

KfK 2517
Juni 1978

**Physikalisch-technische
Grundlagen für
Verschleißmessungen
nach dem
Dünnschichtdifferenzverfahren**

**(Beitrag zur Weiterentwicklung der
Radionuklidtechnik für den Einsatz im
Maschinenbau)**

G. Essig
Laboratorium für Isotopentechnik

Kernforschungszentrum Karlsruhe

Als Manuskript vervielfältigt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE GMBH

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Laboratorium für Isotopentechnik

KfK 2517

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE GRUNDLAGEN FÜR VERSCHLEISSMESSUNGEN NACH
DEM DÜNNSCICHTDIFFERENZVERFAHREN⁺

(Beitrag zur Weiterentwicklung der Radionuklidtechnik für den
Einsatz im Maschinenbau)

G. Essig

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH., Karlsruhe

⁺ von der Fakultät für Maschinenbau der Universität Karlsruhe
genehmigte Dissertation

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE GRUNDLAGEN FÜR VERSCHLEISSMESSUNGEN NACH DEM DÜNNSCICHTDIFFERENZVERFAHREN

(Beitrag zur Weiterentwicklung der Radionuklidtechnik für den Einsatz im Maschinenbau)

ZUSAMMENFASSUNG

Verschleißmessungen durch Bestimmen der Restaktivität des Bauteils sind gekennzeichnet durch einen starken Einfluß der von Anwendungsfall zu Anwendungsfall unterschiedlichen geometrischen Anordnung von Quelle und Detektor und durch die sowohl mit der Versuchszeit als auch mit der abgeriebenen Schichtstärke veränderliche Zusammensetzung des aktiven Isotopengemischs. Ausgehend von den physikalischen Randbedingungen und den Anforderungen aus der Versuchspraxis wird das Differenzenverfahren so konzipiert und entwickelt, daß ein routinemäßiger Einsatz durch die Industrie möglich ist.

Die Vielfalt der möglichen Anwendungen und die dabei erreichbare Leistungsfähigkeit wird demonstriert durch Verschleißmessungen an Kreiskolbenmotoren. Als typische Probleme bei der Anwendung des Differenzenverfahrens wurden Messungen an feststehenden (Mantellauffläche) und an bewegten Teilen (Scheitelleisten) durchgeführt und verschiedene Möglichkeiten der gleichzeitigen Messung zweier Verschleißkomponenten untersucht.

Das Versuchsprogramm umfaßt Messungen mit den augenblicklich wichtigsten Werkstoffen für Dichtleiste und Mantel. Die Ergebnisse ermöglichen grundsätzliche Aussagen über den Einfluß der Betriebskenngrößen Kühlmitteltemperatur, Schmieröldurchsatz, Drehzahl und mittlerer Arbeitsdruck.

PHYSICAL AND TECHNICAL PRINCIPLES FOR WEAR MEASUREMENTS BY THIN LAYER DIFFERENCE METHOD

(A contribution to the Further Development of Radionuclide
Measuring Techniques for Applications in Mechanical Engineering)

ABSTRACT

Wear measurements through determination of the residual radioactivity of a component are greatly influenced by the variation of the geometrical arrangement of source and detector in each case of application as well as by the composition of the radioactive isotope mixture, varying both with testing time elapsed and thickness of the wearing layer. Starting from the physical boundary conditions and the requirements imposed by the testing practice the difference method was so conceived and developed that routine application in industry is possible.

The multitude of potential applications and the performance achievable are demonstrated by wear measurements on rotary engines. To solve typical problems by the application of the difference method measurements were performed on stationary (trochoid surfaces) and moving components (apex seals) and the possibility of simultaneously measuring wear of two components was studied.

The test program covered measurements on the presently most significant materials used for apex seals and rotor housings. The results obtained allow general statements to be made on the influence of the characteristic parameters of operation, i.e. coolant temperature, lubrication oil flow rate, speed, and mean effective pressure.

| I N H A L T S V E R Z E I C H N I S | Seite |
|---|-------|
| 1. EINLEITUNG | 1 |
| 1.1 Stand der Verschleißmessungen nach dem Differenzverfahren | 1 |
| 1.2 Zweck und Ziel der Arbeit | 1 |
| 2. GRENZEN DES DIFFERENZVERFAHRENS | 4 |
| 2.1 Physikalische Randbedingungen des Differenzverfahrens | 4 |
| 2.1.1 Größte erreichbare Empfindlichkeit | 6 |
| 2.1.2 Einschränkungen bei der γ -Spektrometrie | 14 |
| 2.2 Anforderungen von der Versuchspraxis | 17 |
| 2.2.1 Festlegung der technischen Leistungsfähigkeit | 18 |
| 2.2.2 Zuverlässigkeit und problemloser Einsatz | 19 |
| 2.3 Technische Realisierbarkeit | 20 |
| 2.3.1 Prinzip der Informationsübertragung und -verarbeitung | 20 |
| 2.3.2 Kenngrößen der Meßeinrichtung | 25 |
| 2.3.3 Anforderungen an die Aktivierung | 30 |
| 2.3.4 Richtlinien für die Entwicklung des Systems | 31 |
| 3. ENTWICKLUNG DES MESSYSTEMS | 33 |
| 3.1 Zur Aktivierungstechnik | 33 |
| 3.1.1 Energieeinstellung durch eine Bremschicht | 34 |
| 3.1.2 Aktivierung unter kleinen Winkeln | 40 |
| 3.1.3 Kriterien für die Wahl der Bestrahlungsdaten | 61 |
| 3.2 Meßkopf und Elektronik | 67 |
| 3.3 Verfahrensvorschriften | 71 |
| 3.3.1 Wahl des Meßbereichs | 71 |
| 3.3.2 Meßbereich bei Isotopengemischen | 74 |
| 3.3.3 Zur Berechnung der Verschleißgeschwindigkeit | 77 |

| | Seite |
|---|-------|
| 3.4 Kontrolle der Aktivierung und Überprüfung auf Ablagerungen | 85 |
| 3.4.1 Kontrolle der Aktivierung | 85 |
| 3.4.2 Überprüfung auf Ablagerungen | 86 |
| 4. VERSCHLEISSMESSUNGEN AN KREISKOLBENMOTOREN | 89 |
| 4.1 Schmierung und Verschleiß beim Kreiskolbenmotor Bauart NSU-Wankel | 89 |
| 4.1.1 Grundsätzliches Verschleißverhalten des Kreiskolbenmotors | 89 |
| 4.1.2 Wahl eines geeigneten Verschleißmeßverfahrens | 91 |
| 4.2 Versuchsprogramm und Versuchsträger | 92 |
| 4.2.1 Versuchsprogramm | 92 |
| 4.2.2 Versuchsmotore und Verschleißteile | 94 |
| 4.3 Aktivierung der Versuchsteile | 96 |
| 4.3.1 Aktivierung der Dichtleisten | 96 |
| 4.3.2 Aktivierung der Mantellaufbahn | 101 |
| 4.4 Prüfstandsversuche | 103 |
| 4.4.1 Einkomponentenversuche | 103 |
| 4.4.1.1 Verschleißteil Dichtleiste | 103 |
| 4.4.1.2 Verschleißteil Mantellaufbahn | 108 |
| 4.4.2 Zweikomponentenversuche | 113 |
| 4.4.2.1 Verschleißmessung im kalten und im warmen Bogen | 114 |
| 4.4.2.2 Verschleißmessung an Dichtleiste und Mantellaufbahn | 116 |
| 4.5 Fahrzeugversuche | 118 |
| 4.5.1 Aufbau des mobilen Meßsystems | 118 |
| 4.5.2 Versuchsdurchführung und -ergebnisse | 121 |

| | Seite |
|--|-------|
| 5. ZUSAMMENFASSUNG | 123 |
| 6. LITERATURVERZEICHNIS | 127 |
| 7. ANHANG | 134 |
| 7.1 Tabellen | 135 |
| 7.2 Beispiele zu den Nomogrammen I bis III (Kap. 3.1.2) und IV (Kap. 3.3.3 und Kap. 4.4.1) | 138 |
| 7.3 Formelzeichen und Größen | 149 |

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

1.1 Zweck und Ziel der Arbeit

Mit der Einführung der Dünnschichtaktivierung wurde eine wichtige Voraussetzung dafür geschaffen, daß radiometrische Verfahren zur Verschleißmessung ohne Beschränkung durch die Bauteilgröße erfolgreich eingesetzt werden können. Die dünne aktive Oberflächenschicht läßt es aussichtsreich erscheinen, den Verschleiß über eine genaue Messung der Restaktivität des Bauteils zu bestimmen.

Um die Vorteile einer kontinuierlichen Verschleißmessung bei Maschinen ohne geschlossenen Transportkreislauf für das Verschleißgut oder bei sehr großer Verdünnung nutzen zu können, sollen nach dem Prinzip der Differenzmessung ein Verschleißmeßverfahren entwickelt und seine Einsatzgrenzen angegeben werden. Die Entwicklung soll einen routinemäßigen Einsatz dieser Meßmethode unter den Bedingungen industrieller Versuchslabors ermöglichen.

Die Einsatzreife des Verfahrens soll durch Verschleißmessungen an Scheitelleiste und Mantellaufbahn von Kreiskolbenmotoren nachgewiesen werden.

1.2 Stand der Verschleißmessungen nach dem Differenzverfahren

Verschleißmessungen nach dem Prinzip der Restaktivitätsmessung wurden von Postnikov (1) 1966 vorgeschlagen. Die Zuordnung von abgeriebener Schichttiefe zur gemessenen Aktivität des Bauteils wird dabei durch Verschleißsimulation an einem zweiten aktiven Körper in einer Prüfmaschine bestimmt.

Das Verfahren hat den Nachteil, daß von der während des Versuchs beobachteten Abnahme der Aktivität nicht unmittelbar auf den jeweiligen Verschleißzustand des Bauteils geschlossen werden kann. Dies ist erst nach der Erzeugung der entsprechenden Aktivitätsdifferenz und der zugehörigen Längenmessung am Eichstandard möglich. Die Genauigkeit der Verschleißmessung wird entscheidend dadurch bestimmt, wie gut die Vergleichbarkeit der Aktivitätsbestimmung von Versuchsteil und Eichstandard über der

Abriebtiefe erhalten bleibt. Die Messungen von Probe und Bauteil werden unter unterschiedlichen Meßgeometrien vorgenommen, die eine unterschiedliche Empfindlichkeitsmatrix für den jeweiligen Meßplatz ergeben. Damit ergeben sich über der Abriebtiefe unterschiedliche Zählraten-Schichttiefenverhältnisse für Probe und Bauteil, die zu einem Fehler bei der Messung der Abriebtiefe des Bauteils führen.

Nach grundlegenden Arbeiten zur Dünnschichtaktivierung an der Isotopengruppe des Lehrstuhls für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau der Universität Karlsruhe (2) (Vorgängerin des Laboratoriums für Isotopentechnik, Fachbereich Physik-Maschinenbau der Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe) wurde 1970 von Schüssler (3) eine Verschleißmessung durchgeführt, bei der die Simulation des Verschleißvorgangs vor dem eigentlichen Versuchslauf durchgeführt wurde, so daß die im letzteren gemessenen Zählraten unmittelbar einer Schichttiefe zugeordnet werden konnten. Durch die Einschränkung der nutzbaren Meßtiefe auf einen Bereich mit näherungsweise linearem Zusammenhang von Schichttiefe und Zählrate ist eine Eichung der Anordnung in einem Längenmaßstab möglich. Um den Einfluß der wahren Geometrieverhältnisse mit zu erfassen, muß das stufenweise abgeschliffene Originalbauteil beim Aufstellen der Eichkurve für jeden Meßpunkt in einen dafür besonders hergerichteten Modellmotor eingebaut werden.

Nachdem dieser erste Versuch über eine Laufzeit von ~ 6 h die Möglichkeit derartiger Verschleißmessungen prinzipiell nachgewiesen hatte, wurden im selben Jahr Verschleißkennfelder für Scheitelleisten an einem Wankelmotor aufgenommen (4).

In der Folge wurden in der BRD erste Messungen nach dem Differenzverfahren durchgeführt, u. a. an einem Pumpenrad, an einem Auslaßventil eines Dieselmotors und zur Verschleißbestimmung an Großmotoren und Drehmeißeln (5,6,7,8). Aus England wurden 1975 Veröffentlichungen bekannt (9,10,11) über den geplanten Einsatz an Eisenbahnschienen sowie über Messungen an Rohrleitungen und Ziehsteinen von Drahtziehmaschinen. Das kürzlich erteilte Patent für ein von General Motors entwickeltes radiometrisches Meßverfahren (12), bei dem Verschleißpartikel aus dem Abgas ausgefiltert

werden, deutet darauf hin, daß weder Dünnschichtaktivierung noch Differenzverfahren in Amerika einsatzreif entwickelt sind.

Soweit die Versuche in Einzelheiten bekannt sind, zeigen sie neben der Vielfalt der Problemstellungen für den Einsatz eines leistungsfähigen Differenzverfahrens die Unzulänglichkeiten, die bisher einen routinemäßigen Einsatz verhinderten. Dies sind im einzelnen:

unzureichende Empfindlichkeit

unzureichende Genauigkeit

schlechte Langzeitkonstanz der Meßapparatur

Kompliziertheit der Geräte

mangelnde Kenntnisse der physikalischen Gegebenheiten bei komplizierten Meßgeometrien.

Die komplizierte Verknüpfung zwischen grundsätzlichen physikalischen Zusammenhängen wie dem Transportvorgang für eine Quantenstrahlung durch eine Abschirmung einerseits und der eine ganz bestimmte meßproblemabhängige Versuchsdurchführung charakterisierenden Größen wie etwa die Streustrahlungsverteilung andererseits machten es bisher unmöglich, die Einsatzgrenzen des vom Prinzip her einfachen Differenzverfahrens anzugeben. Die vorliegende Arbeit gibt die mögliche Leistungsfähigkeit an und beschreibt die Maßnahmen, die für die Entwicklung eines betriebssicheren Meßverfahrens bis zur technischen Einsatzreife notwendig waren.

2. GRENZEN DES DIFFERENZVERFAHRENS

Unabhängig von den Bedingungen unter denen eine Messung durchgeführt wird - wie Meßgeometrie, Meßgeräte, Versuchsanordnung, zulässiger Aufwand, Qualifikation des Anwenders - gibt es physikalische Grenzen für den Einsatz des Differenzverfahrens. Diese verfahrenstypischen Grenzen, die vom Meßeffect herrühren, beschreiben einen Raum innerhalb dessen das Verfahren prinzipiell eingesetzt werden kann.

Innerhalb dieses Raumes wird der versuchstechnisch sinnvolle Bereich weiter eingegrenzt durch konkurrierende oder ergänzende Anforderungen aus der Praxis.

Die technische Realisierbarkeit schränkt den verbliebenen Raum ein auf den tatsächlich nutzbaren Bereich. Der Unterschied entsteht dadurch, daß aufgrund der oben beschriebenen Grenzen sich ergebende zahlenmäßig angebbare Eigenschaften der Verfahrenskomponenten technisch nicht oder nur unvollständig erreicht werden. Die Ursache sind nicht zur Messung verwendete, zwangsläufig auftretende Nebeneffekte, wie z.B. Strahlung aus der Umgebung (Überlagerung des Meßsignals durch Untergrundstrahlung) oder unzureichender Stand der Technik bei der Fertigung von Einzelkomponenten. So muß zum Beispiel beim Nachweisgerät für die γ -Strahlung ein Kompromiß eingegangen werden zwischen technisch gegenläufigen Anforderungen wie hohe Ansprechwahrscheinlichkeit, kurze Abklingzeit und gutes Energieauflösungsvermögen.

Eine Einschränkung der betrachteten technischen Realisierbarkeit fand dadurch statt, daß nur das in der GfK eingesetzte Zyklotron als Beschleuniger berücksichtigt wurde und bei der Elektronikentwicklung nur handelsübliche Bausteine verwendet wurden.

2.1 Physikalische Randbedingungen des Differenzverfahrens

Die absoluten physikalischen Grenzen sind in einem verfeinerten Modell häufig nicht geeignet um den Raum anzugeben in dem das Differenzverfahren prinzipiell eingesetzt werden kann, oder sie können nicht allgemeingültig mit einem Zahlenwert angegeben werden. Dazu folgende Beispiele:

1. Bei der Bestrahlung eines Maschinenteils finden zwei gegenläufige Vorgänge gleichzeitig statt: Die Bildung von instabilen Kernen durch von den geladenen Teilchen induzierte Kernreaktionen und der Zerfall dieser Kerne nach dem Zerfallsgesetz. Die Sättigungsaktivität als physikalische Grenze der durch die überlagerten Vorgänge erreichbaren maximalen Aktivität ist als Zahlenwert angebar, wenn die Target- und Beschleunigerdaten bekannt sind, obwohl zur Erzeugung eine unendlich lange Bestrahlungszeit erforderlich wäre. Es ist deshalb sinnvoll, an Stelle dieser Grenze die Abhängigkeit des Sättigungsfaktors von der Bestrahlungszeit als physikalische Randbedingung einzuführen (Bild 1). Der Arbeitsbereich für Dünnschichtaktivierungen liegt bei Sättigungsfaktoren $< 0,3$. Die bei der Bestrahlung erzielbare Höchstaktivität wird durch andere Kriterien, wie zulässige Strahlendosis oder Bestrahlungskosten, festgelegt.

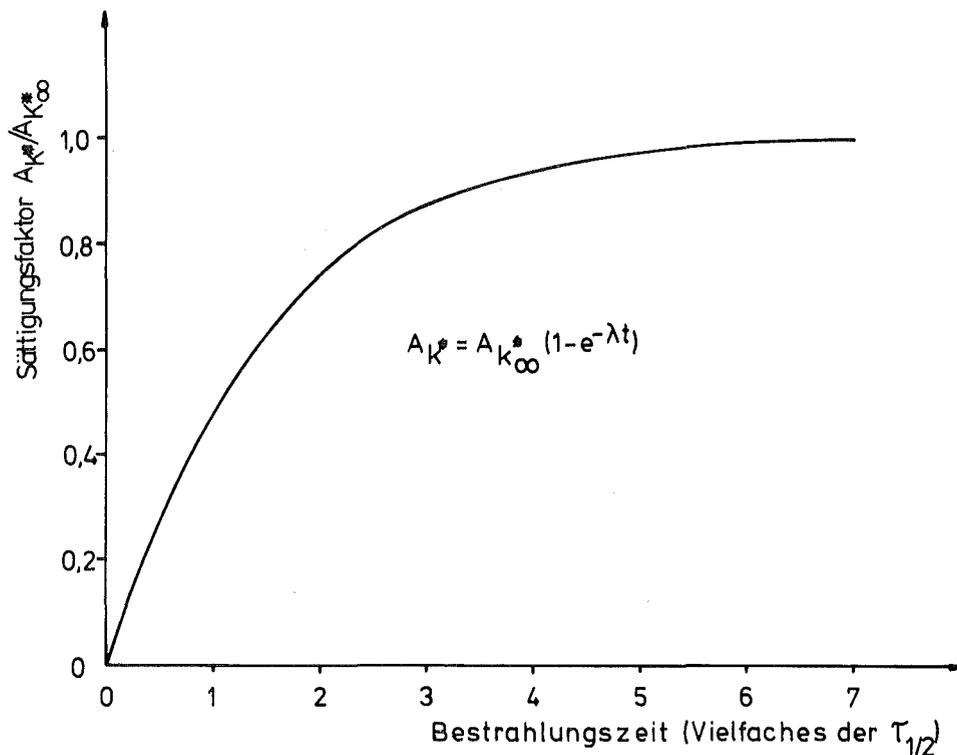


Bild 1: Zunahme der Aktivität A_K^* des Nuklids K^* bei konstanter Produktionsrate

2. Eine physikalische Grenze für die Aktivierung beruht darauf, daß ein Teil der Energie der Geschoßteilchen im Target in Wärme umgewandelt wird, die nicht beliebig schnell abgeführt werden kann. Deshalb wächst die im Target sich einstellende Temperatur mit dem Fluß der Geschoßteilchen. Dieser generelle Zusammenhang läßt sich bei Kenntnis der Targetdaten wie geometrische Verhältnisse und Stoffeigenschaften und der Kühlungsverhältnisse als physikalische Randbedingung beschreiben. Der größte zulässige Fluß ist dann über die erlaubte Höchsttemperatur zu bestimmen.
3. Eine physikalische Grenze, die nicht überschritten werden darf, liegt bei der Bestrahlungsdosis, die das Verschleißverhalten des zu untersuchenden Bauteils verändern würde. Die Angabe eines allgemein gültigen Zahlenwertes ist nicht möglich, obwohl es für jedes Experiment eine größte zulässige Dosis gibt. Es ist deshalb auch hier zweckmäßig, Grenzkurven als physikalische Randbedingungen aufzustellen.

Für das einzelne Experiment ergeben diese Randbedingungen wieder zahlenmäßige Grenzwerte. Die höchste Aktivität, die man dem Versuchsteil aufbringen kann ohne seine Verschleißigenschaften zu verändern, wird bestimmt durch die zulässigen Werte für Dosis und Fluß. Der Quotient ergibt die Bestrahlungszeit und über den zugehörigen Sättigungsfaktor die mögliche Gesamtaktivität.

2.1.1 Größte erreichbare Empfindlichkeit

Dieser Begriff soll hier so definiert sein, daß er sich nur auf die Targeteigenschaften bezieht, also auf den Übertragungsmechanismus für das Signal keine Rücksicht nimmt. Letzterer wird in einem getrennten Kapitel behandelt.

Die Empfindlichkeit ist für das Differenzverfahren (Bild 2) definiert als

$$e_M = \frac{dN}{ds} \sim \frac{dA}{ds} \quad \text{mit}$$

N = Zahl der γ -Quanten/Zeit
s = Schichtdicke
e_M = Empfindlichkeit der Messung
A^M = Aktivität

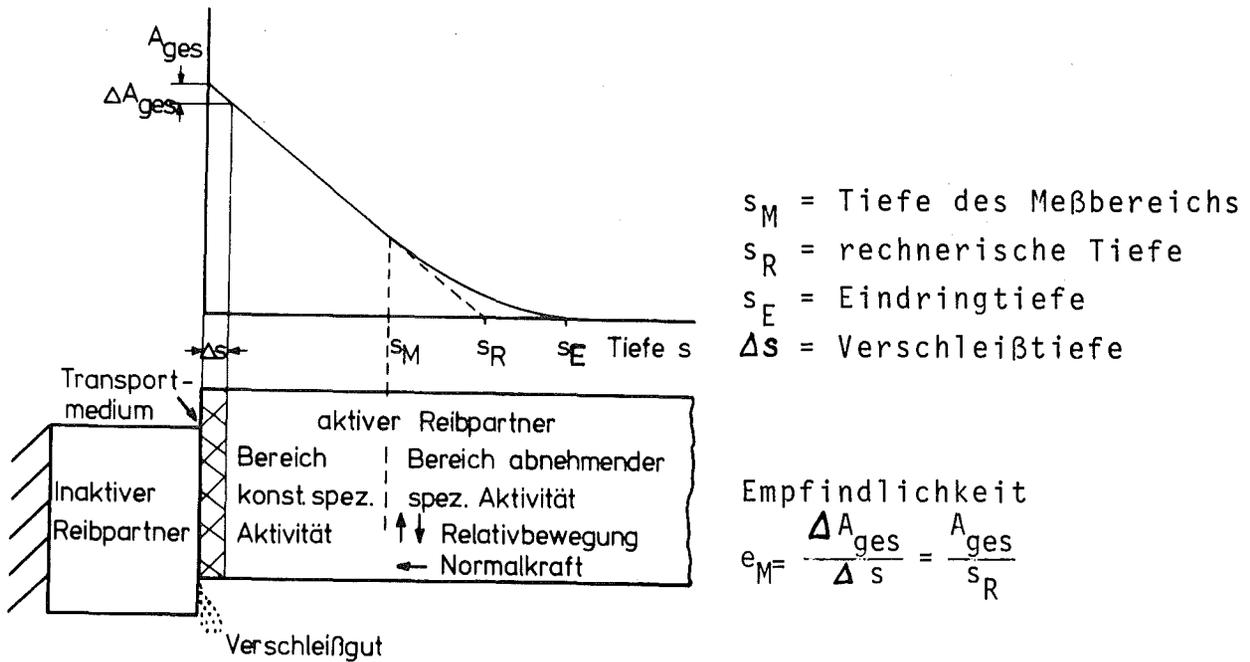


Bild 2: Zusammenhänge und Bezeichnungen beim Differenzverfahren

Sie wird begrenzt durch die maximale Zahl der den Kernzerfall begleitenden γ -Quanten. Die γ -Häufigkeit gibt die dazu erforderliche Aktivität an.

Diese Aktivität kann nicht beliebig gesteigert werden. Am LIT durchgeführte Messungen (14) zeigen eine Änderung der Verschleißigenschaften z.B. von Armco-Eisen bei Bestrahlungsdosen von $> 10^{18} \alpha/cm^2$ an. Welche Veränderung einer einfach meßbaren Materialeigenschaft, z.B. der Härte, zulässig ist, muß für das jeweilige Experiment entschieden werden. Danach wird die maximale Bestrahlungsdosis für das Versuchsteil bestimmt.

Die mechanischen Eigenschaften vor allem hochwertiger Bauteile werden häufig durch Wärmebehandlung erzielt. Der Teilchenstrahl eines Beschleunigers stellt eine Energiequelle mit hoher und örtlich eng begrenzter Quellstärke dar. Für die Anwendung im Maschinenbau geeignete Beschleuniger liefern Strahlströme von 1 - 10 μA . Bei einer typischen Energie von 15 MeV für Deuteronen

(an der Targetoberfläche) liegt die elektrische Strahlleistung damit zwischen 15 und 150 Watt. Bei einem Strahldurchmesser von 3 mm und einer Bestrahlungstiefe von 100 μm liegt die Volumenleistung zwischen 20 und 200 kW/cm^3 . Untersuchungen über die Wärmebelastung nicht bewegter Targets (15) zeigen, daß bei Strömen $> 3 \mu\text{A}$ Temperaturen im Strahlzentrum über 300°C (Aluminium) und 500°C (V2A-Stahl) sich einstellen. (Bild 3).

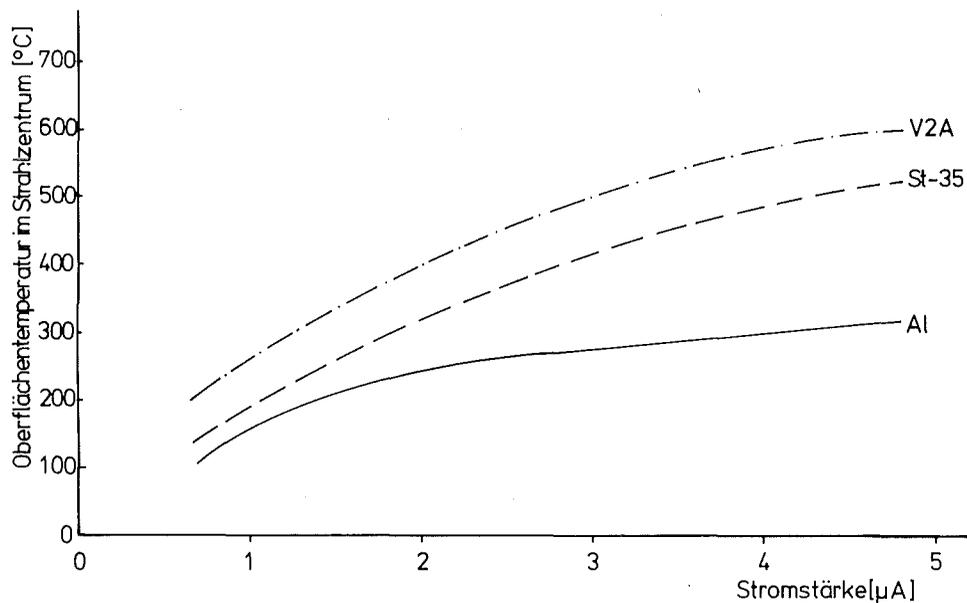


Bild 3: Beharrungstemperatur an der Oberfläche eines nicht bewegten Targets in Abhängigkeit vom Strahlstrom. Nach (16) gerechnet für eine luftgekühlte Scheibe von 30 mm \varnothing bei 15 MeV Energieverlust und einer Luftgeschwindigkeit von 2 m/sec.

Damit kann bei der Bestrahlung eine örtliche Wärmebehandlung stattfinden, deren Ablauf durch Vorrichtungen für eine bessere Wärmeabfuhr (Targetkühlung) und durch Begrenzung der Aktivierungsgeschwindigkeit (kleiner Strahlstrom) beeinflußt werden kann.

Bei einer Bestrahlungsdosis, bei der jeder 10^6 te Targetkern verändert wird, kann bereits eine unzulässige Materialveränderung vorliegen, obwohl die Gesamtaktivität im mCi-Bereich liegt. Da aus technischen Gründen (Auslastungsgrad des Beschleunigers und Mindeststromstärke für einen sicheren Betrieb) die Aktivierungsgeschwindigkeit nicht beliebig klein gehalten werden kann, tritt für alle aufgrund ihrer Halbwertszeit bei Verschleißmessungen einsetzbare Isotope anstelle der unmittelbaren physikalischen Grenze der Sättigungsaktivität die vom Stand der Aktivierungstechnik abhängige physikalische Randbedingung der thermischen Belastbarkeit des Maschinenteils. Je nach Bauteil und Versuchsziel sind dabei Oberflächentemperaturen zwischen 200°C und 800°C zulässig.

Die Empfindlichkeit des Differenzverfahrens ist proportional zur spezifischen Aktivität, sie kann also prinzipiell dadurch gesteigert werden, daß die selbe Aktivität in einer dünneren Schicht aufgebracht wird. Die für die Gefahr einer Schädigung des Bauteils maßgebliche Bestrahlungsdosis ist eine volumenbezogene Größe. Sie begrenzt daher die erreichbare Aktivität in der bestrahlten Oberfläche. Für die Auswirkung einer Verkleinerung der aktivierten Schichttiefe müssen zwei Fälle unterschieden werden:

1. Die zulässige Dosis wurde bei der seitherigen Bestrahlung nicht erreicht:

Es ist möglich, bei gleicher Gesamtaktivität unter Verkleinerung der Schichttiefe s die zulässige Dosis auszunutzen. Dabei steigt bei gleicher Bestrahlungszeit die spezifische Aktivität des Bauteils und die Empfindlichkeit der Messung.

2. Die zulässige Dosis wurde bei der größeren aktiven Schichttiefe bereits erreicht:

Eine Verkleinerung der Schichttiefe bei konstanter Gesamtaktivität ist nicht möglich. Die Gesamtaktivität nimmt im selben Verhältnis ab wie die erzeugte Schichttiefe. Die spezifische Aktivität und die Empfindlichkeit behalten ihre Werte bei. Da die Bestrahlungszeit abnimmt, wird die Ausnützung des Beschleunigers verbessert.

Obwohl im zweiten Fall die Empfindlichkeit nicht besser wird, ist in beiden Fällen eine Verkleinerung der aktivierten Schicht-

stärke richtig, weil dadurch die Genauigkeit der Messung verbessert wird (vgl. Kap. 3.3.4).

Die Tiefe der Aktivierung in Strahlrichtung hängt ab von der Art der Geschoßteilchen und ihrer kinetischen Energie. Ein nicht energievariabler Beschleuniger - wie das Karlsruher Isochron-Zyklotron - bringt alle Teilchen auf dieselbe Energie pro Nukleon, d.h. die Geschoßteilchen $p, d, t, He^3, \alpha, Li^6$ verlassen die Maschine mit gleicher Geschwindigkeit, wobei sich die Startenergien wie die Massenzahlen verhalten. Die Reichweite der Teilchen ist dem Quotienten aus Massenzahl und Quadrat der Kernladungszahl proportional. Die Reichweite der genannten Geschoßteilchen, entsprechend steigender Eindringtiefe, lautet also: $Li^6, He^3, \alpha, p, d, t$ (vgl. Bild 4).

| Benennung | Proton | Deuteron | Triton | Helium ³ | α -Teilchen | Lithium ⁶ |
|------------------------|--|--|--|---|---|---|
| Teilchenart | $\begin{matrix} 1 \\ 1 \end{matrix} p$ | $\begin{matrix} 2 \\ 1 \end{matrix} H$ | $\begin{matrix} 3 \\ 1 \end{matrix} H$ | $\begin{matrix} 3 \\ 2 \end{matrix} He$ | $\begin{matrix} 4 \\ 2 \end{matrix} He$ | $\begin{matrix} 6 \\ 3 \end{matrix} Li$ |
| Startenergie in MeV | 25,2 | 50,6 | 75,4 | 75,4 | 100,1 | 150,4 |
| Eindringtiefe in mm | 1,34 | 2,68 | 3,98 | 0,99 | 1,32 | 0,87 |
| A/P^2 | 1 | 2 | 3 | 0,75 | 1 | 0,66 |

A = Massenzahl; P = Ordnungszahl

Bild 4: Reichweiten in Eisen für verschiedene Geschoßteilchen bei einer Anfangsenergie von 25,2 MeV/Masseneinheit

Die Energie der Geschoßteilchen beim Auftreffen auf das Maschinenteil kann im Falle eines nicht energieeinstellbaren Beschleunigers durch das Vorschalten einer Abbremschicht auf den gewünschten Wert eingestellt werden (vgl. Kap. 3.1.1). Im Falle einer Kernreaktion zwischen Geschoßteilchen und Targetmaterial, deren Wahrscheinlichkeit nicht von der Teilchenenergie abhängt (bei Energien > 0), könnte die aktive Schicht im Maschinenteil auf diese Weise bei konstanter Empfindlichkeit beliebig klein gemacht werden. Die tatsächlichen Reaktionen erfordern nicht nur

eine Mindestenergie zu ihrer Auslösung (endotherme Reaktionen), sondern ihre Wahrscheinlichkeit wächst mit Überschreiten der Schwellenenergie steil an und durchläuft ein ausgeprägtes Maximum (Bild 5).

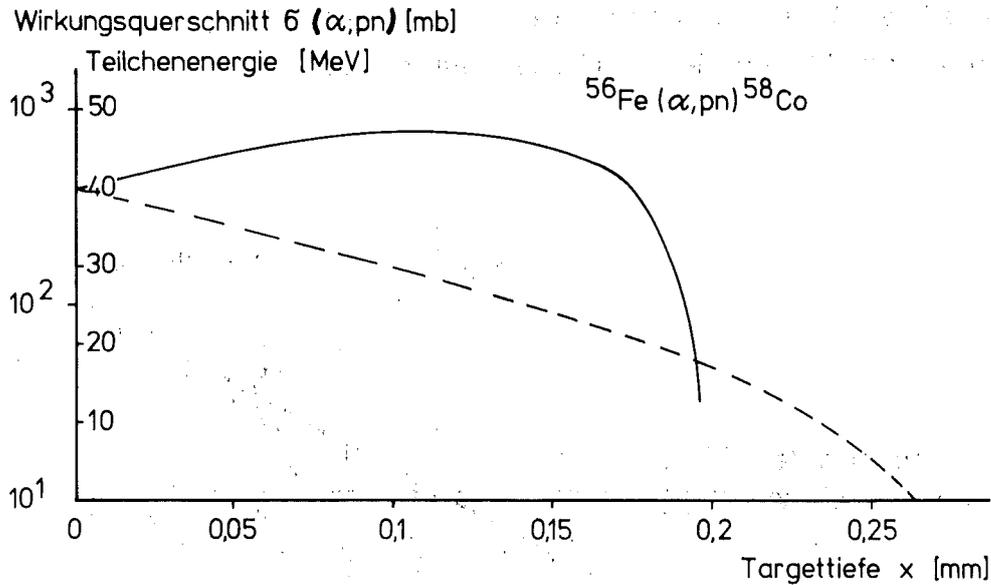


Bild 5: Wirkungsquerschnitt σ für die Reaktion $^{56}\text{Fe}(\alpha, \text{pn})^{58}\text{Co}$ (durchgezogene Kurve) und Energie der α -Teilchen über der Schichttiefe

Dieser Bereich muß aus verfahrenstechnischen Gründen in die Targetoberfläche gelegt werden (vgl. Kap. 3.3.1). Damit ist die kleinste Startenergie für die Bestrahlung und über die zugehörige Eindringtiefe x_0 die aktive Schichtstärke vorgegeben.

Neigt man die Targetoberfläche gegen die Strahlrichtung, so ist für die Messung nur die Tiefe s in Verschleißrichtung maßgeblich, also die Projektion der Eindringtiefe x senkrecht zur Targetoberfläche (Bild 6). Die aktive Schicht wird mit dem Sinus des Bestrahlungswinkels θ kleiner gegenüber der Senkrechtbestrahlung.

Die Verkürzung der aktiven Schicht über dieses Verfahren wird durch technische Probleme (vgl. Kap. 3.1.2) und die folgenden physikalischen Hindernisse eingeschränkt:

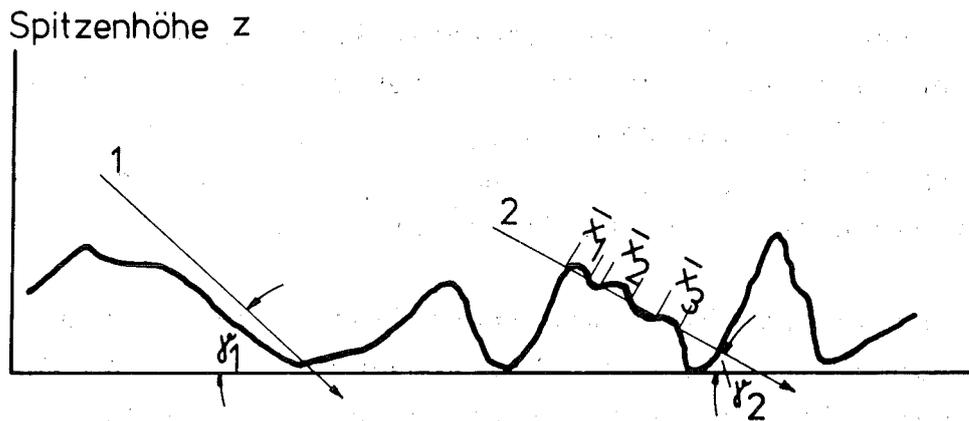


Bild 7: Bestrahlung einer Probe mit rauher Oberfläche

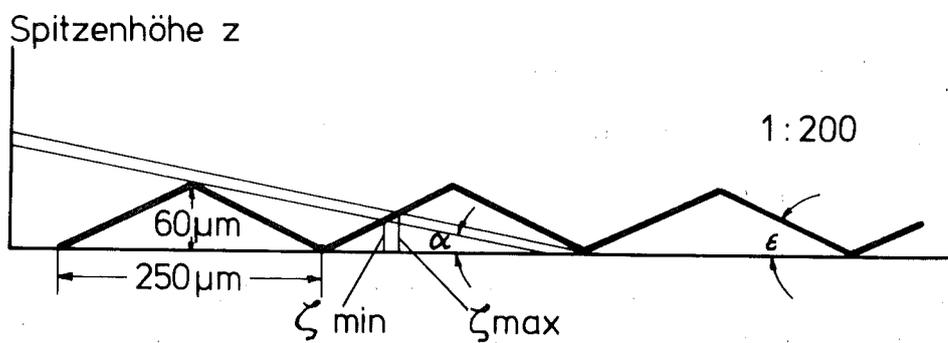
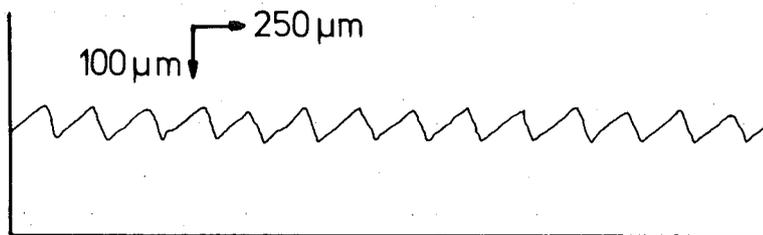


Bild 8: Oberflächenprofil der geritzten Probe und Strahlweg

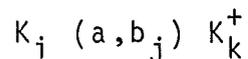
Bild 8 zeigt schematisch den Strahlweg durch das Profil einer durch Schneiden mit einem Diamantwerkzeug entstandenen gleichmäßig rauhen Oberfläche senkrecht zu den Bearbeitungsriefen. Die Aktivierungstiefe streut um $\zeta = \zeta_{\max} - \zeta_{\min} = 32 \mu\text{m} - 27 \mu\text{m} = 5 \mu\text{m}$. Für $\alpha \geq \beta$ wird $\zeta_{\min} = 0$ und $\zeta = \zeta_{\max} = z$, d.h. die Streuung entspricht der Höhe z des Oberflächenprofils.

Bei den untersuchten Maschinenteilen (gebonderte Büchse eines Dieselmotors, Lauffläche eines Kolbenrings für eine Axialdichtung, Mantellaufbahn eines Kreiskolbenmotors) wurden Rauhtiefen < 1 bis $5 \mu\text{m}$ und Mittelwerte für die Profilsteigung zwischen 4° und 15° gemessen. Bei diesen Teilen ist der Einfluß der Oberflächenrauigkeit auf den Verlauf der Tiefenverteilungskurve gering. Bei Werkstücken mit hohen und flachen Profilsitzen verkleinert sich die für die Versuche nutzbare Aktivierungstiefe gegenüber der gerechneten um die Rauhtiefe der Oberfläche.

Schließlich ist die kleinste aktive Schichtstärke begrenzt durch die im Versuchsziel geforderte Mindestverschleißtiefe.

2.1.2 Einschränkungen bei der γ -Spektrometrie

Während einer Bestrahlung mit Geschossteilchen vom Typ a laufen mehrere Kernreaktionen gleichzeitig ab nach der Gleichung



K_j = unterschiedl. Kerne d. Targetmaterials

K_k^+ = unterschiedl. Restkerne nach der Reaktion

b_j = emittierte Teilchen

Da die Wahrscheinlichkeit einer Kernreaktion von der Energie der Teilchen abhängt, ist das Verhältnis der einzelnen K^+ über der Eindringtiefe nicht konstant. Die mittlere Lebensdauer der unterschiedlichen angeregten Kerne unterscheidet sich. Damit ändert sich ihr Zahlenverhältnis auch mit der Zeit (vgl. Kap. 3.3.3 und Bild 9).

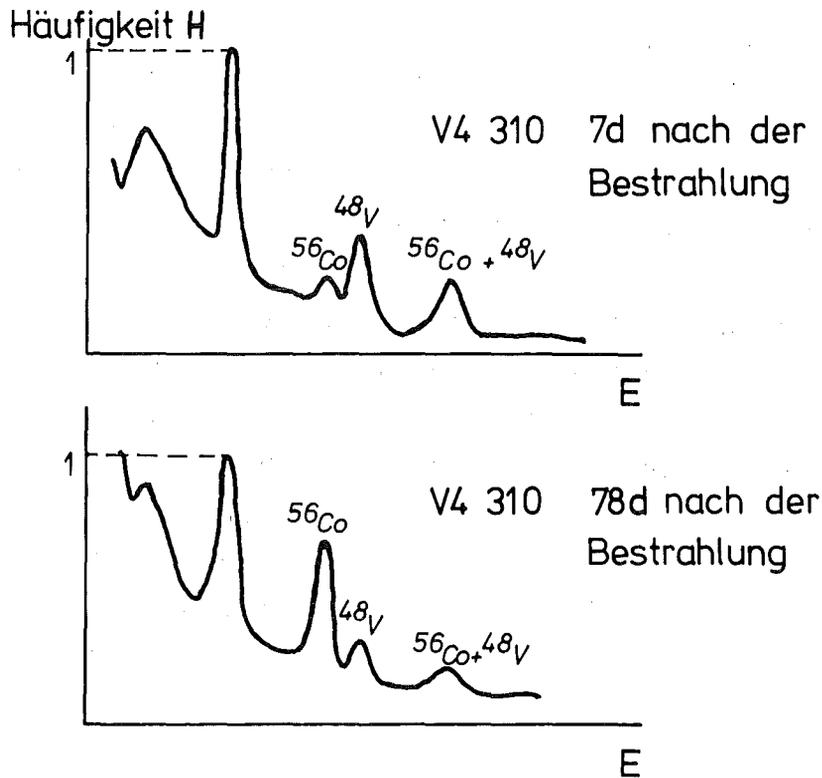


Bild 9: γ -Spektrum einer p-aktivierten Dichtleiste aus Ferrotitanit, 7 Tage und 78 Tage nach Bestrahlungsende aufgenommen (normiert auf jeweilige Höhe des Peaks bei 511 keV)

Aufgrund von versuchstechnisch wichtigen Eigenschaften wie Halbwertszeit, γ -Energie und γ -Häufigkeit wird ein bestimmter aktiver Restkern als Leitisotop für die Verschleißmessung ausgewählt. Die von ihm ausgehende γ -Strahlung stellt das Meßsignal dar. Die γ -Quanten, die beim Zerfall der übrigen entstandenen Isotope frei werden, werden als Störsignal vom Meßgerät mitgemessen.

Gegenüber dem quantitativen Ausmessen eines γ -Spektrums in einer günstigen Eichgeometrie, wie sie für Aktivierungsanalysen oder auch bei der Verschleißmessung im Durchflußverfahren möglich sind, ist die geometrische Anordnung von Probe, Umgebung und Nachweisgerät beim Differenzenverfahren bis auf Ausnahmefälle nicht frei wählbar. Sie wird vorgegeben von den Anbaumöglichkeiten des Detektors an die Maschine und den Ort bzw. die Bewegung des aktiven Teils in der Maschine.

Auf dem Weg vom Bauteil zum Detektor muß die Strahlung eine oder mehrere dicke Absorberschichten durchdringen (Maschinenwand, Kühlwasser, abschirmende andere Bauteile). Die dabei auftretende Vielfachstreuung führt zu einer räumlichen und spektralen Verteilung einer ursprünglich monoenergetischen Quantenstrahlung, die vom Bauteil ausgeht. Diese Verteilung kann nur bei einfachen Geometrien näherungsweise berechnet werden. In Bild 10 sind die Impulshöhenverteilungen für eine Dichtleiste aus d-aktiviertem Ferrotitanit und ein Gehäuse aus α -aktiviertem Elnisil aufgetragen, wie sie bei unterschiedlichen Absorbermaterialien gemessen werden. Der Anteil niederenergetischer Quanten am gesamten Spektrum wächst beim Durchdringen von Abschirmungen wie Motorwand oder Kühlwassermantel durch Comptonvorwärtsstreuung stark an. Die Rückstreucontinua reichen bis in die entsprechenden Photopeaks.

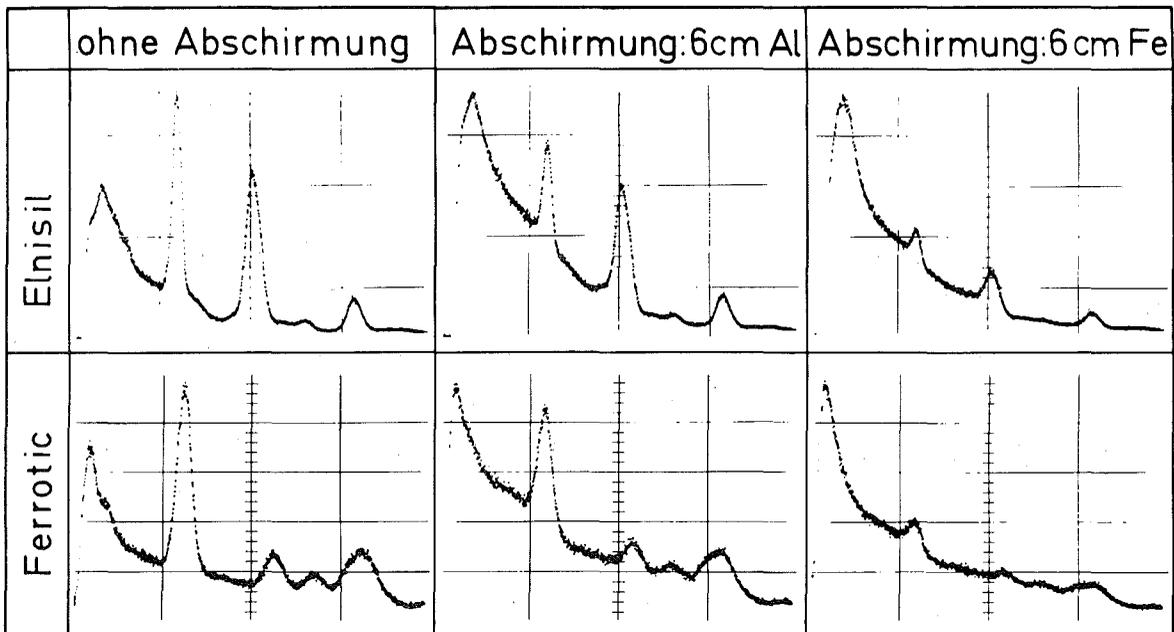


Bild 10: Impulshöhenverteilungen je eines Mantel- und Leistenmaterials in verschiedenen typischen Meßgeometrien. Der Abbildungsmaßstab für den jeweils höchsten Peak (Kanalinhalt) ist konstant gehalten.

Diese prinzipiellen Eigenschaften des Durchgangs von Quantenstrahlung durch dicke Absorberschichten verhindern i.a. beim Differenzenverfahren Mehrkomponentenmessungen durch Energieauswahl (vgl. Kap. 4.4.2).

Die teilweise mehrfache Wechselwirkung der γ -Quanten mit der Umgebung erschwert die Trennung von Meßsignal und Störsignal beim Differenzenverfahren. Dies gilt vor allem, wenn oberhalb des Meßpeaks weitere Peaks von anderen Radioisotopen liegen. Kann ein Nuklid mit hoher γ -Energie zur Messung verwendet werden, so muß auf den mit anderen Peaks überlagerten niederenergetisch gestreuten Anteil verzichtet werden. Häufig liegen die γ -Linien der entstandenen Radioisotope so verschachtelt, daß nur die Linie mit der höchsten Energie eines bestimmten Isotops für die Messung verwendet werden kann. Beide Ursachen, Schachtelung der Energielinien und Energieverteilung durch Vielfachstreuung setzen die Empfindlichkeit stark herab.

Bei komplizierten Spektren muß bei der Aufnahme der Aktivitätstiefenverteilung der späteren Meßgeometrie Rechnung getragen werden. Versuchsaufbau und Detektor müssen so gewählt werden, daß die Empfindlichkeitsmatrix des Meßplatzes der Versuchsdurchführung entspricht.

Beim Differenzenverfahren muß häufig mit Energiefenstern gemessen werden, in die zwei Isotope mit unterschiedlichen Halbwertszeiten in einem nicht bekannten Verhältnis einstreuen. Die Aktivitätsmessung muß mit einer über der Zeit veränderlichen "Ersatzhalbwertszeit" korrigiert werden (vgl. Kap. 3.3.2).

2.2 Anforderungen von der Versuchspraxis

Diese Forderungen ergeben sich aus dem Ziel, der Industrie mit diesem Verschleißmeßverfahren ein Hilfsmittel in die Hand zu geben, mit dem sie Abtragsprobleme überhaupt erst oder besser als mit konventionellen Verfahren lösen kann. Das soll erfüllt sein, wenn die Messung quasikontinuierlich (also mit Meßzeiten \ll Versuchszeit) möglich ist und gleichzeitig mindestens die Auflösung und Genauigkeit der konkurrierenden konventionellen Längenmessung erreicht. Der direkte Wettbewerb mit eingeführten Verfahren stellt

darüberhinaus weitreichende Anforderungen an einen unproblematischen Einsatz.

2.2.1 Festlegung der technischen Leistungsfähigkeit

Für einen Einsatz des Verfahrens in Entwicklung und Vorserienversuch (z.B. Bauteilfreigabe) muß es in der Lage sein, lebensdauerrelevante Verschleißraten zu messen, um einen direkten Vergleich verschiedener Bauteile unter praxisnahen Bedingungen zu ermöglichen.

Bild 11 zeigt am Beispiel einer Verschleißmessung am Wankelmotor, daß dazu die Empfindlichkeit des Meßverfahrens gegenüber dessen erstem Einsatz an einer ähnlichen Maschine um drei Größenordnungen verbessert werden mußte ($\dot{V} = 0,01 \mu\text{m/h}$ gegenüber $30 \mu\text{m/h}$).

| | |
|-----------------------------------|-------------------|
| angestrebte Kilometerleistung | 200 000 km |
| mittlere Fahrgeschwindigkeit | 100 km/h |
| erforderliche Betriebsstundenzahl | 2 000 h |
| zulässiger Abtrag des Bauteils | 200 μm |

angestrebte mittlere Verschleißgeschwindigkeit im Straßenbetrieb $\dot{V} = 0,1 \mu\text{m/h}$

Wegen günstiger Bedingungen auf dem Prüfstand (kein Staub !) liegt der Erwartungswert für die Versuche um den Faktor 2-3 niedriger (Erfahrungswert). Das Meßsystem wird für $\dot{V} = 0,05 \mu\text{m/h}$ ausgelegt.

Bild 11: Auslegung des Differenzenverfahrens für eine Messung am betriebswarmen Motor eines Mittelklasse-PKW (Prüfstandslauf)

Es erscheint möglich, trotz der fortschreitenden Entwicklung im Maschinenbau eine Größenordnung der notwendigen Empfindlichkeit für das Differenzenverfahren zahlenmäßig festzulegen. Häufig werden Neukonstruktionen oder Änderungen nicht durchgeführt, um die Gebrauchsdauer einer Maschine zu erhöhen, sondern um eine ausreichende Lebensdauer bei gesteigerter Leistung (nach Erhöhung von p_{me} oder Nenndrehzahl) oder bei Verwendung von kostengünstigeren

Teilen (Material oder Bearbeitung) zu wahren. Bild 12 zeigt für einige Lebensdauerbegrenzende Bauteile verschieden großer Hubkolbenmotoren im Normalbetrieb gemessene Abtragsraten. Die Umrechnung auf Abriebtiefen zeigt, daß Verschleißgeschwindigkeiten in der Größenordnung von 10 $\mu\text{m}/1000\text{ h}$ bis 100 $\mu\text{m}/1000\text{ h}$ von den Herstellern zugelassen werden. Diese Größenordnung wurde als Zielwert für die Entwicklung des Differenzenverfahrens gewählt.

| Motor | Verschleißteil Maße in mm | Verschleißrate Durchflußmessung in $\mu\text{g}/\text{h}$ | errechnete Abtragstiefe in $\mu\text{m}/1000\text{ h}$ |
|---|--|---|--|
| Schleppermotor Diesel luftgekühlt | Buchse 0T Ring 100 \emptyset | 20 20-50 | 2,2 2,2-5,5 |
| PKW-Motor Diesel wassergekühlt | Buchse 0T Ring 85 \emptyset | 100-500 50-150 | 13-65 100-300 |
| 3 Zyl.-Versuchseinheit Diesel 2-Takt Schiffsmotor | Büchse 1020 \emptyset Ring verchromt 400 \emptyset | | 10-40 100-400 |
| PKW-Motor 4 Zyl.-Diesel wassergekühlt | Kolbenbolzenauge 24 \emptyset , 15 lang | 10 | 13 |

Bild 12: Umrechnung von Verschleißwerten aus Gewichtsangaben in Schichtabtrag

Die Auflösung häufig angewendeter Längenmeßverfahren wie Mikrometermessung oder Ausmessen von Eindrücken liegt bei 1 μm . Das Differenzenverfahren muß diese Auflösung, um in breitem Maße konkurrenzfähig zu sein, übertreffen oder mindestens ebenfalls erreichen.

2.2.2 Zuverlässigkeit und problemloser Einsatz

Das Differenzenverfahren tritt in Konkurrenz zu konventionellen Verfahren, deren Verbreitung und Entwicklungsstand ihnen Vorteile verschafft: Die Vielzahl der Meßprobleme ermöglicht die Einteilung von Geräteklassen und die Definition der Qualifikation des jeweiligen Bedieners. Durch entsprechende Aus-

bildungsgänge (z.B. Meßtechniker) steht qualifiziertes Personal zur Verfügung.

Die Verbreitung des Differenzenverfahrens hängt wesentlich davon ab, daß für seine Anwendung kein völlig neues Berufsbild erforderlich ist. Dies ist auch bei der Konzeption der Meßgeräte zu berücksichtigen (vgl. Kap. 2.3.2).

Definiert man die Zuverlässigkeit des Verfahrens, wie in (18) als den Quotienten aus Meßzeit und Störzeit, so muß in diese Betrachtung neben der Zuverlässigkeit der Meßanordnung während des Versuchs auch die Aktivierung einbezogen werden, da eine mangelhafte Lieferung von aktivierten Versuchsteilen die Störzeit vergrößert. Über den jeweiligen Stand der Bestrahlungstechnik wirken die geforderten Eigenschaften der aktivierten Schicht direkt auf den Einsatz des Verfahrens. Die geforderte Verfügbarkeit bestimmt damit ebenfalls, wie weit bei der technischen Realisierung (vgl. Kap. 2.3) die physikalischen Grenzen im Einzelfall erreicht werden können.

2.3 Technische Realisierbarkeit

2.3.1 Prinzip der Informationsübertragung und -verarbeitung

Radiometrische Verschleißmeßmethoden sind mittelbare Meßverfahren. Die Information über die Meßgröße (hier Restschichttiefe) wird auf eine günstig zu handhabende Ersatzgröße (hier - Strahlung des Versuchsteils) übertragen durch die Aktivierung. Die technischen Probleme, die hierbei zu berücksichtigen sind, werden in Kap. 2.3.3 beschrieben, die Rücktransformation der Ersatzgröße auf die Meßgröße in Kap. 3.3.4.

Der Informationsweg der Ersatzgröße wird in die folgenden Abschnitte aufgeteilt:

1. Eigenschaften des Signals
2. Weg des Signals zur Meßeinrichtung
3. Veränderung der Eigenschaften des Signals während der Übertragung
4. Eigenschaften der Meßeinrichtung
 - a) Nachweis des Signals im Detektor
 - b) Impulsverarbeitung
 - c) Auswertung

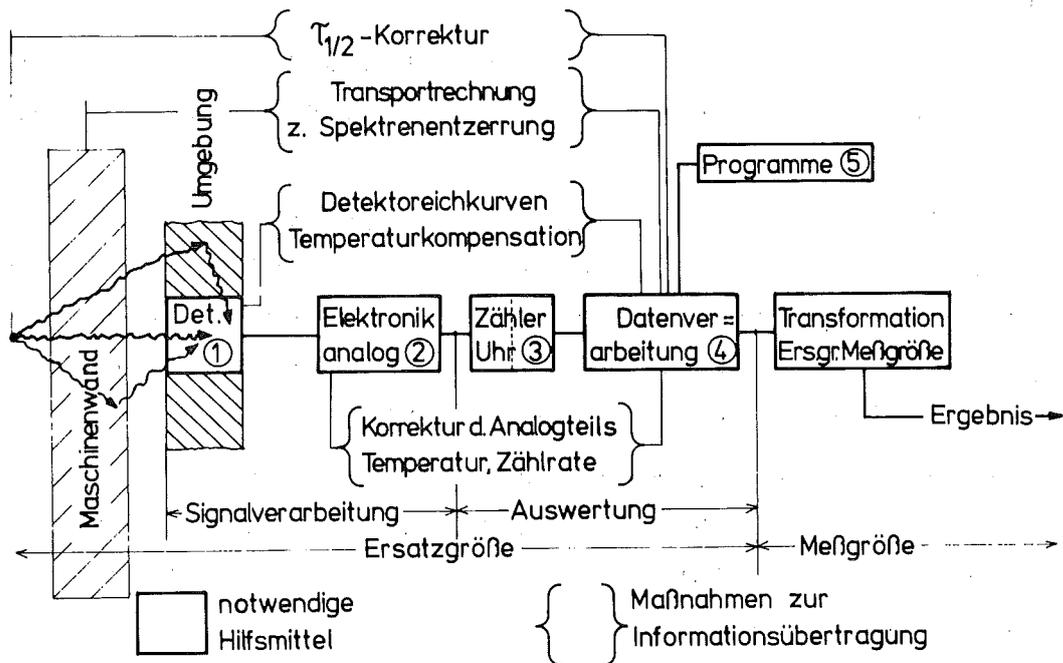


Bild 13: Informationsweg vom aktivierten Verschleißteil bis zum Versuchsergebnis

Bild 13 zeigt systematisch den Informationsweg für die Ersatzgröße. Die Kästen 1 bis 5 stellen notwendige Hilfsmittel dar, in den geschweiften Klammern stehen Funktionen oder Maßnahmen, die erforderlich sind, um die Information des Signals zu erhalten. Anhand der Punkte 1 bis 4 wird nachgewiesen, daß es sich dabei um das einzig mögliche System der Informationsübertragung handelt.

Zu 1.: Das Signal wird allseitig ausgestrahlt. Es werden gleichzeitig Quanten unterschiedlicher Energie ausgestrahlt. Es überträgt die Information über die Energie (welche Tiefenverteilungskurve gilt?) und die Häufigkeit der Quanten (welcher Punkt auf der entsprechenden Tiefenver-

teilungs-Kurve ist erreicht ?). Die Intensität der Strahlung nimmt mit der Zeit ab.

Maßnahme: Korrektur der Intensitätsabnahme durch Kernzerfall über Rückrechnung auf den Zeitpunkt des Versuchsbeginns.

Zu 2. und 3.: Das Signal erreicht den Detektor auf direktem Weg nach Durchdringen der Maschinenwand oder es wird in der Maschinenwand oder der Umgebung des Detektors gegen diesen gestreut. Durch Wechselwirkungen ändern sich Intensität und spektrale Verteilung des Signals.

Maßnahmen: Lösen der Transportgleichung für Maschinenwand und Umgebung zur Spektrenentzerrung und berechnen, welcher Anteil der räumlich und spektral verteilten γ -Quanten in den Detektor fällt.

Zu 4.a: Der Nachweis des Signals geschieht durch Wechselwirkungen mit dem Detektormaterial, deren Wahrscheinlichkeit energieabhängig ist. Der Detektor bildet das einfallende γ -Spektrum nach Multiplikation mit seiner Empfindlichkeitsmatrix ab (Energiespektrum der Wechselwirkungselektronen).

Die Abbildungseigenschaften des Detektors hängen u.a. von seiner Temperatur, der Versorgungsspannung und der Zahl und Energie der Quanten ab.

Maßnahmen: Entfalten des abgebildeten Spektrums mit den Detektoreichkurven. Kompensieren von Temperatureinfluß, Versorgungsspannungsänderungen und Belastungszustand.

Zu 4.b: Im Analogteil der Meßelektronik werden Nutz- und Störsignal getrennt und zu zählbaren Ereignissen klassifiziert. Die Detektorimpulse werden digitalisiert.

Maßnahme: Korrektur von temperaturabhängigen Eigenschaften wie z.B. von Verstärkungsänderungen.

Zu 4.c: Im Auswertungsteil werden die Rohdaten korrigiert und der zeitliche Verlauf der Ersatzgröße registriert. Die anschließende Rücktransformation in die Meßgröße liefert

das Versuchsergebnis. Diese Umrechnung wird ausführlich in Kap. 3.3.4 behandelt.

In dem in Bild 13 dargestellten Meßsystem sind die Einzelkomponenten und ihre Schnittstellen nur von der Funktion her festgelegt, die technische Ausführung ist dadurch nicht eingeschränkt. Die Punkte 1 - 4 behandeln Einflußgrößen auf die übertragene Information und prinzipielle Maßnahmen zur Erhaltung der Eindeutigkeit der Aussage. Jede ausgeführte Meßkette, die auf Teile dieses Systems verzichtet, würde die angebotene Information nur weniger vollständig übertragen können.

Bisher wurde der Fall einer stationären Meßgeometrie betrachtet. Versuchsziel (Messen während des Verschleißvorgangs) und Zeitaufwand (Versuchszeit plus Meßzeit) zwingen i.a. zur Messung unter instationärer oder periodisch veränderlicher Geometrie. Im letzteren Fall bleibt der Informationsfluß wie oben erhalten, wenn die Zeit für eine Periode klein ist gegenüber dem Meßintervall. An die Stelle der konstanten Meßgeometrie tritt dann der konstante Mittelwert der periodisch veränderlichen Geometrieverhältnisse. Die in Kap. 4 beschriebenen Anwendungsbeispiele entsprechen ausnahmslos diesen Bedingungen.

Da das Differenzenverfahren sehr feinfühlig auf Veränderungen des Signalwegs anspricht, muß jede mögliche Auswirkung bei Parameteruntersuchungen sorgfältig geprüft werden. Bei Verschleißmessungen in Wechseltemperaturprogrammen kann die Dichteänderung des Kühlwassers eine Zählratenänderung bewirken, die ein Mehrfaches der durch den Verschleiß hervorgerufenen Abnahme beträgt (z.B. Kap. 4.4.1 Verschleiß im Kalt-Heiß-Programm). Die Genauigkeit der Verschleißmessung im instationären Fall ist durch die unvollständige Erfassung der zeitlich veränderlichen Einflußgrößen und die schwierige mathematische Beschreibung der Transportphänomene eingeschränkt.

Bei Überlagerung von instationärer Meßgeometrie und periodisch wiederkehrenden Versuchsbedingungen bietet das Prinzip des Multiscaling eine gute Lösungsmöglichkeit. Der Meßvorgang während einer Versuchsperiode wird in Intervalle aufgeteilt. Jedem Intervall

wird ein Umrechnungsfaktor zugeordnet, der dem Mittelwert der Geometrieänderung innerhalb der Intervallgrenzen entspricht. Diese Eichung kann durch schrittweise Parameteränderung von Intervall zu Intervall und quasistationäre oder periodische Veränderung innerhalb des Intervalls vorgenommen werden. Ein elektronischer Meßstellenumschalter sortiert die während des Versuchsablaufs gemessenen Zählraten intervallrichtig in getrennte Zähler ein.

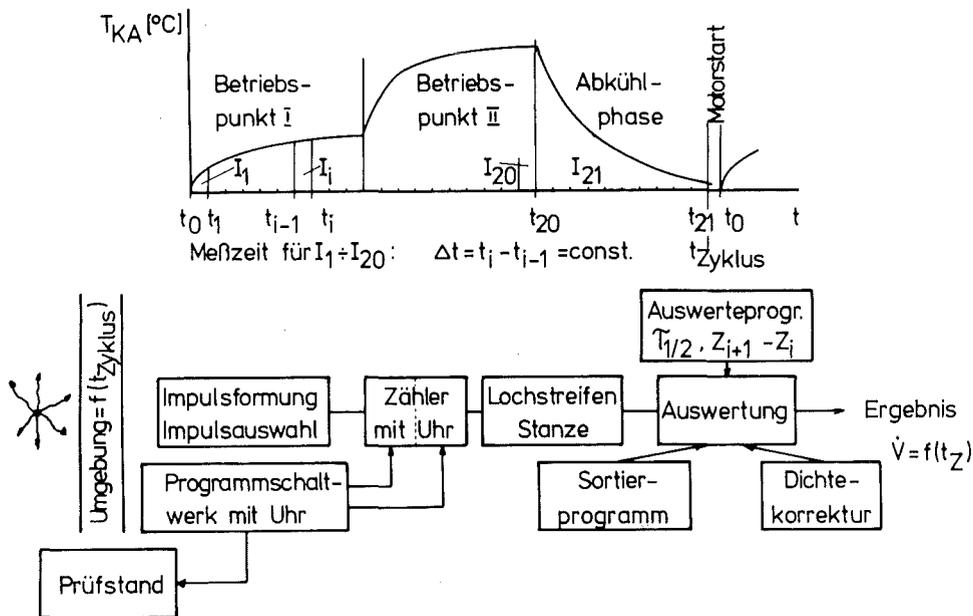


Bild 14: "Multiscaling"-Anordnung für die Verschleißmessung im Kalt-Heiß-Test

Bild 14 zeigt die bei den Kalt-Heiß-Versuchen eingesetzte Multiscaling-Anordnung (vgl. Kap. 4.4.1).

Für die Betriebspunkte I und II soll die Verschleißgeschwindigkeit \dot{V} in Abhängigkeit von der veränderlichen Kühlmitteltemperatur gemessen werden. Dazu wird das Programm so oft wiederholt, bis im Intervall I_i ein hinreichend großer Abtrag stattge-

funden hat.

Die Zykluszeit t_z wird in k gleichlange Meßintervalle (im Versuchsbeispiel $k = 20$) und in ein Pausenintervall eingeteilt. Die Zeit am Ende eines Intervalls wird mit dem Index des entsprechenden Intervalls gekennzeichnet. Durch die Dichteänderung des Kühlmittels sinkt der Anteil der absorbierten Gammaquanten kontinuierlich mit der Zykluszeit. Für jedes Intervall wird ein Korrekturfaktor für die gemessene Impulszahl bestimmt, mit dem die Nettoimpulszahl berechnet wird. Der mittlere Verschleiß im i -ten Intervall wird errechnet aus der Differenz der in den Meßzeiten t_{i-1} bis t_i und t_i bis t_{i+1} gezählten Nettoimpulse.

Der Aufbau der Meßanordnung ist in der unteren Bildhälfte dargestellt. Ein Programmschaltwerk steuert den Prüfstand und schaltet während der Abkühlpause den Zähler aus. Zwischen t_{21} und t_0 liegt das Starten des Motors, dessen Dauer von der Anzahl und Länge der erforderlichen Anlaßvorgänge abhängt. Um sicherzustellen, daß das Intervall I_1 immer mit einer vollen Meßzeit Δt beginnt, wird zum Zeitpunkt t_0 die Zähleruhr vom Programmschaltwerk auf Null gestellt und der Zähler wieder eingeschaltet.

Der Datenstreifen trägt die zu den einzelnen Meßintervallen gehörenden Zählerinhalte, die nach jedem zwanzigsten Wert den Zählerwert Null für das Pausenintervall haben. Damit ist eine einfache Identifikation des ersten Meßintervalls möglich.

Bei der Auswertung werden die Zählwerte mit dem Intervalleichfaktor und der Halbwertszeit korrigiert und intervallrichtig addiert. Aus den Gesamtimpulszahlen für zwei benachbarte Intervalle wird dann der Verschleiß während der Versuchszeit berechnet.

2.3.2 Kenngrößen der Meßeinrichtung

Aus den aufgeführten Randbedingungen sollen Eigenschaften für die Meßeinrichtung definiert werden, die eine Festlegung von Sollwerten und die Auswahl geeigneter Komponenten für das in Bild 13 dargestellte System ermöglichen. Die Planungsdaten für die Entwicklung des Meßsystems werden in Kap. 2.3.4 als Zahlenwert festgelegt. Dabei werden die wechselseitigen Abhängigkeiten von Aktivierung und Meßeinrichtung berücksichtigt.

Für die Auswahl des Nachweisgerätes gelten folgende Kriterien:

1. Von den Strahlungen, die den Kernzerfall begleiten, ist für den Nachweis im Differenzenverfahren nur die γ -Strahlung geeignet, weil sie die Maschinenwand durchdringt und damit kontinuierliche Messungen während des Betriebs des Prüflings ermöglicht. Das Nachweisgerät muß also nach seinen Eigenschaften gegenüber γ -Strahlung ausgewählt werden.
2. Das Meßprinzip (Differenz der Restaktivitäten als Maß für den Abtrag) und die Einsatzbreite (Aktivierungsmöglichkeit, Gesamtaktivität) setzen Dünnschichtaktivierung mit geladenen Teilchen voraus. Dabei finden mehrere Reaktionen mit aktiven Restkernen gleichzeitig statt. Eine eindeutige Zuordnung zwischen der Höhe der gemessenen Gesamtaktivität und der Schichttiefe ist wegen der über der Tiefe und über der Zeit veränderlichen Korrektur der Aktivitätsabnahme durch Kernzerfall sehr schwierig (vgl. Kap. 3.3.3.2). Es muß deshalb aus Aktivierungsgründen auch bei nur einer Verschleißkomponente i.a. in einem Energiefenster gemessen werden. Damit können nur Detektoren mit guter Energieauflösung verwendet werden.
3. Wegen des statistischen Charakters des Kernzerfalls hängt die Genauigkeit der Verschleißmessung von der Anzahl der nachgewiesenen γ -Quanten ab. Die Anzahl der angebotenen γ -Quanten ist begrenzt durch die Aktivierung (vgl. Kap. 2.1.1) und durch die Meßgeometrie. Für die Auswahl des Detektors ist daher die Ansprechwahrscheinlichkeit mit entscheidend.
4. Jeder Detektor hat ein definiertes zeitliches Auflösungsvermögen. Dies bedeutet, daß innerhalb einer Zeitspanne, die sich an ein nachgewiesenes (Zähler I. Art) oder angebotenes (Zähler II. Art) γ -Quant anschließt, keine Strahlung nachgewiesen werden kann. Zum Nachweis hoher Impulsraten (für gute Genauigkeit erforderlich) muß der Detektor ein gutes zeitliches Auflösungsvermögen besitzen.

| Zähler | | Auflösungszeit in sec | Energie-wiedergabe | Ansprechvermögen für γ -Strahlen (662 keV) | Energie-auflösung |
|----------------------|-------------|----------------------------------|--------------------------|---|-------------------|
| Eigenschaft | | | | | |
| Proportionalzähler | | 10^{-6} | gut für kleine Energien | | |
| Auslösezählrohr | | 10^{-5} | stark zählraten-abhängig | $5 \cdot 10^{-3}$ | |
| Szintillationszähler | flüssig | Scintillationsdauer 10^{-9} | energieproportional | | |
| | anorganisch | 10^{-7} | | für 3"x3" $\sim 10\%$ in Peak | <7% bei 662 keV |
| | organisch | Abklingzeit 10^{-8} | | $\sim 10-40\%$ von NaJ(Tl) | |
| | Plastik | 10^{-9} | | | |
| Halbleiterkristall | | Impulsanstieg 10^{-6} | linear | $\sim 5\%$ von NaJ(Tl) ⁺ | < 2 keV |

⁺Vergleich mit 3" x 3"-NaJ(Tl)-Kristall, Meßentfernung 25 cm (nach 21)

Bild 15: Kennwerte schneller Nachweisgeräte für γ -Strahlung

In Bild 15 sind "schnelle" Detektoren zusammengestellt. Proportionalzähler und Auslösezählrohr können wegen mangelnder Energieproportionalität der Höhe der Ausgangsimpulse für das Differenzenverfahren nicht eingesetzt werden. Die Szintillationszähler haben Abklingzeiten zwischen 10^{-7} s und 10^{-9} s. Der Nachweis eines γ -Quants erfolgt über unterschiedliche Wechselwirkungsprozesse (Photoeffekt, Comptonstreuung, Paarbildung). Dadurch ergibt sich für eine monoenergetische Primärstrahlung eine

Energieverteilung (Spektrum), die aber bekannt und zählratenunabhängig ist. Das Ansprechvermögen für γ -Strahlung wächst mit der 5-ten Potenz der Ordnungszahl. Anorganische Szintillatoren wie NaJ (durch den Jodanteil) oder CsJ sind deshalb sehr effektive Nachweisgeräte. Nach (20) ergibt eine Zugabe von 0,3 Mol-% Thallium als Aktivator zu NaJ gleichzeitig günstige Lichtausbeute und niedrige Abklingzeit. Nach (19) scheiden CsJ und Szintillatoren auf Wolframbasis wegen zu langen Abklingzeiten (einige Mikrosekunden) aus.

Organische Szintillatoren sind wegen geringer Ordnungszahl zur Spektrometrie von γ -Strahlung weniger gut geeignet. Die sehr schnellen Plastikszintillatoren (Abklingzeit einige 10^{-9} s) haben eine schlechte Energieauflösung.

Von den Szintillationszählern zeigt NaJ(Tl) insgesamt die günstigsten Eigenschaften für das Differenzenverfahren. Die Kristalle sind in vielen Größen handelsüblich und bieten heute auch gute mechanische Eigenschaften (Poliscin-Kristall). Sie werden in engen Toleranzen gefertigt, so daß der Austausch eines defekten Detektors problemlos möglich ist.

Halbleiterzähler liefern bei kurzen Impulsanstiegszeiten ein energieproportionales Signal. Die Energieauflösung ist mit < 2 keV ausgezeichnet. Das Ansprechvermögen für γ -Strahlung (Photopeakinhalt) im 1 MeV-Bereich beträgt gegenüber 3" x 3" NaJ(Tl) $\approx 1\%$ für Siliziumzähler und 5-25% für Lithium-gedriftete Germaniumzähler (21), die auf 77°K gekühlt werden müssen. Die geringere Ansprechwahrscheinlichkeit ergibt sich vor allem aufgrund des kleinen Zählervolumens. Da für Verschleißmessungen die Zählrate aus dem Peakinhalt bestimmt wird, sind die derzeit käuflichen Halbleiterzähler neben dem Aufwand für die Kühlung wegen ungünstiger Zählausbeute für das Differenzenverfahren ungeeignet. Dies gilt vor allem deshalb, weil hier im Gegensatz zu anderen Aufgaben der γ -Spektrometrie, etwa der Aktivierungsanalyse zur Elementbestimmung, die Spektrenverformung weitgehend schon vor dem Eintritt der γ -Quanten in das Nachweisgerät stattfindet (vgl. Kap. 2.1.2 und Bild 10).

Für die Meßsystementwicklung wird ein 3" x 3" großer NaJ(Tl)-

Detektor mit direkt aufgesetztem Photovervielfacher (sog. Integral Line Montage) ausgewählt, dessen Eigenschaften in (19) und (22) ausführlich beschrieben sind.

Die vollständige Zählapparatur stellt eine Kombination von zusammengeschalteten Zählern dar (Kristall, Photovervielfacher, Impulsauskopplung, Verstärker), die jeweils eine eigene Auflösungszeit haben und deren Gesamtauflösungszeit die Zählverluste bei vorgegebener Impulsrate bestimmt. Die Korrekturen bei unterschiedlichen Zählerkombinationen werden in (23) dargestellt.

Die größte erfaßbare Zählrate wird bei dem vorgeschlagenen Meßsystem vom Analogteil bestimmt. Bei einer Abklingzeit im Szintillator von 250 ns wurde die Impulsdauer am Ausgang des Vorverstärkers auf 0,5 - 1 μ s festgelegt. Der Maximalwert gilt für den voll ausgesteuerten Verstärker mit einer Amplitude von 5 Volt. Die Zählordnung würde also bei einer Impulsfolge mit konstanten Zeitabständen eine größte Impulsrate von 10^6 /s fehlerfrei messen.

Im Gegensatz zu dieser Annahme sind die Zeitintervalle zwischen zwei aufeinanderfolgenden Zählereignissen (in den Detektor einfallende γ -Quanten) nicht konstant. Nimmt man für den Kernzerfall eine Poissonverteilung an, so gilt nach (23)

$$P(t) dt = N e^{-Nt} dt$$

t = Meßzeit

N = Erwartungswert der Impulsfolge

$P(t) dt$ stellt dabei die Wahrscheinlichkeit dafür dar, daß der Nachweis eines weiteren γ -Quants im Zeitintervall zwischen t und t + dt liegt. $P(t)$ gibt die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Intervallängen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Impulsen in Abhängigkeit vom Erwartungswert an. Da der Zählverlust mit einfachen elektronischen Schaltungen nicht vollständig korrigiert werden kann, wird die nominelle Grenzzählrate für das Meßsystem auf 200 000 I/s festgesetzt.

2.3.3 Anforderungen an die Aktivierung

Die in Kap. 2.1.1 genannten physikalischen Grenzen können bei realen Bestrahlungen nicht erreicht werden. Dafür sind zwei Gründe verantwortlich:

1. Unsicherheit und Unvollständigkeit der Unterlagen, die die Vorgänge bei der Aktivierung beschreiben
2. Abweichungen bei der Einstellung und Einhaltung der richtig bestimmten Bestrahlungssollwerte.

In der Literatur (24,25) wiedergegebene Anregungsfunktionen für durch geladene Teilchen ausgelöste Kernreaktionen sind unvollständig hinsichtlich Targetmaterial und Teilchenenergie. Experimentell ermittelte Daten weichen stark voneinander ab und beziehen sich überwiegend auf Einzelreaktionen. In (26) wird aus den Ergebnissen von Experimenten geschlossen, daß die den Berechnungen zugrunde liegenden Theorien über die Wechselwirkung zwischen geladenen Teilchen und Targetmaterial gerade im Bereich kleiner Energien am Ende der Reichweite nicht anwendbar sind.

Die Gesamtwirkungsquerschnitte für Reaktionen natürlicher Isotopengemische mit demselben Restkern K^+ , die am LIT gemessen wurden (30), genügen i.a. den Anforderungen für Senkrechtbestrahlungen. Die für Schrägbestrahlung unter kleinen Winkeln notwendige exakte Kenntnis der Startenergie der Teilchen war bei diesen Experimenten jedoch nicht gegeben, da eine routinemäßige Energiemessung nicht möglich war.

Bei den Einstelldaten für die Bestrahlung existieren zwei Gruppen:

- a) Einstelldaten für den Betrieb des Beschleunigers. Sie sind verantwortlich für Lage, Gestalt und Energie des extrahierten Teilchenstrahls.

Soweit hier die für normale Funktion garantierten Maschinendaten zu große Schwankungen zulassen, müssen durch Messung des tatsächlichen Betriebszustandes genauere Daten beschafft werden. Dies gilt vor allem für die Teilchenenergie, die nach Herstellerangaben beim Karlsruher Zyklotron um $\pm 0,5\%$ vom

Sollwert (50,6 MeV für Deuteronen) abweichen kann. Die Schwankungen während einer Bestrahlung von wenigen Stunden, also unter konstanten Betriebsbedingungen, sind wesentlich geringer. Eine Energiemessung unmittelbar vor der Bestrahlung erlaubt die Feinabstimmung des Bremstargets und bringt einen wesentlichen Vorteil gegenüber der Rechnung mit der zulässigen Gesamtschwankung. Der Einfluß der Startenergie auf die Aktivierungstiefe ist in (24) behandelt.

Betriebsbedingte Schwankungen der Strahlage können im Strahlführungssystem ausgeglichen werden. Dazu ist eine kontinuierliche rückwirkungsfreie Strahlpositionsmessung erforderlich, die den Istwert für eine rechnergesteuerte Strahlführung liefert. Entsprechende Einrichtungen werden in (28,29) beschrieben.

- b) Ausrichten der Targetoberfläche gegen den Strahl. Der durch die Geometriefehler verursachte Fehler im Bestrahlungsergebnis wächst mit kleiner werdendem Sollwinkel α_0 steil an (ausführliche Erörterung in Kap. 3.1). Die in Kap. 2.2.2 geforderte Verfügbarkeit der Aktivierung zwingt zu einer hohen Sicherheit beim Erreichen des geplanten Bestrahlungsergebnisses. Dafür muß ein Sicherheitsabstand zwischen der in Kap. 2.1.1 gefundenen kleinsten aktiven Schichtstärke und den technisch zu realisierenden Aktivitätstiefen in Kauf genommen werden.

2.3.4 Richtlinien für die Entwicklung des Systems

In Bild 16 sind für gebräuchliche für Radionuklidmessungen geeignete Strahler, die rechnerischen Eindringtiefen x_r und die Nutzanteile a_N für Reaktionen der Art $K_i (a, b_j) K^+$ tabelliert (nach (30)). Die rechnerischen Eindringtiefen x_r haben eine Häufung im Bereich von 300 μm - 400 μm , die Nutzanteile a_N liegen zwischen 50% und 80% (der Strahler ^{57}Co kommt wegen seiner niedrigen γ -Energien von 122 keV und 136 keV nur in Ausnahmefällen im Differenzenverfahren zum Einsatz).

| Targetmaterial | Produktkern | Partikel | x_R in μm | a_N in % |
|----------------|--------------------------|----------|------------------------|------------|
| Ti | ^{48}V | p | 350 | 60 |
| Cr | ^{51}Cr | d | 360 | 50 |
| Cr } Cr } | ^{52}Mn | d | 420 | 60 |
| | | p | 350 | 50 |
| Fe | ^{56}Co | p | 320 | 65 |
| Fe } Cu } | ^{57}Co | d | 100 | 25 |
| | | α | 300 | 80 |
| Fe | ^{58}Co | α | 120 | 60 |
| Cu } Cu } | ^{65}Zn | d | 300 | 60 |
| | | α | 150 | 80 |
| | | p | 280 | 65 |
| Zn } Zn } | ^{67}Ga | p | 850 | 80 |
| | | d | 300 | 70 |
| Mo } Mo } | $^{95\text{m}}\text{Tc}$ | d | 720 | 80 |
| | | p | 400 | 50 |
| | | | 590 | 80 |
| Mo | $^{99\text{m}}\text{Tc}$ | d | 200 | 65 |

Bild 16: Rechnerische Bestrahlungstiefen x_r und Nutzanteil $a_N = \frac{x_M}{x_R}$ für gebräuchliche Strahler für Verschleißmessungen nach dem DDV

Der Stand der Aktivierungstechnik legt (vgl. Kap. 3.1.2) den Bestrahlungswinkel fest auf $\geq 15^\circ$. Damit sind für das Differenzenverfahren typische rechnerische Eindringtiefen zwischen $75 \mu\text{m}$ und $100 \mu\text{m}$ erreichbar. Läßt man eine Verkleinerung des Nutzanteils auf 25% bis 50% zu, so sind Werte von $50 \mu\text{m} < s_r < 100 \mu\text{m}$ realisierbar. Diese Werte werden als Auslegungsdaten für das Differenzenverfahren zugrundegelegt.

Der Zielbereich für den Einsatz des Verfahrens wurde in Kap. 2.2.1 festgelegt für Verschleißgeschwindigkeiten von $0,01 \mu\text{m/h} < \dot{V} < 0,1 \mu\text{m/h}$. Nimmt man als typischen Wert $\dot{V} = 0,05 \mu\text{m/h}$ an, dann würde in einem 10 stündigen Lauf ein Schichtabtrag von $0,5 \mu\text{m}$ oder 0,5% bis 1% der rechnerischen Eindringtiefe erzielt. Legt man die Fehlergrenze für die Meßeinrichtung unter günstigen Versuchsbedingungen mit $\leq 1\%$ der gemessenen Impulsrate fest, dann erreicht das Differenzenverfahren eine beste Auflösung von $\leq 0,1 \mu\text{m}$. Das entspricht einer Verbesserung um eine Größenordnung gegenüber den in Kap. 2.2.1 angeführten konventionellen Konkurrenzverfahren. Bei einer kleinsten Verschleißgeschwindigkeit von $\dot{V} = 0,01 \mu\text{m/h}$ wäre nach einer Versuchszeit von 10 h gerade die Auflösungsgrenze erreicht (bezogen auf $s_r = 100 \mu\text{m}$). Die Langzeitkonstanz der Meßanlage muß ebenfalls in der Größenordnung von 1% liegen.

3. ENTWICKLUNG DES MESSSYSTEMS

3.1 Zur Aktivierungstechnik

Der heutige Stand der Aktivierungstechnik und notwendige Weiterentwicklungen werden beschrieben und ihre Auswirkungen auf das Bestrahlungsergebnis und auf den Einsatz des Meßverfahrens beurteilt. Eine Reihe von Kriterien für die Auswahl von Alternativen sind stückzahlabhängig, wie die Verfügbarkeit der Aktivierung oder die Maschinenauslastung und die Rüstzeit. Der jeweils erreichte Stand der Technik wird deshalb vom Umfang der Anwendung radionuklidtechnischer Verschleißmeßverfahren in der Industrie abhängen.

so klein sein gegenüber den beschriebenen Einflüssen, daß mit dem Mittelwert der Verteilung allein gearbeitet werden kann. Die Maschinenenergie E_M am Ablenker bleibt im weitgehend evakuierten Strahlführungssystem ($p \leq 10^{-5}$ Torr) praktisch erhalten. Der Energieverlust ΔE_F tritt auf beim Durchgang durch das Strahlaustrittsfenster, das die Strahlführung gegen den Umgebungsdruck abdichtet.

Für die freie Bewegung größerer Werkstücke (wie z.B. Zylinderköpfe oder Motorblöcke) muß bei Bestrahlungen von Bohrungen ein Luftweg des Teilchenstrahls bis zu 1 m Länge in Kauf genommen werden. Dabei tritt ein weiterer Energieverlust ΔE_L auf. In der Bremsschicht wird die Teilchenenergie um den Betrag ΔE_B auf die gewünschte Auftreffenergie E_0 an der Werkstückoberfläche verringert.

Kleine Werkstücke (Wälzlagerrollen, Klemmkörper von Freiläufen) können in einer internen Targetposition bestrahlt werden. Für alle anderen Aktivierungen müssen beim Berechnen der Abbremsdicke die auftretenden Energieverluste berücksichtigt werden. Eine Aktivierung großer Teile im Vakuum wäre technisch aufwendig wegen der Größe der Bestrahlungskammer.

Die Anordnung und Ausführung eines Bremstargets kann nach zwei grundsätzlichen Überlegungen erfolgen:

- a) Die Maschine liefere den Strahl mit einer festen Energie E_{Fenster} . Dieser Wert beinhaltet die internen Verluste und die Energieabnahme im Austrittsfenster. Die Bremsschicht nimmt als ein Teil des jeweiligen Bestrahlungsexperiments Rücksicht auf den Versuchsaufbau (Länge der Luftwege) und gehört damit zum Maschinenteil, das aktiviert werden soll.
- b) Die Maschine werde durch die Ausrüstung mit einer geeigneten Bremsvorrichtung zu einem im gesamten Bereich energievariablen Beschleuniger. Die Maschine wird jeweils so eingeregelt, daß für ein Bestrahlungsexperiment die geforderte Energie an der Werkstückoberfläche vorhanden ist. Da die Bremsschicht ein experimentunabhängiger Bestandteil der Maschine ist, muß die wirksame Dicke verändert werden können.

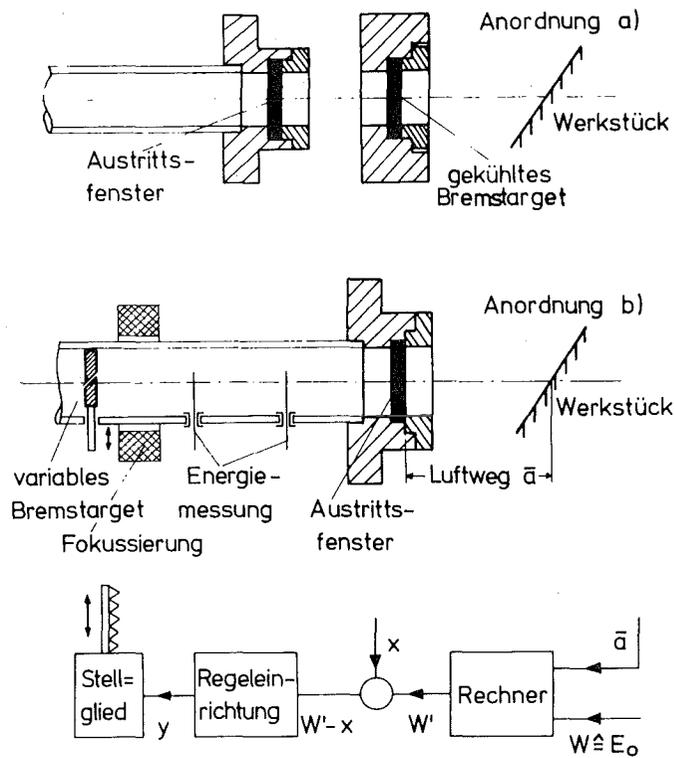


Bild 18: Prinzipskizze zur Energieeinstellung mit einem Bremsziel

Beide Anordnungen (Bild 18) weisen typische Vor- und Nachteile auf, die im folgenden verglichen werden:

Lösung a):

Sie ist die gebräuchliche Ausführung und erfordert nur einen geringen Aufwand (kein Eingriff in das komplizierte Strahlführungssystem, praktisch keinerlei Wartung), der aber proportional zur Anzahl der Aktivierungen wächst. Das Bremsziel befindet sich im Luftweg der Teilchen zwischen Strahlaustrittsfenster und Werkstück. Die Aufheizung eines feststehenden Bremsziels kann bei hohen Strömen zur thermischen Überlastung führen. Die Dichteänderung führt zu einer Verkleinerung der wirksamen Dicke und da-

mit zu einer kleineren Energiedifferenz als gefordert (27). Eine Targetkühlung ist möglich (Gebläse, wassergekühlte Targethalter) und vermindert diese Fehler. Das Material des Bremstargets kann frei gewählt werden. Dabei müssen folgende Punkte beachtet werden:

1. Die Halbwertszeit der im Bremstarget entstehenden Radioisotope soll kurz sein, damit die für die Messung nicht benötigte Aktivität rasch abklingt.
2. Das Material soll eine gute Wärmeleitfähigkeit haben, damit die in einem kleinen Volumen durch den Strahl erzeugte Wärme auf einer möglichst großen Fläche abgeführt werden kann.
3. Bei Maschinenteilen mit ungünstiger Wärmeleitfähigkeit und Formgebung kann das direkt aufgelegte Bremstarget bei guter Wärmeleitung und Kühlung die Temperaturen im Werkstück senken.
4. Bei Werkstoffen, die einen großen Wirkungsquerschnitt für Neutronenabsorption haben (Tantal, Wolfram in Hartmetallen, Chrom als Laufflächenbeschichtung) muß das Bremstarget danach ausgewählt werden, daß als Sekundäreffekt bei der Kernreaktion wenig Neutronen erzeugt werden. Diese gleichzeitige Neutronenaktivierung würde zu großen aktiven Schichttiefen führen und damit die Empfindlichkeit der Messung herabsetzen (vgl. Kap. 2.1.1).
5. Sekundäreffekte, die stark energieabhängig sind, können zur Überwachung eingesetzt werden. Während eine Energieeinstellung über eine Messung von Sekundäreffekten im oder nach dem Bremstarget wegen der Energie- und Flußverteilung im Strahl nicht empfindlich genug ist, kann das Meßsignal verwendet werden, um Schäden zu erkennen, wie z.B. das Durchschmelzen eines Bremstargets.
6. Das Bremstarget verursacht eine Aufweitung des Strahls. Diese Aufweitung ist material- und dickenabhängig und begrenzt die Verkleinerung des Bestrahlungswinkels (vgl. Kap. 3.1.2).

Im Energiebereich $5 \text{ MeV} < \text{Energie/Nukleon} < 25 \text{ MeV}$, der beim Karlsruher Zyklotron für die Bestrahlung von Maschinenteilen benutzt wird, haben Reaktionen mit einem oder mehreren Neutronen

als emittierte Teilchen (d,n ; $d,2n$; p,n ;...) eine hohe Wahrscheinlichkeit. Wenn trotz günstiger Materialauswahl für das Bremstarget der Neutronenfluß an der Oberfläche des Maschinenteils zu groß ist, muß der Abstand zwischen Bremstarget und Werkstück vergrößert werden. Der dadurch verursachte Luftweg II (vgl. Bild 17) geht wegen des jetzt niedrigeren Energieniveaus der Teilchen noch stärker in die Auftreffenergie am Werkstück ein als der Luftweg I und muß deshalb bei der Berechnung der Dicke des Bremstargets genau erfaßt werden.

Lösung b):

Zyklotronmaschine und Ablenker bilden eine Einheit, die einen externen Teilchenstrahl mit einer richtungsabhängigen Fluß- und Energieverteilung liefert. Bei Deuteronenaktivierungen am Karlsruher Zyklotron kann wegen der Temperaturbelastung der Werkstücke i.a. nur ein Teil ($\leq 25\%$) des lieferbaren externen Stromes ausgenutzt werden. Durch die Verwendung eines Teilchenseparators könnte die Energieverteilung der extrahierten Teilchen eingeschränkt werden ohne Verlust an externem Strahlstrom. Die von einem an das Zyklotron angeschlossenen Rechner (29) bedienbare variable Bremschicht weitet den Strahl auf und macht eine anschließende Fokussierung erforderlich. Eine Einrichtung für die Energiemessung und das Austrittsfenster vervollständigen die Anordnung.

Bei dieser Lösung sind verschiedene Reihenfolgen der Komponenten möglich. Wird die Anordnung wie in Bild 18 b gewählt, d.h. Energiemessung am gebremsten und wieder fokussierten Strahl, so werden betriebsbedingte Schwankungen der Startenergie und temperaturabhängige Dichteänderungen des Bremstargets mit ausgeregelt. Die Energieverluste im Austrittsfenster und im Luftweg werden vom Rechner bei der Vorgabe des Energiesollwertes berücksichtigt. Die Vorteile eines nahezu parallelen Teilchenstrahls werden in Kap. 3.1.2 deutlich.

Der Fertigungs- und Montageaufwand für ein dickenvariables Bremstarget (z.B. Doppelkeil) in der Strahlführung, das in einem Regelkreis betrieben werden kann, zwingt bei dieser Lösung zu einem Dauertarget.

Dabei sind andere Kriterien für die Materialauswahl maßgeblich als bei Lösung a):

1. Da das Bremstarget weit von der Bestrahlungsposition entfernt ist, bringt ein rasches Abklingen der Aktivität nach der Einzelbestrahlung keine entscheidenden Vorteile für den Targetumbau.
2. Die Sättigungsaktivität soll klein sein, damit eine Ausnutzung durch eine große Anzahl von Bestrahlungen möglich ist ohne die Gesamtaktivität im selben Maß zu erhöhen. Neben einer kurzen Halbwertszeit der Reaktionsprodukte muß für die auftretenden Reaktionen ein kleiner Wirkungsquerschnitt angestrebt werden.
3. Die thermische Belastbarkeit muß hoch sein.
4. Die nachfolgende Fokussierung wird erleichtert bei kleinen Strahlaufweitungswinkeln.
5. Für eine empfindliche Regelung ist eine große Reichweite der Teilchen im Bremsmaterial wünschenswert.

Von den in Bild 19 aufgeführten Materialien erfüllt Graphit die Voraussetzungen für ein Dauertarget am besten.

Bei einzelnen Anwendungsfällen des Differenzenverfahrens im Bereich sehr hoher Verschleißgeschwindigkeiten (mehrere um/h) können Meßbereiche gefordert werden, die nur durch Bestrahlung mit zeitlich veränderlicher Teilchenenergie mit der gewünschten Aktivitätstiefenverteilung erzeugt werden können. Die Energievariation kann mit Anordnungen nach Lösung a) oder nach Lösung b) durchgeführt werden. Da stark unterschiedliche Abbremsdicken und damit unterschiedliche Aufweitungswinkel während der Bestrahlung auftreten, ist die Anordnung b) mit der Möglichkeit der anschließenden Fokussierung die günstigere Lösung. Wenn der Regelbereich des Dauertargets die gewünschte Energievariation erlaubt, kann diese Betriebsart ohne zusätzlichen Aufwand durch Vorgabe einer Zeitfunktion für den Energiesollwert E_0 über den Rechner gefahren werden.

| Element | Bremsdicke für E_D | | Strahlauf- weitung | | Schmelz- temperatur | Wärmeleit- fähigkeit |
|---------|---|-------|-----------------------|-------|------------------------|-------------------------|
| | von 50 MeV auf 20 MeV in mm (5 MeV) | | in ° | | in °C | W/m · grad |
| C | 6 | (7,1) | 0,3 | (0,5) | 3830 | 20 ... 170 |
| Mg | 8 | (9,7) | 0,4 | (0,7) | 650 | 155 |
| Al | 5,3 | (6,5) | 0,5 | (0,7) | 660 | 220 |
| Si | 6 | (7,4) | 0,5 | (0,8) | 1420 | 85 |
| Ti | 3,6 | (4,5) | 0,6 | (1,0) | 1670 | 17 |
| V | 2,8 | (3,4) | 0,6 | (1,0) | 1900 | 31 |
| Cr | 2,3 | (2,9) | 0,6 | (1,0) | 1903 | 7 |
| Mn | 2,3 | (2,9) | 0,7 | (1,1) | 1244 | 50 |
| Fe | 2,1 | (2,6) | 0,65 | (1,1) | 1540 | 85 |
| Co | 2 | (2,4) | 0,7 | (1,1) | 1490 | 70 |
| Ni | 1,9 | (2,3) | 0,7 | (1,1) | 1452 | 93 |
| Cu | 2 | (2,4) | 0,7 | (1,2) | 1083 | 395 |
| Nb | 2,3 | (2,8) | 0,9 | (1,4) | 2415 | 52 |
| Mo | 1,9 | (2,4) | 0,9 | (1,4) | 2600 | 142 |
| W | 1,3 | (1,6) | 1,2 | (2,0) | 3370 | 163 |

Bild 19: Eigenschaften von Materialien für Dauerbremsschichten nach Anordnung b)

Klammerwerte für Abbremsung von 50 MeV auf 5 MeV
 E_D = Energie des Deuteronenstrahls

3.1.2 Aktivierung unter kleinen Winkeln

Beim heute bekannten Stand der Technik werden für die Dünnschichtaktivierung nicht energievariable Beschleuniger eingesetzt (Bestrahlungsanordnung a) aus Kap. 3.1.1). Die in Kap. 2.3.3 aufgeführten Unsicherheiten in den Unterlagen machen eine exakte Vorausberechnung des Bestrahlungsergebnisses häufig nicht möglich. Wenn der Einfluß möglicher Abweichungen zahlenmäßig angegeben werden kann, läßt sich ein Bereich vorausberechnen, in dem das Bestrahlungsergebnis mit Sicherheit liegen wird. Die zulässige Breite dieses Bereichs (z.B. als relativer Fehler der erzeugten gegenüber der gewünschten aktiven Schichtstärke angegeben) hängt von der Genauigkeit ab, mit der das Versuchsziel selbst angegeben werden kann. Die Forderung nach Verfügbarkeit der Aktivierung

(vgl. Kap. 2.2.2) ist erfüllt, wenn das Bestrahlungsergebnis innerhalb der so definierten Bereichsgrenzen liegt. Die geforderte Absolutgenauigkeit der RNT-Messung kann eine genaue Bestimmung des tatsächlichen Ergebnisses durch eine Eichung des aktiven Maschinenteils notwendig machen.

Diese Eichung kann nach zwei unterschiedlichen Verfahren durchgeführt werden:

1. Ausmessen der Tiefenverteilung durch Abschleifen eines mitbestrahlten Eichstiftes oder Auszählen eines Folienpakets im Energiebereich $E_0 \geq E > 0$.
2. Bestimmen des Aktivitätsverlaufs vor der Targetoberfläche im Energiebereich $E' \geq E > E_0$ und der Gesamtaktivität des Targets. Dabei wird aus der bekannten Tiefenverteilung für Senkrechtbestrahlung auf den weiteren Aktivitätsverlauf im schrägbestrahlten Target geschlossen.

Beim zweiten Verfahren müssen außer dem Target selbst mindestens zwei Folien ausgezählt werden. Damit erhält man die Steigung und die Steigungsänderung der Gesamtaktivitätskurve an der Targetoberfläche und kann die Lage auf der Tiefenverteilungskurve und den tatsächlichen Bestrahlungswinkel θ bestimmen.

Bei Bestrahlungen am Karlsruher Isochron-Zyklotron muß bei nahezu allen bisher untersuchten Materialien (Ausnahmen: ^{52}Cr (d,p2n) ^{51}Cr , $^{66}\text{Zn}(p,pn)$ ^{65}Zn , ^{92}Mo ($\alpha,2\alpha$) ^{88}Zr) die Energie der Teilchen bis zum Auftreffen auf die Werkstückoberfläche abgebremst werden (vgl. Kap. 3.1.1). Legt man die bei Verfahren 2 benutzten Eichfolien über die zu bestrahlende Fläche, so stellen sie einen Teil des Bremstargets dar. Bei dieser Anordnung, bei der ein Teil des Bremstargets für die Eichung verwendet wird, bleibt der Aufwand für die Eichung gering. Eine Trennung von Bremstarget und Eichprobe läßt eine genauere Eichung zu, weil im Energiebereich des bestrahlten Maschinenteils selbst gemessen wird und keine Extrapolation erforderlich ist.

In Bild 20 sind unter Berücksichtigung der Eichmöglichkeiten verschiedene Anordnungen von Werkstück und Bremstarget bei einer Schrägbestrahlung gegenübergestellt. Die vier Fälle

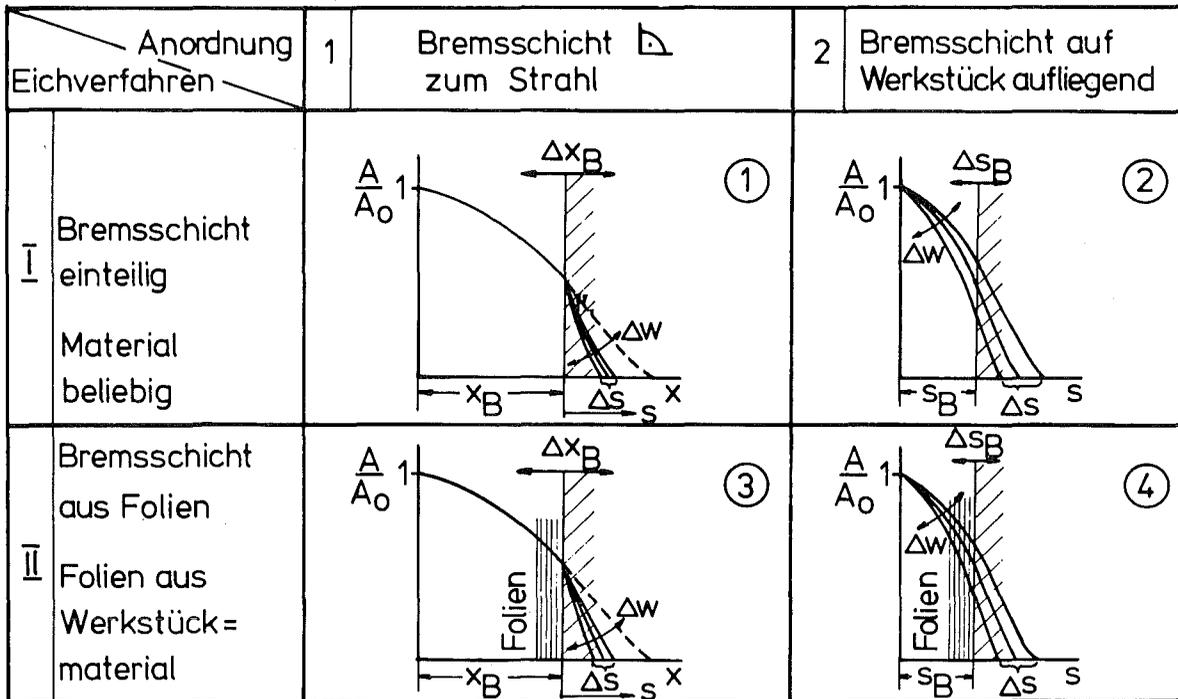


Bild 20: Aufbaumöglichkeiten für Werkstück und Bremsschicht nach Anordnung a aus Bild 18.
Beispiel: $^{56}\text{Co}/^{58}\text{Co}$ -Summenkurve bei α -Bestrahlung von Nickel, $\alpha_0 = 30^\circ$, $\Delta W = \pm 5^\circ$

ergeben sich aus der Kombination der Eichverfahren I (Bremstarget einteilig ohne Eichfunktion) und II (Bremstarget aus Folien aufgebaut, Möglichkeit zur Eichung) mit den Anordnungen 1 und 2 des Bremstargets (unabhängig vom Maschinenteil und senkrecht zum Strahl oder auf dem Maschinenteil aufliegend, d.h. gleiche Winklereinstellung wie die zu bestrahlende Fläche). Dargestellt ist jeweils die ganze Tiefenverteilungskurve im Energiebereich $E_0 \geq E > 0$.

Die senkrechte Linie (Zeile I) bzw. die am weitesten rechts liegende Parallele zur Ordinate (Zeile II) entspricht der Oberfläche des Maschinenteils. Die Dicke des Bremstargets in Teilchenflugrichtung ist mit x_B bezeichnet. Die Abweichung Δx_B bezeichnet die Unsicherheit in der Lage dieses Punktes auf der Tiefenverteilungskurve. Sie wird verursacht durch Fertigungsungenauigkeiten und Wärmeausdehnung, die die wirksame Dicke der Bremsschicht verfälschen (24) und durch Fehler bei der Annahme der rechnerischen Startenergie E_M der Teilchen und des Energieverlusts auf dem Weg zum Werkstück.

Der Winkelfehler Δw zwischen dem Strahl und der Werkstückoberfläche führt zu einer Stauchung oder Dehnung der Tiefenverteilungskurve entlang der s-Achse. Bei der Anordnung 1 ist $s = 0$ für $x = x_B$, für Anordnung 2 gilt $s = 0$ für $x = 0$, d.h. die Tiefenverteilungskurve wird in ihrer gesamten Länge gestaucht.

Die vier Fälle müssen im Hinblick auf die Information über Lage auf der Tiefenverteilungskurve und über Bestrahlungswinkel sowie auf die rechnerische Eindringtiefe s_R und die Länge des Meßbereichs s_M beurteilt werden.

Fall 1: Information über Lage und Winkel sehr gut (Ergebnis entspricht direkt der Tiefenverteilung im Werkstück). Anteil des Meßbereichs an der rechnerischen Eindringtiefe

$a_N = \frac{s_M}{s_R}$ nicht winkelabhängig, Verfügbarkeit gut. Großer Aufwand für die Eichung, kein Schutz der Oberfläche durch aufgelegtes Bremstarget.

Fall 2: Information wie bei Fall 1, Schutz der Oberfläche und Wärmeabfuhr über Bremstarget möglich. Großer Aufwand für die Eichung, Verfügbarkeit und a_N winkelabhängig.

Fall 3: Geringer Aufwand für die Eichung, a_N und Verfügbarkeit nicht winkelabhängig. Keine Information über den wahren Bestrahlungswinkel, Oberflächenschutz nicht möglich.

Fall 4: Einfache Eichung, Oberflächenschutz für Werkstück möglich, Information über den wahren Bestrahlungswinkel. Verfügbarkeit und a_N winkelabhängig.

Fall 3 scheidet als Alternative aus, weil der Bestrahlungswinkel nicht gemessen werden kann. Fall 4 ist Fall 2 vorzuziehen, weil bei ähnlicher Information der Aufwand für die Eichung geringer ist. Ob Fall 1 oder Fall 4 günstiger ist muß nach dem vorgesehenen Bestrahlungswinkel entschieden werden und ist abhängig vom Stand der Einrichtgenauigkeit.

Häufig wird eine Kombination aus den Fällen 1 und 4 als Anordnung gewählt. Sie ist in Bild 21 dargestellt. Dabei entspricht B_1 der Bremsschicht aus Anordnung 1, d.h. die Teilchenenergie wird durch B_1 auf die gewünschte Startenergie für das

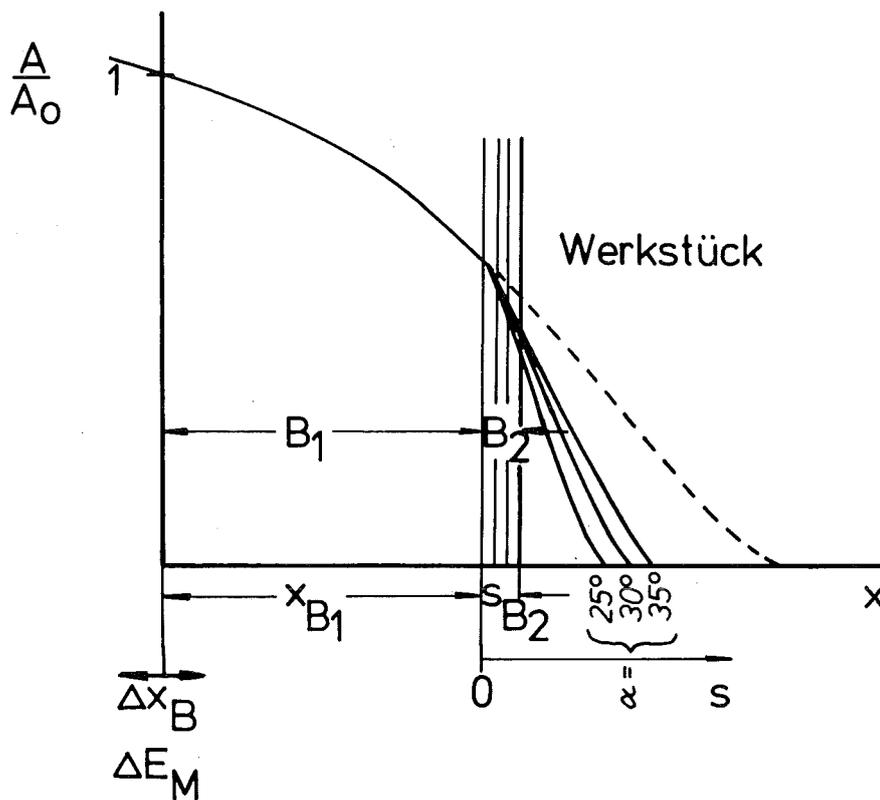


Bild 21: Typische Bestrahlungsanordnung mit geteilter Bremsschicht und Eichmöglichkeit durch Bremsfolien

Maschinenteil eingestellt. Die ganze zu aktivierende Werkstückoberfläche wird durch wenige dünne Folien aus dem Targetmaterial abgedeckt (meist 2 Folien).

Diese Anordnung ermöglicht eine einfache Eichung der aktiven Schicht. Da die Eichfolien B_2 sehr dünn sind (wenige μm), ist der winkelabhängige Einfluß auf die Reststärke des Meßbereichs s_M i.a. vertretbar.

Bild 22 dient zur Auslegung von Schrägbestrahlungen unter Berücksichtigung des Fehlers in der Tiefenverteilung senkrecht zur Werkstückoberfläche aufgrund von Einstellungenauigkeiten und zur Auswahl der günstigsten Bestrahlungsanordnung (vgl. Bilder 20 und 21). Vorausgesetzt werden Kenntnisse über die Tiefenverteilung

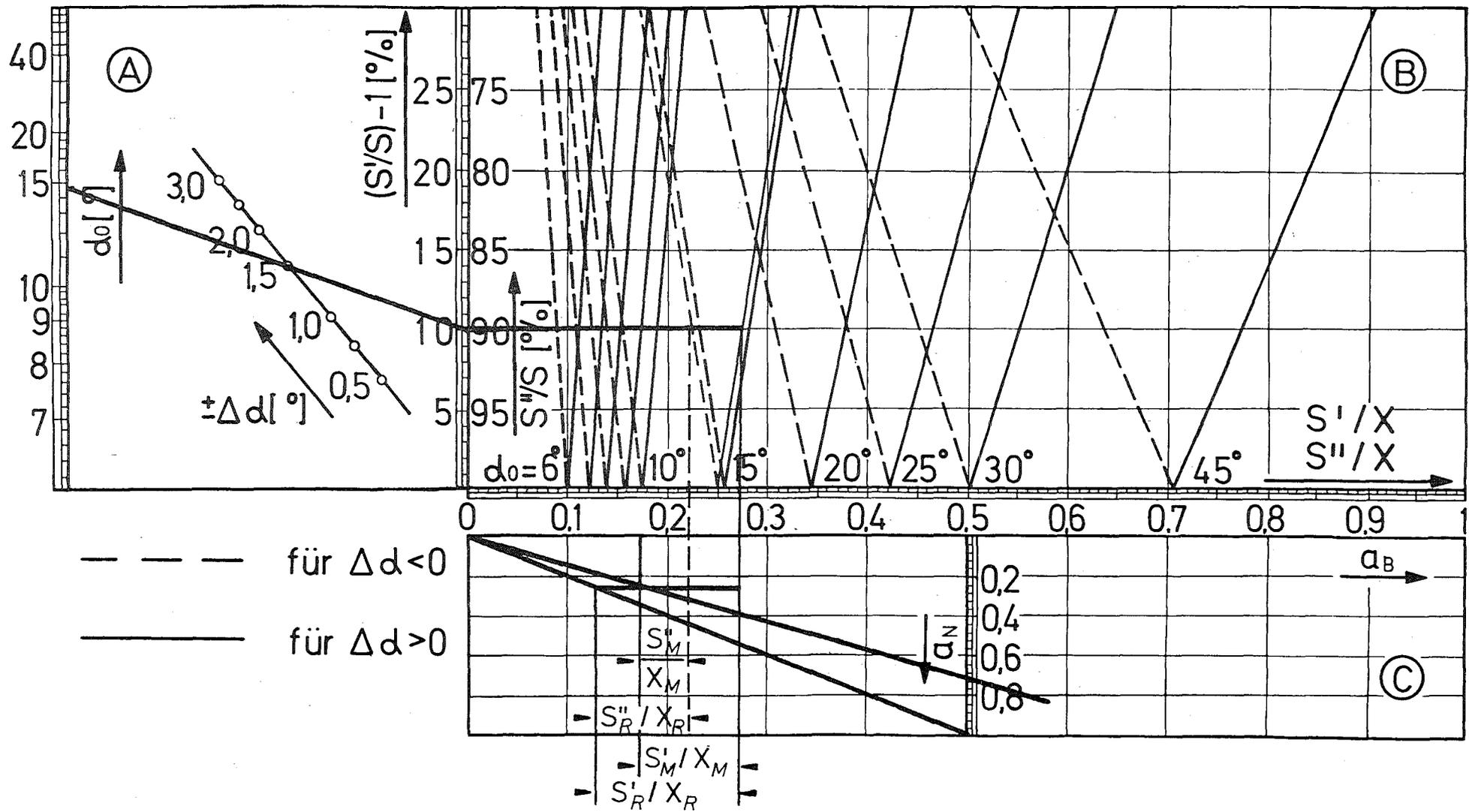


Bild 22: Nomogramm I

Schaubild zur Auslegung von Schrägbestrahlungen unter Berücksichtigung von Einstellungsauigkeiten

der entstehenden Isotope in Teilchenflugrichtung. Das Nomogramm setzt einen monoenergetischen Parallelstrahl voraus. Für abweichende Strahleigenschaften ist eine Kombination der aus dem Nomogramm ermittelten Werte mit den entsprechenden Korrekturen für Strahlaufweitung etc. erforderlich. Diese Einflüsse werden weiter unten getrennt behandelt.

Teil A zeigt den Einfluß von Einstellungsauigkeiten (z.B. durch mechanische Elastizitäten der Bestrahlungsvorrichtung oder Unschärfen der Einrichtoptik) auf den relativen Tiefenfehler der Aktivitätsverteilung bei vorgegebenem Bestrahlungssollwinkel α_0 . Ist vom Versuchsziel her die zulässige relative Abweichung und der Absolutwert der aktiven Schicht gegeben (z.B. $s_R \stackrel{!}{=} 100 \mu\text{m} \pm 10\%$), dann kann bei bekannter Verteilung der Aktivität in Strahlrichtung (z.B. $x_R = 400 \mu\text{m}$ aus Abschleifversuch $\wedge \alpha_0 = 14,5^\circ$) aus dem Nomogramm die größte Einstellungsauigkeit ermittelt werden, bei der das geforderte Aktivierungsergebnis noch sicher erreicht wird. Sie beträgt im Beispiel $\Delta\alpha = \pm 1,5^\circ$.

Durch sorgfältige Kontrolle der bestrahlten Targets können Häufigkeitsverteilungen der Einstellungsauigkeiten $\Delta\alpha_i$ aufgestellt werden, die beim Einsatz verschiedener Aktivierungsvorrichtungen über einen längeren Zeitraum aufgetreten sind. In diesem Fall kann unter Rückgriff auf Nomogramm I die Wahrscheinlichkeit bestimmt werden, mit der ein gefordertes Bestrahlungsergebnis erreicht werden wird. Damit hat der Experimentator eine wichtige Entscheidungshilfe für die Versuchsplanung in der Hand. Auf der anderen Seite ist so eine einfache Überprüfung möglich, ob der Stand der Aktivierungstechnik den Anforderungen aus der Versuchspraxis genügt.

Im Nomogrammteil B kann aus der geforderten absoluten Stauchung der Tiefenverteilung (s'/x und s''/x) und der zulässigen Abweichung s'/s bzw. s''/s für $s'' < s < s'$ der zugehörige Bestrahlungssollwinkel α_0 abgelesen werden. Er hat im Beispiel den Wert $\alpha_0 = 14,5^\circ$ für $s_R/x_R = \frac{100 \mu\text{m}}{400 \mu\text{m}} = 0,25$.

Eine wichtige Eigenschaft einer Dünnschichtaktivierung für das Differenzenverfahren ist das Verhältnis a_N aus rechnerischer

Bestrahlungstiefe s_R (sie bestimmt die Empfindlichkeit der Messung) und Länge des Meßbereichs s_M . Der Quotient $a_N = \frac{s_M}{s_R}$ wird Nutzanteil genannt, da er die mögliche Ausnutzung der aufgebrauchten Aktivität beschreibt. Bei Anordnungen nach Bild 21 kann der Nutzanteil a_N^+ durch Einstellungenauigkeiten stark verändert werden. Durch Einführung der dimensionslosen Kennzahl $a_B = \frac{B_2}{s_M}$, die den Anteil der Eichfolien B_2 am größtmöglichen Meßbereich s_M angibt, kann mit Hilfe der Nomogrammteile A, B und C ein Bereich $a_N'' < a_N^+ < a_N'$ angegeben werden, innerhalb dessen der tatsächliche Nutzanteil für die ausgeführte Bestrahlung liegen wird. Ergeben sich für die absoluten Bereichsgrenzen oder die Breite des Bereichs unzulässige Werte, dann muß nach Bild 20 eine andere Bestrahlungsanordnung gewählt werden. Für das eingezeichnete Beispiel ist ein Nutzanteil a_N^+ der ausgeführten Bestrahlung zwischen 34% und 45% zu erwarten. Die Handhabung des Nomogramms wird im Anhang erläutert.

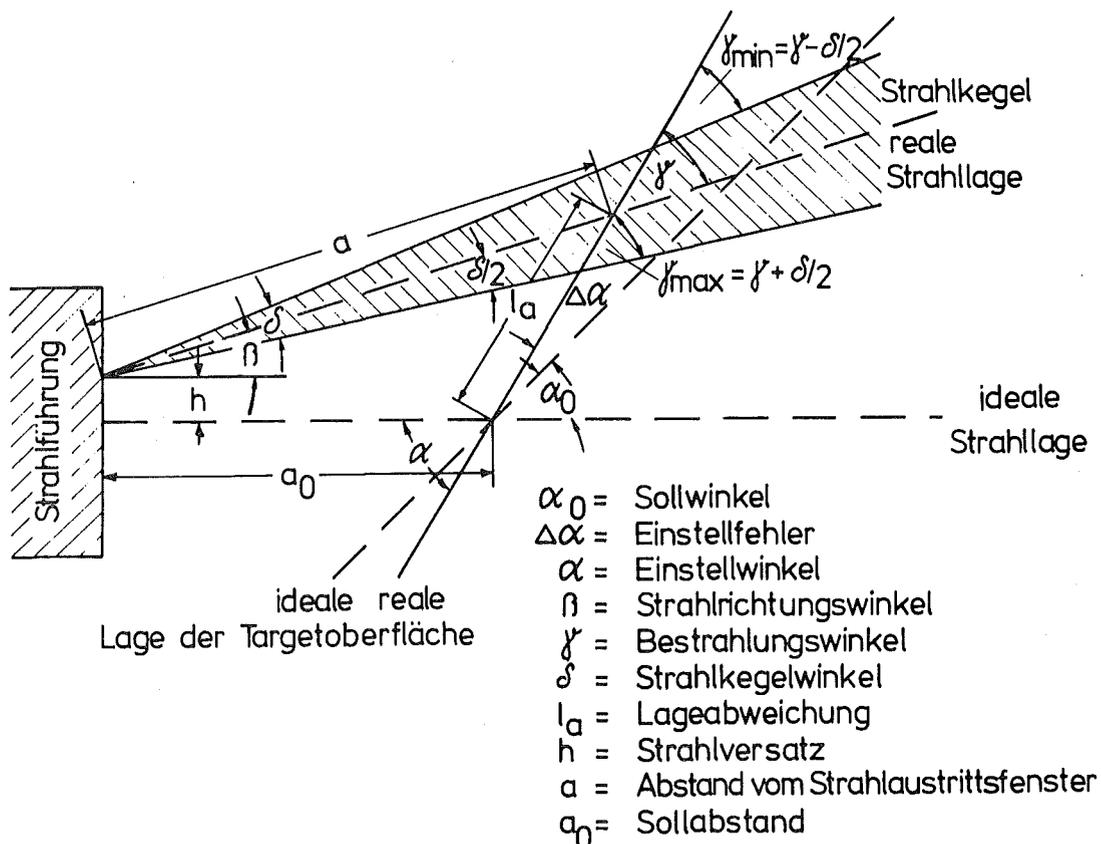


Bild 23: Benennung der geometrischen Beziehungen zwischen Teilchenstrahl und Werkstückoberfläche

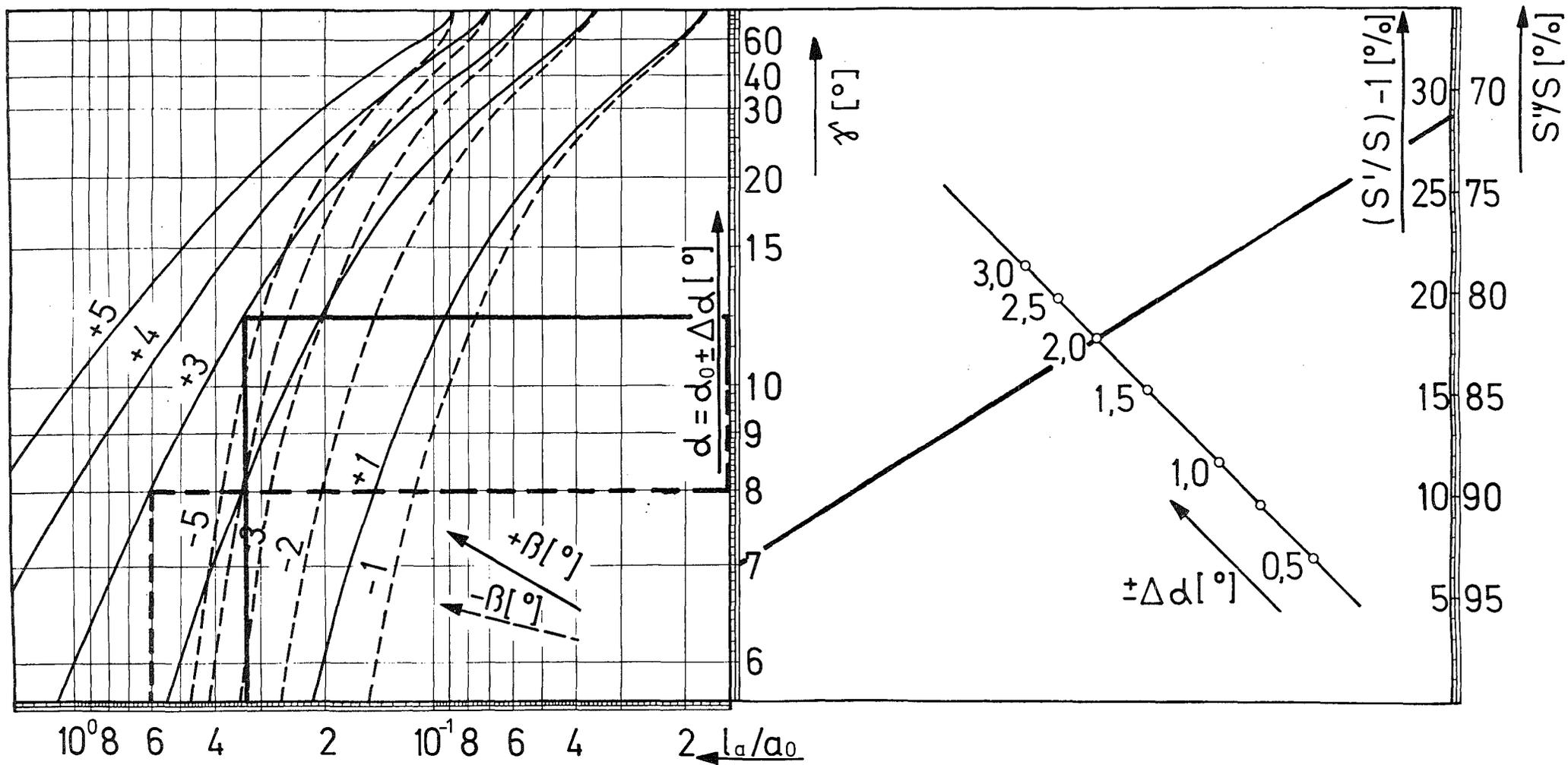


Bild 24: Nomogramm II

Schaubild zur Bestimmung des relativen Lagefehlers des Strahlmittelpunktes bei einer Schrägbestrahlung

Die geometrischen Beziehungen zwischen Teilchenstrahl und Werkstückoberfläche im allgemeinen Fall sind in Bild 23 dargestellt. Die ideale Strahllage entspricht der gedachten Verlängerung der Achse des Strahlführungsrohres. Durch Ausrichtefehler des Bestrahlungsgerätes gegenüber dieser raumfesten Achse oder durch mechanische und elektronenoptische Fehler im Strahlführungssystem kann die reale Strahllage relativ zur Werkstückoberfläche von der Sollage abweichen. Der relative Lagefehler l_a/a_0 des Strahlmittelpunktes ist in Bild 24 aufgetragen. Das eingezeichnete Beispiel wird im Anhang erklärt.

Der Teilchenstrahl kann innerhalb der Strahlführung in ausreichender Näherung als Parallelstrahl mit wenigen mm^2 Querschnitt betrachtet werden (sehr große Brennweite des elektronischen Linsensystems). In der Bremsschicht und der Luftstrecke wird der Strahl um den Winkel $\delta = \delta_B + \delta_L$ aufgeweitet. Dieser Winkel erreicht Werte bis ungefähr $\delta = 10^\circ$, für übliche Bestrahlungen am Karlsruher Zyklotron, und kann deshalb bei kleinen Sollwinkeln α_0 nicht vernachlässigt werden.

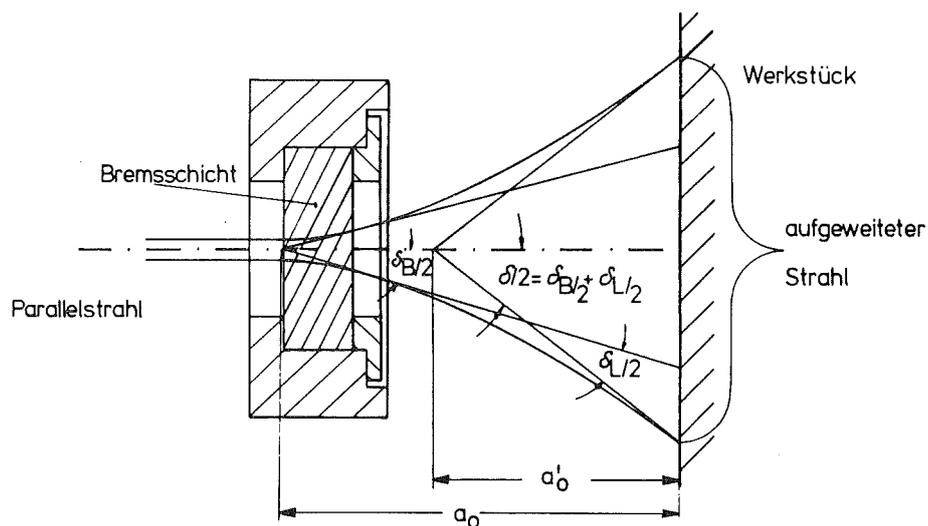


Bild 25: Prinzipbild zur Strahlaufweitung in der Bremsschicht und im Luftweg

Gegenüber der vereinfachten Darstellung in Bild 23 gibt Bild 25 die tatsächliche Strahlform wieder. Definiert man die Spitze des von den Tangenten an die Randstrahlen im Berührungspunkt mit dem Werkstück gebildeten Kegels als scheinbare Strahlungsquelle, so ist $a'_0 < a_0$ der scheinbare Abstand vom Werkstück. Bei den am Karlsruher Zyklotron üblichen Bestrahlungsverhältnissen ist $\vartheta_B \gg \vartheta_L$, so daß für die Auslegung von Aktivierungen $a'_0 = a_0$ gesetzt werden kann. Der Strahlaufweitungswinkel wurde für unterschiedliche Bremstargets experimentell bestimmt und wird wie unten ausgeführt berücksichtigt.

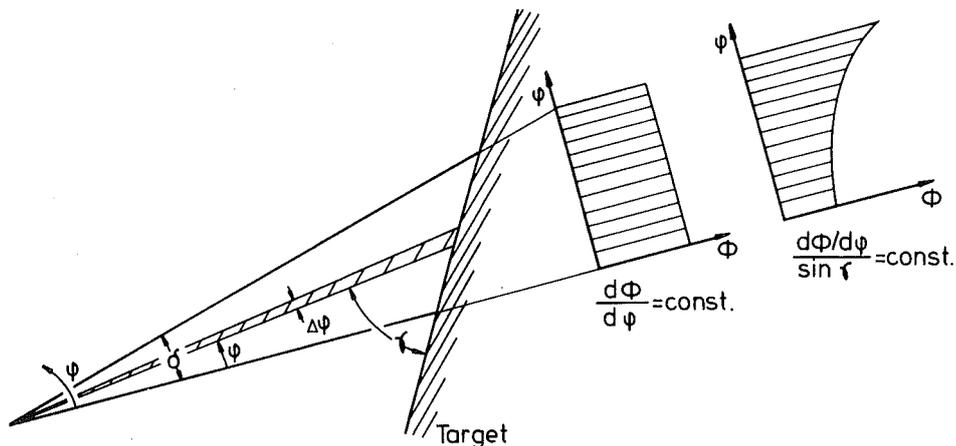


Bild 26: Typische Flußdichteverteilungen für den Teilchenstrahl, deren Auswirkung auf die Schrägbestrahlung von Werkstücken diskutiert wurde.

Die Geschossteilchen sollen beim Parallelstrahl (Lösung b aus Kap. 3.1.1) über dem Strahlquerschnitt gleichmäßig verteilt sein. Beim aufgeweiteten Strahl werden die Teilchenflußverteilungen $d\vartheta/d\varphi = \text{const.}$ und $\frac{d\vartheta/d\varphi}{\sin\gamma} = \text{const.}$ betrachtet (Bild 26). $d\vartheta/d\varphi = \text{const.}$ gilt näherungsweise bei rotationssymmetrischer Strahlform in der Nähe des Strahlmittelpunktes, $\frac{d\vartheta/d\varphi}{\sin\gamma} = \text{const.}$ kann durch unsymmetrische Flußverteilung und Abdecken einer Flanke des Strahls bei der Aktivierung angenähert werden.

Bei der Schrägbestrahlung von ebenen Flächen sind zwei Fälle zu unterscheiden:

1. Die Bewegung des Werkstücks relativ zum Strahl geschehe senkrecht zu der Ebene, die durch den Einstellwinkel α aufgespannt wird, oder es werde nicht bewegt.
2. Die Bewegung erfolge in Richtung des Schenkels 1 des Einstellwinkels α

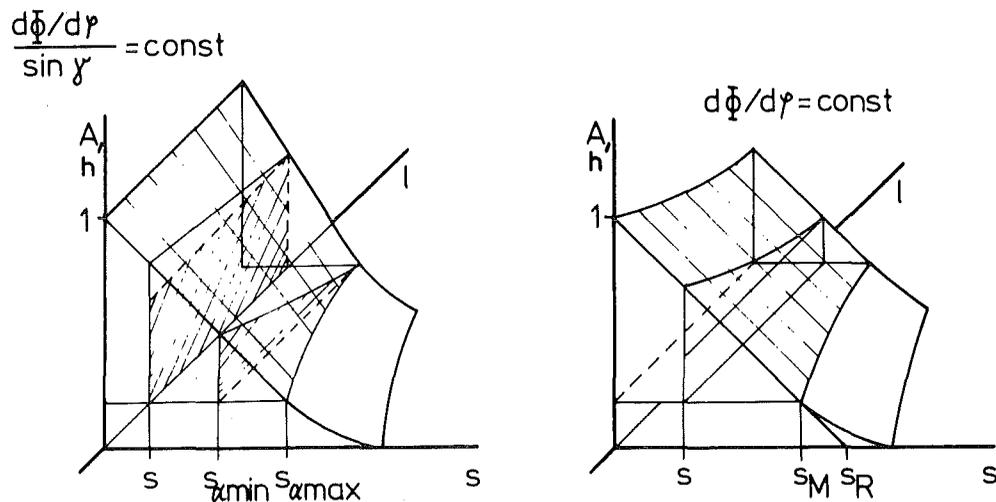


Bild 27: Skizze zur Berechnung der Gleichmäßigkeit $g_l(s)$ der Aktivität unter einer zur Oberfläche parallelen Schnittebene im Abstand s von der Oberfläche

Im Fall 1 ergibt sich eine Verteilung der Gesamtaktivität über der Schichttiefe s , wie sie in Bild 27 dargestellt ist, für den Schnitt des Werkstücks mit der durch den Einstellwinkel aufgespannten Ebene. Das Volumen unter der Fläche F gibt die Gesamtaktivität des Werkstücks wieder. Schnitte im Abstand s parallel zur Werkstückoberfläche zeigen die jeweilige Verteilung der Aktivität in l -Richtung. Dabei ist die Abnahme der Gesamtaktivität senkrecht zur Werkstückoberfläche dA_{ges}/ds im Bereich $0 \leq s \leq s_{min}$ konstant, während die Gleichmäßigkeit der aktivierten Schicht immer schlechter wird.

Für kleine Winkel δ wird die Schnittlinie zwischen der Oberfläche F des Aktivitätsberges und einer zur Oberfläche parallelen Ebene in der Tiefe s durch eine Gerade ersetzt, die $h_{\max}(s) = h(s, \alpha + \frac{\delta}{2})$ und $h_{\min}(s) = h(s, \alpha - \frac{\delta}{2})$ verbindet. Die Gleichmäßigkeit der Aktivitätsverteilung in der Tiefe s werde so definiert:

$$g_l(s) = \frac{F_{\square}}{F_{\nabla}}(s) \quad \text{mit} \quad F_{\square} = l(s) \cdot h_{\min}(s)$$

$$F_{\nabla} = l(s) \cdot \frac{h_{\max}(s) + h_{\min}(s)}{2}$$

$$g_l(s) = \frac{2 h_{\min}(s)}{h_{\min}(s) + h_{\max}(s)} \quad (1)$$

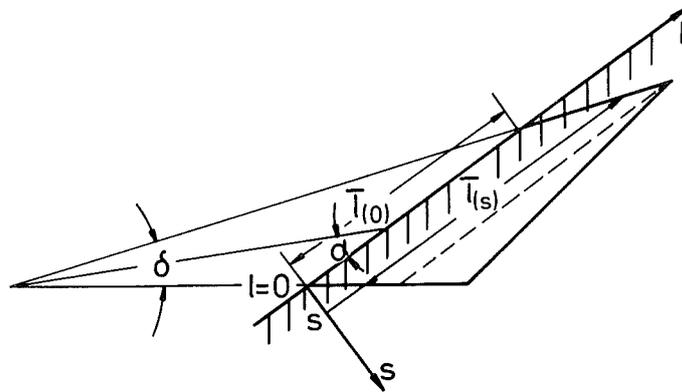


Bild 28: Schnitt durch die aktivierte Zone bei Schrägbestrahlung mit aufgeweitetem Strahl

Bild 28 zeigt die Verschiebung der aktiven Schicht in l -Richtung und die Änderung der Breite $l(s)$. Die größte Verschiebung gegenüber der Oberfläche erfährt im Definitionsbereich $0 \leq s \leq s_{\min}$ der Randstrahl unter dem Winkel $\gamma' = \alpha - \frac{\delta}{2}$ mit $l(\alpha - \frac{\delta}{2}, s) = \text{ctg}(\alpha - \frac{\delta}{2}) \cdot s$ oder

$$l(s) = l(0) + \operatorname{ctg} \left(\alpha - \frac{\vartheta}{2} \right) \cdot x = l(0) + \operatorname{ctg} \left(\alpha - \frac{\vartheta}{2} \right) \cdot x \cdot \sin \left(\alpha - \frac{\vartheta}{2} \right)$$

$$l(s) = l(0) + \cos \left(\alpha - \frac{\vartheta}{2} \right) \cdot x \quad (2)$$

Wegen $\cos \left(\alpha - \frac{\vartheta}{2} \right) \leq 1$ wird $l(s_{\max}) \leq l(0) + x_{\max}$. Wählt man $\bar{l}(0) < \bar{l}_V - x_{\max}$ so ist sichergestellt, daß immer die gesamte aktivierte Fläche im Verschleißbereich liegt. Da im allgemeinen $\bar{l}_V \gg x_{\max}$ gilt, stellt dies keine praktische Einschränkung für den Versuch dar. Damit bleibt im Bereich $0 \leq s \leq s_{\min}$ der lineare Verlauf der Aktivitätstiefenkurve erhalten, weil die Abnahme der spezifischen mittleren Flächenaktivität durch die Zunahme der Fläche, aus der aktive Verschleißpartikel herausgelöst werden, ausgeglichen wird.

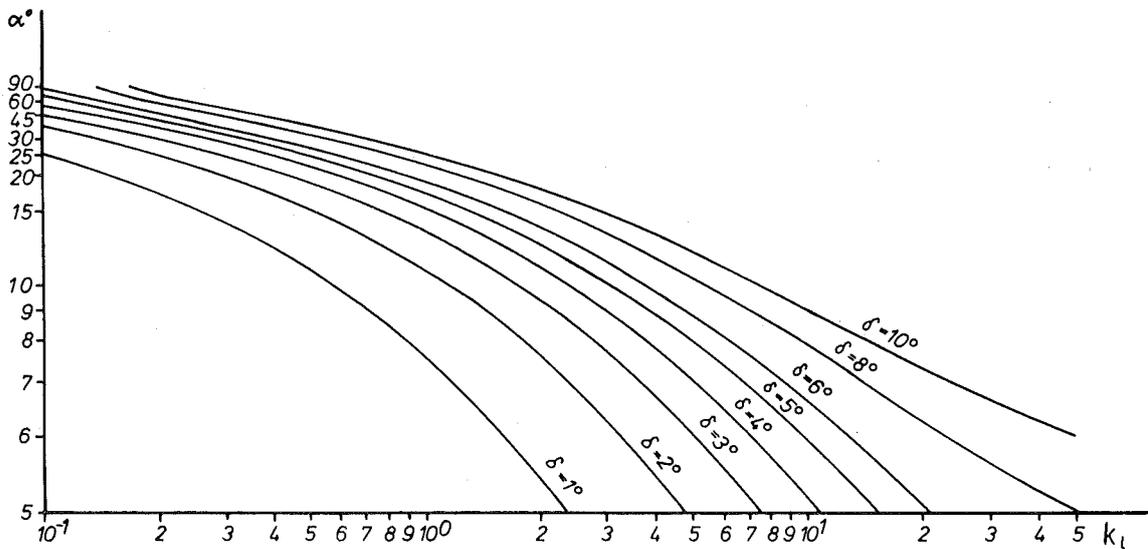


Bild 29: Vergrößerungsfaktor k_L der aktivierten Fläche bei aufgeweitetem Strahl

In Bild 29 ist der Vergrößerungsfaktor für die aktive Fläche bei Strahlaufweitung $k_L = \frac{2 \sin \vartheta}{\cos \vartheta - \cos 2\alpha}$ über α aufgetragen für verschiedene Strahlaufweitungswinkel ϑ . Die Breite der aktiven Fläche in der Tiefe s in l -Richtung wird damit

$$\bar{l}(s) = \bar{l}(0) + k_L \cdot s \quad \text{für } 0 \leq s \leq s_{\min} \quad \text{mit} \quad s_{\min} = x \cdot \sin(\alpha - \frac{\sigma}{2})$$

Verbreiterung oder Verschiebung der aktiven Schicht brauchen i.a. nur bei sehr kleinen Targets oder bei Werkstücken mit sehr scharf begrenzten Verschleißflächen wie z.B. Schneiden (Werkzeuge für zerspanende Formgebung) oder Fließschultern (spanlose Formgebung) berücksichtigt zu werden.

Nach Bild 27 gilt für die Flußverteilung $\frac{d\Phi/d\varphi}{\sin \varphi} = \text{const}$:

$$h_{\min}(s) = h_0 \left(1 - \frac{s}{s_{\min}}\right) \quad \text{und} \quad h_{\max}(s) = h_0 \left(1 - \frac{s}{s_{\max}}\right).$$

Der Gleichmäßigkeitsgrad der Flächenaktivität in der Tiefe s ist damit:

$$gl(s) = \frac{2 \left(1 - \frac{s}{s_{\min}}\right)}{2 - \frac{s}{s_{\min}} - \frac{s}{s_{\max}}} \quad (3)$$

An der Werkstückoberfläche gilt: $gl(0) = 1$ für alle α und σ
Für die Flußverteilung $d\Phi/d\varphi = \text{const}$ gilt:

$$h_{\max}(s) = h_0 \left(1 - \frac{s}{s_{\max}}\right); \quad h_{\min}(s) = h_0 \cdot \frac{s_{\min}}{s_{\max}} \left(1 - \frac{s}{s_{\min}}\right)$$

Der Gleichmäßigkeitsgrad der Flächenaktivität wird damit

$$gl(s) = \frac{2 \left(1 - \frac{s}{s_{\min}}\right)}{1 - \frac{2s}{s_{\min}} + \frac{s_{\max}}{s_{\min}}} \quad (4)$$

An der Werkstückoberfläche gilt:

$$gl(0) = \frac{2}{1 + \frac{s_{\max}}{s_{\min}}} < 1 \quad \text{wegen} \quad \frac{s_{\max}}{s_{\min}} > 1 \quad \text{für} \quad \sigma > 0$$

Versuchsziel und Kenntnisse oder Annahmen über den Abriebmechanismus bestimmen die erforderliche Gleichmäßigkeit der Aktivitätsverteilung über der zu untersuchenden Verschleißfläche. Das Nomogramm, Bild 30, erlaubt es, ausgehend von den geplanten Aktivierungseinstelltdaten α_0 und $\Delta\alpha$ (rechte Nomogrammhälfte unten) und dem geschätzten Strahlaufweitungswinkel σ (Kurvenscharen in

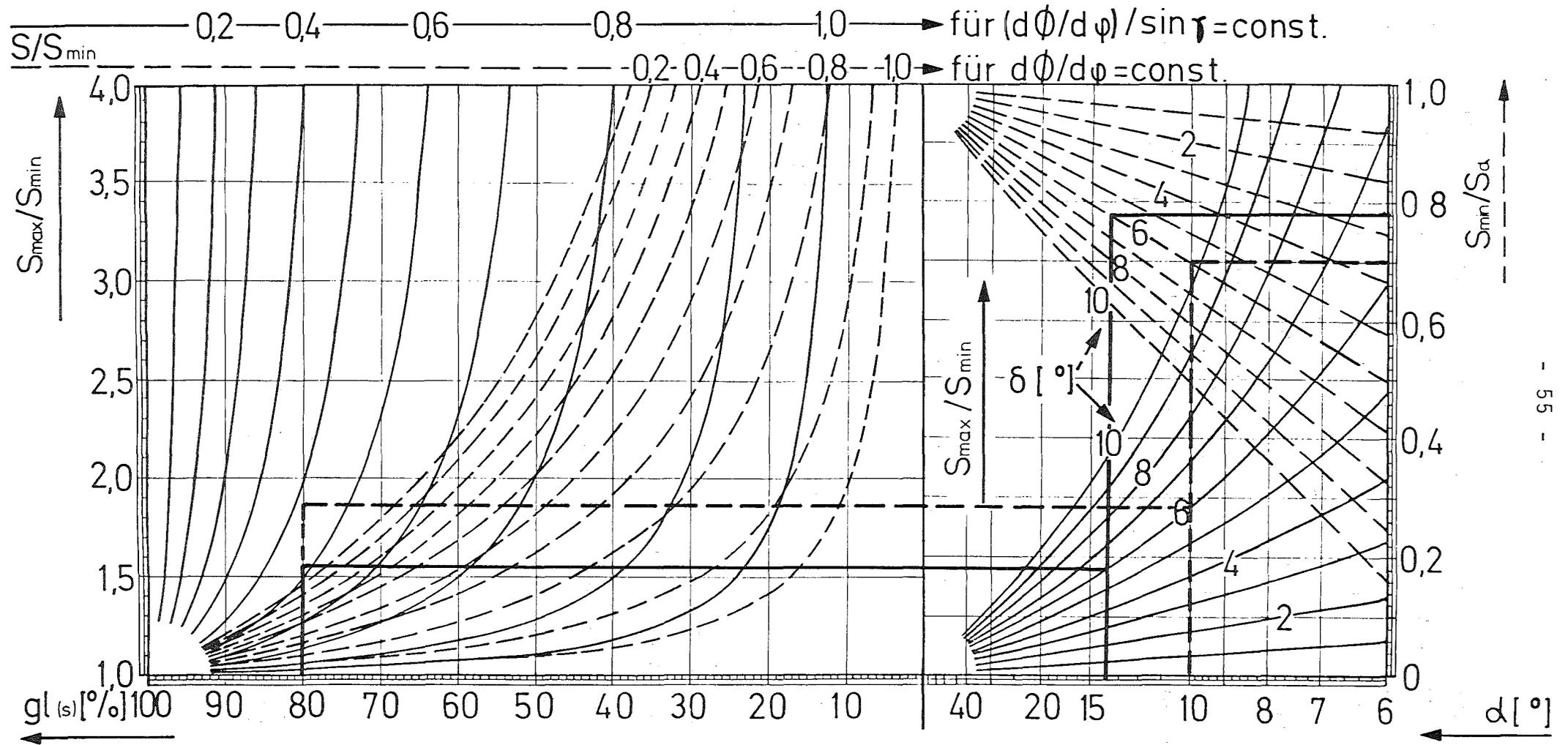


Bild 30: Nomogramm III

Schaubild zur Bestimmung der Gleichmäßigkeit $gl_{(s)}$ der Aktivität längs der Tiefe s .

der rechten Nomogrammhälfte) für die Flußverteilungen $\frac{d\Phi/d\varphi}{\sin \varphi'} = \text{const}$ und $d\Phi/d\varphi = \text{const}$ (Kurvenscharen in der linken Nomogrammhälfte) die Gleichmäßigkeit der Flächenverteilung (untere Achse des linken Nomogramnteils, Angabe in %) für eine vorgegebene Schichttiefe zu bestimmen. Das eingezeichnete Anwendungsbeispiel sowie die Handhabung des Nomogramms werden im Anhang erläutert.

Im Fall II wird die ganze Fläche in Bewegungsrichtung nacheinander unter den Winkeln $\vartheta' - \frac{\vartheta}{2} \leq \vartheta' \leq \vartheta' + \frac{\vartheta}{2}$ bestrahlt. Es ergibt sich auf der ganzen Fläche eine gegenüber der mit dem Einstellwinkel α gerechneten veränderte Tiefenverteilung mit verkürztem Meßbereich (Bild 31).

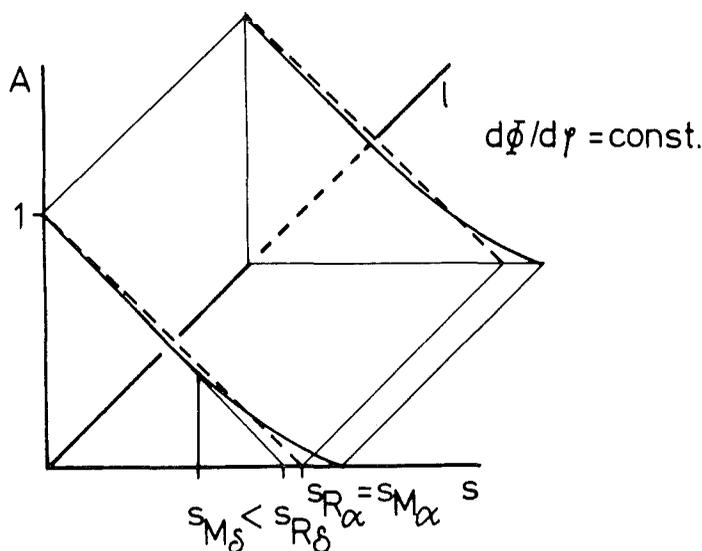


Bild 31: Verkürzung des Meßbereichs s_M bei Bestrahlung nach Fall II (Bewegung in l-Richtung)

$$s_{M\delta} = s_M \cdot \frac{\sin(\alpha - \frac{\vartheta}{2})}{\sin \alpha}$$

- idealisierte Tiefenverteilung bei $\delta=0$
- Tiefenverteilung bei $\delta > 0$

Für diese Tiefenverteilung gilt

$$f^+(s, \alpha, \vartheta) = \lim_{\Delta\varphi \rightarrow 0} \frac{\sum_{k=0}^{\vartheta} \sum f(\alpha = 90^\circ, \vartheta = 0^\circ, x_k)}{\frac{\vartheta}{\Delta\varphi} + 1} \quad (5)$$

mit $x_k = \frac{s}{\sin(\alpha + \frac{\vartheta}{2} - k \cdot \Delta\varphi)}$

und $f(\alpha = 90^\circ, \vartheta = 0^\circ)$ = Tiefenverteilung in Bestrahlungsrichtung bei Parallelstrahl

Die Strahlaufweitung hat eine Verkürzung des Meßbereichs zur Folge bei gleicher rechnerischer Bestrahlungstiefe, d.h. bei gleicher Empfindlichkeit der Messung wird die mögliche Ausnutzung der Aktivierung schlechter gegenüber dem Parallelstrahl.

$$s_{M_{\vartheta, \alpha}} = s_{M_{\alpha}} \cdot \frac{\sin(\alpha - \frac{\vartheta}{2})}{\sin \alpha} \quad (6)$$

Senkrecht dazu entsteht bei kegelförmigem Strahl eine Verteilung nach Fall I, die wegen des Winkelbereichs $90^\circ - \frac{\vartheta}{2} \leq \gamma' \leq 90^\circ + \frac{\vartheta}{2}$ für die betrachteten Strahlaufweitungswinkel $0 \leq \vartheta \leq 10^\circ$ für eine Abschätzung nicht berücksichtigt zu werden braucht.

Voraussetzung für die Gültigkeit dieser Transformation ist ein konstantes Stromintegral über den gesamten Winkelbereich $d\Phi/d\varphi = \text{const.}$

Bei der Aktivierung von gekrümmten Oberflächen ist der wahre Bestrahlungswinkel γ' zusätzlich zu den bisher genannten Größen abhängig vom Strahldurchmesser und dem Krümmungsradius der Oberfläche. Im Maschinenbau häufig eingesetzte eindimensional gekrümmte Werkstücke sind zylindrische Drehteile (Büchsen, Zylinderbohrungen, Kolbenringe, Lagerschalen, Wellen). Diese Teile können wie ebene Flächen behandelt werden, wenn die Symmetrieachse der Fläche in der Ebene liegt, die vom Bestrahlungswinkel γ' und einer Mantellinie aufgespannt wird. Die Aktivitätsverteilung entlang der Mantellinie kann aus dem Nomogramm für ebene Flächen abgeschätzt werden.

Für die Umfangsrichtung gilt (vgl. Bild 32) :

a) Parallelstrahl:

$$\gamma''(d, \alpha, R) = \arccos \left(\cos \alpha + \frac{d}{R} \right) \quad (7)$$

Da γ' als der kleinste Winkel zwischen Strahl und Oberfläche definiert ist, gilt:

$$\arccos\left(\cos\alpha + \frac{b}{2R}\right) \leq \gamma' \leq \arccos\left(\cos\alpha - \frac{b}{2R}\right) \text{ für } b \leq 2R \cdot \cos\alpha$$

und

$$\arccos\left(\cos\alpha + \frac{b}{2R}\right) \leq \gamma' \leq 90^\circ \text{ für } b > 2R \cdot \cos\alpha$$

Für den Sonderfall $\alpha = 90^\circ$ (mittige Bestrahlung) ergibt sich:

$$\arccos\frac{b}{2R} \leq \gamma' \leq 90^\circ$$

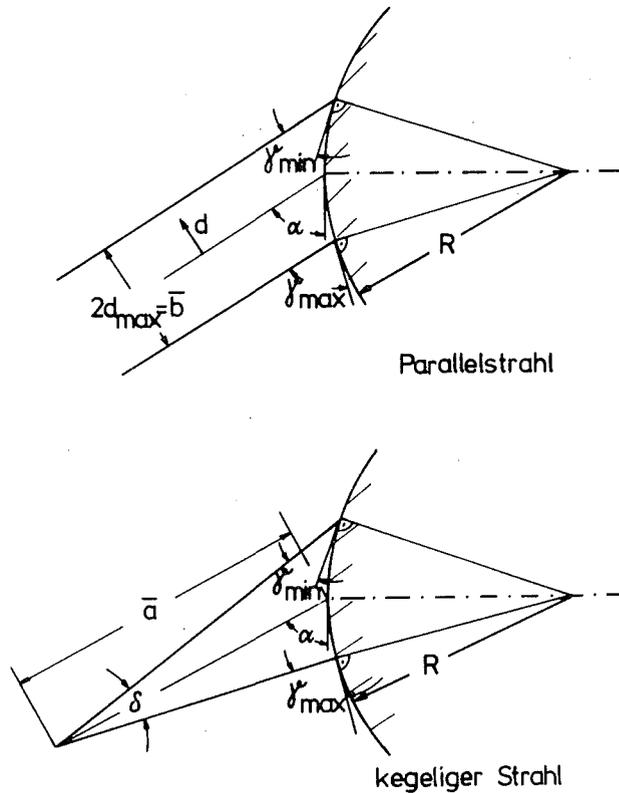


Bild 32: Benennung der Größen für die Bestimmung des Bestrahlungswinkels γ' bei gekrümmten Oberflächen

b) Kegeliges Strahl:

$$\gamma'(\bar{a}, R, \alpha, \varphi) = \arccos \left\{ \frac{\bar{a}+R}{R} \cdot \sin \left[\arcsin \left(\frac{\cos \alpha \cdot R}{\bar{a}+R} \right) + \varphi \right] \right\} \quad (8)$$

Dabei gilt:

$$\arccos \left\{ \frac{\bar{a}+R}{R} \cdot \sin \left[\arcsin \left(\frac{\cos \alpha \cdot R}{\bar{a}+R} \right) + \frac{\varphi}{2} \right] \right\} \leq \gamma' \leq \arccos \left\{ \left[\dots \frac{\varphi}{2} \right] \right\}$$

für $\varphi \leq 2 \arcsin \left(\frac{\cos \alpha \cdot R}{\bar{a}+R} \right)$

und

$$\arccos \left\{ \frac{\bar{a}+R}{R} \cdot \sin \left[\arcsin \left(\frac{\cos \alpha \cdot R}{\bar{a}+R} \right) + \frac{\varphi}{2} \right] \right\} \leq \gamma' \leq 90^\circ$$

für $\varphi > 2 \arcsin \left(\frac{\cos \alpha \cdot R}{\bar{a}+R} \right)$

Für den Sonderfall $\alpha = 90^\circ$ gilt:

$$\arccos \left(\frac{\bar{a}+R}{R} \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \right) \leq \gamma' \leq 90^\circ.$$

Eine Reihe weiterer Bauteilegruppen wie Nocken oder einfache Verzahnungen können wie Zylinderflächen behandelt werden, wenn im aktivierten Bereich der Krümmungsradius der Leitkurve näherungsweise konstant ist und der Bestrahlungswinkel gegen die Erzeugende der Fläche eingestellt wird.

Bei Flächen der allgemeinen Form $F(x, y, z) = 0$ können die Vereinfachungen nicht immer angewendet werden. Die Aussagen über die Tiefenverteilung müssen im ganzen Raumwinkelbereich der aktivierten Fläche richtungsabhängig gemacht werden. Sie müssen im Einzelfall bestimmt werden.

Winkelfehler zwischen Strahlachse und Längsachse der Bestrahlungsvorrichtung (vgl. Bild 33) führen zu Abweichungen in der Tiefenverteilung. Sie können durch die Einrichtvorschriften beeinflusst werden.

1. Senkrechte Bestrahlung ($\alpha = 90^\circ$):

a) Ebene Flächen: Die Lage des Strahlflecks wird korrigiert durch Verschieben der Vorrichtung senkrecht zum Strahl. Der Bestrah-

lungswinkel ist $\alpha' = \alpha \cdot \cos \vartheta$

- b) Gekrümmte Flächen: Die Vorrichtung wird so verschoben, daß der Strahl durch die Drehachse des Werkstücks geht. Die Einstellung kann erfolgen durch ein Schwenkvisier, das in der Drehachse gelagert ist. Der Winkelfehler ist vollständig korrigierbar, d.h. $\alpha' = \alpha = 90^\circ$.

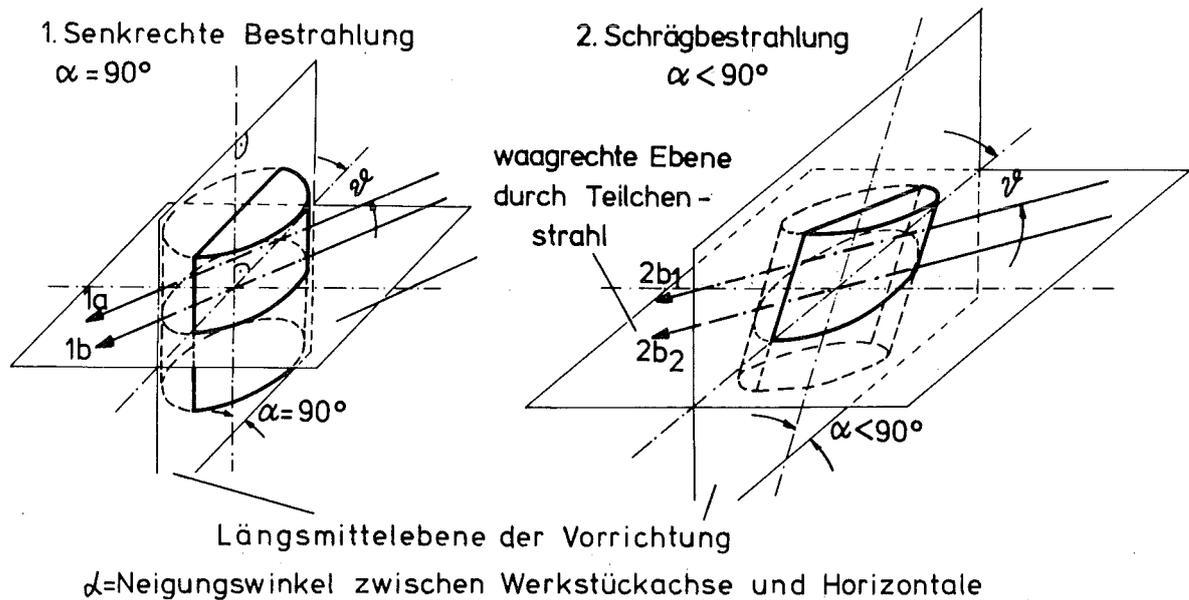


Bild 33: Winkelfehler ϑ zwischen Strahlachse und Längsachse der Bestrahlungsvorrichtung bei senkrechter und schräger Bestrahlung

2. Schrägbestrahlung ($\alpha < 90^\circ$)

- a) Ebene Flächen: Lagekorrektur durch seitliches Verschieben der Vorrichtung. Die Eindringkurve wird mit dem Faktor $\cos \vartheta$ gestaucht, die Veränderung ist unabhängig vom Einstellwinkel
- b) Gekrümmte Flächen:
1. Beim Ausrichten des Strahls auf die Targetmittellinie

wird der tatsächliche Bestrahlungswinkel vergrößert
 $\vartheta > \alpha$. Die Änderung steigt mit kleiner werdendem α .

2. Beim Ausrichten auf den Schnittpunkt der Werkstückoberfläche mit der Längsachse der Vorrichtung wird der Bestrahlungswinkel verkleinert. Die Ausführungen zu Bild 32 gelten entsprechend.

3.1.3 Kriterien für die Wahl der Bestrahlungsdaten

Für eine erste grobe Auswahl der Bestrahlungsdaten werden

1. die maximale Abrieftiefe z.B. 50 μm
2. der vorgesehene Zeitraum für die Durchführung der Versuche und 150 Tage
3. die Meßgeometrie (Dicke und Material der Abschirmung) 10 cm Stahl

vorgegeben. Diese Forderungen ergeben sich zwingend aus dem Versuchsziel. Aus den möglichen Reaktionen zwischen dem Werkstückmaterial und den am Beschleuniger extrahierten Teilchen werden diejenigen ausgewählt, bei denen mindestens ein radioaktiver Restkern K^+ entsteht, der für die Versuche geeignet ist, hinsichtlich

1. Tiefenverteilung z.B. $x_M \geq 50 \mu\text{m}/\sin \vartheta$
2. Halbwertszeit $T_{1/2} \geq 50$ Tage
3. Gamma-Energie $E_\gamma \geq 500$ keV

Die so ausgewählten Reaktionen ermöglichen alle grundsätzlich die Versuchsdurchführung. Sie unterscheiden sich in ihrer Auswirkung auf die Empfindlichkeit und Genauigkeit der Messung und die Meßschwelle. Für die weitere Bewertung der Alternativen werden folgende Kriterien betrachtet:

4. Gamma-Ausbeute des Zielisotops
5. Gesamtwirkungsquerschnitt des Zielisotops für Geschosspartikel a
6. Reinheit des Zielisotops bei Beschuß mit Partikel a
7. Wahrscheinlichkeit für Sekundäreffekte (Neutronenbildung)

8. Form der Tiefenverteilung (Betrag von a_N)
9. Größe von x_M bei festem a_N
10. erforderliche Energiedifferenz $\Delta E_{\text{Gesamt}} = E_{\text{Fenster}} - E_0$.

Beim Dünnschichtdifferenzverfahren wird die Materialabnahme der Zählratenänderung im Meßfenster zugeordnet. Eine große γ -Häufigkeit des Meßisotops ermöglicht eine gute Empfindlichkeit bei niedriger Aktivität des Bauteils (Kriterium 4). Ein hoher Gesamtwirkungsquerschnitt $\sigma_{Kj}(a, b_j) K^+$ für alle Reaktionen mit der Partikel a mit dem Restkern K^+ ergibt kurze Bestrahlungszeiten und damit preisgünstige Aktivierungen (Kriterium 5). Können Partikel und Anfangsenergie so gewählt werden, daß wenige oder nur eine Art von Zielkernen gebildet wird (Kriterien 6 + 7), so kann das Meßfenster über einen großen Teil des γ -Spektrums bzw. die gesamte aufgefangene Strahlung gelegt werden. Die für eine geforderte Empfindlichkeit notwendige Gesamtaktivität wird dadurch ebenfalls kleiner.

Bild 34 gibt einen Überblick über γ -Strahler mit einer Halbwertszeit > 1 d, die bei der Bestrahlung von Titan (natürliches Isotopengemisch) mit Protonen, Deuteronen und Alpha-Teilchen entstehen. Alle erfüllen das Kriterium 3 ($x_M \geq 50 \mu\text{m}$). $^{44\text{m}}\text{Sc}$, ^{46}Sc und ^{48}V erfüllen zusätzlich das Kriterium 1 ($E_{\gamma} \geq 500 \text{ keV}$), nur ^{46}Sc hat eine Halbwertszeit $T_{1/2} \geq 50$ d (Kriterium 2). Bei den im Beispiel vorgegebenen Experimentdaten ist ^{46}Sc das Zielisotop. Es wird der höheren Ausbeute wegen durch Bestrahlung mit α -Teilchen erzeugt.

Sollen die Versuche innerhalb eines kürzeren Zeitraumes von z.B. einer Woche durchgeführt werden, so erfüllen die Isotope $^{44\text{m}}\text{Sc}$, ^{46}Sc und ^{48}V die Kriterien 1 bis 3 (Kriterium 2 jetzt $T_{1/2} \geq 2$ d). Für die Festlegung des Meßisotops werden weitere Kriterien herangezogen.

| Target-material | Partikel | Produktkern | $T_{1/2}$ in d | E_{γ_0} für lin. Bereich in MeV | Ausbeute $\mu\text{C}/\mu\text{Ah}$ | γ -Linien in keV (γ -Häufigkeit in %) |
|-----------------|----------|--------------------------|----------------|--|-------------------------------------|--|
| Ti | α | $^{44\text{m}}\text{Sc}$ | 2,44 | | 335 | 271 (86), 1020(1,3), 1140(2,7) |
| | | ^{46}Sc | 84,1 | 100 | 14 | 889(100), 1120(100) |
| | | ^{47}Sc | 3,43 | | 144 | 160(73) |
| | | ^{48}V | 16,2 | 63 | 161 | 511(100), 945(10), 983(100), 1312(97) |
| | | ^{51}Cr | 27,8 | 4 | 26 | 320(9) |
| | d | ^{46}Sc | 84,1 | 13 | 4,5 | 889(100), 1120(100) |
| | | ^{48}V | 16,2 | 21 | 130 | 511(100), 945(10), 983(100), 1312(97) |
| | p | ^{48}V | 16,2 | 13,3 | 330 | 511(100), 945(10), 983(100), 1312(97) |

Bild 34: γ -Strahler nach dem Beschuss eines natürlichen Titangemisches mit p, d, α nach (31)

Kriterien 4 und 5: Das Produkt aus Aktivitätsausbeute und γ -Häufigkeit vergleicht den Bestrahlungsaufwand für den selben Meßeffect (Zählrate). Setzt man die Ansprechwahrscheinlichkeit des Nachweisgerätes im betrachteten Energiebereich als konstant voraus, und normiert auf das schwächste Präparat, so ergibt sich die Reihenfolge für Bestrahlungsende:

| Isotop | Gamma-Ausbeute | Partikel |
|--------------------------|----------------|----------|
| ^{48}V | 113 | p |
| | 55 | α |
| | 44 | d |
| ^{46}Sc | 3 | α |
| $^{44\text{m}}\text{Sc}$ | 1,4 | α |
| ^{46}Sc | 1 | d |

Bei Versuchsende steht $^{44\text{m}}\text{Sc}$ wegen seiner kurzen Halbwertszeit auf dem letzten Platz.

Ein handelsüblicher 3" x 3" NaJ(Tl)-Kristall mit einer Energieauflösung von 6,5% bei 661,6 keV (^{137}Cs) kann nicht alle Photopeaks aus dem angebotenen Spektrum getrennt auflösen. Die Messung wird erschwert durch gestreute γ -Quanten von Isotopen mit höherer Energie, die im Meßfenster für eine bestimmte γ -Linie (z.B. Photopeak von ^{48}V bei $E_{\gamma} = 983$ keV) gezählt werden (vgl. Kap. 3.3.3). Im Beispiel wird die Messung einfacher, wenn nur der Photopeak bei $E_{\gamma} = 1312$ keV für den Versuch verwendet wird. Dabei können dann nur 31,6% der γ -Ausbeute von ^{48}V für die Messung eingesetzt werden (bei einem theoretischen Peak zu Total-Verhältnis von 1).

Bei der Protonenbestrahlung von Titan entsteht ^{48}V als einziger γ -Strahler. Damit kann auch bei komplizierten Streuverhältnissen das ganze γ -Spektrum im Meßfenster gezählt werden. Neben der γ -Ausbeute spricht die Reinheit des Zielisotops (Kriterium 6) für die Wahl der Geschoßpartikel Proton.

Bei Problemstellungen mit weniger unterschiedlichen γ -Aus-

beuten sind die Kriterien 8 und 9 entscheidend für die Auswahl von Zielisotop und Geschößpartikel. Mit $a_N \rightarrow 1$ wächst der nutzbare Bereich s_M der aktivierten Schicht und die Unabhängigkeit bei der Wahl der Bestrahlungsanordnung (vgl. Kap. 3.1.2, Bilder 20, 22). Je näher x_M (bei festem a_N) bei der geforderten maximalen Abriebtiefe liegt, desto sicherer ist die Voraussage für das Bestrahlungsergebnis (Sollwinkel $\rightarrow 90^\circ$, vgl. Kap. 3.1.2). Bei gegenläufigen Auswirkungen sind die Kriterien 8 und 9 i.a. stärker als das Kriterium 10 (Strahlaufweitungswinkel σ wächst für gewählte Partikel a und Bremsmaterial mit der Energiedifferenz ΔE_{Gesamt}), weil die Ungenauigkeiten bei Verkleinerung des Bestrahlungssollwinkels α_0 den Vorteil einer Verkleinerung des Strahlaufweitungswinkels σ überwiegen.

Nach der Auswahl des Zielisotops und der Geschößpartikel und -energie werden die Bestrahlungsanordnung und die Scan-Bewegung festgelegt. An die Anordnung von Bremstarget und Maschinenteil relativ zum Strahl werden zwei Hauptanforderungen gestellt:

1. Der Bereich, in dem das Bestrahlungsergebnis erwartet wird, muß so eng sein, daß jeder Wert innerhalb dieses Bereichs die geplanten Versuche ermöglicht (vgl. Kap. 3.1.2).
2. Bei der Prüfung des bestrahlten Bauteils und der Eichung dürfen vorgegebene Fehlergrenzen nicht überschritten werden.

Mit den Nomogrammen und Darstellungen in Kap.3.1.2 werden für eine zulässige Bereichsbreite von $s_M(1-f) < s_M^+ < s_M(1+f)$ der kleinste Sollwinkel α_0 und die günstigste Anordnung des Bremstargets ermittelt. Bei^{min} der Wahl der Werkstoffe für das Bremstarget und die Aufnahme für das Maschinenteil muß das Kriterium 7 (Sekundärbestrahlung durch von den "out going particles" b_j induzierte Reaktionen) beachtet werden. Je nach Versuchsziel können auch zulässige Bereiche für die Eigenschaften rechnerische Bestrahlungstiefe s_R oder Ausnutzungsgrad a_N vorgegeben werden. Damit ist die Aktivierungstiefe festgelegt. Die geforderte Empfindlichkeit wird durch ein entsprechend hohes Stromintegral während der Bestrahlung erreicht (vgl. Kap. 2.1.1).

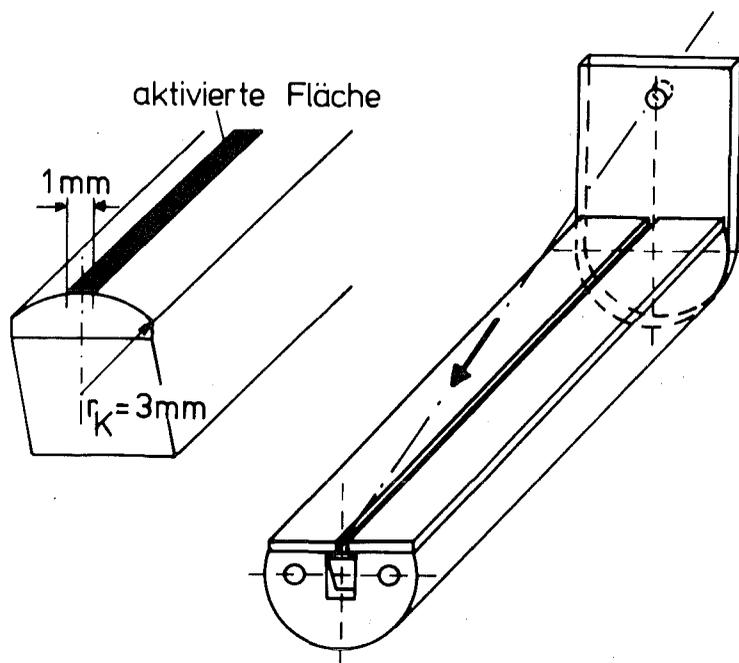


Bild 35: Bestrahlungsaufnahme für Scheitel-
leisten und Lage der aktiven Fläche

Bild 35 zeigt ein ausgeführtes Bestrahlungsbeispiel (vgl. Kap. 4.3.1). Die Scheitelleiste wurde mit Protonen bestrahlt, als Meßisotop wurde ^{56}Co gewählt. Zur Wärmeabfuhr wurde die Leiste eng in eine Aluminiumhalterung eingesetzt. Die maximale Abriebtiefe für das Versuchsprogramm wurde zu $75\ \mu\text{m} \pm 15\ \mu\text{m}$ angenommen. Bei der Bestrahlungsanordnung nach Bild 21 wurden drei Eichfolien zu je $11\ \mu\text{m}$ Dicke über die Leistenkuppe gelegt. Die Vorrichtung wurde entlang der Leistenlängsachse im Strahl hin- und herbewegt. Durch die enge Kollimierung (Breite der aktiven Fläche $1\ \text{mm}$) kann näherungsweise ein Parallelstrahl angenommen werden. Der Bestrahlungswinkel $\alpha_0 = 29^\circ$ wurde gegenüber der Kuppenmittellinie eingestellt. Nach Bild 32 ergibt sich ein kleinster Bestrahlungswinkel in Umfangsrichtung der Leistenkuppe von $\alpha_{0U} = 80,4^\circ$. Die dadurch verursachte Stauchung der Tiefenverteilung ist kleiner als $1,5\%$. Damit kann diese Aktivierung trotz des kleinen Kuppenradius von $3\ \text{mm}$ wie die Bestrahlung einer ebenen Fläche behandelt werden. Für die Auslegung gilt das Nomogramm I.

Die Verwendung einer engen Strahlblende ermöglicht eine Rückführung des Bestrahlungsproblems auf einen einfachen Fall. Für die Versuchsdurchführung war die Begrenzung der aktiven Fläche auf eine schmale Zone um die Leistenkuppe günstig, um Einflüsse eines ungleichmäßigen Abtrags über dem Umfang (Dachfasenbildung) auf das Versuchsziel (Bestimmung der Höhenabnahme) zu verringern (vgl. Kap. 3.3.4).

3.2 Meßkopf und Elektronik

In den Kap.1 und 2 wurden Forderungen an die Meßeinrichtung aufgestellt, nach denen die Konzeption für ein Verschleißmeßgerät erarbeitet wurde, das auf die Randbedingungen des DDV ausgelegt ist. Die geforderte hohe technische Leistungsfähigkeit (vgl. Kap. 2.2.1) muß beim Einsatz von käuflichen Kernstrahlmeßeinheiten durch hohe Anforderungen an die Qualifikation des Bedieners erkaufte werden. Für die Impulsaufbereitung und -verarbeitung wurde daher ein Kompaktgerät entwickelt und gebaut. Es ist in seinem Aufbau auf die Eigenschaften des Nachweisgeräts (3" x 3" NaJ(Tl)-Kristall) und auf die Probleme bei der Informationsübertragung (vgl. Kap. 2.3.1) zugeschnitten.

Zur Sicherheit der Messung tragen zwei Maßnahmen bei:

1. Das Energiespektrum der nachgewiesenen γ -Strahlung und die Energiebereiche der Meßfenster werden zur Einstellung des Meßgeräts und während des Versuchslaufs zur Kontrolle auf einem Sichtgerät dargestellt.
2. Selbsttätige Regeleinrichtungen helfen systematische Fehler weitgehend zu verringern, die aus Änderungen in den Betriebsbedingungen entstehen (z.B. durch Temperaturänderung des Nachweisgeräts) oder aus prinzipbedingten Nichtlinearitäten (z.B. zählratenabhängige relative Zählverluste oder Fehlinformationen durch überlagerte Impulse).

Das Gerät wurde für die gleichzeitige Messung von 2 Komponenten ausgelegt. Durch die Verzerrung des γ -Spektrums bei der Messung (vgl. Kap. 2.1.2) und den steil ansteigenden Aufwand für die Aktivierung ist die gleichzeitige Messung von mehr als 2 Kom-

ponenten nach dem DDV nur in Ausnahmefällen möglich. Bei vielen Einkomponentenmessungen sind genauere Messungen möglich, wenn im Energiebereich des Meßisotops liegende Peaks eines zweiten oder weiterer Isotope (vgl. Kap. 3.3.3) ausgeblendet werden können. Dabei werden die beiden Meßfenster auf getrennte Peaks desselben Meßisotops eingestellt und die Zählraten addiert.

Bild 36 zeigt das Blockschaltbild für die Meßelektronik. Es können Einkristalldetektoren oder sogenannte Poliscindetektoren verwendet werden (optisch leitend zusammengefaßte kleine Einkristalle mit geringer Empfindlichkeit gegen Temperaturänderungen und Beschleunigungen). Die Grundeinstellungen sind auf eine Kristallgröße von 3" x 3" abgestimmt.

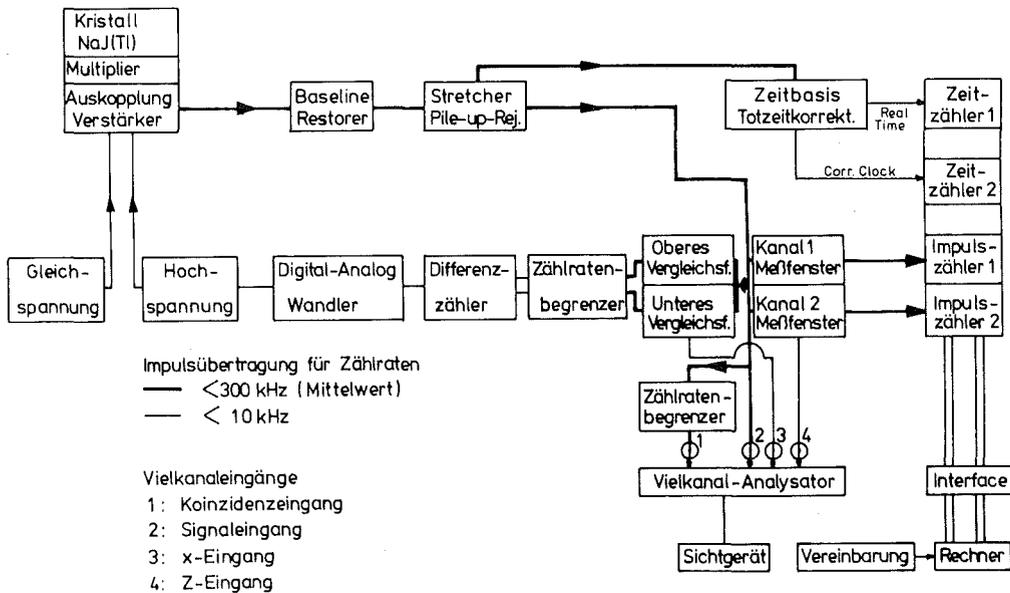


Bild 36: Blockschaltbild der Elektronik für Messungen nach dem Differenzverfahren

Der Detektor trägt eine Auskopplung mit Verstärker. Die höchste für die Messung verwendete γ -Linie erzeugt darin einen Impuls mit einer Amplitude von 5 Volt. Die Begrenzung der Gesamtverstärkung auf 5 Volt ergibt sich aus den Daten der integrierten Schaltungen, die für die Impulsaufbereitung und -verarbeitung verwendet werden. Die Dauer eines Impulses größter Energie bis zum Abfall auf 50 mV beträgt $< 1 \mu s$ (Anstieg $\approx 100 ns$, Abfall-

zeit ≈ 700 ns).

Die Impulsaufbereitung aus Baseline Restorer, Pile - up Rejector und Stretcher verändert nach üblichen Verfahren die Impulsform und -lage ohne für die Messung wichtige Informationen zu verlieren. Bei mehr als 100 ns gegeneinander verschobenen Impulsen werden der Originalimpuls und weitere aufgestockte unterschieden. Der aufgestockte Impuls wird unterdrückt und ein Einzählen im falschen Energiefenster verhindert. Durch die Verlängerung des Scheitelwerts des Impulses kann eine feste Zeitdifferenz zwischen Startsignal (Überschreiten der 50 mV-Schwelle) und Bestimmung des Scheitelwertes eingestellt werden, die eine einfache Impulshöhenanalyse ermöglicht.

Die Totzeit, d.h. die Zeitspanne, während der das Gerät für einen ankommenden Impuls gesperrt ist, wird gemessen und die tatsächliche Meßzeit gegenüber dem eingestellten Wert entsprechend verlängert. Der Abstand zweier aufeinanderfolgender Meßpunkte entspricht jetzt nicht mehr der eingestellten Meßzeit. Ein Zählsystem aus zwei Zeit- und zwei Impulszählern übergibt die Impulszahlen der beiden Meßfenster, die Versuchszeit (Real Time) und die korrigierte Meßzeit an einen Rechner.

Zur Korrektur von Verstärkungsänderungen in der Meßkette vom Kristall bis zum Meßfenster wird ein digitaler Spektrumsstabilisator verwendet. Parallel zu den Meßfenstern liegen die aufbereiteten Impulse an zwei Stabilisatorfenstern an, die so auf die Flanken eines Peaks gelegt werden, daß die gleiche Impulszahl in beiden Fenstern gezählt wird. Die Breite und der Abstand der Fenster sind auf die Energieauflösung eines 3" x 3" NaJ-Kristalls abgestimmt und proportional zur Lage im Spektrum fest eingestellt. Eine Verstärkungsänderung bewirkt eine Verschiebung des Peaks gegenüber der fest eingestellten Stabilisatorlage und eine unterschiedliche Veränderung der Fensterinhalte. Der Stabilisator erzeugt eine der Differenz der Fensterinhalte proportionale Gleichspannung, die vorzeichenrichtig zur Hochspannung addiert wird und damit die ursprüngliche Gesamtverstärkung wiederherstellt. Betrag und Richtung der Regelspannung werden auf einem Meßinstrument angezeigt. Ein Zählratenbegrenzer sperrt die Ein-

gänge des Differenzzählers nach einem Impuls für eine feste Totzeit. Damit kann das Regelverhalten auf niedrige und mittlere Zählraten ausgelegt werden, ohne daß die Regelung bei sehr hohen Zählraten instabil wird. Dieses Verhalten ermöglicht eine zufriedenstellende Funktionsweise über einen weiten Zählratenbereich.

Zur einfachen Einstellung der Meßfenster und der Stabilisatorlage wird das Impulshöhenspektrum auf dem Bildschirm eines Analysators angezeigt und wahlweise die Stabilisatorfenster (für die Einstellung) oder die Meßfenster (während des Versuchslaufs) eingeblendet. Da die Änderung der Meßgröße wegen der hohen Zählrate über den "schnellen" Datenweg (dicke Linien in Bild 36) verfolgt wird und der Analysator nur als Sichtgerät für die Einstellung und Funktionskontrolle der Meßkette dient, sind die Anforderungen an die Energieauflösung und an die Verarbeitungsgeschwindigkeit gering. Der eingesetzte Analysator kann bei 256 Kanälen bis zu einer Impulsfrequenz von ≈ 20 kHz betrieben werden (bezogen auf Impulse, die in den höchsten Kanal eingezählt werden). Ein Zählratenbegrenzer im Logiksignal für den Koinzidenzschalter vermeidet Fehler in der Impulshöhenanalyse aufgrund zu geringer Impulsabstände.

Für den Versuchseinsatz wird der Detektor von einem wassergekühlten Meßkopf aufgenommen. Er schützt den Kristall gegen mechanische Beschädigungen und verhindert Temperatureffekte im Kristall und Multiplier (längere Abklingzeit der Lichtpulse, schlechtere Auflösung, "feed-back-" und "satellite" Impulse), deren Auswirkungen sich nicht über die Verstärkungsregelung beseitigen lassen.

Der Schutz handelsüblicher Kristallmontagen gegen Verstärkungsänderungen ist unvollständig weil die μ -Metallabschirmung den Kristall und den Sockel für die Auskopplung nicht umschließt. Ist am Prüfstand ein Anbau des Meßkopfes senkrecht zu den magnetischen Feldlinien nicht möglich, so kann eine zusätzliche Abschirmung aus einem Foliensandwich (31) im Meßkopf vorgesehen werden. Vor allem bei Motorenprüfständen mit Wirbelstrombremsen können starke Magnetfelder auftreten (vgl. Bild 37), die einen

besonderen Schutz erforderlich machen.

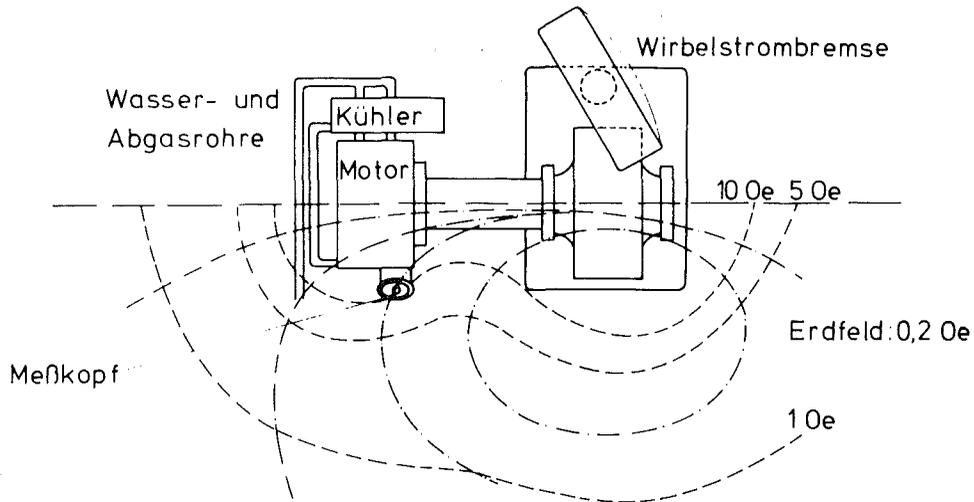


Bild 37: Magnetfeld am Prüfstand für Motor B bei voller Erregung der Wirbelstrombremse. Meßkopf in Anbaulage für die Mantelversuche

3.3 Verfahrensvorschriften

3.3.1 Wahl des Meßbereichs

Die von der Oberfläche aus gemessene Restaktivität des Bauteils fällt streng monoton mit der Abriebtiefe s , d.h. für jeden Punkt der Aktivitätssummenkurve besteht eine eindeutige Zuordnung zur Schichttiefe. Die Meßunsicherheit bezogen auf ein Intervall Δs der Tiefenverteilung hat ein Minimum für den kleinsten rel. statistischen Fehler. Die zugehörige Tiefe s_{opt} liegt in der Nähe des Wendepunkts der Summenkurve. Die Lage dieses Minimums

gibt den für die Messung günstigsten Tiefenbereich an. Der Meßbereich muß so gewählt werden, daß er s_{opt} enthält.

Für $s = s_{opt}$ soll der relative statistische Fehler

$$f = \frac{\sigma(\Delta J)}{\Delta J} = \frac{\sqrt{2 J - \frac{dJ}{ds} \cdot s_v}}{\frac{dJ}{ds} \cdot s_v} \quad (9)$$

seinen kleinsten Wert erreichen.

s_v = Dicke der im Versuch abgeriebenen Schicht

$\frac{dJ}{ds}$ = mittlere Steigung der Tiefenverteilungskurve im Tiefenintervall

Für $f = \min$ muß $f' = 0$ sein.

$$f' = \frac{1}{2} \frac{F'}{F} \cdot \frac{dJ}{ds} \cdot s_v - F \frac{d^2J}{ds^2} \cdot s_v \stackrel{!}{=} 0 \quad (10)$$

mit $F = 2 J - \frac{dJ}{ds} \cdot s_v$

$$F' = 2 \frac{dJ}{ds} - \frac{d^2J}{ds^2} \cdot s_v$$

Für kleine Tiefenintervalle $h \rightarrow 0$ wird

$$f' = \left(\frac{dJ}{ds}\right)^2 - 2 J \frac{d^2J}{ds^2} \stackrel{!}{=} 0 \quad (11)$$

Wegen $\left(\frac{dJ}{ds}\right)^2 > 0$ und $J > 0$ muß $\frac{d^2J}{ds^2}$ ebenfalls > 0 sein, damit Gl. (11) erfüllt ist. Da die $\frac{d^2J}{ds^2}$ Tiefenverteilung immer einen s-förmigen Verlauf hat bedeutet dies, daß s_{opt} hinter dem Wendepunkt der Kurve liegt. Wenn $J = J(s)$ bekannt ist, kann s_{opt} mit Gl. (10) berechnet werden.

Für eine einfache Vergleichbarkeit der Ergebnisse aller Versuche mit einem aktivierten Bauteil wird der Meßbereich so ausgewählt, daß in seinen Grenzen mit einem linearen Zusammenhang zwischen Summenaktivität und Schichttiefe gerechnet werden darf. Der so gefundene Bereich wird "linearer Meßbereich" genannt.

Für die Bestimmung von Lage und Länge des linearen Meßbereichs und der darin gültigen Ausgleichsgeraden gelten die Be-

dingungen:

1. s_{opt} muß im Bereich enthalten sein.
2. Die Unsicherheit bei der Messung der Abriebtiefe soll eine vorgegebene Schranke an keiner Stelle überschreiten.

oder

3. Die Unsicherheit bei der Bestimmung des Verschleißwegs soll für eine beliebige Länge des Verschleißwegs $<$ Länge des Meßbereichs eine vorgegebene Schranke nicht überschreiten.

Die Bedingungen 2. oder 3. ergeben unterschiedliche Linearbereiche. Ihre Wahl wird vom Versuchsziel bestimmt. Die Zusammenhänge sind in Bild 38 dargestellt.

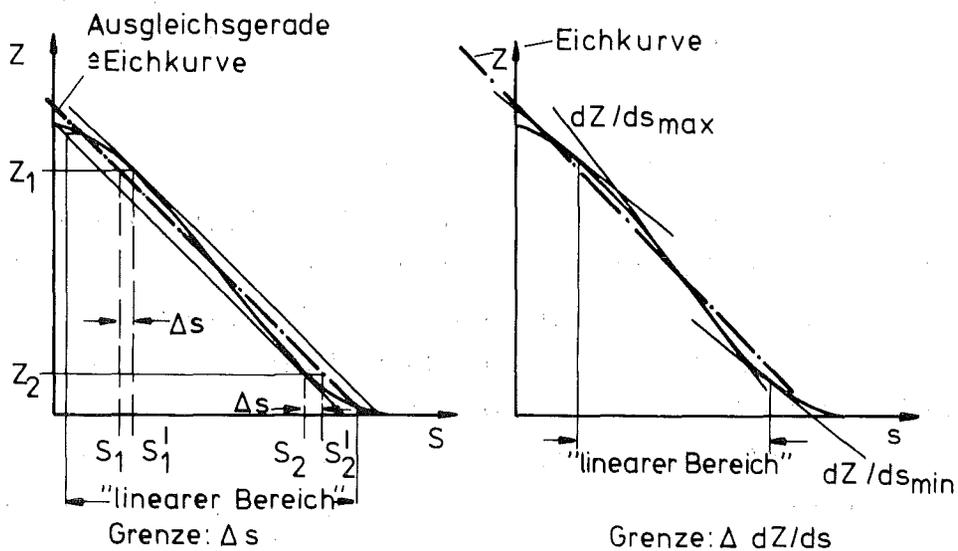


Bild 38: Bestimmung von Lage und Länge des linearen Meßbereichs

Linearer Bereich nach Bedingung 2.:

Ein Parallelenpaar im Abstand $2\Delta s$ wird so an die Kurve gelegt, daß beide Parallelen die Kurve berühren (31). Die Ordinaten der Schnittpunkte von Parallelen und Aktivitätskurve werden auf die Ausgleichsgerade (Abstandshalbierende der Parallelen) projiziert. Die zugehörigen Werte von s sind die Grenzen des linearen Bereichs. Die Fehlerschranke Δs wird im ganzen Bereich 4 mal erreicht. Die größte Unsicherheit für eine Abtragsmessung (Differenz aus zwei Tiefenmessungen) ist $\pm 2\Delta s$. Beim Vergleich von 2 Versuchsläufen kann der Absolutfehler den Betrag $4\Delta s$ erreichen.

Diese Abgrenzung des linearen Bereichs ist zweckmäßig, wenn die zu einem bestimmten Ereignis gehörige Tiefe gesucht wird, z.B. diejenige Verschleißtiefe, bei der der Bruch eines Teils eintritt.

Bei kleinen Abträgen pro Versuchslauf, wie sie bei Parameteruntersuchungen mit einem einzigen aktivierten Versuchsteil angestrebt werden, wird der lineare Bereich nach Bedingung 3. festgelegt.

Linearer Bereich nach Bedingung 3.:

Der Fehler zwischen der Steigung der Aktivitätssummenkurve und der Steigung der Ausgleichsgeraden darf eine festgelegte Schranke nicht überschreiten. Der größte Fehler wird dreimal erreicht: Mit positivem Vorzeichen in den beiden Bereichsgrenzen und mit negativem Vorzeichen im Wendepunkt der Summenkurve.

Bei dieser Definition des linearen Bereichs können die Ergebnisse beliebiger Versuchsläufe, die mit einer Aktivierung gefahren wurden, mit bekanntem maximalem Eichfehler miteinander verglichen werden.

3.3.2 Meßbereich bei Isotopengemischen

Beim DDV ist eine Trennung unterschiedlicher aktiver Restkerne anhand ihrer γ -Energie wegen des hohen Streustrahlungsanteils im Spektrum häufig nicht oder nur unter großen Empfindlichkeitsverlusten (verschachtelte Spektren) möglich. Überdecken sich die linearen Meßbereiche der einzelnen Isotope ganz oder teilweise, dann ist im gemeinsamen linearen Meßbereich der Anteil der einzelnen Isotope im Spektrum über der Tiefe konstant und ändert sich

während des Versuchs im Verhältnis der Halbwertszeiten. Die im Meßfenster nachgewiesene Strahlung kann so behandelt werden, als würde sie von einem einzigen "Ersatzisotop" ausgehen, dessen Eigenschaften einer gewichteten Superposition der Einzelisotope entsprechen. Zu diesem "Ersatzisotop" gehört eine "Ersatzhalbwertszeit", die selbst eine Zeitfunktion darstellt (vgl. Bild 39).

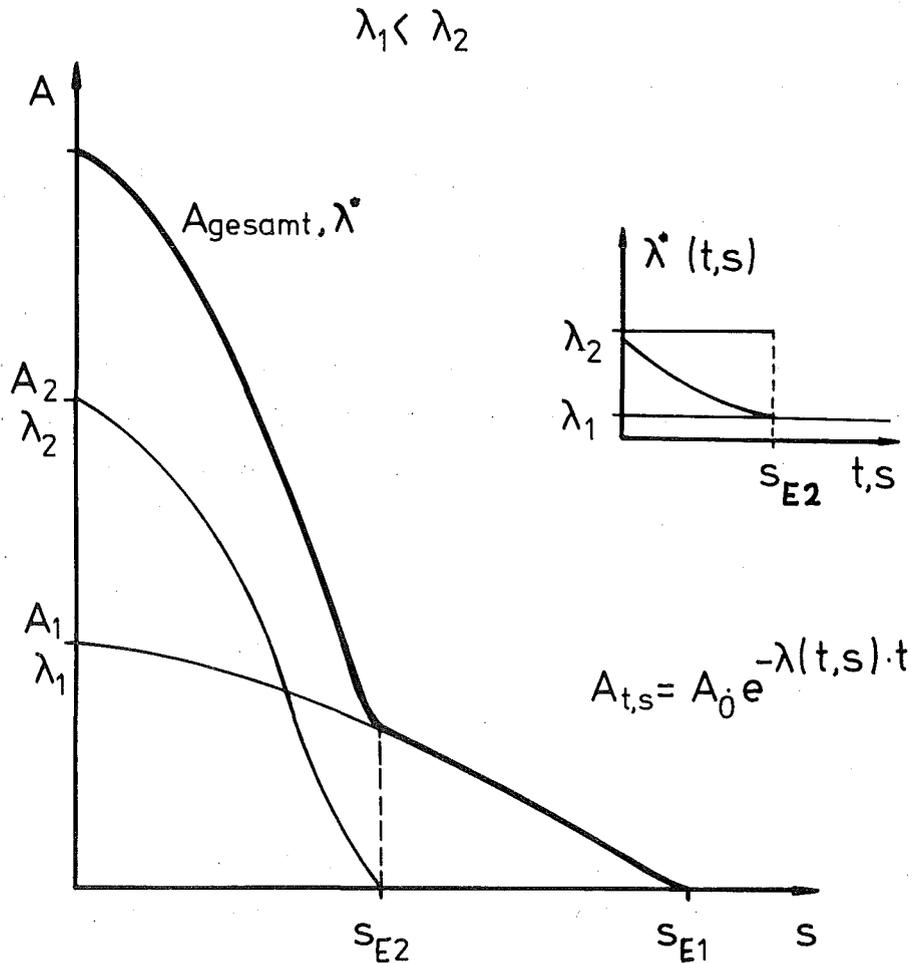


Bild 39: Verlauf der "Ersatzhalbwertszeit" über der Versuchszeit (Verschleißtiefe) bei Mischspektren mit stark unterschiedlichen Halbwertszeiten der Einzelisotope

Bei n Isotopen im Meßfenster gilt zur Zeit t für die Zählrate an der Oberfläche:

$$Z(s_0, t) = Z(s_0, t_0) \cdot \sum_{i=1}^n a_i \cdot e^{-\lambda_i \cdot t} \quad (13)$$

a_i = Anteile der einzelnen Isotope an der Zählrate im Meßfenster

λ_i = Zerfallskonstanten der Isotope

t = Versuchszeit

oder unter Berücksichtigung des Materialabtrags für die Tiefe s :

$$Z(s, t) = \underbrace{Z_0(s_0, t_0)}_{\cdot (1 - \frac{\Delta s}{s})} \cdot \sum_{i=1}^n a_i \cdot e^{-\lambda_i \cdot t} \quad (14)$$

wegen $dZ/ds = \text{konstant}$ im linearen Meßbereich.

Die im Spektrum enthaltenen Isotope und ihre Halbwertszeiten werden bei einer Eichmessung bestimmt. Die Anteile der einzelnen Isotope am Meßspektrum unter Versuchsbedingungen sind i.a. nicht bekannt. Die Koeffizienten a_i werden in diesem Fall aus mehreren Messungen der Zählrate im verschleißfreien Betrieb bestimmt.

$$Z_k(s_0, t_k) \stackrel{!}{=} Z(s_0, t_0) \cdot \sum_{i=1}^n a_i \cdot e^{-\lambda_i \cdot t_k} \quad (15)$$

$k = 1:m$ Anzahl der Meßpunkte für die Bestimmung der a_i

Mit den so bestimmten a_i werden die Zählraten unter realen Versuchsbedingungen, d.h. bei unbekannter Abriebtiefe $s \neq s_0$ korrigiert.

Ist kein Tiefenintervall Δs vorhanden, das die linearen Meßbereiche von allen Isotopen im Meßfenster enthält, so ist die Rückführung auf eine einfache lineare Eichung nicht möglich. Bild 40 zeigt die Darstellung dieses allgemeinen Falles im Aktivitäts-Zeit-Tiefenschaubild. Die von der Oberfläche aus gemessene Gesamtaktivität im Bauteil fällt sowohl über der Tiefe als auch mit wachsender Zeit t streng monoton. Damit fällt der "Aktivitätsberg" streng monoton zur s - t -Ebene ab. Für jede gemessene

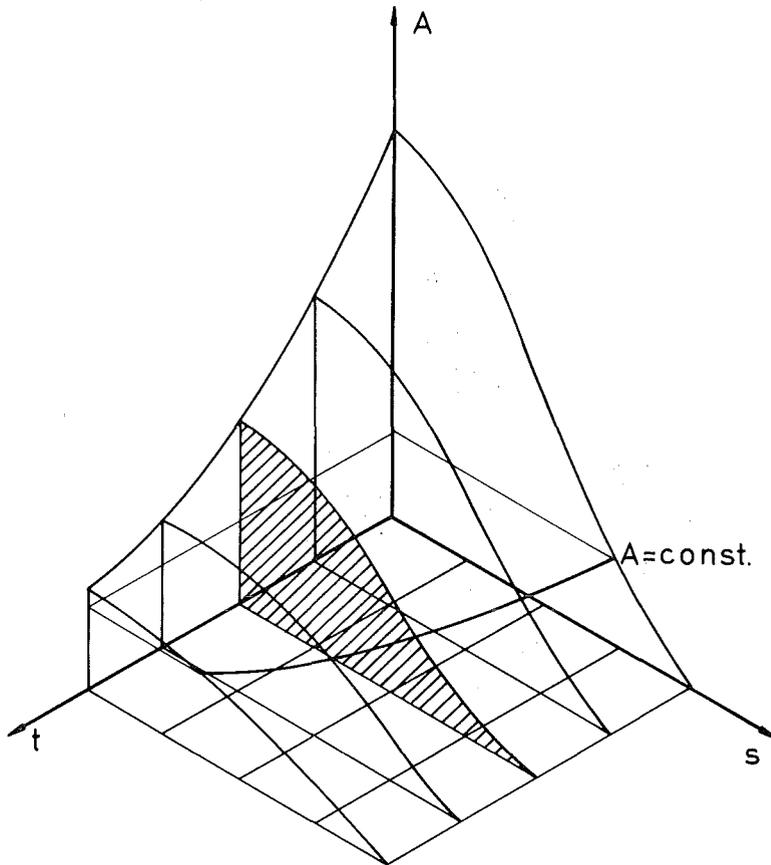


Bild 40: Darstellung der Aktivität eines bestrahlten Bauteils im Aktivitäts-Zeit-Tiefenschaubild. Die Oberfläche des Bauteils liegt in der A-t-Ebene. Die A-s-Ebene zeigt die Aktivitätsverteilung bei Bestrahlungsende.

Aktivität A (Schnitt parallel zur s-t-Ebene im Abstand A) existiert eine Schnittkurve mit der Aktivitätsfläche, deren Projektion auf die s-t-Ebene eine eindeutige Funktion $s = s(t)$ ist. Da die Aktivität A und die Zeit t gemessen werden, hat die gesuchte Tiefe $s = s(A, t)$ eine eindeutige Lösung.

3.3.3 Zur Berechnung der Verschleißgeschwindigkeit

Bild 41 zeigt die Darstellung eines Versuchslaufs im A-s-t-Diagramm (nur linearer Bereich). Gemessen wurde die Aktivitätsänderung

$$dA = \frac{\partial A}{\partial s} ds + \frac{\partial A}{\partial t} dt \text{ oder } dA = \frac{\partial A}{\partial s} \frac{ds}{dt} dt + \frac{\partial A}{\partial t} dt \quad (16)$$

mit $\frac{ds}{dt} = \dot{V} = \text{Verschleißgeschwindigkeit}$

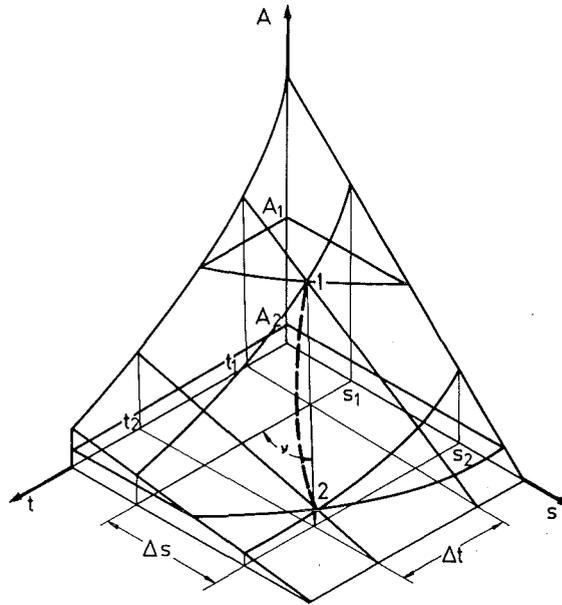


Bild 41: Darstellung eines Versuchslaufs
im A-t-s-Schaubild

Kernzerfall und Abtransport aktiver Verschleißteilchen sind konkurrierende unabhängige Vorgänge, die zur beobachteten Abnahme der Restaktivität des Verschleißteils führen. Werden innerhalb der Versuchszeit $\Delta t = t_2 - t_1$ eine beliebige Anzahl von Verschleißteilchen mit einer Gesamtmasse, die der Schichtdicke $\Delta s = s_2 - s_1$ entspricht, herausgelöst und wegtransportiert, so sinkt die Aktivität A des Bauteils von A_1 nach A_2 . Die zugehörigen Zustände 1 und 2 stellen Anfang und Ende der betrachteten Meßzeit dar. Unter der Annahme, daß keine Anlagerung von Verschleißteilchen am aktivierten Versuchsteil erfolge und weil nur positive Schritte auf der Zeitachse sinnvoll sind, muß die Kurve für die Aktivitätsänderung innerhalb einer Fläche liegen, die durch die eingezeichneten Schnittebenen durch die

Punkte 1 und 2 begrenzt wird. Ist der Zeitabstand zwischen dem Heraustrennen von 2 Verschleißteilchen klein gegenüber der Versuchsdauer und ist das mittlere Volumen eines einzelnen Verschleißteilchens klein gegenüber dem Gesamtabrieb, dann ergibt sich für die Verschleißgeschwindigkeit $\frac{\partial s}{\partial t} = \text{konstant}$ die dick gestrichelte Kurve von 1 nach 2. Die Steigung der Projektion dieser Kurve auf die s-t-Ebene ist die gesuchte Verschleißgeschwindigkeit $\frac{\Delta s}{\Delta t} = \dot{V}$, die Projektion von 2 auf die s-Achse gibt die Abriebtiefe an.

Die analytische Beschreibung der in Bild 40 dargestellten allgemeinen Form der Aktivitätsfläche $F(A, s, t) = 0$ ist i.a. sehr aufwendig. Wenn die im Meßfenster für die Energieauswahl nachgewiesenen Anteile der Aktivitätsdichte $\frac{dA_i}{ds}$ der einzelnen Isotope unter Versuchsbedingungen experimentell bestimmt werden können, liefert eine getrennte Halbwertszeitkorrektur und anschließende Superposition die Tiefenverteilung zum Versuchszeitpunkt.

$$A(s, t=t_v) = \sum_{i=1}^n A \cdot a_i(s, t_0) \cdot e^{-\lambda_i \cdot t} \quad (17)$$

A = Aktivität

$a_i(s, t_0)$ = Anteil im Fenster experimentell bestimmt

Diese Kurve stellt einen Schnitt der Aktivitätsfläche parallel zur A-s-Ebene dar im Abstand $t = t_v$ (schraffierte Fläche in Bild 40). Da der gemessene Aktivitätswert auf dieser Kurve liegen muß, ist die zugehörige Abriebtiefe s eindeutig bestimmt.

Definitionsgemäß kann innerhalb des linearen Meßbereichs das partielle Differential $\frac{\partial A}{\partial s}$ ersetzt werden durch den Eichwert $\frac{A}{s} = \frac{A_0}{s_R} = \text{konstant}$. $\frac{\partial A}{\partial t}$ ist bekannt aus dem Zerfallsgesetz. Damit ist s_R der Abriebweg s bei n Isotopen im Meßfenster.

$$\Delta s = s_2 - s_1 = \frac{A(t_1, s_1) - A(t_2, s_2) - \sum_{i=1}^n A_{0i} (1 - e^{-\lambda_i (t_2 - t_i)})}{\frac{1}{s_R} \sum_{i=1}^n \frac{A_{0i}}{s_{Ri}}} \quad (18)$$

Die Aktivitätsabnahme wird über die gemessene γ -Strahlung nachgewiesen. Man unterteilt die Versuchszeit t_v in m gleiche kleine Meßzeitintervall der Breite $\tau = \tau_j$ entsprechend der am Meßgerät eingestellten Zählzeit. Unter der Voraussetzung, daß τ so gewählt wird, daß die Annahme einer innerhalb einer Intervallbreite τ konstanten Verschleißgeschwindigkeit zulässig ist, wird die über die Halbwertszeit korrigierte Impulszahl I der jeweiligen Intervallmitte zugeordnet (vgl. Bild 42). Für den Verschleißweg gilt:

$$\Delta s = \frac{1}{e_M \cdot \tau} \left[\frac{\sum_{j=2}^m (I_j - I_{j-1})}{m-1} + \frac{I_2 - I_1 + I_m - I_{m-1}}{2} \right] \quad (19)$$

mit

$$e_M = \frac{I_0}{s_R \cdot \tau} = \text{Empfindlichkeit der Messung für das eingestellte Energiefenster}$$

Der Gesamtverschleiß während des Versuchslaufs ergibt sich aus der Summe der Differenzen zweier aufeinanderfolgender Meßwerte (1. Glied in der eckigen Klammer) und den extrapolierten Differenzen ΔI_1^+ und ΔI_m^+ für die vor dem ersten bzw. nach dem letzten Meßpunkt liegenden Versuchszeiten mit einer Dauer von jeweils $\frac{\tau}{2}$. Für $\tau \ll t_v$ geht der Wert des 2. Gliedes in der eckigen Klammer gegen Null.

Der relative statistische Fehler des Meßergebnisses Δs ist damit:

$$f = \frac{\sigma(\Delta s)}{\Delta s} = \frac{\sqrt{(m-1)\tau} \sqrt{\sum_{j=2}^m (Z_j + Z_{j-1})}}{(m-1)\tau \sum_{j=2}^m (Z_j - Z_{j-1})} \quad (20)$$

Z_j = korr. Zählrate des Meßpunktes j

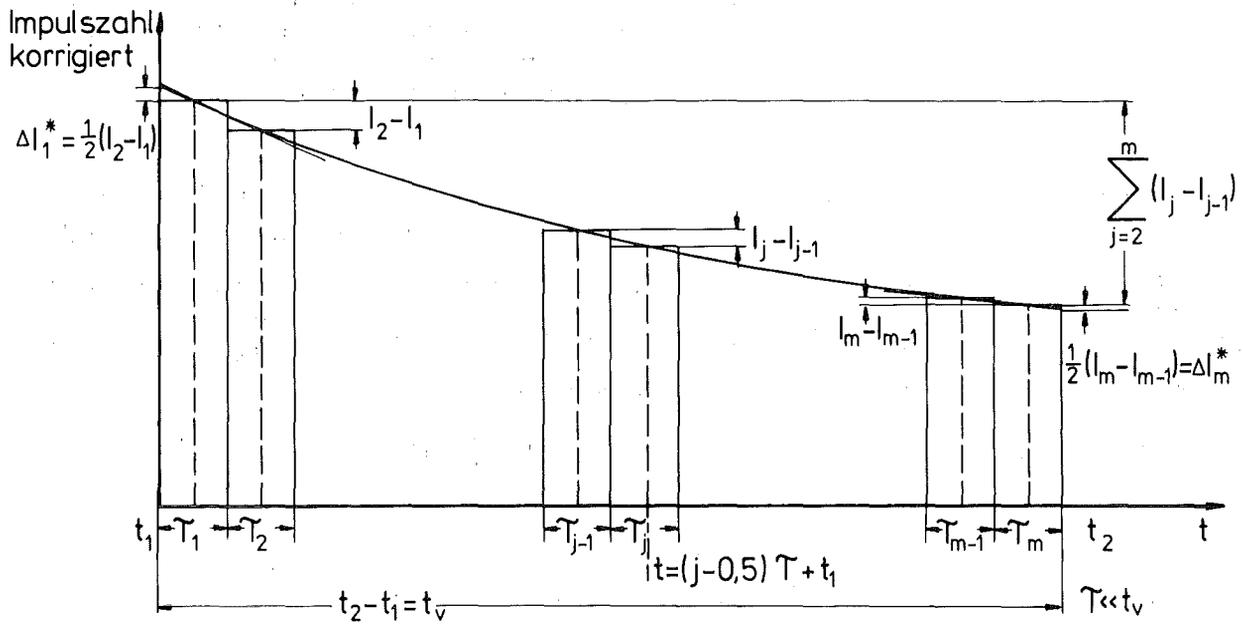


Bild 42: Benennung der Größen für die Berechnung der Verschleißgeschwindigkeit

Gleichung (16) stellt das vollständige Differential der Aktivität dar. Das vollständige Differential für den fehlerbehafteten Meßwert der Zählratendifferenz lautet:

$$dZ = \frac{\partial Z}{\partial A} \cdot dA + \frac{\partial Z}{\partial U} \cdot dU + \frac{\partial Z}{\partial M} \cdot dM \quad (21)$$

Darin sind:

$\frac{\partial Z}{\partial A} \cdot dA$ = Zählratenänderung durch Aktivitätsabnahme des Bauteils. $\frac{\partial Z}{\partial A}$ ist für einen bestimmten Versuch eine Eich-Konstante, deren Wert von den Aktivierungsdaten (Spektrum, λ -Häufigkeit) und dem Versuchsaufbau (Nachweiswahrscheinlichkeit, Meßgeräteeinstellung) abhängt.

$\frac{\partial Z}{\partial U} \cdot dU = \sum_i fU_i dU_i$ = Zählratenänderung durch Änderung der Umgebung

fU_i sind z.B. $\frac{\partial Z}{\partial \rho} = e^{-\rho}$ Dichteänderung der Abschirmung z.B. Kühlmittel

$\frac{\partial Z}{\partial r} = -\frac{2}{r^3}$ Abstandsänderung

$$\frac{\partial Z}{\partial M} \cdot dM = \sum_j f_{M_j} dM_j = \text{Zählratenänderung durch Einflüsse auf die Meßkette z.B. durch Temperatureffekte, Magnetfelder, Netzspannungsstörungen etc..}$$

Für den allgemeinen Fall können weder die vollständigen Differentiale dU und dM noch die partiellen Differentiale $\frac{\partial Z}{\partial U} dU$ und $\frac{\partial Z}{\partial M} dM$ berechnet werden. Sie müssen für den einzelnen Versuch abgeschätzt oder durch Blindversuche mit $\frac{dA}{ds} \rightarrow 0$ und $\frac{dA}{dt} \rightarrow 0$ (kein Abtrieb und $T_{1/2} \gg$ Versuchszeit) bestimmt werden.

Für die Berechnung von s wird Gleichung 21 umgestellt:

$$\frac{\partial Z}{\partial A} \cdot \frac{\partial A}{\partial s} \cdot ds = dZ - \left(\frac{\partial Z}{\partial A} \cdot \frac{\partial A}{\partial t} \cdot dt + \frac{\partial Z}{\partial U} \cdot dU + \frac{\partial Z}{\partial M} \cdot dM \right)$$

$$s(Z) = \frac{\int dZ}{k \cdot A} - \frac{\int \left(\frac{\partial Z}{\partial A} \cdot \frac{\partial A}{\partial t} \cdot dt + \frac{\partial Z}{\partial U} \cdot dU + \frac{\partial Z}{\partial M} \cdot dM \right)}{k \cdot A} + C \quad (22)$$

mit $k = \frac{\partial Z}{\partial A}$

Für $\int dZ + \int \frac{\partial Z}{\partial A} \cdot \frac{\partial A}{\partial t} \cdot dt \gg \int \frac{\partial Z}{\partial U} \cdot dU + \int \frac{\partial Z}{\partial M} \cdot dM \quad (23)$

kann der Verschleißweg angegeben werden

$$s = \bar{s} + f$$

Dabei ist f ein geschätzter Betrag für den nicht erfaßten Fehler, der durch die Vereinfachung $\frac{\partial A}{\partial s} \stackrel{!}{=} \frac{A_0}{s_R} = \text{konstant}$ entsteht (vgl. Kap. 3.32). $\frac{\partial A}{\partial t} dt$ wird als bekannt und vollständig korrigiert vorausgesetzt. Der relative Fehler f bei der Aktivitätsbestimmung wird nach Gleichung 20 berechnet.

Bei den heute typischen Aktivierungen muß ein Abtrag von $\Delta s \leq 0,01 s_R$ für einen Versuchslauf ausreichen, wenn die in Kap. 2.3.4 geforderte Leistungsfähigkeit erreicht werden soll. Für eine Meßunsicherheit von 10% des Meßwertes müssen die nicht erfaßbaren systematischen Fehler durch Änderungen der Umgebung und in der Meßkette die Bedingung

$$\int \frac{\partial Z}{\partial U} \cdot dU + \int \frac{\partial Z}{\partial M} \cdot dM \stackrel{!}{\leq} 0,1(Z_1 - 0,99 Z_1) = 0,001 \cdot Z_1 \quad (24)$$

erfüllen. Ein Verletzen dieser Bedingung ist eine häufige Ursache für nicht zufriedenstellende Leistungsfähigkeit des Meßverfahrens.

Bei der Versuchsplanung muß die Aktivierung so ausgelegt werden, daß bei der höchsten erwarteten Verschleißgeschwindigkeit \dot{V}_{\max} für eine Zählratendifferenz $\Delta Z = 0,01 Z$, d.h. für die gesamte Versuchszeit oder m Intervalle nach Bild 42 die geforderte statistische Sicherheit S erreicht wird. Eine Aufteilung der Versuchszeit $t_2 - t_1$ in Meßzeiten $\tau < \frac{t_2 - t_1}{2}$ hat den Vorteil, daß eine plötzliche Zunahme der Verschleißgeschwindigkeit, die die Gefahr einer Schädigung ankündigt, bereits zu einem Zeitpunkt $t_2^+ < t_2$ erkannt wird, nämlich in demjenigen Intervall $m^+ < m$ in dem Gleichung 24 erfüllt ist.

Unsicherheiten bei der Bestimmung der Halbwertszeiten verschiedener Isotope (unterschiedliche Angaben von den einzelnen Autoren) oder unterschiedliche Halbwertszeiten der Isotope im Meßfenster (vgl. Kap. 3.3.2) machen eine exakte Halbwertszeitkorrektur nicht immer möglich. Bild 43 zeigt die Abhängigkeit der kleinsten mit einem vorgegebenen relativen Fehler aufgrund von unvollständiger Halbwertszeitkorrektur meßbaren Verschleißgeschwindigkeit von der wahren Halbwertszeit $T_{1/2}$, deren Fehler $\Delta T_{1/2}$ und der Abriebtiefe pro Versuchslauf $a_v = \frac{\Delta s_y}{s_R}$. Das eingezeichnete Beispiel wird im Anhang erläutert.

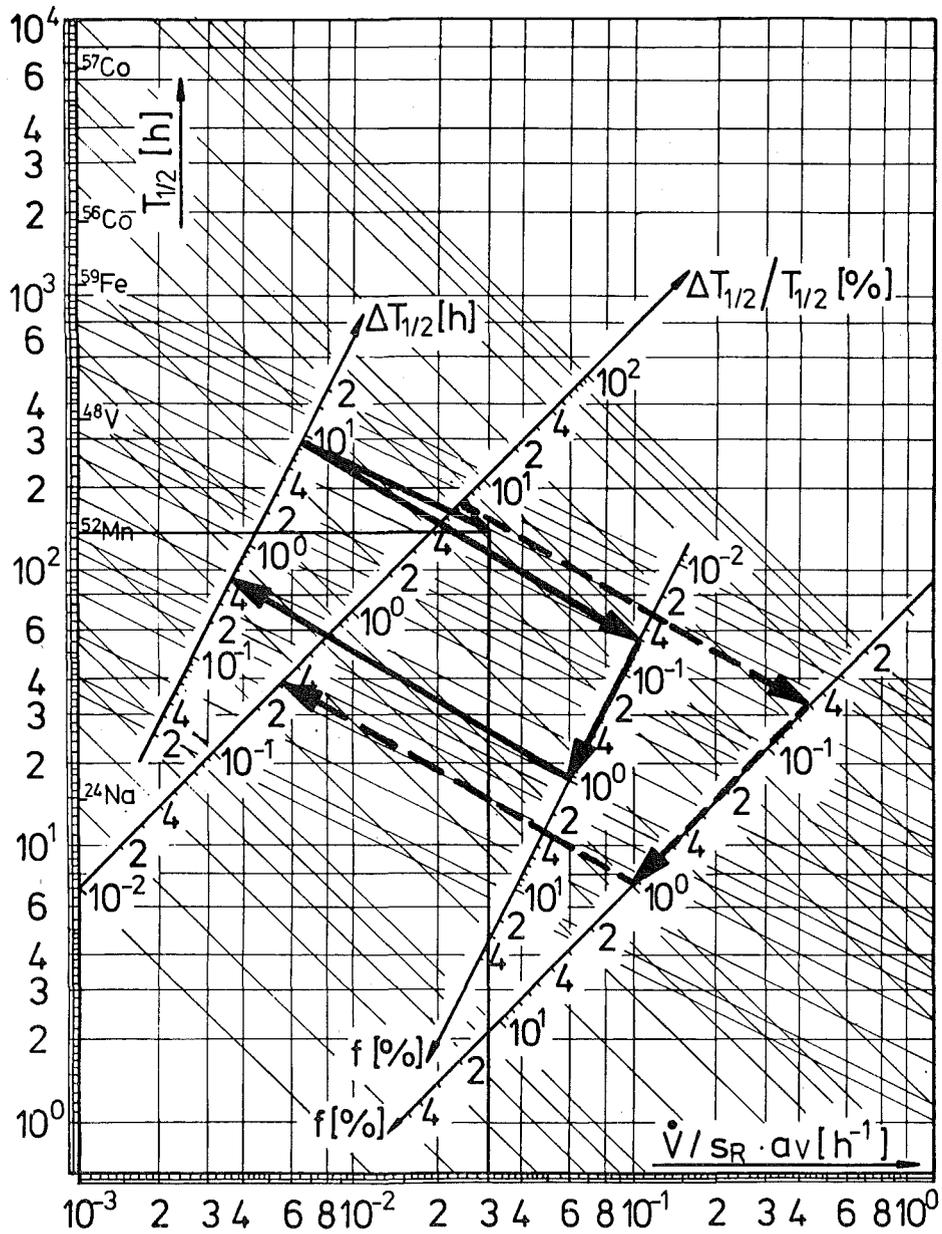


Bild 43: Nomogramm IV

Schaubild zur Bestimmung der kleinsten meßbaren Verschleißgeschwindigkeit bei unvollständiger Halbwertszeitkorrektur

3.4 Kontrolle der Aktivierung und Überprüfung auf Ablagerungen

3.4.1 Kontrolle der Aktivierung

Beim heutigen Stand der Aktivierungstechnik kann bei Bestrahlungen unter kleinen Winkeln ($\alpha_0 < 30^\circ$) die Absolutgenauigkeit des Versuchsergebnisses durch die inzwischen routinemäßig eingesetzte Aktivierungskontrolle verbessert werden. Die Überprüfung des γ -Spektrums wird mit einem hochauflösenden Nachweisgerät und in gleichbleibender Meßgeometrie durchgeführt. Sie ermöglicht den direkten Vergleich mit den unter den gleichen Bedingungen aufgenommenen Tiefenverteilungen der Probeaktivierungen. Das Zählratenverhältnis der nachgewiesenen Isotope gibt den Ort auf der Tiefenverteilungskurve an.

Die Bestimmung der rechnerischen Bestrahlungstiefe s_R erfolgt mit Eichfolien oder Probestiften. Dabei werden folgende typischen Werte erreicht:

Meßunsicherheit bei Folienmessung: $u_F < \pm 10\%$ im Bereich
 $s_R > 4D_2 > 50 \mu\text{m}$

Stiftmessung: $u_S < \pm 5\%$ im Bereich
 $s_R \geq 50 \mu\text{m}$.

Nach unten ist der Bereich begrenzt durch den kleinsten sinnvollen Wert von s_R , der vom Stand der Aktivierungstechnik und vom Versuchsziel abhängt (vgl. Kap. 2.1.1).

Bei einfachen Spektren (z.B. nach Protonenbestrahlung von Titan) kann s_R in der gleichen Geometrie wie bei der spektrometrischen Überprüfung bestimmt werden. Bei überlagerten Spektren (z.B. nach Bestrahlung von Ferrotitanit oder Nickellaufschichten) muß s_R in einer versuchsähnlichen Anordnung ermittelt werden.

Die Gleichmäßigkeit der Aktivitätsverteilung über der bestrahlten Fläche wird durch Autoradiographie bestimmt.

Bild 44 zeigt das Densitogramm von Leiste 4. Zur quantitativen Auswertung der Schwärzungsunterschiede in der bestrahlten Fläche muß die Anzahl der Helligkeitsstufen zwischen einer nicht belichteten Filmzone und dem Bereich größter Schwärzung bekannt sein. Der steile Helligkeitsgradient beim Übergang vom unbelich-

teten Filmmaterial auf das Bild der Leiste wurde zur besseren Auswertung gedehnt durch unterschiedliche Abbildungsmaßstäbe in

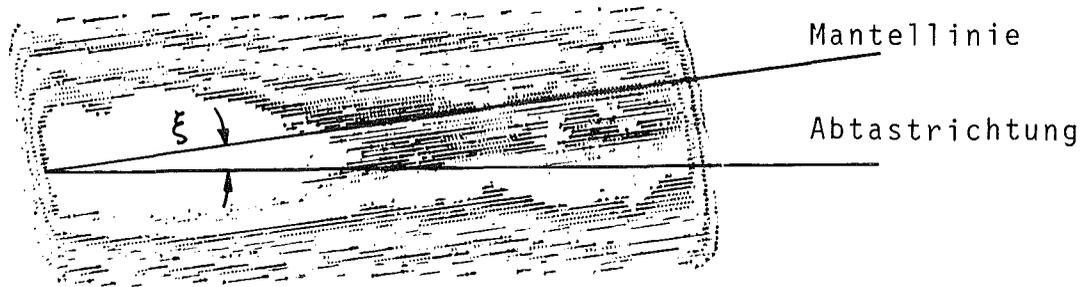


Bild 44: Densitogramm einer aktivierten Scheitelleiste

x- und y-Richtung und einen kleinen Winkel ξ zwischen der Leistenmantellinie und der Abtastrichtung. Die aktive rechteckförmige Fläche wird dadurch als Parallelogramm wiedergegeben. Die abgebildete Leiste weist kleine Schwärzungsunterschiede auf ($< 10\%$ des Mittelwerts der aktiven Fläche), die in der Größenordnung der Meßgenauigkeit liegen (ungefähr ± 1 Stufe Unsicherheit durch Filmeigenschaften und -behandlung).

3.4.2 Überprüfung auf Ablagerungen

Ablagerungen von radioaktivem Verschleißgut in der Nähe des Nachweisgeräts haben Einfluß auf die Empfindlichkeit und damit auf die Absolutgenauigkeit des Meßergebnisses. Der Transport der Verschleißteilchen aus dem für das Meßgerät sichtbaren Bereich muß deshalb überprüft werden.

Wenn die Ablagerungen auf dem Verschleißteil selbst klein sind und dieses leicht von der übrigen Maschine getrennt werden kann (z.B. Scheitelleiste), wird die Zählratenerhöhung aufgrund von Ablagerungen (z.B. an Läufer und Mantellaufbahn) durch den Vergleich einer Messung der Maschine bei ausgebautem Verschleißteil und der Untergrundmessung bestimmt. Bei Versuchen an Mantellaufbahnen werden aktive Verschleißteilchen in Lackschichten eingelagert, die sich vor allem im heißen Bogen nach der kurzen Halb-

achse bilden. Eine Trennung der Ablagerungen vom aktiven Verschleißteil ist wegen der Festigkeit der Lackschicht schwierig. Zur Bestimmung des Meßfehlers muß neben der Menge des abgelagerten Verschleißgutes der Ort und die zugehörige Nachweiswahrscheinlichkeit der Meßanordnung bekannt sein.

Bei hohen Anforderungen an die Ortsauflösung kann die Lage des Abriebs wie bei der Aktivierungskontrolle durch Autoradiographie bestimmt werden. Die Bestimmung der Abriebmenge aus der Folienschwärzung ist aufwendig. Bei geringeren Anforderungen an die Ortsauflösung genügt ein Ausmessen mit einem Spaltkollimator.

Bild 45 zeigt über dem Mantelwinkel aufgetragen die Impulshäufigkeit, die mit einem 3" x 3" NaJ-Detektor und einem Spaltkollimator bei einem Ni SiC Mantel nach Beendigung der Versuchsreihe gemessen wurde. $Z(\varphi_T)$ ist auf die größte Zählrate Z_{\max} (ohne Untergrund) bei $\varphi_T = 255^\circ$ normiert.

Der auf dem Mantel abgelagerte Anteil des Abriebs beträgt für die ausgemessene Laufbahn $a_{AM} \approx 5\%$ des Abriebs. Die mittlere Nachweiswahrscheinlichkeit für γ -Quanten aus dem Bereich der Lackzone im heißen Bogen beträgt für eine mittlere Energie $\bar{E}_\gamma = 850 \text{ keV}$ $\approx 11\%$ der Nachweiswahrscheinlichkeit für die Meßstelle. Die Ablagerungen führten damit zu einem Fehler von 0,6% des ermittelten Gesamtverschleißes. Wären die Verschleißteilchen bei Versuchen mit einer aktiven Leiste an der selben Stelle abgelagert worden, so würde der Meßfehler bei gleicher Detektoranordnung 1,7% betragen wegen der 3 mal schlechteren Nachweiswahrscheinlichkeit für die rotierende Leiste gegenüber der eingezeichneten Mantelmarkierung. Bei starken Ablagerungen auf der Laufbahn bietet bei Leistenversuchen eine Detektoranordnung im kalten Bogen Vorteile.

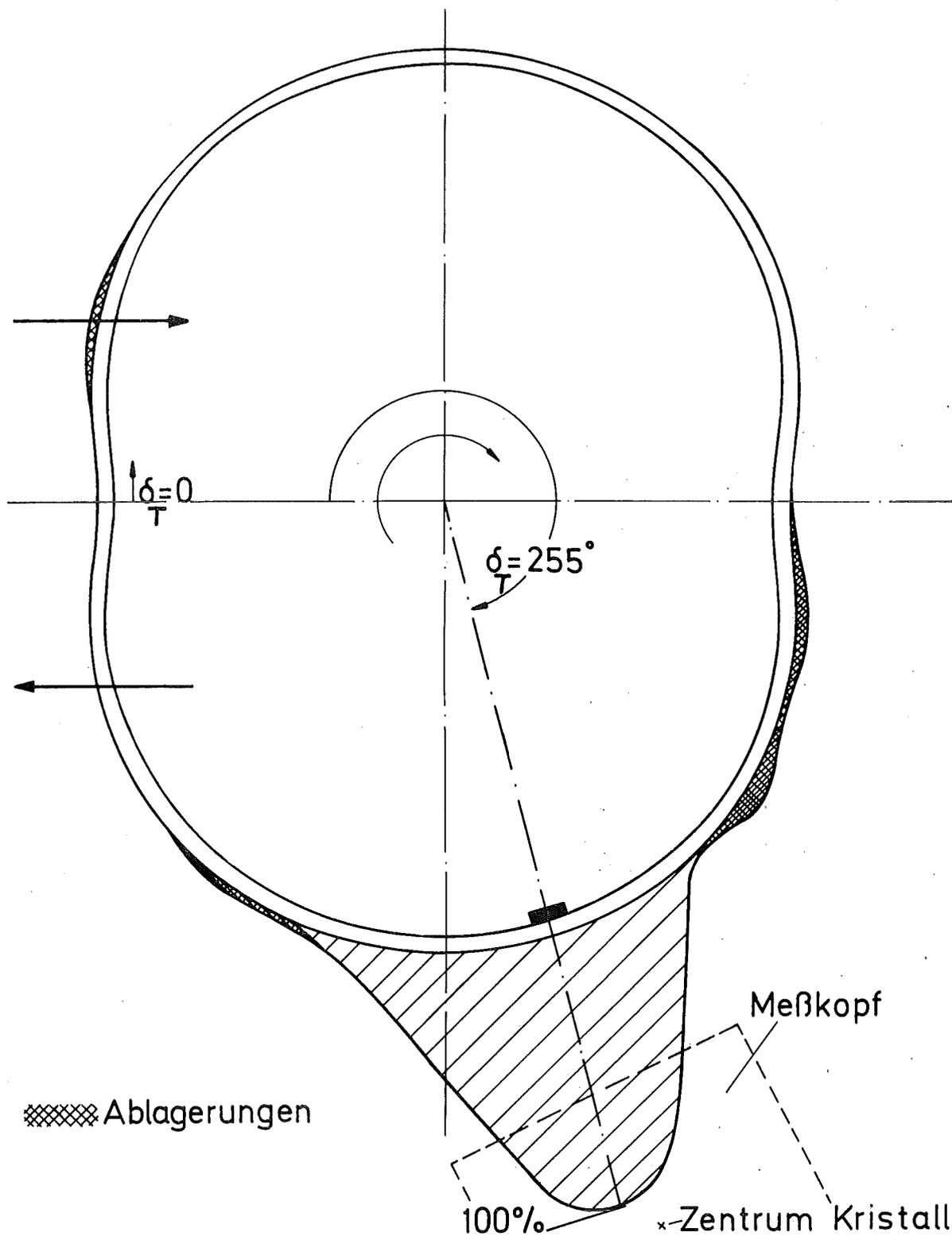


Bild 45: Aktivitätsverteilung nach 50 h Versuchsdauer (Mantel I).
Für Messung mit schlitzförmigem Kollimatorspalt und
3" x 3" NaJ-Detektor

4. V E R S C H L E I S S M E S S U N G E N A N K R E I S K O L B E N M O T O R E N

4.1 Schmierung und Verschleiß beim Kreiskolbenmotor

4.1.1 Grundsätzliches Verschleißverhalten des Kreiskolbenmotors

Die wichtigsten Verschleißprobleme bei Kreiskolbenmotoren treten an den Reibpartnern Leiste und Mantellaufbahn auf. Ausbrüche der Laufbahnbeschichtung führen zur Zerstörung der Maschine (33), Verschleiß der Gasdichtung führt zu Leistungsverlust und erhöhtem Kraftstoffverbrauch (34) bis hin zum Ausfall der Maschine durch ungenügende Verdichtung beim Anlassen.

Welcher Mechanismus zur Entstehung der sogenannten Rattermarken auf der Mantellauffläche führt, die vor allem bei Verwendung von metallischen Dichtleisten im heißen Bogen beobachtet werden konnten, ist nicht eindeutig geklärt (35,36,37,38,39,40). Als Grund für das Abheben und anschließende heftige Aufschlagen der Leiste werden Reibschwingungen angenommen. Ihre Auslösung wird zurückgeführt auf die Kräftebilanz an der Dichtleiste mit Berücksichtigung der Reibung an der Haupt- und Nebendichtfläche oder auf ein Schieben und Überspringen von Öl- und Verbrennungsrückständen. Bei der ersten Erklärung wird ein stick-slip ähnlicher Vorgang bei mangelnder Schmierung vorausgesetzt. An einem Versuchsmotor Ka 3:2 mit feststehenden Dichtleisten wurde bei großen Druckdifferenzen zwischen zwei Brennräumen ein Abheben der Leisten von der Laufbahn beobachtet (41). Die durch Rattermarken gefährdeten Bereiche im Wankelmotor 2:3 weisen ebenfalls hohe Differenzdrücke beim Überstreichen durch die Leiste auf. Bei den heute verwendeten Materialpaarungen für Leiste und Trochoide treten bei serienmäßig gefertigten Motoren i.a. nur sogenannten Rattermarken-Schatten auf. Dabei handelt es sich um Mikrowelligkeiten von wenigen um, die nicht lebensdauerbegrenzend sind.

Dreiteilige Gliederleisten mit Eckstücken aus Kolbenringguß und Hartmetallmitteleil führen zu ungleichmäßigem Mantelverschleiß, zur sogenannten "Eisenbahnschienen"-Bildung (34), die die Gasdichtheit zwischen zwei Brennräumen verschlechtert.

Der Laufbahnverschleiß hat ein breites Maximum im heißen Bogen bei 255° Exzenterwinkel (vom Zünd-OT gemessen). In Abhängigkeit vom Leistenmaterial kann auch im kalten Bogen hoher Laufbahnverschleiß auftreten (40,42,43, vgl. Kap. 4.4.2). Bei einem Mantelwinkel von $\delta_T = 155^{\circ}$ ist die Belastung durch Feder-, Massen- und Gaskraft hoch und die verschleißmindernde Schwenkbewegung der Leiste (43) in der Nähe des Wendepunktes gering. Neben hohem Laufbahnverschleiß können dadurch Freßerscheinungen an der vorlaufenden Leistenkuppe auftreten, die zur Ausbildung der sogenannten Dachfase führen.

Bei Werkstoffpaarungen mit geringer Freßneigung bleibt der Kuppenradius erhalten. Die entlang der Firstlinie gemittelte Höhenabnahme und der Gewichtsverlust einer Leiste sind proportional (37).

Die Schmierbedingungen für die Dichtleiste sind wenig geklärt. Die Verschleißgeschwindigkeiten von Leiste und Mantellaufbahn sind stark abhängig von der Härte und den Gleiteigenschaften der Reibpartner, der Einfluß der Viskosität des Schmieröls ist gering (46,47). Aus den Schmieröluntersuchungen zahlreicher Mineralölfirmer (34,39,46,48,49,50,51) und Dichtteilehersteller (36,41) wird geschlossen, daß die Dichtleisten im Mischreibungsgebiet arbeiten.

Versuche mit dem Wankelmotor Typ B (vgl. Kap. 4.2), bei dem durch die Konstruktion der Öldichtung sichergestellt ist, daß weit über die gefahrenen Drehzahlen hinaus kein Öl aus dem Kolbenbereich in den Brennraum gelangt und damit für die Leisten-schmierung zur Verfügung stehen könnte, zeigen einen Einfluß der Verschleißgeschwindigkeit der Leiste vom Dosierölstrom (vgl. Kap. 4.4.1) nur für Ölmengen $< \approx 50 \text{ g/h} \cdot \text{Scheibe}$. Unter der Annahme, daß die mit dem Kraftstoff zugeführte Ölmenge sich auf der zu schmierenden Fläche gleichmäßig verteilt und nach einem Umlauf der Leiste verbraucht ist bzw. durch die Auslaßöffnung verloren geht, würde die Dicke des Ölfilms sich zwischen $10^{-3} \mu\text{m}$ und $10^{-2} \mu\text{m}$ einstellen. Bei einer Rauhtiefe der Trochoide von $R_t \approx 0,5 \mu\text{m}$ kann ein so dünner Film weder einen Schmierkeil aufbauen noch seine Dichtaufgabe (33) erfüllen. Daraus folgt, daß sich ein Ölfilm

unbekannter Dicke einstellt, der weder durch die Leiste abgeschabt noch durch die Verbrennung zerstört wird. Bei den mit Motor B durchgeführten Versuchen war die zum Aufrechterhalten des Ölfilms notwendige Frischölmenge weitgehend unabhängig von der Drehzahl, d.h. der mechanische Austrag durch die Dichtleiste war klein gegenüber dem Verlust durch die thermische Beanspruchung. Neuere Untersuchungen (52,53), bei denen eine Abhängigkeit des Leistenverschleißes vom Flüchtigkeitsverhalten und die Überlegenheit synthetischer Öle festgestellt worden sind, deuten in dieselbe Richtung.

Die mit Motor A und IKA-Dichtleisten gewonnenen Ergebnisse (vgl. Kap. 4.4.1 und (4)) über das Verschleißverhalten im Betriebskennfeld bei unterschiedlichen Kühlmitteltemperaturen bestätigten sich bei allen eingesetzten Materialien für Leiste und Mantel und unabhängig vom Motortyp. Danach fällt die Vollastverschleißgeschwindigkeit monoton mit steigender Kühlmitteltemperatur im Bereich $35^{\circ}\text{C} \leq T_{KA} \leq 100^{\circ}\text{C}$ um mehr als eine Größenordnung. Sie ist unabhängig vom Verschleißweg und nimmt mit der Anpreßkraft der Leiste stark zu. Die vereinzelt nachgewiesenen höheren Werte der Verschleißgeschwindigkeit bei hohen Kühlmitteltemperaturen traten nur bei unsauberem Lauf des Motors auf.

4.1.2 Wahl eines geeigneten RNT-Verschleißmeßverfahrens

Die Verschleißgeschwindigkeiten bei Nennleistung und Normalbetrieb von $5 \mu\text{m}/1000 \text{ h} < \dot{V} < 500 \mu\text{m}/1000 \text{ h}$ je nach Bauteil und Werkstoff decken den von Hubkolbenmotoren bekannten Bereich ab (vgl. Bild 12). Im Gegensatz zum Hubkolbenmotor mit Tauchschmierung gibt es bei Kreiskolbenmotoren kein Öldichtsystem, das eine kontrollierte Versorgung der Gasdichtung mit Schmieröl und einen Austausch des mit Verbrennungsprodukten und Verschleiß beladenen Öls mit dem Frischöl im Sumpf gewährleistet. Obwohl bei Motor C abhängig von den Betriebsbedingungen Hinweise für einen teilweisen Ölaustausch gefunden wurden, können daher bei Kreiskolbenmotoren Verschleißmessungen an Dichtleiste und Laufbahn nicht nach dem Durchflußmeßverfahren durchgeführt werden.

Bei Ansaugluftmengen bis zu 250 m^3 Luft/h · Scheibe liegen die Gewichtsanteile des Leisten- und Mantelverschleißes im Abgas bei wenigen ppb. Der abgetragene Verschleiß kann deshalb nur über aufwendige Filtermeßverfahren direkt im Abgas oder über die Restaktivität des Bauteils nach dem DDV nachgewiesen werden.

Die Erprobung des DDV am Wankelmotor hat gegenüber der Verwendung einer speziellen Verschleißmaschine (z.B. Stift-Scheibe-Maschine o.ä.) den Vorteil, daß neben der Verschleißgeschwindigkeit, die durch die Wahl der Werkstoffe und der Betriebsbedingungen bei den Versuchsmotoren über den geforderten Anwendungsbereich hinaus verändert werden konnte, auch die Einsatzbedingungen wirklichkeitsgerecht sind. Weiter wurden in den letzten Jahren an vielen Stellen konventionelle Verschleißmessungen an Kreiskolbenmotoren durchgeführt (vgl. Kap. 4.1.1), so daß die mit dem DDV gewonnenen Ergebnisse einen unmittelbaren Beitrag zur Lösung eines Problems der Motorenbaupraxis leisten konnten.

4.2 Versuchsprogramm und Versuchsträger

4.2.1 Ziel der Messungen und Versuchsprogramm

Die Wahl des Versuchsträgers ermöglicht es, bei den Messungen gleichzeitig zwei Ziele zu verfolgen:

1. Entwicklung und Erprobung des DDV
2. Erforschung wichtiger Parameter für das Verschleißverhalten von Kreiskolbenmotoren mit metallischen Dichtleisten.

Dieser Reihenfolge entsprechend wurde das Versuchsprogramm (Bild 46) so aufgebaut, daß die Messungen typische Beispiele für Aktivierung, Spektrometrie, Einsatzbereich und Leistungsfähigkeit des Verfahrens enthalten. Dagegen wurde die vollständige Untersuchung der Einflüsse einzelner Parameter abgebrochen, wenn der grundsätzliche Einfluß auf das Verschleißverhalten ermittelt war und die weiteren Messungen keinen zusätzlichen Beitrag zur Verfahrensentwicklung versprachen.

Die folgenden typischen Probleme aus der Anwendung des DDV wurden bei den Messungen untersucht:

Bild 46: Versuchsprogramm zur Erprobung des Differenz-
 verfahrens
 Numerierung der Verschleißteile siehe Bild 48

| | | | "1-Komponenten-Versuche" | | | "2-Komponenten-Versuche" | | | |
|--------------------|-------------|--------------------------------|--|---|------------------|---------------------------|-----|--|----------------|
| | | | Nr. | Versuchsziel | Bereich | Verschleißteil | Nr. | Versuchsziel | Verschleißteil |
| Prüfstandsversuche | Leiste | 1 | Temperatureinfluß | $35^{\circ}\text{C} \leq T_{KA} \leq 100^{\circ}\text{C}$ | 3,4 | Mantel/Mantel | 7 | $\dot{V} = f(\text{Dosieröl})^+$ im kalten und warmen Bogen $T_{KA} = 40^{\circ}\text{C}$ 3000 min^{-1} $p_{me} = 11 \text{ bar}$ | I |
| | | 2 | Ölmenge | $10 \div 100 \text{ mg}/1000 \text{ min}^{-1} \cdot h \cdot \text{Scheibe}$ | 4 | | | | |
| | | 3 | Betriebskennfeld | $1500 \leq n \leq 6000 \text{ min}^{-1}$ $3 < p_{me} < 9 \text{ bar}$ | 1 | | | | |
| | Mantel | 4 | Temperatureinfluß | $35^{\circ}\text{C} \leq T_{KA} \leq 100^{\circ}\text{C}$ | II, III | Leiste/Mantel | 8 | \dot{V} grob für beide Verschleißpartner 1500 min^{-1} $p_{me} = 8 \text{ bar}$ $T_{KA} = 37^{\circ}\text{C}$ | 3, II |
| | | 5 | Kalt-Heiß-Test | $15^{\circ}\text{C} \leq T_{KA} < 100^{\circ}\text{C}$ | II | | | | |
| | | 6 | Betriebskennfeld | $2000 \leq n \leq 6000 \text{ min}^{-1}$ $4 < p_{me} < 11 \text{ bar}$ | I | | | | |
| Fahrzeugversuche | "Kaltstart" | | | | "Heißverschleiß" | | | | |
| | 9 | Verschleiß bei kalter Maschine | $2^{\circ}\text{C} \leq T_{KA} < 70^{\circ}\text{C}$ | 1 | 10 | Verschleiß im Fahrbetrieb | 1 | | |

⁺ wegen einer Leckage an der Öldichtung war eine Zuordnung zum Öldurchsatz nicht möglich

1. Aktivierung: Aktivierbarkeit mit p, α , d, z.B. Hartmetall, Oxidkeramik, Nitridkeramik.
Halbwertszeitkorrektur und Meßbereich bei Isotopengemischen (Ferrotitanit, Elnisil).
Einfluß von Strahlaufweitung und Krümmungsradius der Oberfläche auf die Tiefenverteilung.
2. Spektrometrie: Behandlung von einfachen (III) und zusammengesetzten (3) Spektren.
Messung an feststehenden Teilen (Mantel).
Messung an bewegten Teilen (Dichtleiste).
3. Leistungsfähigkeit: Auflösung bei 1- und 2-Komponentenmessungen.
Kleine Verschleißgeschwindigkeit und kurze Halbwertszeit (III).
4. Einsatzbereich: Messungen am Prüfstand und während des Straßenbetriebs (mobiles Meßsystem).

Gleichzeitig umfaßt das Versuchsprogramm Messungen mit den augenblicklich wichtigsten Werkstoffen für Dichtleiste (Spezialguß und Sintermetalle) und Mantel (Nickel- und Chromlaufflächen), die grundsätzliche Aussagen ermöglichen über den Einfluß der Betriebskenngrößen Kühlmitteltemperatur, Schmieröldurchsatz, Drehzahl und mittlerer Arbeitsdruck.

4.2.2 Versuchsmotoren und Verschleißteile

Versuchsträger waren für den PKW-Einsatz gebaute 1- und 2-Scheiben-Kreiskolbenmotoren mit den in Bild 47 aufgeführten Kenngrößen.

Motor A wurde nur für Messungen an IKA-3-Leisten eingesetzt und später durch den Serienmotor B ersetzt, mit dem Versuche mit unterschiedlichen Leisten- und Laufbahnmaterialien durchgeführt wurden und der einen besseren Vergleich der Ergebnisse mit konventionell ausgewerteten Messungen an anderen Stellen ermöglichte.

| Motor | Motorleistung kW bei min^{-1} | Kammer- volumen in cm^3 | Benzin- zufuhr | Öl- dichtung | effektive Verdichtung | k- Faktor | Scheiben- breite in mm | \bar{a}_T in mm |
|-------|---|--|-------------------------|-----------------|--------------------------|--------------|------------------------------|----------------------|
| A | 36/5500 | 497,5 x 1 | Vergaser | Kolben- ring | 9,0 | 7,3 | 68 | 2,0 |
| B | 85/6000 | 497,5 x 2 | | | 9,0 | 7,3 | 68 | 2,0 |
| C | 105/6500 | 602 x 2 | Direktein- spritzung | Kratz- ring | 9,42 | 6,86 | 75 | 4,0 |

Bild 47: Kenngrößen der Versuchsmotoren

Von Motor C wurden nacheinander verschiedene Baustufen gefahren, die im Grundaufbau unverändert blieben. Durch die Konstruktion der Öldichtung (Kratzringe) war eine genaue Ölbilanz für die Gasdichtung nicht möglich. Dieser Motortyp wurde vor allem für die Anpassung des Meßverfahrens an die Messung des Mantelverschleißes verwendet.

Bild 48 gibt einen Überblick über die Versuchsteile, die Kombination der Reibpartner und den so bestückten Versuchsmotor. Die Paarung B II 1 (Versuchsmotor B, Elnisilmantel und aktive Leiste IKA-3) wurde nur für die Straßenversuche eingesetzt (vgl. Kap. 4.5). Alle anderen Kombinationen in Bild 48 wurden auf dem Prüfstand gefahren. Für die Leistentypen 5 bis 7 wurden Probeaktivierungen durchgeführt um die Einsatzmöglichkeit des Verfahrens bei möglichen zukünftigen Werkstoffen zu überprüfen. Einsatzfähige Dichtleisten für Verschleißmessungen standen nicht zur Verfügung. Die Leisten 1 - 3 kamen in der dem jeweiligen Motortyp und -baustufe entsprechenden Ausführung in Spiderteilung und als 3-teilige Gliederleiste zum Einsatz. Die Angaben in Bild 48 beziehen sich dabei immer auf das Mittelteil. Für die Versuche mit Leistentyp 4 wurde ein von der Serie abweichender Kolben verwendet.

Alle Mäntel bestanden aus einer Aluminiumlegierung mit elektrolytisch aufgetragenen Laufsichten von $\approx 300 \mu\text{m}$ Dicke. Die Mäntel I und II hatten ähnliche Laufsichten unterschiedlicher Hersteller. Die SiC-Teilchen sind 1-3 μm groß und gleichmäßig in der Nickelschicht eingelagert ($\approx 200\ 000$ Teilchen pro mm^2). Mantel III mit Hartchrombeschichtung wurde nur in Verbindung mit Leiste 4 gefahren.

4.3 Aktivierung der Versuchsteile

4.3.1 Aktivierung der Dichtleisten

In Bild 49 sind die wichtigsten Daten der Reaktionsprodukte aufgeführt, die bei der Aktivierung der Leistenmaterialien entstehen. Soweit im Text keine weitere Erklärung folgt, wurden die dick umrandeten Reaktionsprodukte als Leitisotop verwendet.

Für die Werkstoffe 5 - 7 ist eine Trennung der im Energie-

| Nr. | Name | Art | Zusammensetzung in Gewichts-% | Härte HRC | Versuchsmotoren | Reibpartner |
|--------------|------|------------------------------|---|----------------------|-----------------|-------------|
| Dichtleisten | 1 | IKA-3 | Spezialgrauguß C 3,6 Si 2,8 Mn 0,8 | 40 | A, B, C | I,II |
| | 2 | Widia GT 20 | Hartmetall WC 85 TiC 3 Co 12 | 74 | C | I |
| | 3 | Ferrotitanit WF | Sintermetall TiC 34,5 C 0,55 Cr 10 Mo 3 Cu 0,8 Fe Rest | 67 | B | II |
| | 4 | IKA | Spezialgrauguß Kuppe umschmelzgehärtet C 3,3 Si 2,3 Mn 0,5 Ni 0,9 Mo 1,3 Cu 1 | Kuppe: 57 Fuß: 28 | B | III |
| | 5 | Ticalox | Oxidkeramik Al ₂ O ₃ 60 TiC 40 | } Probeaktivierungen | | |
| | 6 | heißgepreßtes Siliziumnitrid | Nitridkeramik Si ₃ N ₄ 98 Mg 0 2 | | | |
| | 7 | X-TiC 3 | Hartmetall m. niedrigem spez. Gew. (TiW)C 79 Ni 21 | | 72 | |
| Mäntel | I | Nidur | } Nickel mit Siliziumkarbid Ni 95% SiC 3,5-5% | 54 | C A, B | 1,2 1,3 |
| | II | Elnisil | | | | |
| | III | Hartchrom | elektrolytisch abgeschieden Cr | 65 | B | 4 |

Bild 48: Übersicht über die Versuchsteile und Reibpaarungen
Die Hartmetalleiste wurde als inaktiver Verschleißpartner bei Mantelmessungen eingesetzt.

Bild 49: Reaktionsprodukte bei der Aktivierung der Scheitel-
 leisten. Umrandet: Für die Verschleißbestimmung ver-
 wendete Isotope

| Leiste | Material | Teilchen | δ -Strahler | δ -Energien in keV | Halbwertszeit $T_{1/2}$ in d |
|--------|-----------------|----------|--------------------|----------------------------|---------------------------------|
| 1 | IKA-3 | d | ^{54}Mn | 835 | 303 |
| | | | ^{56}Co | 511, 847, 1040, 1240, 1760 | 77 |
| | | | ^{57}Co | 122, 136, 692 | 270 |
| | | | ^{58}Co | 511, 810 | 71 |
| 3 | Ferrotitanit WF | d | ^{46}Sc | 889, 1120 | 84 |
| | | | ^{48}V | 511, 945, 983, 1312 | 16,2 |
| | | | ^{51}Cr | 320 | 27,8 |
| | | | ^{52}Mn | 511, 744, 935, 1434 | 5,6 |
| | | | ^{54}Mn | 835 | 300 |
| | | | ^{56}Co | 511, 847, 1040, 1240, 1760 | 77 |
| | | | ^{57}Co | 122, 136, 692 | 270 |
| 4 | IKA | p | ^{52}Mn | 511, 744, 935, 1434 | 5,6 |
| | | | ^{56}Co | 511, 847, 1040, 1240, 1760 | 77 |
| | | | ^{57}Co | 122, 136, 692 | 270 |
| 5 | Ticalox | p | ^{48}Sc | 983, 1040, 1314 | 1,8 |
| | | | ^{48}V | 511, 945, 983, 1312 | 16,2 |
| 6 | Siliziumnitrid | α | ^7Be | 477 | 53,4 |
| 7 | X Ti C 3 | α | ^{48}Sc | 983, 1040, 1314 | 1,8 |
| | | | ^{48}V | 511, 945, 983, 1312 | 16,2 |

spektrum überlagerten Isotope durch Abklingenlassen der kurzlebigen Isotope vor dem Versuchsbeginn möglich. Bei Werkstoff 2 scheidet diese Möglichkeit aus wegen des ungünstigen Verhältnisses der Halbwertszeiten der wichtigsten Isotope ($T_{1/2}^{56\text{Co}}/T_{1/2}^{48\text{V}} < 5$) und der erforderlichen langen Abklingzeit von ≈ 100 Tagen. Für die Versuche wurde die im Meßfenster nachgewiesene Strahlung von ^{48}V und ^{56}Co entsprechend Kap. 3.3.2 wie von einem einzigen Isotop ausgehend behandelt. Die Versuche wurden auf den schmäleren linearen Meßbereich von ^{48}V begrenzt.

Um bei Betriebszuständen und Materialpaarungen mit der Gefahr von Freißverschleiß die Höhenabnahme der Leiste richtig zu bestimmen, wurde ein schmaler Firststreifen entlang der Kuppenmitte bestrahlt (vgl. Bild 35), der bei Dachfasenbildung nicht erreicht wird. Bei den Leisten 1 und 3 mit einem Kuppenradius $r_K = 4$ mm betrug die Breite der aktiven Fläche $b = 2$ mm, bei Leiste 4 mit $r_K = 2$ mm war $b = 1$ mm. Nach Bild 32 ist der Winkel $\vartheta(b, r)$, den die Normalprojektion des Teilchenstrahls mit der Leistenoberfläche bildet, $75,5^\circ \leq \vartheta \leq 90^\circ$ für die Leisten 1 und 3 und $80,4^\circ \leq \vartheta \leq 90^\circ$ für Leiste 4. Die Verkürzung der Eindringtiefe normal zur Werkstückoberfläche s_R für einen Randstrahl bezogen auf den Mittelpunktstrahl beträgt 3,2% bzw. 1,4%.

Im Normalbetrieb bleibt trotz der Höhenabnahme der Leiste der Kuppenradius r_K erhalten. Dies gilt auch für Motor B, bei dem die Leiste aufgrund des Unterschieds zwischen Kuppenradius und Äquidistantenabstand a_T der Lauffläche zur Trochoide ($r_K = 2 a_T$) Radialbewegungen in ihrer Nut ausführt. In diesem Fall hat der Verschleiß eine Verschiebung des Leistenprofils in Richtung der Normalenprojektion des Teilchenstrahls zur Folge, d.h. der Winkel $\vartheta(b, r)$ hat keinen Einfluß auf die Ausdehnung der Tiefenverteilung in Verschleißrichtung.

Die Einstelldaten der Leistenaktivierungen gehen aus Bild 50 hervor. Die unterschiedlichen Bestrahlungswinkel ergeben sich aus den Verschleißtiefen, die für das jeweils geplante Versuchsprogramm erwartet wurden. Der extrem kleine Bestrahlungswinkel von $\alpha_0 = 5^\circ$ bei Leiste 3, den die besonderen Versuchsbedingungen erforderlich machten (vgl. Kap. 4.4.2), erfordert großen Aufwand für die Aus-

| Leiste | Bestrahlungswinkel α_0 | Teilchen-Energie (E_M in MeV) | Abdeckung in μm | Eichung | rechnerische Bestrahlungstiefe s_R in μm | Länge des Meßbereichs s_M in μm |
|--------|----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|--|--|--|
| 1 | 15° | d (50,6) | 600 Fe unter | 15° Folie $3 \times 10 \mu\text{m}$ | 110 | 70 |
| 3 | 5° | p (25,2) | 2480 Alu senkr. | Eichstift | 16 | 10 |
| 4 | 29° | p (25,2) | 455 Fe unter | 29° Folie $3 \times 10 \mu\text{m}$ | 135 | 85 |

Bild 50: Einstelldaten für die Leistenaktivierungen

richtung des Targets und setzt eine targetfeste Zieleinrichtung nach Bild 35 voraus. Für die Tiefeneichung muß ein mitbestrahlter Stift aus dem Leistenmaterial abgeschliffen werden. Um eine Strahlaufweitung in der Luftstrecke zwischen Bremsschicht und Leistenoberfläche zu vermeiden, stellte bei dieser Bestrahlung die allgemein weniger günstige Anordnung nach Fall 2, Bild 20, die beste Lösung dar. Die übrigen Leistenaktivierungen entsprachen in ihrem Aufbau Fall 4 (vgl. Kap. 3.1.2). Bei allen Bestrahlungen waren die Leisten eng in einen Aluminiumträger eingepaßt, der mit einem Gebläse gekühlt wurde.

4.3.2 Aktivierung der Mantellaufbahn

Bild 51 zeigt die bei den Mantelaktivierungen entstandenen Radionuklide. Die Unterschiede zwischen Werkstoff I und II bestehen hauptsächlich in der Gleichmäßigkeit und der Einlagerungsdichte der Siliziumkarbidteilchen. Da die für Verschleißmessungen nutzbaren Nuklide ausschließlich aus dem Nickelanteil gebildet werden, besteht kein Unterschied zwischen den γ -Spektren der Schichten I und II.

Die Tiefenverteilungskurven von ^{57}Co nach Deuteronenbeschuß und von der Summe der γ -Quanten von ^{56}Co und ^{58}Co im Energiebereich $500 \text{ keV} < E_{\gamma} \leq 1800 \text{ keV}$ nach α -Bestrahlung (mit $3'' \times 3''$ NaJ-Kristall gemessen) haben einen S-förmigen Verlauf, der im Bereich des Wendepunktes einen hinreichend großen linearen Meßbereich ermöglicht. Die Peaks von ^{56}Co bei 847 keV und ^{58}Co bei 810 keV können bei der verwendeten Spektrometeranordnung nicht getrennt werden. Die Ausnutzung der linearen Meßbereiche von jeweils nur einem Isotop ist nicht möglich. Für die γ -Spektrometrie bietet der Energiebereich von $^{56}\text{Co}/^{58}\text{Co}$ Vorteile gegenüber demjenigen von ^{57}Co (vgl. Kap. 2.1.2). Alle Mantelschichten der Typen I und II wurden deshalb mit α -Teilchen aktiviert.

Die Laufschrift III wurde mit Protonen bestrahlt. Die Messungen wurden mit ^{52}Mn durchgeführt.

Bild 52 zeigt die Lage der aktiven Markierung bei den Mantelwinkeln $\delta_{\text{TK}} = 155^{\circ}$ (Meßstelle 1, kalter Bogen) und $\delta_{\text{TW}} = 255^{\circ}$ (Meßstelle 2, warmer Bogen) in den Zonen größten Mantelverschleißes

| Mantel Nr. | Material der Laufschrift | Teilchen | δ -Strahler | γ -Energien in keV | Halbwertszeit $T_{1/2}$ in d | |
|------------|--------------------------|----------|--------------------|---------------------------|------------------------------|------|
| I, II | Nidur, Elnisil | α | { | ^{56}Co | 511, 847, 1040, 1240, 1760 | 77 |
| | | | | ^{57}Co | 122, 136, 692 | 270 |
| | | | | ^{58}Co | 511, 810 | 71 |
| III | Hartchrom | p | { | ^{51}Cr | 320 | 27,8 |
| | | | | ^{52}Mn | 511, 744, 935, 1434 | 5,6 |

Bild 51: Reaktionsprodukte bei der Aktivierung der Mantellaufschriften

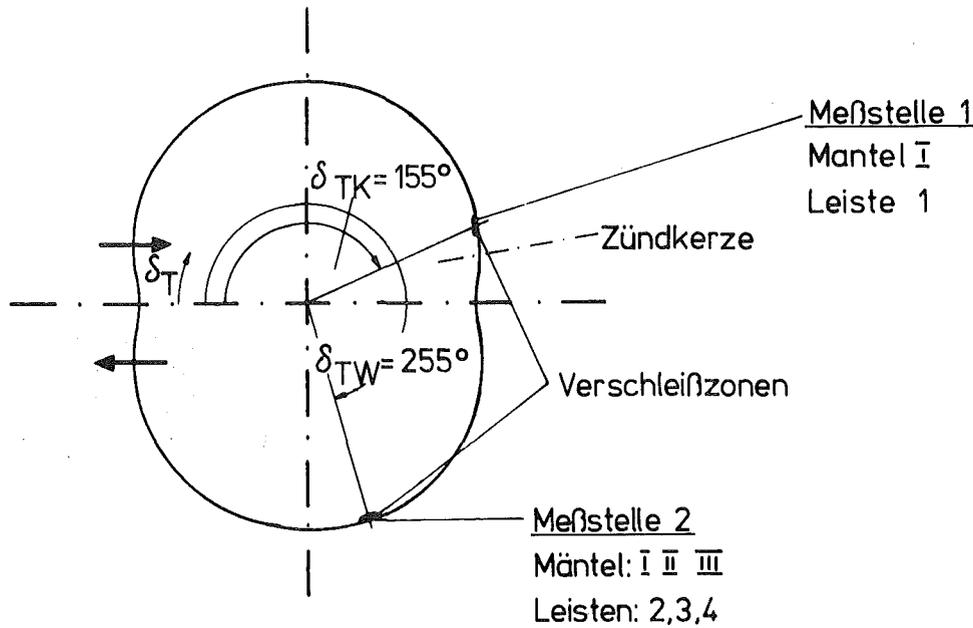


Bild 52: Lage der aktiven Markierungen an den Mänteln I, II und III

(Bezeichnungen nach (54)). Mit der Mantellaufschicht I wurden gleichzeitige Messungen an beiden Meßstellen vorgenommen (vgl. Kap. 4.4.2), bei den Mänteln II und III wurde der Verschleiß an Meßstelle 2 verfolgt.

Die bestrahlte Fläche wurde von 4 cm^2 bei Mantel I auf ein Quadrat mit 16 cm^2 bei den Mänteln II und III vergrößert. Die Mäntel wurden nicht über die ganze Breite aktiviert um im Falle von Schienenbildung nur den durch das Leistenmittellteil hervorgerufenen Verschleiß zu erfassen. Für die Mäntel I und II wurde bei einem Bestrahlungswinkel $\alpha_0 = 15^\circ$ die Anordnung 4 nach Bild 20 gewählt, für den Mantel III bei $\alpha_0 = 10^\circ$ die Anordnung 1, da keine dünnen Chromfolien für die Eichung verfügbar waren.

4.4 Prüfstandsversuche

4.4.1 Einkomponentenversuche

4.4.1.1 Verschleißteil Dichtleiste

Bild 53 zeigt den Höhenverschleiß der Leisten 3 und 4 jeweils bezogen auf die Verschleißgeschwindigkeit im betriebswarmen

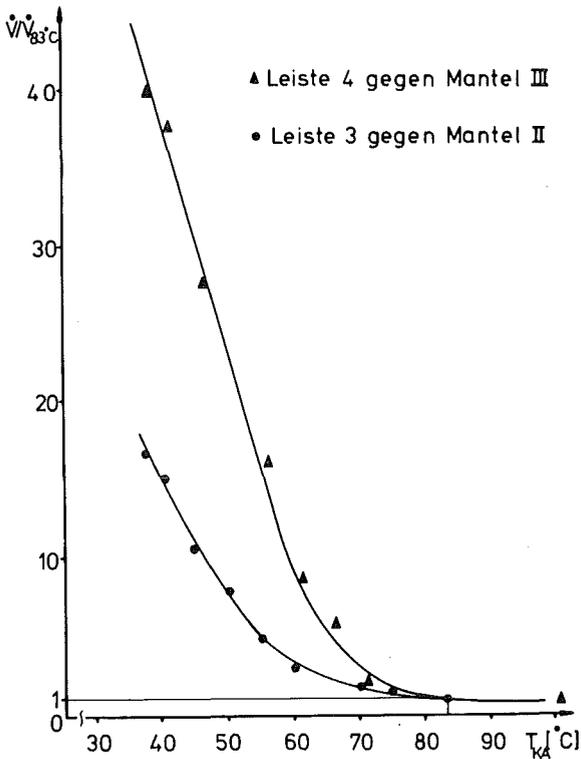


Bild 53: Verschleiß der Leisten 3 und 4 bezogen auf die Verschleißgeschwindigkeit im betriebswarmen Motor ($T_{KA} = 83^{\circ}\text{C}$)

Motor ($T_{KA} = 83^{\circ}\text{C}$). Beide Kurven zeigen eine starke Abhängigkeit von der Kühlmitteltemperatur. Ein ähnlicher Verlauf der Verschleißrate zu niedrigen Kühlmitteltemperaturen hin wurde bei den ersten Anwendungen der Radionuklidtechnik an einem 1-Zylinder-Versuchsdieselmotor gemessen. Als Ursache wird in (55) korrosiver Verschleiß angegeben, ausgelöst durch schwefelhaltige Kraftstoffbestandteile nach Unterschreiten des Taupunkts bei Kühlmitteltemperaturen unter 45°C . Der Verschleißanstieg beim Leistentyp 3 erfolgt allmählicher als bei Leiste 4 und ist zu tieferen Temperaturen hin verschoben. Oberhalb der Betriebstemperatur von 83°C nimmt die Verschleißrate weiter ab. Voraussetzung dafür ist, daß die erhöhte Kühlmitteltemperatur bei sauberem Motorlauf (keine Glühzündungen) durch Drosselung der Kühlung hervorgerufen wird. Eine im Fahrbetrieb unter Vollast mögliche Erhöhung der Kühlmitteltemperatur über den vorgesehenen Betriebspunkt hinaus hat ihre Ursache meist in Unregelmäßigkeiten in der Verbrennung (z.B. durch Glühzündungen an heißen Rückständen auf der Zündkerze). Dieser Betrieb führt zu einem deutlichen Verschleißanstieg (vgl. Kap. 4.5.2). Auf dem Prüfstand kann auch bei hohen Manteltemperaturen die Kühlmitteltemperatur konstant gehalten und die Motorfunktion über Man-

teltemperatur- und Leistungsmessung kontrolliert werden. Dabei ergab eine Erhöhung der Kühlmitteltemperatur trotz damit ansteigender Manteltemperatur einen weiteren Rückgang der Verschleißgeschwindigkeit. Dagegen waren eine schlechte Verbrennung, die durch den Einbau neuer Zündkerzen beseitigt werden konnte, häufig nicht durch Änderung der Manteltemperaturen oder durch deutliche Drehmomentschwankungen sondern an der Abgastemperatur zu erkennen (vgl. (52), Kap.4).

Die absoluten Verschleißwerte von Leiste 3 liegen eine Größenordnung niedriger als die von Leiste 1; Leiste 4 nimmt einen Mittelplatz ein. Die sehr harten Sintermetalleisten sind durch ihre Verschleißfestigkeit vor allem bei überwiegendem Kaltbetrieb vorteilhaft. Obwohl auch hier eine deutliche Temperaturabhängigkeit vorhanden ist, erreicht der Abrieb keine lebensdauerrelevanten Werte. Bei diesem Vergleich muß auf die unterschiedlichen Reibpartner (vgl. Bild 48) und Bauformen hingewiesen werden.

In der zweiten Versuchsreihe wurde die Abhängigkeit der Verschleißgeschwindigkeit von der zugeführten Ölmenge untersucht. Bild 54 zeigt den Vollastverschleiß bei 1500 min^{-1} und 3000 min^{-1}

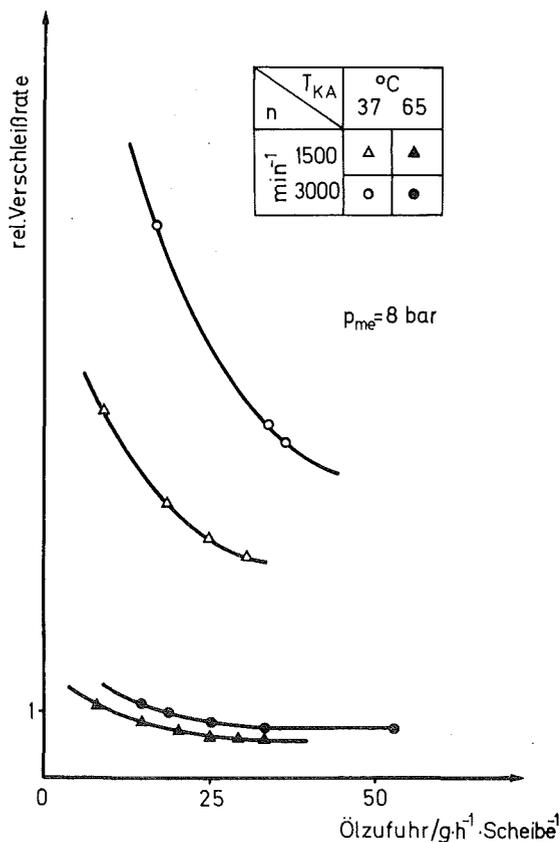


Bild 54: Vollastverschleiß von Leiste 4 in Abhängigkeit von der zugeführten Dosierölmenge bei unterschiedlichen Temperaturen und Drehzahlen

und Kühlmittelaustrittstemperaturen von 37°C und 65°C.

Aus den Kurven für den betriebswarmen Motor geht hervor, daß oberhalb einer Ölmenge von 35 - 40 g/h · Scheibe die Verschleißminderung durch eine z.B. drehzahlproportionale Dosierung der Ölzufuhr nicht wesentlich beeinflusst werden kann. Beim Betrieb des Motors mit einem konstanten Öl-Benzin-Mischungsverhältnis wird bei hohen Drehzahlen zuviel Öl durchgesetzt, dessen Rückstände zu schlechtem Motorlauf führen und damit die Verschleißgeschwindigkeit sogar erhöhen können.

Mit abnehmender Motortemperatur erhöht sich der Mindestölbedarf. Diesem Zusammenhang ist der Einfluß von Temperatur und Drehzahl auf den Absolutwert der Verschleißgeschwindigkeit überlagert. In Bild 55 sind die Meßwerte der Versuchsläufe auf den jeweiligen Betrag bei 35 g Öl/h · Scheibe normiert. Der unterschiedliche Kurvenverlauf für die drei Temperaturen zeigt die

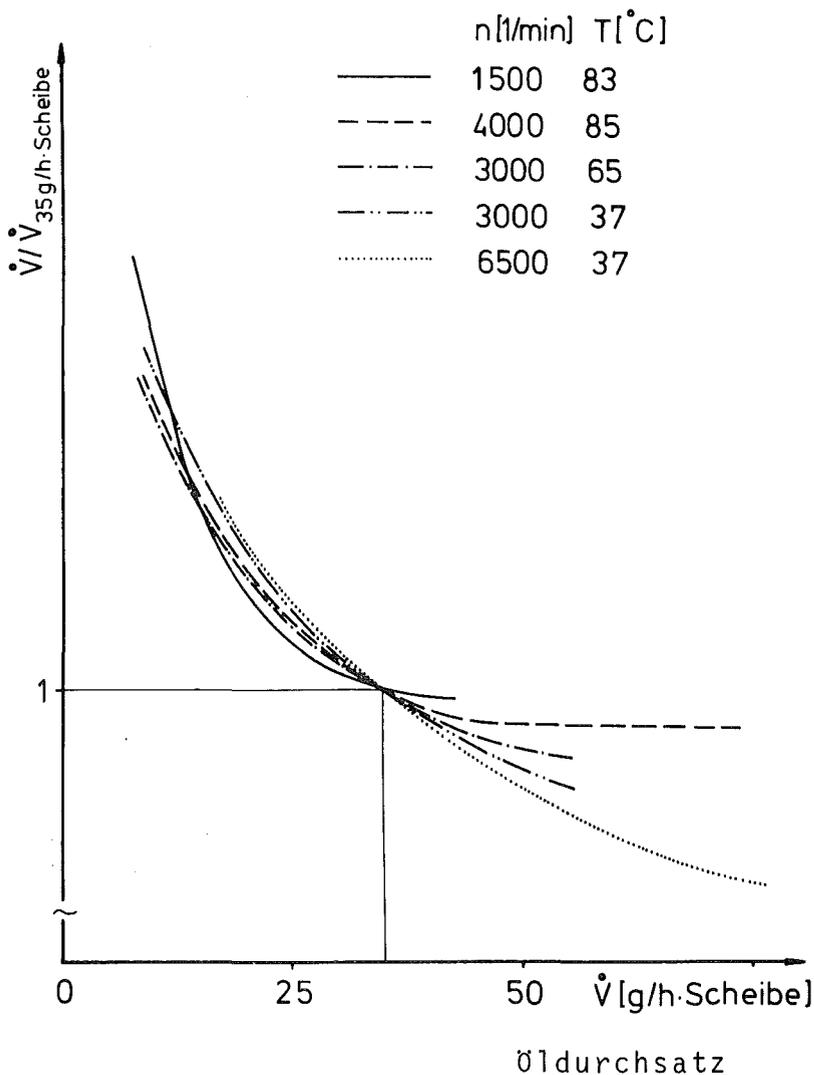


Bild 55: Auf den Einheitsölstrom von 35g/h · Scheibe normierte Verschleißraten (aus Versuch Nr.2 berechnet)

Verschiebung zu höheren Mindestöldurchsätzen.

Für den Schmierzustand der Dichtleiste sind zwei Erklärungen möglich:

1. Die Tragfähigkeit des Ölfilms wird bei niedrigen Motortemperaturen durch Kraftstoffverdünnung und Rückstände verschlechtert. Ein teilweiser Ausgleich durch erhöhte Ölzufuhr ist möglich indem die Qualität des Ölvorrats im Motor verbessert wird.
2. Der Verschleißmechanismus wird bei niedrigen Temperaturen besonders stark beeinflusst von Ölbestandteilen (z.B. Sulfataschebildner bei korrosivem Verschleiß), die in so geringen Anteilen (0,4 bis 0,8 Gewichts-% wegen Glühzündungsgefahr bei Vollast (52,56) vorhanden sind, daß sie vollständig verbraucht werden. Bei einem höheren Öldurchsatz können mehr verschleißfördernde Verbrennungsprodukte neutralisiert werden und dadurch der Verschleißvorgang selbst beeinflusst werden.

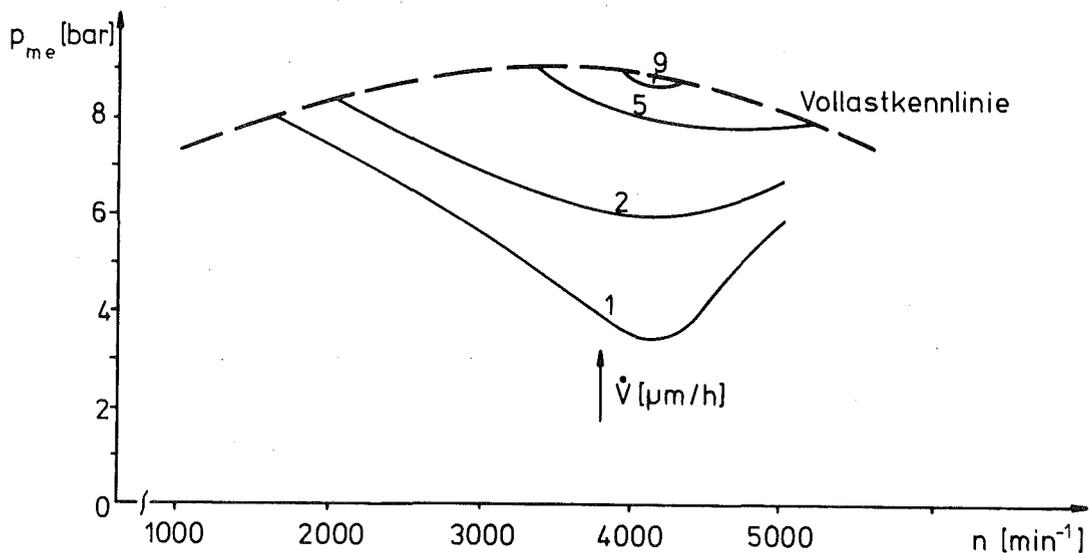


Bild 56: Verschleißkennfeld der Leiste 1 gegen Mantel II,
 $T_{KA} = 830^{\circ}\text{C}$

In Bild 56 sind im Drehzahl-Last-Kennfeld Linien gleicher Verschleißgeschwindigkeit bei betriebswarmer Maschine für Leiste 1 und Motor A aufgetragen (vgl. Bild 61 Mantelverschleiß). Der Verschleiß steigt mit der Drehzahl an bis zu einem Maximum, das mit 4600 min^{-1} zwischen den Drehzahlen für den höchsten mittleren Arbeitsdruck und für die Nennleistung liegt. Bei höheren Drehzahlen nimmt die Verschleißgeschwindigkeit wieder ab. Bei allen Drehzahlen zeigt sich ein starker Einfluß des mittleren Arbeitsdrucks auf den Verschleiß.

Das Verschleißmaximum bei Vollast stimmt ungefähr überein mit der Drehzahl, bei der die Normalkraft auf die Leistenkuppe kurz nach dem Zündtotpunkt (entsprechend den Meßstellen am Mantel, Bild 52) ihren Höchstwert erreicht. Der Verschleißrückgang bei höheren Drehzahlen ist dadurch erklärbar, daß der Einfluß des abnehmenden Gasdrucks den Zuwachs der Leistenbelastung durch die größer werdende Fliehkraft überwiegt. Die Abnahme der Verschleißgeschwindigkeit bei konstantem Arbeitsdruck oberhalb von 4600 min^{-1} zeigt, daß der Verschleiß nicht zum zurückgelegten Reibweg proportional ist. Sie entspricht einer Verbesserung des Schmierfilms durch steigende Differenzgeschwindigkeit der Reibpartner, drehzahlabhängige Öldosierung und abnehmende Normalkraft.

4.4.1.2 Verschleißteil_Mantellaufbahn

In Bild 57 ist der Mantelverschleiß über der Kühlmitteltemperatur aufgetragen. Die Werte sind auf die Verschleißgeschwindigkeiten bei 60°C am Motorausstritt normiert. Beiden Paarungen gemeinsam ist die starke Zunahme des Verschleißes unterhalb von 50°C . Die Hartchromschicht (Mantel III) ist dabei wesentlich verschleißfester: Die Verschleißgeschwindigkeiten liegen eine Größenordnung niedriger als bei Elnisil (Mantel II) und der Temperatureinfluß ist zwischen 35°C und 55°C bis zur Hälfte niedriger als bei Elnisil.

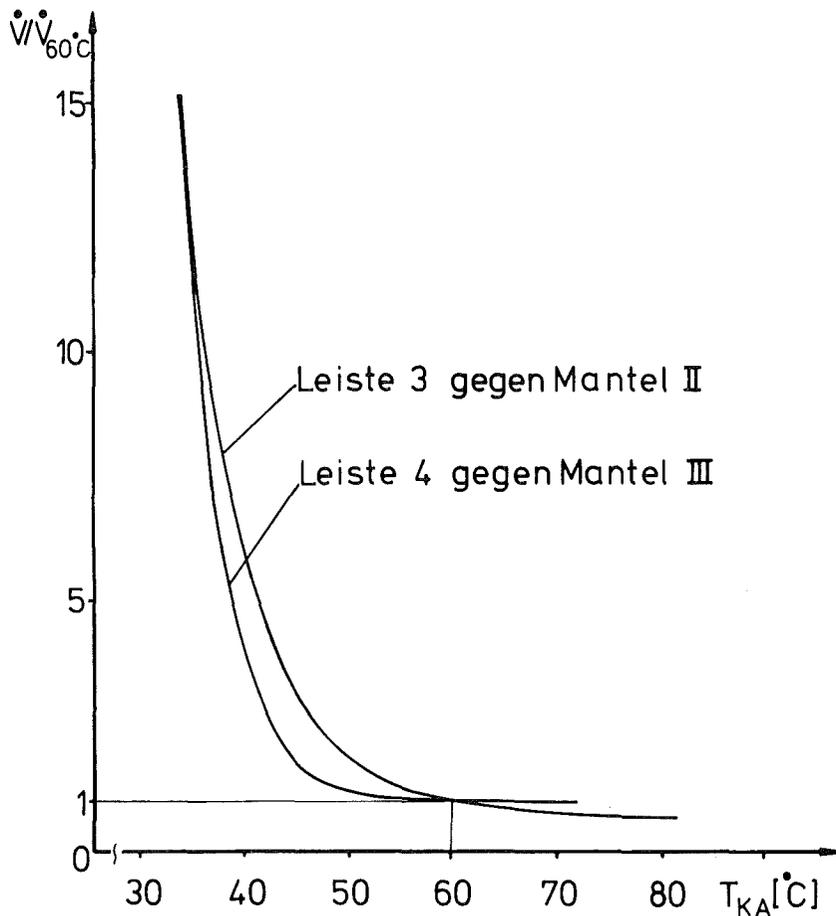


Bild 57: Mantelverschleiß über der Kühlmitteltemperatur, bezogen auf $T_{KA} = 60^\circ\text{C}$

Bild 58 zeigt die gemessenen Absolutwerte. Die eingezeichneten Meßpunkte sind Ergebnisse aus Versuchsläufen mit den aktiven Mäntel III₁ und III₂. Ihre Streuung um die eingezeichnete Kurve ist ein Maß für die Wiederholbarkeit des Versuchs und beinhaltet die Eichfehler der Aktivierungen sowie Montageeinflüsse und Toleranzen des Prüflings.

Mit Verschleißgeschwindigkeiten von $3 \mu\text{m} \div 5 \mu\text{m}/1000 \text{ h}$ im warmen Zustand wurden bei diesen Messungen die Grenzen der Leistungsfähigkeit des Verfahrens erreicht. Während eines Versuchslaufs von 33 h betrug der Abrieb $0,15 \mu\text{m}$ oder 1,95% von s_R . In der gleichen Zeit war die Aktivitätsabnahme durch Kernzerfall beim Meßisotop ^{52}Mn mit 15,5% 80-fach größer. Soll der Fehler durch unvollständige Halbwertszeitkorrektur (vgl. Kap. 3.3.) z.B. weniger als $\pm 25\%$ des Meßergebnisses betragen, so muß die Halbwerts-

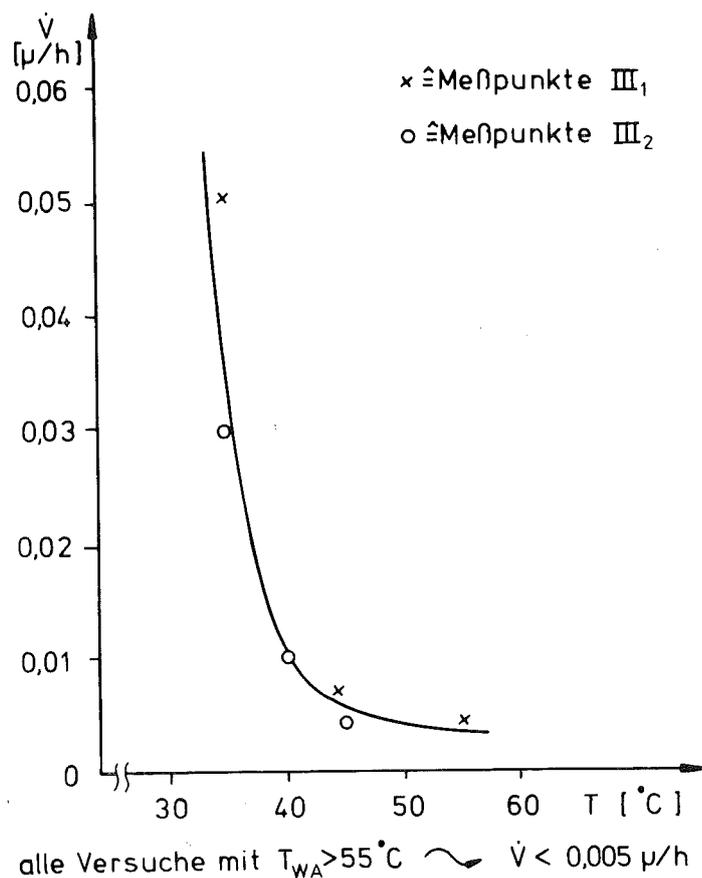


Bild 58: Verschleißgeschwindigkeit über der Kühlmitteltemperatur bei 1500 min^{-1} und Vollast für Mantellaufschicht aus Hartchrom

zeit im vorliegenden Fall auf 28 min oder auf 3,4% genau bekannt sein (durchgezogene bzw. gestrichelte Pfeile in Bild 59; die Konstruktion des Schaubilds wird im Anhang erklärt).

Dieses Beispiel zeigt, daß beim äußersten Ausnutzen der Leistungsfähigkeit des Differenzverfahrens sorgfältig geprüft werden muß, welche Meßunsicherheit das Ergebnis beinhaltet aufgrund der in Kap. 3.3.3 eingeführten Vereinfachungen beim Übergang vom totalen Differential der Aktivität (Gl.16) auf die Bestimmungsgleichung für die Tiefe s (Gl.22). Die Angabe des relativen statistischen Fehlers des Meßergebnisses reicht daher zur Beschreibung des Versuches nicht aus.

Für das angeführte Beispiel wurde in den Versuchspausen die Zählratenabnahme im Meßfenster über jeweils ungefähr 100 Stunden gemessen und daraus die Halbwertszeit für die nachgewiesene Strahlung bestimmt.

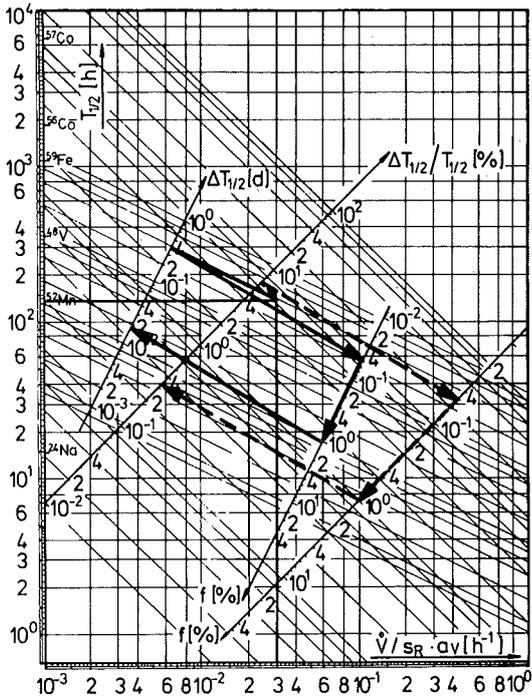


Bild 59: Zulässige Abweichung bei der Bestimmung der Halbwertszeit des Meßisotops bei den Versuchen mit Chrommänteln

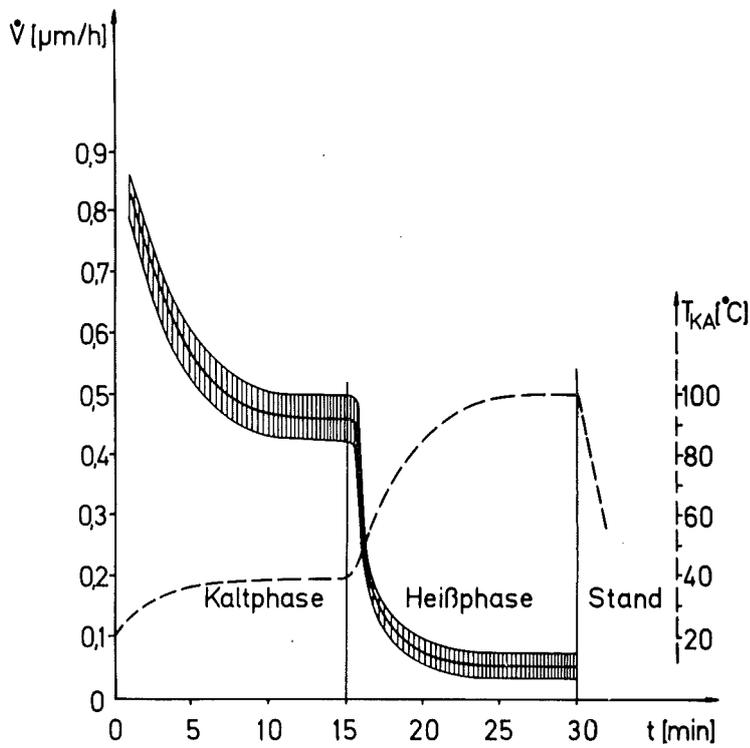


Bild 60: Kühlmitteltemperatur und Verschleißgeschwindigkeit von Mantel II im Kalt-Heiß-Test

Bild 60 zeigt das Ergebnis der mit einer Anordnung nach Bild 14 gefahrenen Versuche Nr. 5 zum Mantelverschleiß im Kalt-Heiß-Test. Der Kurvenverlauf bestätigt die Vermutung aus den vorangegangenen Messungen, daß der auch aus konventionellen Untersuchungen bekannte über den Test gemittelte Wert der Verschleißgeschwindigkeit von $\sim 0,3 \mu\text{m/h}$ wesentlich vom Abrieb im Kaltbetrieb verursacht wird. Das Meßergebnis zeigt, daß der Verschleiß im Kalt-Heiß-Test zu mehr als 90% vom Kaltbetrieb herrührt. Der Anteil aus der Heißphase ($T_{KA} = 100^\circ\text{C}$) ist gering. Die Vorteile des Verfahrens für die Messung von periodisch wiederkehrenden instationären Vorgängen im Multi-Scaling-Betrieb sind hier besonders deutlich erkennbar.

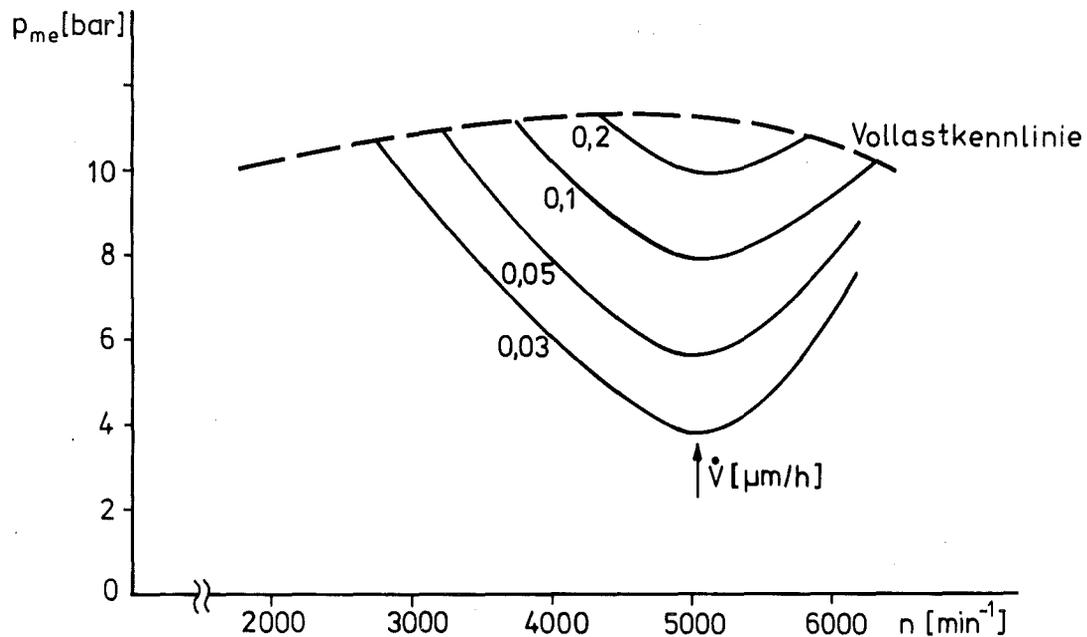


Bild 61: Verschleißkennfeld für Mantel I gegen Leiste 2, betriebswarm

In Bild 61 sind im Drehzahl-Last-Kennfeld die Vollastkurve und Linien gleicher Verschleißgeschwindigkeit eingezeichnet für die Meßstelle 2 im heißen Bogen (Mantel I gegen Leiste 2). Ein

Vergleich mit dem Verschleißkennfeld für die Leiste (vgl. Bild 56) zeigt denselben qualitativen Verlauf. In beiden Fällen ist eine kritische Drehzahl vorhanden, bei der die Verschleißgeschwindigkeit bei einer Verdreifachung des mittleren Arbeitsdrucks um eine Größenordnung wächst. Diese Übereinstimmung trotz der konstruktiven Unterschiede zwischen den Motoren A und C und der unterschiedlichen Werkstoffpaarungen zeigt, daß mit diesen Versuchen das typische Verschleißverhalten von Kreiskolbenmotoren gefunden wurde. Bei derartigen Versuchszielen ist ein entscheidender Vorteil des weiterentwickelten DDV gegenüber konventionellen Verfahren, daß das ganze Kennfeld (20 ÷ 50 Meßpunkte) ohne Zwischenmontage mit einem aktivierten Versuchsteil gefahren werden kann. Für alle Betriebspunkte außerhalb der eingezeichneten Kurvenschar ist die Verschleißgeschwindigkeit kleiner als auf der Grenzkurve, deren Zahlenwert innerhalb der Leistungsfähigkeit des Verfahrens z.B. nach der beabsichtigten Gebrauchsdauer der Maschine festgelegt werden kann.

4.4.2 Zweikomponentenversuche

Durch den starken Einfluß der Meßgeometrie auf die Nachweiswahrscheinlichkeit (vgl. Kap. 2.3.1) der Meßanordnung ermöglicht das DDV auch bei ähnlichen oder identischen \mathcal{A} -Spektren die gleichzeitige Messung an mehreren Stellen desselben Versuchsteils. Diese Eigenschaft wurde ausgenutzt um den Verschleiß im kalten und im warmen Bogen (vgl. Kap. 4.1.1) an derselben Trochoide zu beobachten.

Die Einstreufaktoren ε_{ij} geben das Verhältnis der im Detektor für die Meßstelle j nachgewiesenen Impulse zu denjenigen Impulsen im Detektor für die Meßstelle i an, die von derselben Aktivität i herrühren. Durch aufeinanderfolgende Eichmessungen, bei denen jeweils nur eine Aktivität in allen Detektoren nachgewiesen wird, sind diese Verhältniszahlen mit einem hinreichend geringen statistischen Fehler zu bestimmen. Der relative statistische Fehler der Verschleißmessung kann dann aus der Differenz der Zählraten wie folgt abgeschätzt werden:

$$f = \frac{\delta(Z_{01} - Z_{11})}{Z_{01} - Z_{11}} = \frac{1}{a_{V1} \cdot \sqrt{Z_{01}}} \cdot \sqrt{\frac{(1 + \epsilon_{21} \cdot \epsilon_{12}) (2 - a_{V1}) + 2 \frac{\epsilon_{21}}{k} (2 - a_{V2})}{1 - \epsilon_{12} \cdot \epsilon_{21}}} \quad (25)$$

mit Z_{01} = Zählrate für $t = 0$ von Komponente 1, in Meßstelle 1 nachgewiesen

Z_{02} = Zählrate für $t = 0$ von Komponente 2, in Meßstelle 2 nachgewiesen

$K = \frac{Z_{01}}{Z_{02}}$ = Verhältnis der Netto-Anfangszählraten

a_{V1} = relativer Abrieb der Komponente 1

a_{V2} = relativer Abrieb der Komponente 2

Bei der Versuchsvorbereitung werden Werte für a_{V1} und a_{V2} geschätzt (z.B. Erfahrungswerte aus ähnlichen Versuchen). Mit Gleichung (25) kann die Auswirkung einer Änderung im Versuchsaufbau auf den relativen statistischen Fehler des Meßergebnisses berechnet oder bei Vorgabe einer Fehlerschranke Aktivierungsdaten (Verhältnis der erzeugten Aktivitäten, Tiefe der aktiven Schicht) festgelegt werden.

Als Sonderfall dieses Prinzips ist die gleichzeitige Messung von Dichtleisten- und Mantelverschleiß anzusehen. Die Unterscheidung der Meßstellen beruht auf der periodisch wiederkehrenden Lageänderung der Leiste gegenüber der feststehenden Meßstelle für den Mantelverschleiß.

4.4.2.1 Verschleißmessung im kalten und im warmen Bogen

Für die Verschleißzonen 1 und 2 (vgl. Bild 52) wurden an einem Einscheibenmodell die günstigsten Anordnungen für die Detektoren 1 und 2 bestimmt. (Voraussetzung: $k = 1$, $a_{V1} = a_{V2}$, gleiche λ -Spektren in beiden Verschleißzonen.) Das Koordinatensystem nach Bild 62 läßt eine einfache Optimierung der Einstreufaktoren zu, weil die Einflüsse von Abstand \bar{a}_D zur Quelle, Richtungswinkel α und Schwenkwinkel ψ des Detektors weitgehend unabhängig voneinander erfaßt werden können. Tabelle 1 im Anhang enthält die mit Eichproben bestimmten Einstreufaktoren für eine Auswahl der untersuchten Anbaustellungen (Koordinaten nach Tabelle 2 im Anhang).

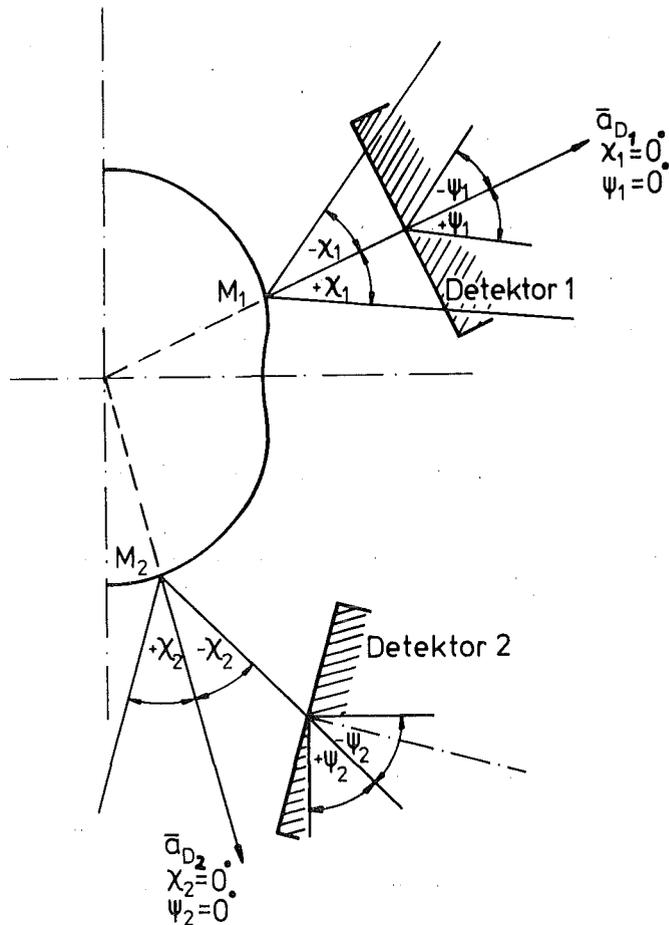


Bild 62: Koordinatensystem zur Anordnung der Meßköpfe für Versuch Nr.7

Da gleiches Verschleißverhalten und gleiche Aktivierung für beide Meßstellen vorausgesetzt wurde, waren gleichmäßig kleine Werte für beide Einstreufaktoren anzustreben. Die besten Ergebnisse brachte die Anbaustellung 27/3 (Tab.1) mit $\epsilon_{12} = 0,0538$ und $\epsilon_{21} = 0,0406$. Die zugehörigen Koordinaten sind:

Detektor 1: $\bar{a}_{D1} = 98,5 \text{ mm}$; $\chi_1 = 35^\circ$; $\psi_1 = 55^\circ$

Detektor 2: $\bar{a}_{D2} = 98,5 \text{ mm}$; $\chi_2 = 0^\circ$; $\psi_2 = -40^\circ$.

Wegen Anbauten am nichtaktiven Mantel war ein axialer Versatz von Detektor 1 um 16 mm in Richtung Schwungrad erforderlich. Damit ergaben sich für die endgültige Anordnung am Vollmotor die Einstreufaktoren $\epsilon_{12} = 0,0555$ und $\epsilon_{21} = 0,0491$.

In Bild 63 sind die Ergebnisse eines Versuchslaufs im Kalt-

betrieb mit verschiedenen Öldosierpumpen aufgetragen. Die Verschleißgeschwindigkeit im kalten Bogen ist für alle Versuchsläufe um den Faktor 5 - 6 kleiner als im warmen Bogen. Da bei der Auslegung der Meßanordnung gleiche Verschleißgeschwindigkeiten für beide Meßstellen vorausgesetzt wurden, ist der relative Fehler für den kalten Bogen größer. Die absoluten Fehler unterscheiden sich wenig, weil die relativen Abträge in den Versuchszeiten von 2 bis 4 Stunden pro Lauf in beiden Verschleißzonen gering sind ($a_{V1}, a_{V2} \ll 1$).

| Dosierpumpe | M_1 kalter Bogen \bar{V} in $\mu\text{m}/1000\text{h}$ | M_2 warmer Bogen \bar{V} in $\mu\text{m}/1000\text{h}$ |
|-------------|---|---|
| 1 | 22 \pm 7,5 | 175 \pm 5,5 |
| 2 | 30 \pm 12 | 165 \pm 10 |
| 3 | 18 \pm 7 | 106 \pm 7,5 |
| 4 | 28 \pm 5,5 | 149 \pm 4 |

Bild 63: Mantelverschleiß im kalten und im warmen Bogen (Versuch Nr.7)

4.4.2.2 Verschleißmessung an Dichtleiste und Mantellaufbahn

Für die gleichzeitige Messung an Dichtleiste und Mantellaufbahn (Meßstelle 2 im warmen Bogen) wurden Leiste 3 und Mantel II gewählt. Bei dieser Materialpaarung ist eine Trennung der Komponenten über das δ -Spektrum nicht möglich. Von Versuch Nr.7 unterscheidet sich das Meßproblem dadurch, daß beide Meßstellen (vgl. Bild 64) eine ähnlich große Nachweiswahrscheinlichkeit gegenüber der aktiven Leiste besitzen, daß aber kleine Lagekorrekturen am Detektor 1 ohne wesentlichen Einfluß auf den Einstreufaktor an Meßstelle 2 bleiben. Für die dargestellte Anordnung wurden die Einstreufaktoren $\epsilon_{12} = 0,9033$ und $\epsilon_{21} = 0,0247$ bestimmt.

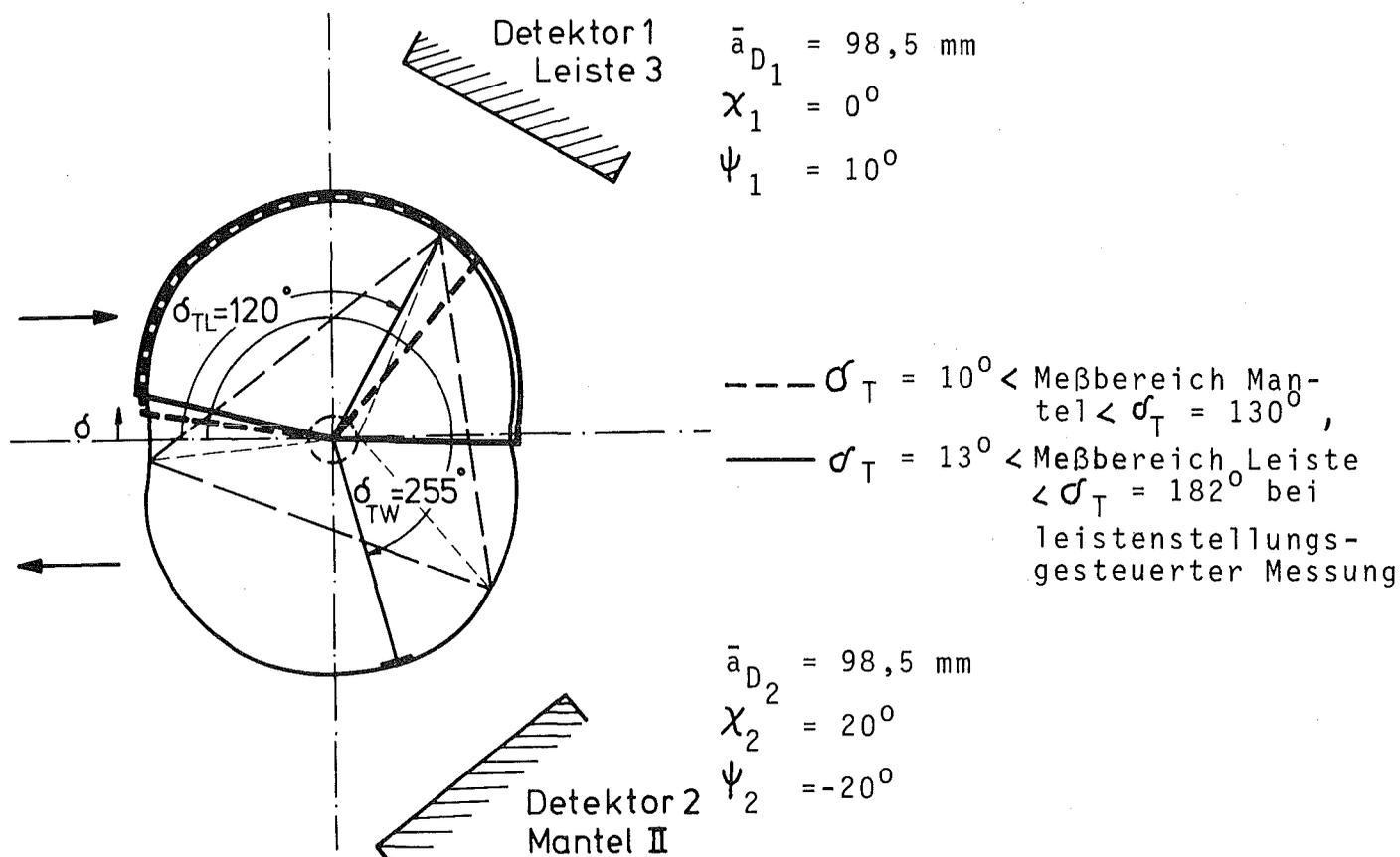


Bild 64: Anordnung der Detektoren für die gleichzeitige Verschleißmessung an Scheitelleiste und Mantel (Versuch Nr.8)

Wegen der starken Einstreuung von der Leiste in die Mantelmessung ist diese einfache Anordnung durch die geringe Genauigkeit und den dadurch erforderlichen großen Abtrag pro Versuchslauf nicht für Parameteruntersuchungen geeignet. Sie bietet aber eine Möglichkeit, am Versuchsbeginn durch gleichzeitiges Messen von Dichtleiste und Mantel über verhältnismäßig grobe Aussagen die ordnungsgemäße Funktion des Motors zu überprüfen (z.B. bei Versuchsmotoren mit erheblichen Material- und Fertigungstoleranzen) und empfindliche Parameteruntersuchungen im Anschluß mit einer Einkomponentenmessung durchzuführen.

Für den Versuch Nr.8 wurde dazu die Dichtleiste durch extreme Schrägbestrahlung in einer Tiefe von nur $16 \mu\text{m}$ und der Mantel in einer Tiefe von $110 \mu\text{m}$ bestrahlt. Die Kontrollversuche ergaben die im Kaltbetrieb üblichen Verschleißgeschwindigkeiten von $V_L = 1,9 \mu\text{m/h}$

für die Leiste und von $\dot{V}_T = 1 \mu\text{m/h}$ für den Mantel. Nach einer Laufzeit von ungefähr 10 h war die aktive Schicht von der Leiste abgerieben, während der Mantel noch einen Meßbereich von 70 μm Länge aufwies und für empfindliche 1-Komponentenmessungen eingesetzt werden konnte.

Die Genauigkeit der 2-Komponentenmessung an Leiste und Mantel wird verbessert, wenn beide Meßketten über die Läuferstellung gesteuert nur für den Bruchteil einer Läuferumdrehung eingeschaltet werden. Öffnet man den Zähler von Meßkette 1 nur dann, wenn die aktive Leiste den Bereich $13^\circ < \phi_T < 182^\circ$ überstreicht, und den Zähler von Meßkette 2 nur im Bereich $10^\circ < \phi_T < 130^\circ$, so ergibt die Rechnung die Einstreufaktoren $\epsilon'_{12} = 0,0339$ und $\epsilon'_{21} = 0,0344$. Die Zählausbeute für die Leiste sinkt dabei jedoch auf 88%, für den Mantel sogar auf 33%.

4.5 Fahrzeugversuche

4.5.1 Aufbau des mobilen Meßsystems

In Ergänzung zu den Prüfstandsversuchen wurde eine mobile Meßanlage aufgebaut und für Verschleißmessungen in einem Mittelklasse-PKW vom Typ R0 80 eingesetzt. Da die private Nutzung des Versuchsfahrzeugs nicht eingeschränkt werden durfte, mußte ein schneller und einfacher Ein- und Ausbau der Meßanlage sichergestellt werden. Die Änderungen am Fahrzeug beschränkten sich auf die Verkürzung der Batteriehalterung und die Verwendung einer Batterie mit kleineren Abmessungen aber gleicher Kapazität wie die Originalausrüstung und die Verlegung des Hauptstromölfilters vom Motor an den inneren Radlauf. Beide Änderungen sind nur dann erforderlich, wenn an der Verschleißzone 2 (warmer Bogen) des Mantels gemessen werden soll. Bild 65 zeigt schematisch die Einbau- lage des Detektors. Da der schwingungsarme Lauf des Kreiskolben- motors eine sehr steife Motoraufhängung zuläßt, konnte der Detek- tor in einer Blechhalterung am linken Längsholm befestigt werden ohne daß Beschädigungen durch Motorschwingungen zu erwarten waren. Temperaturmessungen am Detektorboden und an der Auskopplung zeig- ten, daß bei höheren Fahrgeschwindigkeiten (Autobahnfahrt mit $60 \text{ km/h} < \text{Fahrgeschwindigkeit} < 160 \text{ km/h}$, Außentemperatur 15°C)

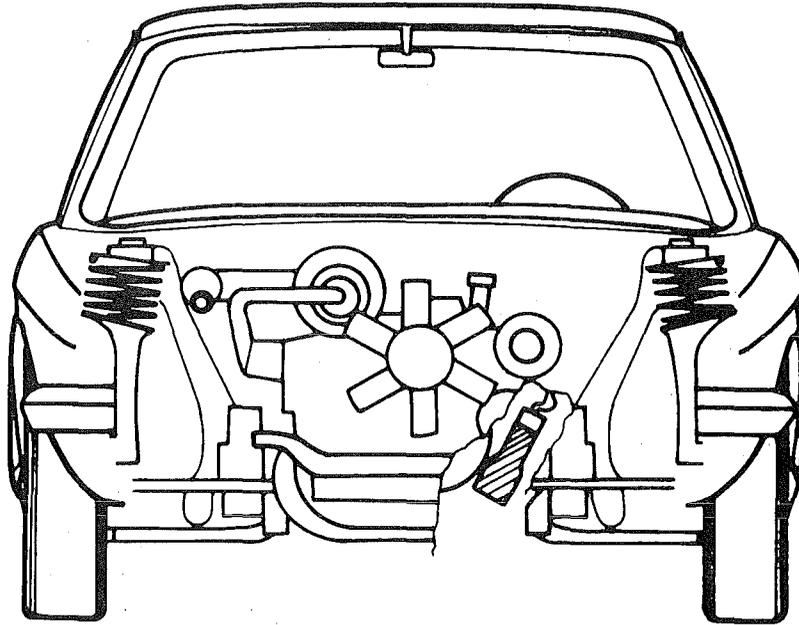
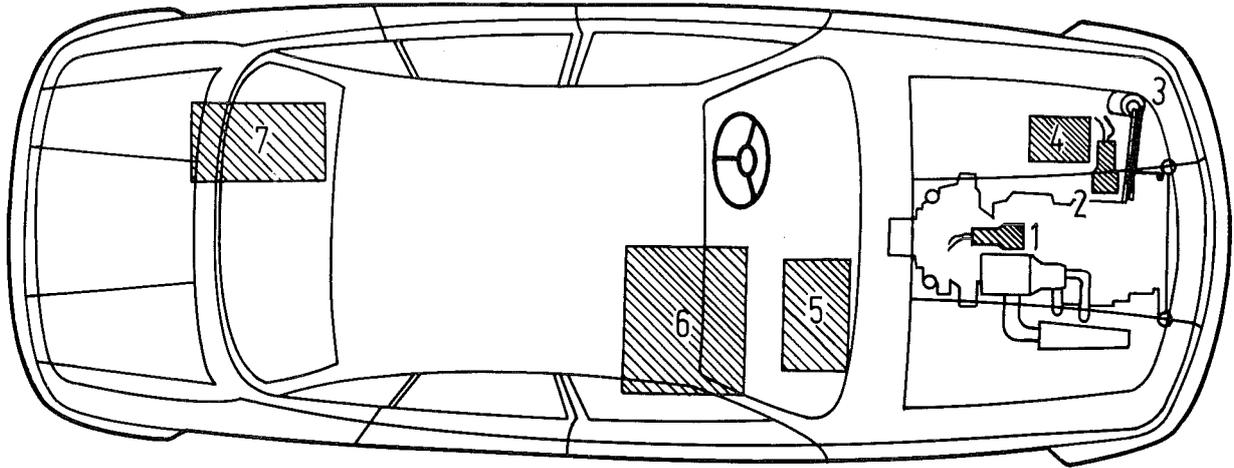


Bild 65: Einbauskeizze des Detektors für Verschleißmessungen im Fahrbetrieb
Anbaulage Meßstelle 2

der Meßkristall einer nahezu konstanten Temperatur ausgesetzt war ($26^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$), die im Stadtverkehr durch die Stillstandphasen auf 31°C bis 37°C anstieg. Für die Detektorlage oberhalb des Motors (zur Verschleißmessung an Leisten) betragen die entsprechenden Temperaturen $40^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ und 35°C bis 45°C .

Bild 66 zeigt die Anordnung der Meßanlage im Fahrzeug. Die Batterie (4) speist einen Wechselrichter (5) im Fußraum vor dem Beifahrersitz (technische Daten im Anhang, Tabelle 3), der die Meßelektronik (6) und die Lochstreifenstanze (7) mit einer sinusförmigen Wechselspannung von 220 Volt versorgt. Für alle Stromverbraucher genügt die serienmäßig eingebaute Drehstromlichtma-

schine, nur zum Motorstart muß der Wechselrichter ausgeschaltet sein. Die Meßelektronik ist auf dem Untergestell des Beifahrersitzes montiert und wird wie die Lochstreifenstanze von der Rücksitzbank aus bedient. Die Positionen (5), (6) und (7) und der Detektor werden jeweils nur zu den Meßfahrten eingebaut.



- | | |
|---------------|------------------|
| 1 Meßstelle 1 | 5 Wechselrichter |
| 2 Meßstelle 2 | 6 Meßgeräte |
| 3 ÖlfILTER | 7 Streifenlocher |
| 4 Batterie | |

Bild 66: Anordnung der Meßgeräte für die mobile Verschleißmeßanlage nach dem Differenzverfahren in einem Mittelklasse-PKW mit Kreiskolbenmotor (Typ NSU RO 80)

4.5.2 Versuchsdurchführung und -ergebnisse

Zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit der Meßanlage wurden mit einer IKA-Leiste Versuche bei kaltem und betriebswarmem Motor durchgeführt (Bild 67). Während beim Warmlaufen aus 20°C bis zum Erreichen der Betriebstemperatur bei $n = 1000 \text{ min}^{-1}$ (Versuch Nr.9₁) ein Verschleiß von 0,2 $\mu\text{m}/\text{Start}$ gemessen wurde, erreichte der Verschleiß bei einem Kaltstart aus 2°C unter Vollast (Versuch Nr.9₂) auf einer Fahrstrecke von 5 km den hohen Wert von 1,95 μm .

Die Versuche 10₁ bis 10₅ wurden unter gemischten Betriebsbedingungen im normalen Straßenverkehr durchgeführt. Dabei wurden über längere Strecken hinweg Verschleißgeschwindigkeiten zwischen 0,8 $\mu\text{m}/100 \text{ km}$ und 1,6 $\mu\text{m}/100 \text{ km}$ gemessen. Der Versuch 10₁ zeigt mit 5 $\mu\text{m}/100 \text{ km}$ auch hier einen starken Einfluß der Kaltphase (vgl. Kap. 4.4.1) auf die Verschleißgeschwindigkeit.

Unter voller Motorbelastung wurden auf einem abgesperrtem Rundkurs 3 Läufe über je 10 Runden gefahren (Versuch Nr.10₆). Auch bei dieser Versuchsfahrt wurde ein starker Verschleißanstieg durch Glühzündungen festgestellt (vgl. Kap. 4.4.1), die für die erste Runde des ersten Laufes einen Verschleiß von 1,1 μm oder 15 $\mu\text{m}/100 \text{ km}$ hervorriefen. Nach dem Reinigen des Schußkanals und der Montage von neuen Zündkerzen stellte sich ein einwandfreier Motorlauf ein, bei dem Verschleißgeschwindigkeiten von 1,8 $\mu\text{m}/100 \text{ km}$ (2.Lauf) und 2,1 $\mu\text{m}/100 \text{ km}$ (3.Lauf) gemessen wurden.

| Nr. des Versuches | Fahrstrecke in km | Art der Fahrt | Verschleiß in μm | Verschleißgeschwindigkeit \dot{V} in $\mu\text{m}/100 \text{ km}$ |
|-------------------|-------------------|---|-----------------------------|---|
| 9.1 | 0 | Warmlaufen von 20°C auf Betriebstemperatur im Stand (Leerlauf bei $n = 1000 \text{ min}^{-1}$) | 0,2/Start | - |
| 9.2 | 5 | Kaltstart unter Vollast aus 2°C bis Betriebstemperatur erreicht | 1,95 \pm 0,05 | - |
| 10.1 | 67 | Stadtfahrt mit 14 Kaltstarts | 3,3 \pm 0,3 | 5 |
| 10.2 | 326 | 65 km Stadt- und Landstraße, 261 km Autobahn, 6 Kaltstarts | 2,6 \pm 0,4 | 0,8 |
| 10.3 | 491 | 51 km Stadt-, 140 km Landstraße, 300 km Autobahn, 8 Kaltstarts | 8,2 \pm 0,3 | 1,6 |
| 10.4 | 484 | 204 km Stadt- und Landstraße, 280 km Autobahn | 7,4 \pm 0,1 | 1,5 |
| 10.5 | 1072 | 222 km Stadt- und Landstraße, 850 km Autobahn, 5 Kaltstarts | 10,3 \pm 0,1 | 1 |
| 10.6 | 196 | Fahrt unter Vollast auf abgesperrtem Rundkurs | 4,7 \pm 0,2 | 1,9 ⁺ (15) |

⁺korrigierter Wert, in Klammer: Verschleißgeschwindigkeit der ersten Runde bei Glühzündung

Bild 67: Ergebnisse der Verschleißmessungen an einem Kreiskolbenmotor im Fahrbetrieb (Verschleißteil: Leiste 1)

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

Ein routinemäßiger Einsatz von Radionuklidmeßverfahren durch die Industrie setzt voraus, daß die Leistungsfähigkeit der Verfahren vor der Anwendung bei neuen Versuchsträgern oder -zielen abgeschätzt und damit bereits in der Versuchsplanung eine Entscheidung zwischen konkurrierenden Meßverfahren getroffen werden kann.

Beim Dünnschichtdifferenzmeßverfahren nimmt grundsätzlich die gesamte Restaktivität des Bauteils am Meßvorgang teil. Deshalb sind bei Aktivierungen für das Differenzverfahren genaue quantitative Aussagen über die Aktivitätsverteilung im Versuchsteil über das ganze bestrahlte Volumen notwendig. Damit bereits bestrahlte teure Versuchsteile nicht nach der Kontrolle der Aktivierung verworfen werden müssen, müssen die zahlenmäßigen Auswirkungen realer Bestrahlungsbedingungen (Form des Strahls der Geschößteilchen, Flußverteilung im Strahl, Einstell- und Bewegungsfehler) auf die Aktivitätsverteilung bekannt sein.

Diese Einflüsse werden unter Zugrundelegung heute üblicher Bestrahlungsanordnungen für ebene und gekrümmte Targetoberflächen behandelt. Für Schrägbestrahlungen ebener Oberflächen durch einen idealisierten Strahl mit paralleler Teilchenflugrichtung wurden Nomogramme entwickelt, mit deren Hilfe die geeignete Bestrahlungsanordnung ausgewählt werden kann.

Für das vor dem Strahl bewegte Target (Erzeugung ausgedehnter aktiver Flächen) werden unterschieden:

Fall I : Bewegung des Targets senkrecht zur Ebene, die durch den Bestrahlungswinkel aufgespannt wird

Fall II : Bewegung in Richtung der Durchstoßlinie von Target und Ebene des Bestrahlungswinkels.

Die Erweiterung auf gekrümmte Targetoberflächen führt zu Vorschriften für Aufbau und Bewegung von Werkstücken in Abhängigkeit von der geforderten Aktivitätsverteilung und vom Versuchsziel.

Soll der Verschleiß eines Versuchsteils fortlaufend während des Betriebs der Maschine beobachtet werden, so muß die vom aktiven Versuchsteil ausgehende Strahlung im allgemeinen Fall zeitlich veränderliche dicke Materialschichten (Motorgehäuse, Kühlmittel, andere Bauteile) auf dem Weg zum Nachweisgerät durchdringen. Im Gegensatz zum Durchflußverfahren mit seiner bekannten und weitgehend von den Versuchsbedingungen unabhängigen Meßgeometrie im Meßkopf unterliegen die Gammaquanten beim Differenzverfahren vielfältigen Wechselwirkungen mit der Umgebung, die die Messung erschweren und eine energiespezifische Messung häufig unmöglich machen. In diesen Fällen muß im Meßfenster des Nachweisgeräts mit einem Mischspektrum gearbeitet werden, das von der Strahlung verschiedener Isotope herrührt und dessen Eigenschaften über der Zeit und der Tiefe der aktivierten Schicht veränderlich sind. Für das Mischspektrum läßt sich für jede Schichttiefe eine über der Zeit veränderliche "Ersatzhalbwertszeit" definieren für das Abklingen der im Meßfenster registrierten Strahlung. Es wird gezeigt, daß auch in den Fällen, wo für die im Meßfenster nachgewiesene Strahlung eine einfache Zuordnung zur Schichttiefe (lineare Eichung) nicht möglich ist, für jede Tiefe der aktiven Schicht ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Aktivität und Schichttiefe besteht.

Neben dem Verschleißvorgang und dem natürlichen Abklingen der Aktivität haben Änderungen in der Meßkette und in der Meßgeometrie (z.B. Abstand- und Dichteänderungen) einen Einfluß auf die Änderung der im Meßfenster nachgewiesenen Strahlung. Diese Einflußgrößen müssen für die jeweilige Versuchsanordnung sehr sorgfältig überprüft werden, weil sie für die Genauigkeit der Messung von größerer Bedeutung sein können als der statistische Fehler bei der Impulzzählung. Die Einflüsse sind oft sehr komplex und entziehen sich einer Berechnung in der geforderten Schärfe. In diesen Fällen müssen Blindversuche durchgeführt werden, bei denen im verschleißfreien Betrieb des Prüflings die Auswirkung aller Störgrößen auf die Bestimmung der vom eingebauten aktiven Versuchsteil hervorgerufenen Zählrate ermittelt wird. Von der sorgfältigen

Planung und Durchführung dieser Versuche hängt dann der erfolgreiche Einsatz des Dünnschichtdifferenzverfahrens entscheidend ab. Dies gilt vor allem für Wechselprüfprozeduren, bei denen Einflüsse der Umgebung auf die Informationsübertragung (Dichteänderung von Kühlmittel in einer durchstrahlten Motorwand, stark veränderliche magnetische Streufelder) die vom Verschleiß hervorgerufene Zählratenabnahme weit übertreffen können. Hier bieten auch Messungen nach dem Multiscaling-Prinzip einen guten Lösungsweg.

Die Bestimmung von Gesamtverschleiß und mittlerer Verschleißgeschwindigkeit für einen Versuchslauf ist unabhängig vom tatsächlichen zeitlichen Verlauf des Abriebs nur dann exakt möglich, wenn die Verschleißgeschwindigkeit im ersten und letzten Meßintervall konstant ist. Daraus wird eine Vorschrift für die Wahl der Stützstellen bei Dünnschichtmessungen abgeleitet.

Für die Durchführung von Verschleißmessungen nach dem Dünnschichtdifferenzverfahren wurde mit dem Kreiskolbenmotor ein Versuchsträger ausgewählt, der es ermöglicht, bei den Messungen gleichzeitig zwei Ziele zu verfolgen:

1. Entwicklung und Erprobung des Differenzverfahrens
2. Erforschung wichtiger Parameter für das Verschleißverhalten von Kreiskolbenmotoren mit metallischen Dichtleisten.

Das Versuchsprogramm ist so aufgebaut, daß die Messungen typische Beispiele für Aktivierung, Spektrometrie, Einsatzbereich und Leistungsfähigkeit des Meßverfahrens darstellen:

- Aktivierung - Aktivierbarkeit mit p, α, d von z.B. Hartmetall, Oxidkeramik, Nitridkeramik.
Halbwertszeitkorrektur und Meßbereich bei Isotopengemischen (Ferrotitanit, Elnisil).
Einfluß von Strahlaufweitung und Krümmungsradius der Oberfläche auf die Tiefenverteilung.
- Spektrometrie - Behandlung von einfachen (Chrom) und zusammengesetzten Spektren (Ferrotitanit).
Messung an feststehenden Teilen (Mantel).
Messung an bewegten Teilen (Dichtleiste).

Leistungsfähigkeit - Auflösung bei 1- und 2-Komponentenmessungen.
Nachweis kleiner Verschleißgeschwindigkeiten bei kurzer
Halbwertszeit des Meßisotops (Chrommantel).

Einsatzbereich - Messungen am Prüfstand und während des Straßen-
betriebs (mobiles Meßsystem).

Durch die Auswahl der Versuchsmotoren waren Vergleiche möglich
mit Betriebserfahrungen und neueren Versuchsergebnissen zahlreicher
Versuchslabors. Die Messungen lassen Aussagen zu über das Ver-
schleißverhalten wichtiger Werkstoffe für Dichtleiste (Spezialguß
und Sintermetalle) und Mantel (Nickel- und Chromlaufflächen) in
Abhängigkeit von den Betriebskenngrößen Kühlmitteltemperatur,
Schmieröldurchsatz, Drehzahl und mittlerer Arbeitsdruck.

Da der Schwerpunkt der Arbeit auf dem Aufzeigen typischer An-
wendungen des Differenzverfahrens liegt, wurden die Einflüsse der
einzelnen Parameter dann nicht weiter untersucht, wenn die grund-
sätzliche Auswirkung auf das Verschleißverhalten ermittelt war
und weitere Messungen keinen zusätzlichen Beitrag zur Verfahrens-
entwicklung versprachen.

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

- 1 Postnikov, V.J.: Survey of the use of radioactive tracers in industry (SM-84/1)
In: Radioisotope Tracers in Industry and Geophysics. Proceedings of a Symposium, Prague, 21-25 November 1966
International Atomic Energy Agency, Vienna, 1967
- 2 Gervé, A.,
Kamm, H.,
Katzenmeier, G.: Zur Deuteronenaktivierung von Maschinenteilen aus Stahl und Gußeisen
Forschungsberichte Verbrennungskraftmaschinen Heft 77, 1968, Forschungsbericht 2-213/10; Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V., Frankfurt/Main
- 3 Schüßler, J.: Isotopentechnik im Maschinenbau. Aktivierungsanalytische Spezialverfahren - Dünnschichtdifferenzverfahren -
Forschungshefte Forschungskuratorium Maschinenbau e.V., Heft 6, 1970
Maschinenbau-Verlag Frankfurt/Main
- 4 Essig, G.: Verschleißmessungen am Einscheiben-Wankelmotor des Typs M 35 (1970)
unveröffentlicht
- 5 Katzenmeier, G.,
Herrmann, P.: Ermittlung des Kavitationsabtrages an einem Pumpenrad
(1972) unveröffentlicht
- 6 Kaiser, W.: Messung des Auslaßventil-Verschleißes mit Hilfe von Radioisotopen am Motor F 8 L 413
(1971) unveröffentlicht
- 7 Katzenmeier, G.,
Roth, H.: Versuche am MAN-Großmotor K 7 SZ 70/125
(1973) unveröffentlicht
- 8 Koch, R.: Verschleißuntersuchungen an Hartmetallschneiden
(1973) unveröffentlicht

- 9 Ettinger, K.,
Fremlin, J.H.,
Askouri, N.A.: Measurement of Wear and Corrosion by
Surface Irradiation with Charged Par-
ticle Beam
- 10 Askouri, N.A.,
Chen, N.S.,
Ettinger, K.V.,
Fremlin, J.H.,
Nowotny, R.,
Wills, G.B.: On-line Wear Monitoring by Surface Ac-
tivation
International Journal of Applied Radia-
tion and Isotopes, 1975, Vol.26, S.61-70
- 11 Conlon, T.W.: Thin Layer Activation by Accelerated
Ions for Measurement of Industrial Wear
Nondestructive Testing. Research and
Practice. NDETA 7 (6) 1974, S.310-314
- 12 Mayer, W.J.,
Anderson, R.L.,
Lechman, D.C.: A Radiometric Method for Apex Seal Wear
Measurements in Rotary Engines
SAE 741 066, 1976
- 13 Kruger, P.: Principles of Activation Analysis
New York: John Wiley and Sons, 1971
- 14 Szatzschneider, K.: Untersuchung der Verschleißigenschaften
von Armco-Eisen nach der Bestrahlung mit
Neutronen und Alpha-Teilchen
KFK 2434 (1977)
- 15 Czink, F.: Untersuchung der Wärmebelastung von nicht
bewegten Targets bei der Aktivierung mit
geladenen Teilchen
(1975) unveröffentlicht
- 16 Kronenberger, F.: Berechnung von Eindringtiefe, Stopping
Power, Strahlaufweitungswinkel und
Straggling in Abhängigkeit von der ki-
netischen Energie bei der Bestrahlung
von Eisen
(1976) unveröffentlicht

- 17 Szatzschneider, K.: Einfluß der Oberflächenrauigkeit auf den Verlauf der Aktivität normal zur Targetoberfläche bei kleinen Bestrahlungswinkeln
(1977) unveröffentlicht
- 18 Emrich, F.: Wirtschaftlich-technische Analyse des Einsatzes der Radionuklidtechnik (Verfahren zur Messung des Verschleißes von Bauteilen in der Motorenentwicklung mit Hilfe von Radioisotopen)
KFK 2243 (1976)
- 19 Fünfer, E.,
Neuert, H.: Zählrohre und Szintillationszähler
G. Braun, Karlsruhe 1959
- 20 Harshaw, J.A.,
Stewart, E.C.,
Nay, I.O.: AEC-Report NYO-1577, 1952
- 21 Fiedler, H.,
Tench, O.: Germanium (Li) Gamma Spectrometer Systems
Canberra Industries, Middletown 1966
- 22 Harshaw, J.A. Szintillation Crystal Manual
The Harshaw Chemical Industry, Cleveland, Ohio, 1976
- 23 Weise, L.: Statistische Auswertung von Kernstrahlungsmessungen
R. Oldenbourg, München 1971
- 24 Mc Gowan, F.K.,
Milner, W.T.,
Kim, H.J.: Nuclear Cross Sections for Charged Particle Induced Reactions
ORNL-CPX-1 und 2 Oak Ridge National Laboratory, 1964
- 25 Keller, K.A.,
Lange, J.,
Münzel, H.,
Pfennig, G.: Anregungsfunktionen für Kernreaktionen mit geladenen Projektilen
In: Schopper, H. (Hrsg): Landolt-Börnstein, Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaften und Technik, Band 5, Springer-Verlag Berlin, 1973

- 26 Fano, U.
et al.: Studies in Penetration of Charged Particles in Matter
Publication 1133 National Academy of Sciences - National Research Council, 2.ed. Washington, D.C., 1967
- 27 Hein, H.P.: Untersuchung über die Ursachen der Schwankungen in der Tiefenverteilung radioaktiver Isotope in Metallen nach der Aktivierung mit geladenen Teilchen (1973) unveröffentlicht
- 28 Reimann, R.: Rückwirkungsfreie Strahlpositionssonde mit intensitätsunabhängiger Positionsanzeige
ZAMP Vol. 22 (1971), S.78-85
- 29 Schulz, F.,
Schweikert, H.: Operation of the Karlsruhe Isochronous Cyclotron in 1975
KFK 2298 (1976)
- 30 Herkert, B.: Die Aktivierung von metallischen Maschinenteilen mit geladenen Teilchen zur Durchführung von Verschleißmessungen
KFK 2096 (1975)
- 31 Vance, R.D.: Shape Foil into a Magnetic Shield
Electronic Design 18, (1974), S.86-89
- 32 Kronenberger, F.: Rechnerische Bestimmung des sogenannten linearen Meßbereichs bei Dünnschichtaktivierungen
(1976) unveröffentlicht
- 33 Yamamoto, K.: Rotary Engine
1. ed. Hiroshima: Toyo Kogyo Co., 1969
- 34 Hartmann, A.: Fortschritte bei Kreiskolbenmotoren
MTZ Motortechnische Zeitschrift 36 (1975), 3, S.89 und 90

- 35 Jungbluth, G.: Skriptum Kolbenmaschinen II - Rotationskolbenmaschinen -
Institut für Kolbenmaschinen, Universität Karlsruhe, 1976
- 36 Prasse, H.F.,
Mc Cormick, H.E.,
Anderson, R.D.: A Critical Analysis of the Rotary Engine Sealing Problem
SAE 730 118, 1973
- 37 Brandone, B.,
du Jeu, J.: Etude d'une huile de graissage pour moteurs rotatifs
Compagnie Française de Raffinage TOTAL (1972)
- 38 Froede, W.: Auszüge aus neueren Entwicklungsarbeiten am Kreiskolbenmotor, Bauart NSU/Wankel
MTZ Motortechnische Zeitschrift 24 (1963) Heft 4, S.113-123
- 39 Rogers, T.W.,
Lemke, W.,
Lefevre, J.,
Ohzawa, T.: Lubricant Studies in Rotary - Combustion Engines
SAE 720 467, 1972
- 40 Bensinger, W.B.: Rotationskolben-Verbrennungsmotoren
Springer-Verlag Berlin 1973
- 41 Kühner, H.: Versuche am Kreiskolbenmotor Ka 3:2
MTZ Motortechnische Zeitschrift 28 (1967), 6, S.210-217
- 42 Stecher, F.: Studien über die Schmierung und den Verschleiß von Dichtleiste und Trochoide im Wankelmotor
Fachschrift K 17, Goetze-Werke AG, Burscheid, 1973

- 43 Clar, F.: Reibungs- und Verschleißversuche bei hohen Gleitgeschwindigkeiten
VDI-Zeitschrift Band 109 (1969), S.722-27
- 44 Buran, U.: Thermische Oberflächenbeschichtungen als Lösungsweg für verschleißfeste Dichtleisten von Rotationskolbenmotoren
Fachschrift K 13, Goetzwerke AG, Burscheid, 1973
- 45 Neuhäuser, H.J.: Über Entwicklungsmöglichkeiten von Werkstoffen und Beschichtungen für Kreis-
kolbenmotoren
Fachschrift K 12, Goetzwerke AG, Burscheid, 1973
- 46 Lowther, H.V.,
Lane, J.W.: Rotary Engines - Operation and Lubri-
cation
National Petrol Research Association,
Annual Meeting Paper, San Antonio, USA,
1972
- 47 Ansdale, R.F.: Der Wankelmotor. Konstruktion und Wir-
kungsweise
Motorbuch Verlag, Stuttgart, 1971
- 48 Miller, B.J.,
Hollinghurst, R.: Lubricant Requirements of New Power
Plants for Vehicles
Fisita-Congress, London, June 1972,
S. 5/23-5/32
- 49 Behling, R.D.,
Weise, E.: Lubricant and Fuel Requirements and
General Performance Data of Wankel Ro-
tary Piston Engines
SAE 730 048, 1973
- 50 Souillard, G.J.,
Van Quaethoven, F.F.: Lubrication of the Wankel Rotary Engine
SAE 730 047, 1973
- 51 Eberan-Eberhorst, C.G.A.,
Weise, E.: Requirements and Performance Testing of
Lubricants for Wankel Rotary Piston
Engines
1973

- 52 Brandone, B.,
du Jeu, J.:
Some Aspects of the Lubrication of
Wankel - Type Rotary Engines
Rotary Engines: Operation, Pre-Ignition
and Wear.
Proceedings of the Institution of
Mechanical Engineers. Vol.188 (1974)
No.14, S.289-294
- 53 Breau, J.Y.,
Miller, P.,
Rogers, T.W.:
Recent Studies on Rotary-Engine Lubri-
cation
Proceedings of the Institution of
Mechanical Engineers. Vol.188 (1974)
No.14, S.295-302
- 54 Huber, E.:
Benennung der Teile von Kreiskolben-
motoren System NSU/Wankel
MTZ Motortechnische Zeitschrift 27
(1966), 12, S.501-503
- 55 Kaspar-Sickermann, W.,
Stegemann, D.:
Methoden und Ergebnisse der Verschleiß-
messung an Kolbenringen mit Hilfe ra-
dioaktiver Isotope.
Forschungsberichte Verbrennungskraft-
maschinen, Heft 18, 1961, Forschungs-
bericht 2-213/3; Forschungsvereinigung
Verbrennungskraftmaschinen e.V.,
Frankfurt/Main
- 56 Beavis, D.A.,
Towle, A.:
Lubricant Development for the Wankel
Type Rotary Engine
Proceedings of the Institution of
Mechanical Engineers. Vol.188 (1974)
No.14, S.303-308

7. A N H A N G

7.1 Tabellen

7.2 Beispiele zu den Nomogrammen I bis III (Kap. 3.1.2) und IV (Kap. 3.3.3 und Kap. 4.4.1)

7.3 Formelzeichen und Größen

| Det ₁ \ Det ₂ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | |
|-------------------------------------|---------------|---------------|---------------|----------------------------|---------------|---------------|------------------------------------|---------------|----|
| 10 | 4,45 10,23 | 4,20 9,87 | 2,38 10,88 | 4,60 19,21 | 3,68 19,42 | 4,98 18,75 | 3,66 20,00 | 2,52 21,19 | 10 |
| 11 | 4,39 9,36 | 4,15 9,03 | 2,35 9,95 | 17,57 | 17,76 | 17,15 | 18,30 | 19,38 | 11 |
| 12 | 5,17 12,57 | 4,88 12,14 | 2,76 13,37 | 23,61 | 23,86 | 23,04 | 24,58 | 26,04 | 12 |
| 13 | 5,39 9,59 | 5,09 9,26 | 2,88 10,20 | 18,01 | 18,20 | 17,57 | 18,75 | 19,86 | 13 |
| 14 | 5,36 9,39 | 5,06 9,06 | 2,86 9,99 | 17,63 | 17,82 | 17,21 | 18,36 | 19,45 | 14 |
| 15 | 5,22 8,09 | 4,93 7,81 | 2,79 8,61 | | | | | | 15 |
| 16 | 6,09 11,02 | 5,75 10,63 | 3,25 11,72 | von Anbaustellung 4 ab ist | | | | | 16 |
| 17 | 5,86 12,24 | 5,53 11,81 | 3,13 13,02 | E ₁₂ zu groß | | | | | 17 |
| 18 | 6,90 15,21 | 6,52 14,68 | 3,69 16,17 | | | | | | 18 |
| 19 | 5,46 7,80 | 5,16 7,53 | 2,92 8,30 | | | | E ₂₁ E ₁₂ | | 19 |
| 25 | 7,38 8,85 | 6,97 8,54 | 3,94 9,41 | 25 | | | | | |
| 26 | 7,54 7,80 | 7,12 7,53 | 4,03 8,30 | 26 | | | | | |
| 27 | 7,60 5,06 | 7,18 4,88 | 4,06 5,38 | 27 | | | | | |
| 28 | 7,49 8,00 | 7,08 7,73 | 4,01 8,51 | 28 | | | | | |
| 29 | 7,96 7,66 | 7,52 7,39 | 4,26 8,14 | 29 | | | | | |
| 41 | 7,38 8,26 | 6,97 7,97 | 3,95 8,79 | 41 | | | | | |
| 42 | 7,98 | 7,70 | 8,49 | 42 | | | | | |
| 43 | 13,69 7,04 | 12,93 6,79 | 7,32 7,48 | 43 | | | | | |
| 44 | 13,97 | | | 44 | | | | | |
| 45 | 14,00 | | | 45 | | | | | |
| 46 | 14,15 | | | 46 | | | | | |
| 47 | 15,25 | | | 47 | | | | | |
| 48 | 15,38 | | | 48 | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | | | | | | |

Von Anbaustellung
43 ab ist E₂₁ zu groß

Tabelle 1: Einstreufaktoren in % für unterschiedliche Detektoranbaustellungen nach Bild 62 (Auszug). Die günstigste Anbaustellung ist durch die Klammer hervorgehoben.

| Anbaustellung Nr. | Abstand \bar{a}_D in mm | Richtungswinkel χ in $^\circ$ | Schwenkwinkel ψ in $^\circ$ |
|----------------------|------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 1 | 98,5 | - 20 | 0 |
| 2 | 98,5 | - 20 | - 20 |
| 3 | 98,5 | - 35 | 55 |
| 4 | 149 | - 10 | 0 |
| 5 | 149 | - 20 | 0 |
| 6 | 149 | - 20 | - 20 |
| 7 | 149 | - 20 | 20 |
| 8 | 149 | - 20 | 40 |
| 10 | 68 | 0 | 0 |
| 11 | 68 | 0 | - 15 |
| 12 | 68 | - 20 | 15 |
| 13 | 78,5 | 0 | 0 |
| 14 | 78,5 | 0 | 20 |
| 15 | 78,5 | 0 | - 20 |
| 16 | 78,5 | - 20 | 0 |
| 17 | 78,5 | - 20 | 20 |
| 18 | 78,5 | - 40 | 30 |
| 19 | 78,5 | 20 | 0 |
| 25 | 98,5 | 0 | 0 |
| 26 | 98,5 | 0 | - 20 |
| 27 | 98,5 | 0 | - 40 |
| 28 | 98,5 | 0 | 20 |
| 29 | 98,5 | 0 | 35 |
| 41 | 98,5 | 40 | 0 |
| 42 | 98,5 | 40 | - 20 |
| 43 | 149 | 0 | 0 |
| 44 | 149 | 0 | - 20 |
| 45 | 149 | 0 | - 40 |
| 46 | 149 | 0 | 20 |
| 47 | 149 | 0 | 40 |
| 48 | 149 | - 20 | 0 |

Tabelle 2: Koordinaten der Detektoranbaustellungen in
Tabelle 1 (Koordinatensystem nach Bild 62)

Versuchsfahrzeug: Typ NSU RO 80

Hersteller: Audi NSU Auto Union AG
Leergewicht: 1280 kg
zul. Gesamtgewicht: 1730 kg
Zuladung: 450 kg
zul. Achslast: vorn 950 kg
hinten 850 kg
Batterie: serienmäßig 54 Ah
im Versuch 54 Ah, kleinere Ausführung
Lichtmaschine: BOSCH K1 - 14V55A20
770 Watt
55 Ampère

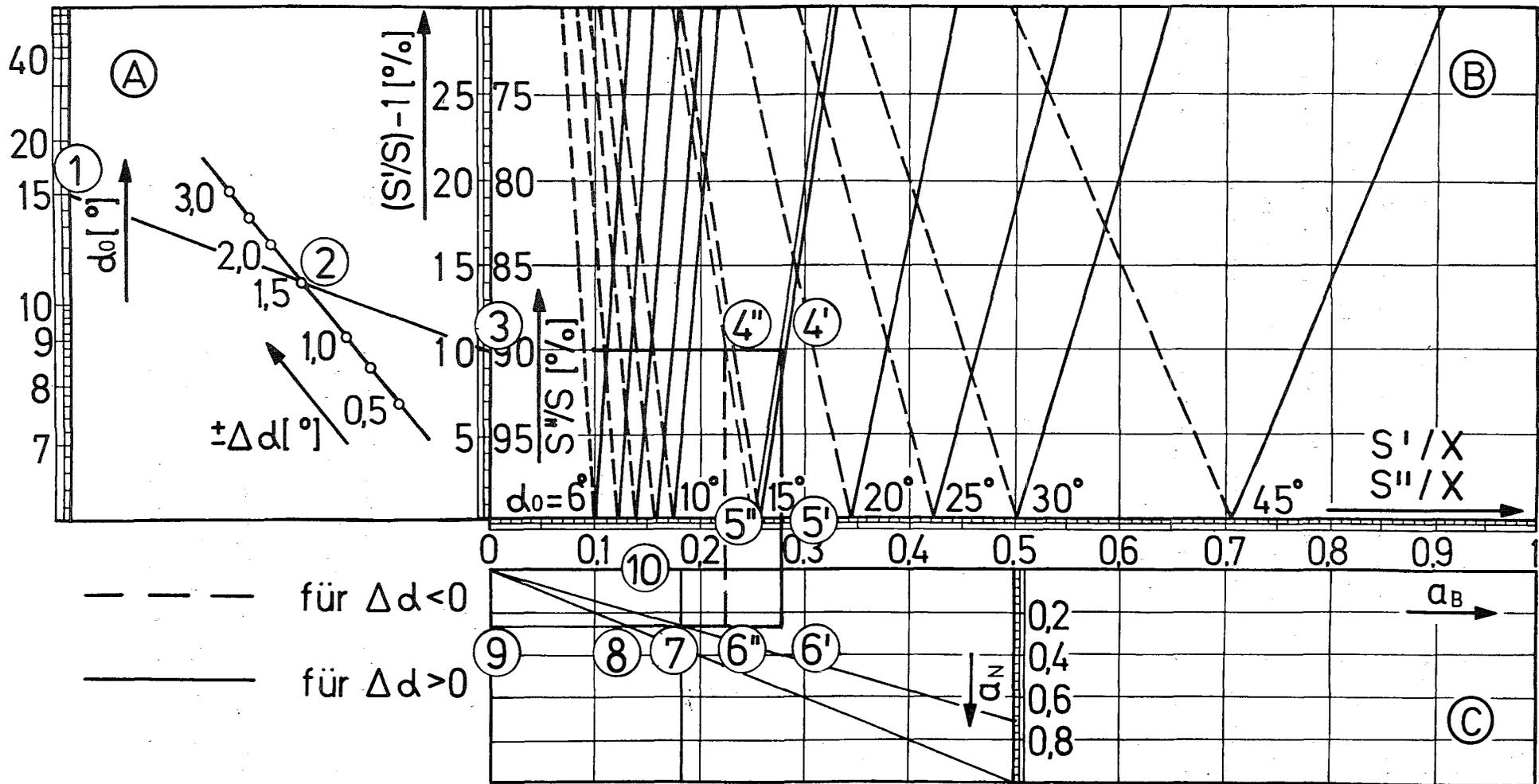
Meßgeräte:

Wechselrichter: Typ 12 V/250 A
Eingangsspannung: 12 V Gleichstrom
Ausgangsspannung: 220 V Wechselstrom, 50 Hz Sinus
Leistungsabgabe: 250 VA
Wirkungsgrad: 44%
Gewicht: 18 kg

Einkomponentenmeßplatz: Leistungsaufnahme 70 VA, Gewicht 18 kg
(Überrahmen, Hochspannung, Stabilisator,
Diskriminator, Zähler, 3" x 3" NaJ(Tl)-Kristall)
Oszilloskop: 150 VA, 15 kg
Geräteschrank für 2 19" NIM-Einschübe 7,5 kg

Tabelle 3: Technische Daten des Versuchsfahrzeugs und der
Meßgeräte für das mobile Meßsystem (Auszug)

NOMOGRAMME I BIS IV



Nomogramm I
 Schaubild zur Auslegung von Schrägbestrahlungen nach Bild 21
 (vgl. Kap. 3.1.2, Seite 45)

Nomogramm_I:

Das Schaubild dient zur Auslegung von Schrägbestrahlungen mit einem monoenergetischen Parallelstrahl deren Aktivitätstiefenverteilung in Teilchenflugrichtung bekannt ist (x_M, x_R). Für Bestrahlungsanordnungen nach Bild 21 kann mit dem Nomogrammteil C der tatsächliche Nutzanteil a_N^+ für das aktivierte Bauteil ermittelt werden, wobei die Dicke der Eichfolien und Einstellungsgenauigkeiten zwischen Teilchenstrahl und Wertstückoberfläche berücksichtigt sind.

Für die rechnerische Bestrahlungstiefe s_R und die Länge des Meßbereichs s_M im Werkstück gilt:

$$\frac{s_R}{x_R} = \sin \alpha - a_N \cdot a_B$$

mit: α = tats. Bestrahlungswinkel

$$a_N = \frac{x_M}{x_R}$$

$$a_B = \frac{B_2}{x_M}$$

$$\frac{s_M^+}{x_M} = \sin \alpha - a_B$$

Für den tatsächlichen Nutzanteil a_N^+ gilt:

$$\frac{a_N^+}{a_N} = \frac{\frac{s_M^+}{x_M}}{\frac{s_R}{x_R}} = \frac{s_M^+/x_M}{s_R^+/x_R}$$

s_M^+/x_M und s_R^+/x_R werden im Schaubild als Strecken abgelesen. Der Quotient ergibt das Verhältnis vom tatsächlichen zum größtmöglichen Nutzanteil.

Für das eingezeichnete Beispiel gelten folgende Werte:

Bestrahlungssollwinkel $\alpha_0 = 14,5^\circ$ (1)

geschätzte Einstellungsgenauigkeit $\Delta\alpha = \pm 1,5^\circ$ (2)

Die Stauchung der Tiefenverteilung liegt damit im Bereich

$$x \cdot \sin \alpha_0 \cdot 0,9 \leq s \leq x \cdot \sin \alpha_0 \cdot 1,1 \quad (3)$$

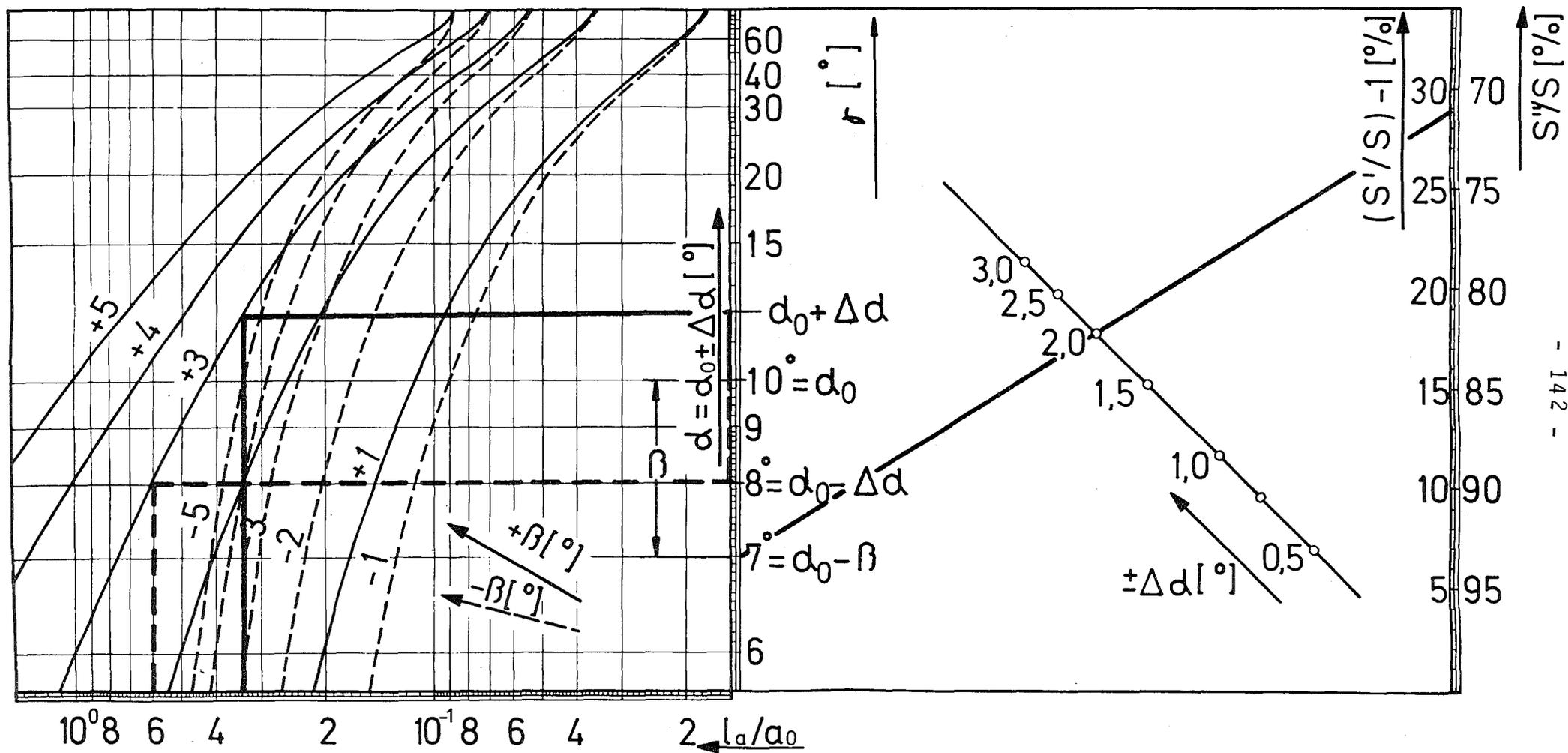
Eine Waagrechte durch (3) schneidet die Hilfslinien für $\alpha_0 = 14,5^\circ$ in den Punkten (4'') (untere Bereichsgrenze) und (4') (obere Bereichsgrenze). Die Lote auf die Achse s''/x bzw. s'/x ergeben in den Punkten (5'') und (5') die unteren und oberen Bereichsgrenzen in Einheiten von x .

Für eine Bremsschicht $B_2 = 50 \mu\text{m}$ (2 Folien zu je $25 \mu\text{m}$ für die Eichung von s_M) und eine orthogonale Tiefenverteilung mit $x_R = 400 \mu\text{m}$, $x_M = 280 \mu\text{m}$ wird $a_B = \frac{B_2}{x_M} = 0,18$ (10). Für die Konstruktion von a_N^+ wird in Teil C ein Strahl von $a_B = 0$ durch $a_N = \frac{x_M}{x_R} = \frac{280 \mu\text{m}}{400 \mu\text{m}} = 0,7$ eingezeichnet. Er schneidet $a_B = 0,18$ im Punkt (7). Eine Waagrechte durch (7) schneidet den Strahl für $a_N = 1$ im Punkt (8) und die Lote durch (4'') und (4') in den Punkten (6'') und (6'). Die Strecke (9)-(8) hat die Länge $a_N \cdot a_B$, die Strecke (9)-(7) die Länge a_B . Die Strecken (9)-(6'') und (9)-(6') haben die Länge $\sin(\alpha_0 - \Delta\alpha)$ und $\sin(\alpha_0 + \Delta\alpha)$. Damit stellen die Strecken (6'')-(7) und (6'')-(8) die gesuchten Größen $s_M''/x_M = \sin(\alpha_0 - \Delta\alpha) \cdot a_B$ und $s_R''/x_R = \sin(\alpha_0 - \Delta\alpha) \cdot a_B \cdot a_N$ dar (entsprechend für $\sin(\alpha_0 + \Delta\alpha)$).

Im Beispiel ist:

$$\left. \begin{aligned} \frac{s_M''}{x_M} &= 0,045 \\ \frac{s_R''}{x_R} &= 0,0998 \end{aligned} \right\} \frac{a_N''}{a_N} = 45\% \quad \left. \begin{aligned} s_M'' &= 12,6 \mu\text{m} \\ s_R'' &= 39,9 \mu\text{m} \end{aligned} \right\} a_N'' = 31,6\%$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{s_M'}{x_M} &= 0,096 \\ \frac{s_R'}{x_R} &= 0,1459 \end{aligned} \right\} \frac{a_N'}{a_N} = 64,2\% \quad \left. \begin{aligned} s_M' &= 26,8 \mu\text{m} \\ s_R' &= 59,8 \mu\text{m} \end{aligned} \right\} a_N' = 44,8\%$$



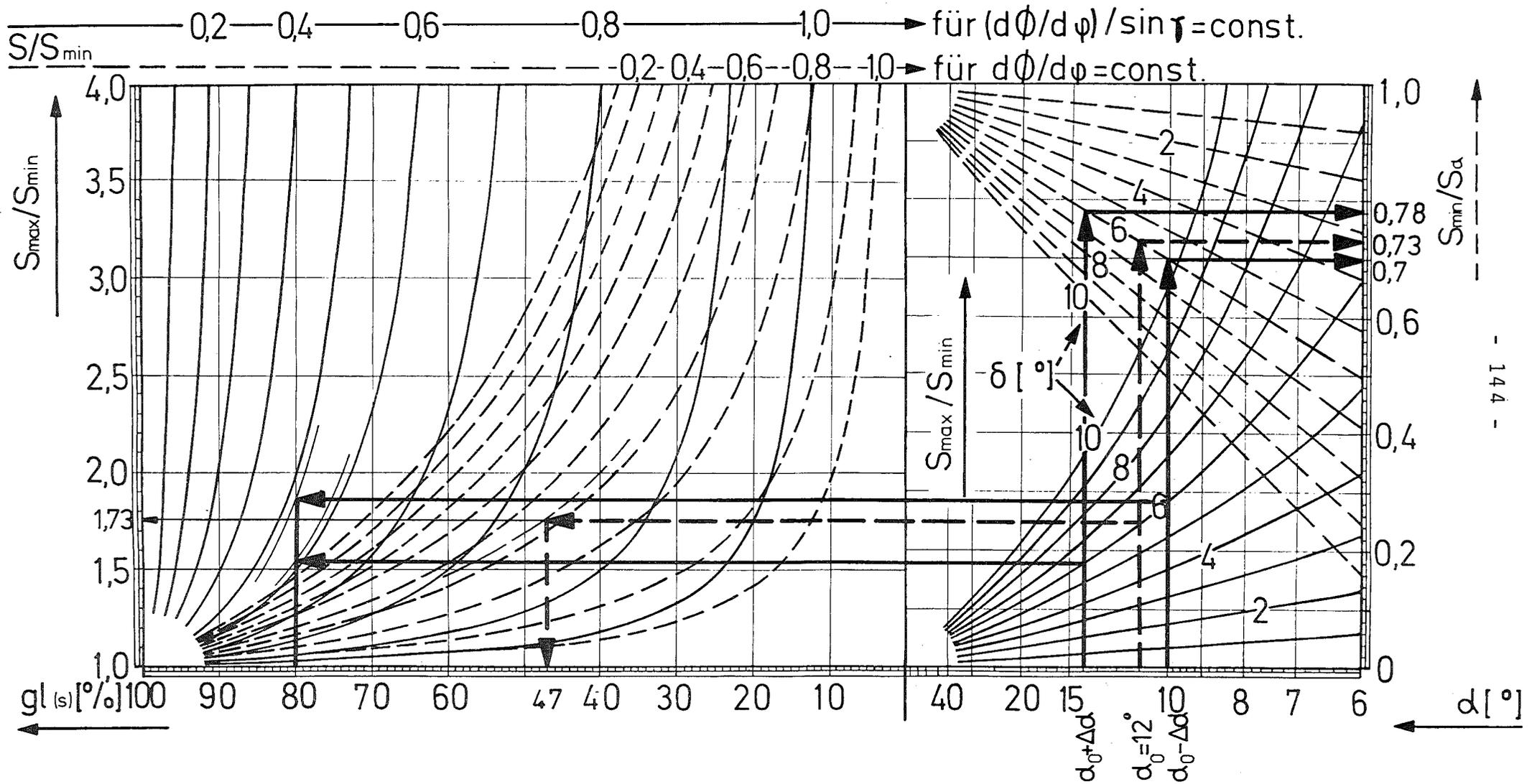
Nomogramm II

Schaubild zur Bestimmung der relativen Lageabweichung l_a/a_0 des Strahlzentrums bei einer Schrägbestrahlung (vgl. Kap. 3.1.2, Seite 48)

Nomogramm II:

Fehler in der Strahlrichtung (Strahlrichtungswinkel $\beta \neq 0$) verändern den tatsächlichen Bestrahlungswinkel β' und die Lage der aktivierten Stelle auf dem Werkstück. Im linken Nomogrammteil kann die relative Lageabweichung l_a/a_0 (Lageabweichung bezogen auf den Abstand zwischen Strahlaustritt und Werkstück) abgelesen werden für unterschiedliche Strahlrichtungswinkel. Für das eingezeichnete Beispiel ($\alpha_0 = 10^\circ$, $\Delta\alpha = \pm 2^\circ$, $\beta = 3^\circ$) muß mit $0,32 \leq l_a/a_0 \leq 0,61$ gerechnet werden, d.h., eine hinreichende Treffsicherheit für die zu aktivierende Stelle ist nur noch dann gegeben, wenn a_0 sehr klein gehalten werden kann.

Der rechte Teil des Schaubilds zeigt die mögliche Abweichung der Stauchung der Tiefenverteilung durch die Einstellunsicherheit $\pm \Delta\alpha$. Positive Winkel β verkleinern den tatsächlichen Bestrahlungswinkel β' gegenüber dem Sollwinkel α_0 (vgl. Bild 23). Im eingezeichneten Beispiel muß mit einem Stauchungsfehler von $\approx \pm 30\%$ gerechnet werden.



Nomogramm III

Schaubild zur Bestimmung der Gleichmäßigkeit $gl_{(s)}$ der Aktivität längs der Tiefe s (vgl. Kap. 3.1.2, Seite 55)

Nomogramm_III:

Mit diesem Schaubild kann diejenige Aktivierungstiefe bestimmt werden, bis zu der eine geforderte Gleichmäßigkeit der Aktivitätsverteilung über der bestrahlten Fläche eingehalten wird (vgl. Kap. 3.1.2).

Das eingezeichnete Beispiel 1 (durchgezogene Linien) geht von folgenden Versuchsdaten aus:

$$\left. \begin{array}{l} \alpha_0 = 12^\circ \\ \Delta\alpha = \pm 2^\circ \\ \vartheta = 6^\circ \end{array} \right\} \text{ Diese Werte beschreiben die Bestrahlungs-} \\ \text{anordnung}$$
$$\frac{d\vartheta/d\varphi}{\sin\vartheta} = \text{const}$$

Gesucht wird diejenige Tiefe der aktiven Schicht bis zu der $gl(s) \geq 80\%$ gilt.

Für $\alpha = \alpha_0 + \Delta\alpha = 14^\circ$ liest man das Wertepaar $s_{\min}/s_\alpha = 0,78$ (Ordinate des rechten Nomogrammteils) und $s/s_{\min} = 0,58$ ab (durchgezogene Kurvenscher für $d\vartheta/d\varphi \cdot \sin\vartheta$ im linken Nomogrammteil interpoliert), für $\alpha = \alpha_0 - \Delta\alpha = 10^\circ$ sind $s_{\min}/s_\alpha = 0,7$ und $s/s_{\min} = 0,53$. Das Produkt aus s/s_{\min} und s_{\min}/s_α liefert die Bereichsgrenzen für das zu erwartende Bestrahlungsergebnis bezogen auf den Einstellwinkel α . Sie betragen im Beispiel $0,37 \leq s/s_\alpha \leq 0,45$. Damit ist zu erwarten, daß bei der ausgeführten Bestrahlung im günstigsten Fall die Hälfte, im ungünstigsten Fall nur wenig mehr als ein Drittel der vorgesehenen Aktivierungstiefe für die Messung eingesetzt werden kann. Der tatsächliche Wert kann nach der Bestrahlung berechnet werden, wenn α durch Eichung bekannt ist.

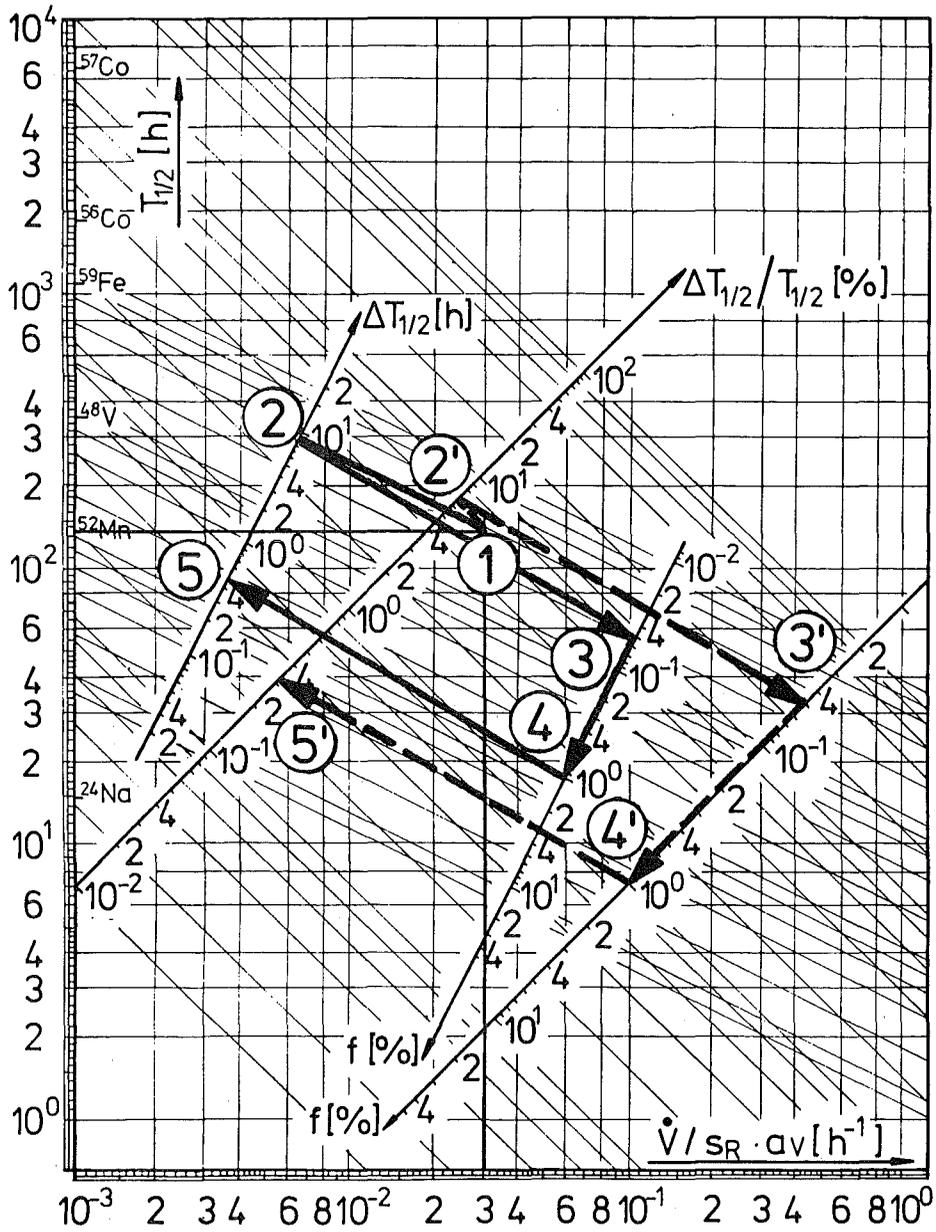
Das zweite eingezeichnete Beispiel (gestrichelter Linienzug) geht von einer Kontrollmessung für das bereits bestrahlte Werkstück aus. Der tatsächliche Einstellwinkel sei $\alpha = 11^\circ$ (aus Eichmessung bekannt), durch Autoradiographie der Eichfolie sei die Flußverteilung zu $d\vartheta/d\varphi = \text{const}$ bestimmt worden. Gesucht sei diejenige Gleichmäßigkeit der Aktivierung, die bis zu einer Tiefe von

$s/s_{11}^0 \leq 0,5$ mindestens vorhanden ist.

Aus dem Schaubild wird auf der Ordinate rechts der Wert $s_{\min}/s_{11}^0 = 0,73$ abgelesen. Der Wert von s/s_{\min} wird berechnet:
 $s/s_{11}^0: s_{\min}/s_{11}^0 = \frac{0,5}{0,73} \cdot s/s_{\min} = 0,68$. Für $s/s_{\min} = 0,68$ wird in der linken Nomogrammhälfte (gestrichelte Kurvenschar für $d\delta/d\varphi = \text{const}$) eine Kurve interpoliert. Das Lot durch den Schnittpunkt mit der Waagrechten aus dem rechten Nomogrammteil schneidet die Abszisse $gl(s)$ bei 47%. Das Ergebnis lautet also:

$$s/s_{11}^0 (\delta = 6^\circ, d\delta/d\varphi = \text{const}) \leq 0,5 \wedge gl \geq 47\%$$

Die durchgezogene Kurvenschar im rechten Nomogrammteil gibt außerdem das Verhältnis der Bestrahlungstiefen s_{\max}/s_{\min} durch die Randstrahlen des aufgeweiteten Strahles an. Es beträgt im Beispiel $s_{\max}/s_{\min} = 1,73$ (Ordinate des linken Nomogrammteils).



Nomogramm IV

Schaubild zur Bestimmung der normierten Verschleißgeschwindigkeit $\dot{V}/s_R \cdot a_V$ bei unvollständiger Korrektur des Halbwertszeitfehlers $\Delta T_{1/2}$ (vgl. Kap. 3.3.3, Seite 84)

Nomogramm_IV:

Das doppellogarithmisch aufgetragene Schaubild dient zur Ermittlung des Fehlers bei der Halbwertszeitkorrektur. Eingezeichnet sind zwei Scharen von Hilfslinien für die Angabe des Halbwertszeitfehlers in Stunden $\Delta T_{1/2}$ [h] und als dimensionslose Größe $\Delta T_{1/2}/T_{1/2}$ [%].

Aufgabe: Für den Versuch 4 mit Mantel III (Kap. 4.4.1.2) soll ermittelt werden, welche Abweichung bei der Bestimmung der Halbwertszeit für die im Meßfenster nachgewiesene Strahlung zulässig ist, wenn ein Fehler von $f^+ = \pm 25\%$ des Meßergebnisses nicht überschritten werden soll.

Folgende Daten sind bekannt:

Meßisotop: ^{52}Mn mit $T_{1/2} = 137$ h

rechnerische Bestrahlungstiefe: $s_R = 77 \mu\text{m}$ (aus Eichung)

Verschleißrate: $5 \mu\text{m}/1000$ h

geplante Dauer des Versuchslaufs: 33 h $\rightarrow V = 0,15 \mu\text{m}$,
 $a_V = 1,95\%$.

zulässiger Meßfehler (bezogen auf Dicke der Restschicht)

$$f = f^+ \cdot a_V = 0,25 \cdot 0,00195 = 0,049\%$$

$$\text{bezogene Verschleißrate } \dot{V}/s_R \cdot a_V = 0,0303 \text{ h}^{-1}$$

Der Schnitt von $\dot{V}/s_R \cdot a_V = 0,0303 \text{ h}^{-1}$ und $T_{1/2} = 137$ h ergibt den Ausgangspunkt ① für die Konstruktion. Die Hilfslinie durch diesen Punkt schneidet $\Delta T_{1/2}$ in ② (dick ausgezogene Pfeile). Dieser Punkt wird durch eine Gerade mit $f = 0,049\%$ verbunden \rightarrow ③. Eine Parallele zur Strecke ②-③ durch den Punkt ④ ($f=1\%$) schneidet $\Delta T_{1/2}$ im Punkt ⑤. Hier wird als Ergebnis abgelesen:

$\Delta T_{1/2} = 0,47$ h, d.h. die Halbwertszeit muß auf 0,47 h oder 28 min genau bestimmt werden.

Wird das Ergebnis als dimensionslose Größe $\Delta T_{1/2}/T_{1/2}$ gewünscht, so erfolgt die Konstruktion entsprechend mit der zugehörigen Hilfslinienschar (unterbrochene Pfeile). Als Ergebnis wird bei Punkt ⑤' abgelesen:

$\Delta T_{1/2}/T_{1/2} = 0,34\%$. Die Halbwertszeit muß also auf 3,4% genau bestimmt werden.

F O R M E L Z E I C H E N U N D G R Ö S S E N

- \bar{a} = Tatsächlicher Abstand des Strahlauftreffpunktes vom Austrittsfenster (Bremstarget)
- \bar{a}_0 = Sollabstand
- \bar{a}_M = Versatz des Strahlzentrums gegenüber der Ideallage
- \bar{a}_T = Abstand der äquidistanten Lauffläche zur berechneten Trochoide
- \bar{a}_D = Abstand des Detektors von der Verschleißzone
- a_i = Anteil der i-ten Komponente am Spektrum im Meßfenster
- a_{AM} = Anteil der abgelagerten Verschleißteilchen am Gesamtverschleiß
- $a_B = \frac{B_2}{x_M}$ = Dicke der Eichfolien bezogen auf Meßbereich x_M
- $a_N = \frac{x_M}{x_R}$ = Nutzanteil = Anteil des Meßbereichs an der rechnerischen Bestrahlungstiefe
- $a_v = \frac{\Delta s_v}{s_R}$ = relative Abriebtiefe pro Versuchslauf
- A = Aktivität
- A_{ges} = Gesamtaktivität
- A_k^+ = Aktivität des k-ten Restkerns bei Bestrahlungsende
- $A_{k\infty}^+$ = Sättigungsaktivität des k-ten Restkerns
- $\frac{A_k^+}{A_{k\infty}^+}$ = Sättigungsfaktor
- \bar{b} = Breite der bestrahlten Fläche senkrecht zur Hauptbewegungsrichtung während der Bestrahlung
- $\bar{b}_\alpha = 2d_{\max}$ = Breite des Parallelstrahls in der Ebene des Einstellwinkels α
- B = Bremsschicht zur Energieeinstellung
- d = Durchmesser des Parallelstrahls
- D = Schwärzung des Radiographiefilms
- $e_M = \frac{\partial Z}{\partial S}$ = Meßempfindlichkeit der Versuchsanordnung

| | |
|---------------------|---|
| E, E_{γ} | = γ -Energie in keV (MeV) |
| E_0 | = Energie der Partikel beim Auftreffen auf die Werkstückoberfläche |
| E_M | = Energie des Teilchens beim Austritt aus der Zyklotronmaschine |
| ΔE_B | = Energieverlust in der Bremsschicht |
| ΔE_F | = Energieverlust im Strahlrohrfenster |
| ΔE_L | = Energieverlust im Luftweg |
| ΔE_S | = Energieverlust im Strahlführungssystem |
| ΔE_W | = Energieverlust im Werkstück |
| f | = relativer Fehler des Meßergebnisses |
| $F_{(o)} F_{()}^+$ | = Funktion von (), Funktionswert an einer vorgegebenen Stelle |
| F_{\square} | = Fläche |
| $g_l(s)$ | = Gleichmäßigkeitsgrad der Summenaktivität in einer Ebene parallel zur Oberfläche in der Tiefe s (in %) |
| h | = Ordinate einer zur Werkstückoberfläche parallelen Ebene in der Tiefe s |
| H | = Häufigkeit |
| I | = Impulszahl |
| k_L | = Vergrößerungsfaktor für die akt. Fläche bei aufgeweitetem Strahl |
| l | = Koordinate längs der Werkstückoberfläche |
| l_a | = Lageabweichung des Strahlzentrums |
| \bar{l} | = Strecke längs der Werkstückoberfläche |
| l_o | = Länge der akt. Fläche |
| l_v | = Länge der am Versuch teilnehmenden Fläche |
| n | = Drehzahl |
| N | = Anzahl der γ -Quanten pro Zeiteinheit |
| p | = Druck im Strahlführungssystem |
| p_{me} | = mittlerer effektiver Druck |

- P = Wahrscheinlichkeit
- r_K = Kuppenradius der Dichtleisten
- R = Krümmungsradius der Werkstückoberfläche
- R_T = Rauhtiefe
- s = Koordinate normal zur Targetoberfläche bei α_0
s' bei α_0 , $\Delta\alpha > 0$ s⁺ bei Anordnung
s'' bei α_0 , $\Delta\alpha < 0$ s⁺⁺ nach Bild 21
- s_E = größte Aktivierungstiefe
- s_M = Endtiefe des Meßbereichs
- s_R = rechnerische Bestrahlungstiefe
- s_M } für α_0 ; s_M^+ } für α , s_M^+ } für γ
 s_R } s_R }
- s_{min}^s, s_{max}^s = Tiefenangaben für die Randstrahlen mit $\alpha = \alpha_{min}, \alpha_{max}$ bei kegeligem Strahl
- s_{opt} = Ort auf der Tiefenverteilungskurve für kleinste Meßunsicherheit bei Verschleißmessungen
- $s_V, \Delta s_V$ = Dicke der im Versuch abgeriebenen Schicht
- S = statistische Sicherheit
- t = Zeiteinheit
- t_V = Versuchszeit
- t_Z = Dauer eines Zyklus
- $T_{1/2}$ = Halbwertszeit
- $\Delta T_{1/2}$ = absoluter Fehler der Halbwertszeit
- T = Temperatureinheit
- T_{KA} = Kühlmittelaustrittstemperatur
- u = Meßunsicherheit
- u_F = Meßunsicherheit der Folieneichung
- u_S = Meßunsicherheit der Stifteichung

- V = Verschleiß
 \dot{V} = Verschleißgeschwindigkeit
 \dot{V}_{\min} = kleinste mit vorgegebenem Fehler meßbare Verschleißgeschwindigkeit
 ΔW = absoluter Winkelfehler der Bestrahlungsanordnung
 W = Führungsgröße der Regelung
 W' = Führungsgröße des Systems unter Berücksichtigung der Störgröße \bar{a}
 x = Koordinate in Flugrichtung der Geschoßteilchen
 x_0 = größte Aktivierungstiefe
 x_E = Eindringtiefe
 x_M = Endtiefe des Meßbereichs
 x_R = rechnerische Bestrahlungstiefe
 \bar{x}_B = wirksame Dicke der Bremsschicht
 $\Delta \bar{x}_B$ = absolute Abweichung der wirksamen Dicke der Bremsschicht von der Sollstärke durch Fertigungsungenauigkeiten, Lagefehler
 X = Regelgröße
 Y = Stellgröße
 z = Spitzenhöhe einer rauhen Oberfläche
 Z = gemessener Zählwert, Zählrate
 Z_k = zeitkorrigierter Zählwert
 Z_W = wahrer Zählwert einer statistischen Impulsfolge
- $\alpha = \alpha_0 \mp \Delta \alpha$ = tatsächlicher Einstellwinkel gegen ideale Strahlage
 α_0 = Sollwinkel zwischen Werkstückoberfläche und idealer Strahlage
 $\Delta \alpha$ = absoluter Einstellfehler
 β = Winkel zwischen idealer und tatsächlicher Strahlage
 γ = wahrer Winkel zwischen Oberfläche und Strahlrichtung
 γ' = wahrer Winkel zwischen Oberfläche und Teilchenflugrichtung

- δ = Strahlkegelwinkel
- δ_T = Mantelwinkel der Trochoide
- δ_{TK} = Mantelwinkel der Meßstelle im kalten Bogen
- δ_{TW} = Mantelwinkel der Meßstelle im warmen Bogen
- ϵ = Einstreufaktor bei Mehrkomponentenmessung
- ζ = Verkürzung der Eindringtiefe bei einer rauhen gegenüber einer glatten Oberfläche
- ϑ = Winkel zwischen Strahlachse und Schwenkebene des Bestrahlungsgerätes (Ebene durch α)
- α = Profilsteigungswinkel
- λ = Zerfallskonstante
- ν = Projektionswinkel der Verschleißgeschwindigkeit im Z-s-t-Schaubild
- ξ = Winkel zwischen Leistenmittellinie und Abtastrichtung des Densitometers
- ρ = Dichte
- σ = Wirkungsquerschnitt für eine Kernreaktion
- τ = Breite des Meßintervalls
- φ = Strahlwinkel
- Φ = Teilchenfluß
- χ = Winkel zwischen der Detektorachse und dem Mittelpunktstrahl durch die Verschleißzone am Mantel
- ψ = Schwenkwinkel des Detektors