- und Bewegungsverhalten schnelllaufender Wälzlager mit Hilfe von Radioisotopen  
MTZ Nr. 5/1972 S. 187 - 192
15. Rüdinger V. Die kontinuierliche Verfolgung des Verschleißverhaltens von Getriebeölen in der FZG-Zahnrad-Verspannungs-Prüfmaschine mit Hilfe der Radionuklidtechnik  
Erdöl und Kohle Heft 4 (1974) S. 201-204

16. Rüdinger V. Tragfähigkeit und Verschleißverhalten  
bei Verwendung nicht-Newton'scher  
Schmieröle  
Vortrag, Jahrestagung der Deutschen  
Rheologen BAM Berlin 28. - 30.4.1975
17. Kaiser W. , Radioisotopen-Versuche über den Ein-  
Volz J. fluß eines MoS<sub>2</sub>-Schmierölsatzes  
auf den Kolbenringverschleiß eines  
Einzylinder-Dieselmotors  
MTZ Nr. 12/1971
18. Erste Strahlenschutzverordnung Bundesgesetzblatt Teil I  
1965 Nr. 61