



**KfK 4762**  
**Oktober 1990**

# **Bestimmung der Nachweisgrenze bei Kontaminationsmessungen mit dem Ratemeter**

**H. Dilger**  
**Hauptabteilung Sicherheit**

**Kernforschungszentrum Karlsruhe**



**Kernforschungszentrum Karlsruhe**  
**Hauptabteilung Sicherheit**

KfK 4762

**Bestimmung der Nachweisgrenze**  
**bei Kontaminationsmessungen mit dem Ratemeter**

H. Dilger

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

## Zusammenfassung

Es werden Formeln für die Berechnung der Nachweis- und Erkennungsgrenzen beim Einsatz des Ratemeters bei Kontaminationsmessungen abgeleitet. Dabei wird zwischen stationären und dynamischen Messungen unterschieden. Es zeigt sich, daß bei vorgegebenen Grenzwerten der Oberflächenaktivität, der Nulleffektrate und des Oberflächenansprechvermögens Wertepaare mit minimaler Ansprech- und Meßzeit bzw. Ansprech- und Überstreichzeit gefunden werden können.

Determining the lower limit of detection in contamination measurements with rate-meters

## Abstract

Formulas are derived for calculating the limits of detection and identification when the ratemeter is used to measure contaminations. A distinction is made between steady-state and dynamic measurements. It appears that with specified limits of surface activity, of background rate and of surface response value pairs can be found with minimum response and measurement times or response and scanning times.

## 1. Einleitung

Auf dem Gebiet der kerntechnischen Normung werden zur Zeit Aktivitätsmeßverfahren zur Freigabe von radioaktiven Reststoffen bearbeitet. Vor kurzem erschienen grundlegende Normen über die "Nachweis- und Erkennungsgrenze bei Kernstrahlungsmessungen" [1] und die "Bestimmung der Oberflächenkontamination" [2]. Mit der vorliegenden Arbeit soll die diesen Normen zugrundeliegende Philosophie auf die zur Zeit entstehende Norm übertragen werden.

## 2. Stationäre Messung

Wenn ab dem Zeitpunkt  $t = 0$  eine der einfallenden Teilchenzahl proportionale Spannung  $U$  erzeugt wird, gilt für die Zeitabhängigkeit der am Drehspulinstrument mit der Ansprechzeit  $\tau$  angezeigten Zählrate:

$$R = R_{\infty} (1 - e^{-t/\tau}) = R_{\infty} \cdot f(t, \tau) \quad (1)$$

- $R$  = zeitabhängige Zählrate in  $s^{-1}$
- $R_{\infty}$  = mittlere Zählrate nach Beendigung des Ladevorgangs in  $s^{-1}$
- $t$  = Meßdauer in  $s$
- $\tau$  = Ansprechzeit in  $s$
- $f(t/\tau)$  = Ladefunktion

In Abb. 1 ist die Funktion  $f$  für verschiedene  $t/\tau$  angegeben.

Wenn die einfallenden Teilchen aus radioaktiven Zerfallsvorgängen stammen, unterliegen sie einer Poisson-Verteilung. In [1] sind Formeln für die Nachweis- und Erkennungsgrenze bei Kernstrahlungsmessungen mit zählenden Geräten angegeben. Für nicht zu kleine Zählraten und Meßzeiten kann die Poisson-Verteilung durch eine Normalverteilung angenähert werden. Des weiteren können für den Ratemeterbetrieb in 1. Näherung in den Formeln nach [1] die Meßzeiten  $t$  durch  $2\tau$  ersetzt werden. Mit diesen Näherungen gelten folgende Beziehungen:

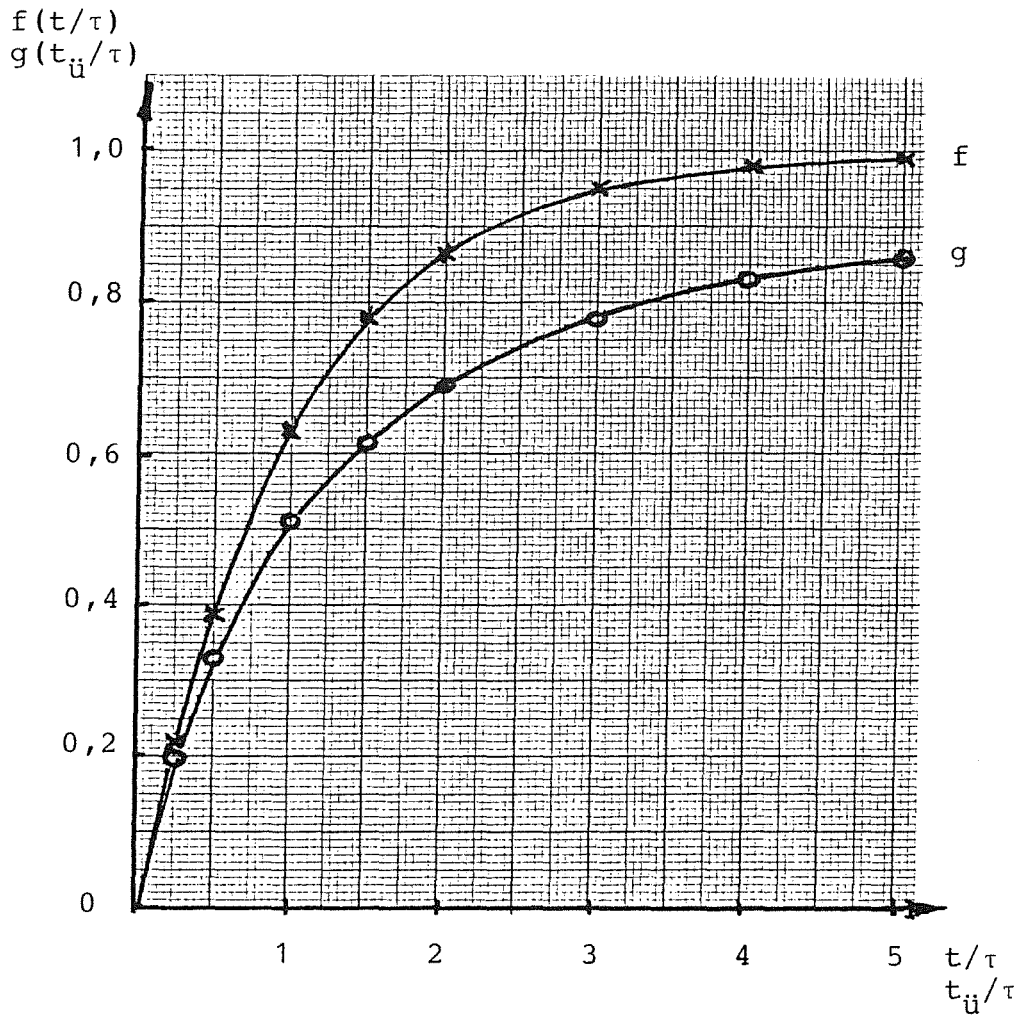


Abb. 1: Ladefunktion  $f$  nach Gl. (1) in Abhängigkeit von der normierten Meßzeit bzw. Bewegungsfunktion  $g$  nach Gl. (15) in Abhängigkeit von der normierten Überstreichzeit nach Abb. 3.

$$EG = k_{1-\alpha} \sqrt{\frac{R_0}{2} \left( \frac{1}{\tau_0} + \frac{1}{\tau_b} \right)} \quad (2)$$

$$NWG = (k_{1-\alpha} + k_{1-\beta}) \sqrt{\frac{\rho_0}{2} \left( \frac{1}{\tau_0} + \frac{1}{\tau_b} \right)} \quad \rho_0 \tau \geq 10 \quad (3)$$

EG = Erkennungsgrenze in s<sup>-1</sup>

NWG = Nachweisgrenze in s<sup>-1</sup>

k<sub>1-α</sub>, k<sub>1-β</sub> = Quantilen der Standard-Normalverteilung

R<sub>0</sub> = Nulleffektzählrate in s<sup>-1</sup>

τ<sub>0</sub> = Ansprechzeit bei der Messung des Nulleffekts in s

τ<sub>b</sub> = Ansprechzeit bei der Messung des Bruttoeffekts in s

ρ<sub>0</sub> = Erwartungswert von R<sub>0</sub> in s<sup>-1</sup>

Die mittlere Zählrate nach Beendigung des Ladevorgangs bei vorgegebener Aktivität und vorgegebenem Ansprechvermögen des Kontaminationsmeßgeräts ergibt sich zu:

$$R_\infty = OA \cdot \eta \quad (4)$$

OA = Oberflächenaktivität in Bq cm<sup>-2</sup>

η = Oberflächenansprechvermögen in s<sup>-1</sup> Bq<sup>-1</sup> cm<sup>2</sup>

Wenn mit Oberflächenmessungen die Einhaltung von Grenzwerten nach der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) kontrolliert werden soll, muß in Gl. (4) statt der Oberflächenaktivität der entsprechende Grenzwert nach Anlage IX StrlSchV eingesetzt werden.

Damit das Meßverfahren geeignet ist, muß nach [1] die Nachweisgrenze NWG kleiner oder gleich der Zählrate des Grenzwertes sein. Im vorliegenden Fall des Ratemeterbetriebs ergibt sich mit den Gln. (1) - (4) folgende Aussage:



$$NWG = (k_{1-\alpha} + k_{1-\beta}) \sqrt{\frac{\rho_0}{2} \left( \frac{1}{\tau_0} + \frac{1}{\tau_b} \right)} \leq GW \eta (1 - e^{-\tau_b/\tau}) = R_{GW} \quad (5)$$

GW = Grenzwert der Oberflächenaktivität in Bqcm<sup>-2</sup>

t<sub>b</sub> = Meßzeit bei der Messung des Bruttoeffekts in s

R<sub>GW</sub> = mittlere Zählrate, die durch GW erzeugt wird in s<sup>-1</sup>

Mit der Wahl der Ansprechzeiten  $\tau = \tau_0 = \tau_b$  und beispielsweise der Parameter  $k_{1-\alpha} = k_{1-\beta} = 1,65$  läßt sich Gl. (5) umstellen:

$$\frac{3,3 \sqrt{\rho_0}}{GW \eta} \leq (1 - e^{-\tau_b/\tau}) \sqrt{\tau} \quad (6)$$

Die linke Seite der Ungleichung (6) ist bei vorgegebenem Erwartungswert der Nulleffektzählrate, dem Grenzwert der Oberflächenaktivität und dem Oberflächenansprechvermögen konstant gleich K. Die rechte Seite ist eine Funktion h(τ) mit dem Parameter t<sub>b</sub>.

$$K \leq h(\tau), \text{ Par. } t_b \quad (6a)$$

Die Kurvenscharen h(τ) mit der Meßzeit t<sub>b</sub> als Parameter sind in Abb. 2 aufgezeichnet. Die Kurven zeigen einen Hochpunkt.

Für alle Parametersätze t<sub>b</sub>, τ für die die Ungleichung (6a) erfüllt sind, ist die Nachweisgrenze kleiner oder gleich der Zählrate des Grenzwerts. Damit ist das Meßverfahren geeignet, die Einhaltung des Grenzwertes mit der vorgegebenen statistischen Sicherheit k<sub>1-β</sub> zu kontrollieren. Die Verbindungskurve der Hochpunkte gibt für den Fall NWG = R<sub>GW</sub> den Parametersatz t<sub>b</sub>, τ an, für den t<sub>b</sub> minimal wird.

Der Hochpunkt läßt sich aus der rechten Seite von Gl. (6) bestimmen. Die numerische Berechnung ergibt die Beziehung:

$$t_{bmin} = 1,25 \tau \quad (7)$$

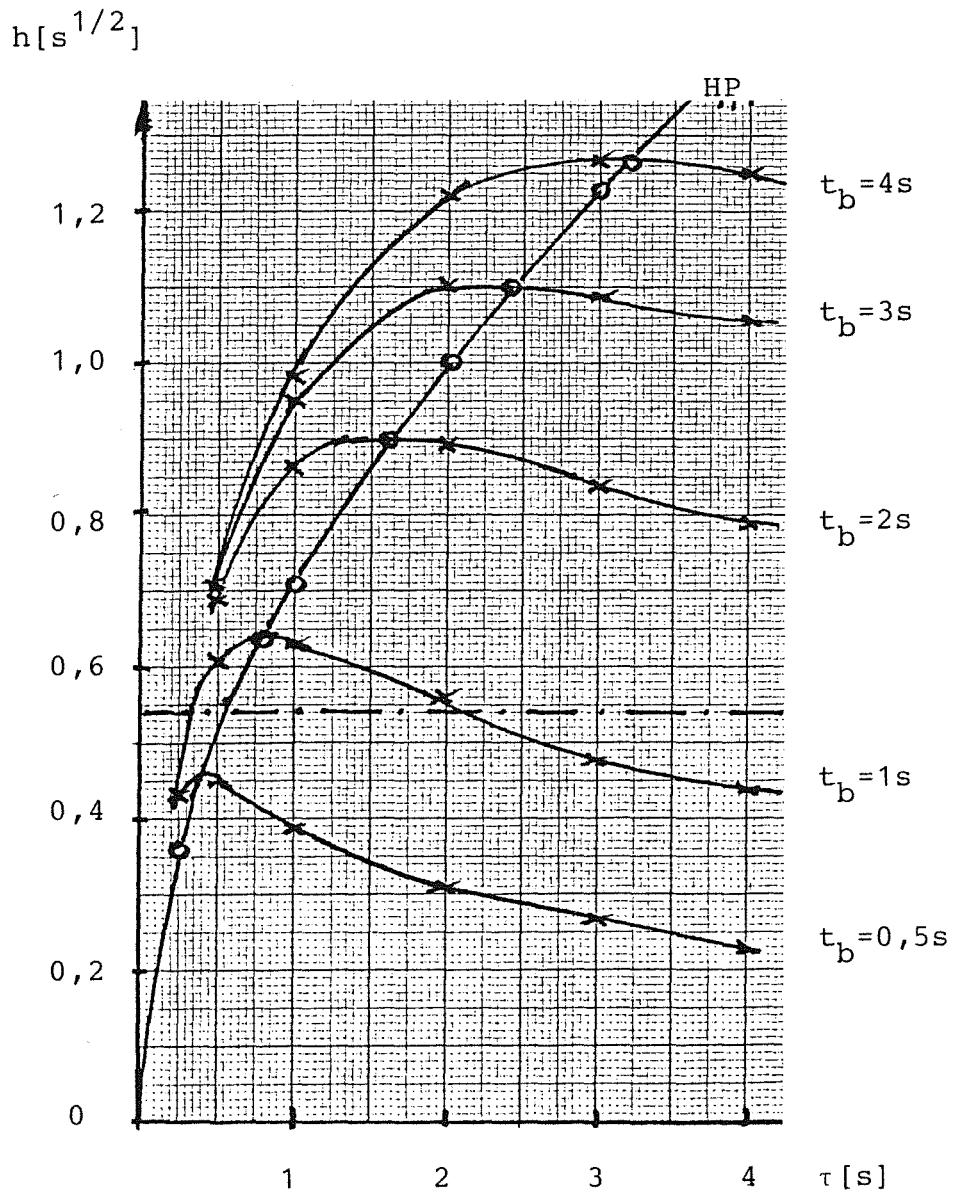


Abb. 2: Nomogramm zur Bestimmung der Ansprech- und Meßzeit für ein ruhendes Ratemeter

Dieser Wert für  $t_b$  eingesetzt in Gl. (6) führt zu:

$$\tau = 21,8 \frac{\rho_0}{GW^2 \eta^2} \quad (8)$$

und

$$t_{bmin} = 27,2 \frac{\rho_0}{GW^2 \eta^2} \quad (8a)$$

### 3. Dynamische Messungen

Bei Messungen mit bewegtem Detektor ist zu beachten, daß das Meßgerät nur bei einer punktförmigen Kontamination sofort die ganze Aktivität erfassen kann. Bei flächenhaften Kontaminationen nimmt die meßbare Aktivität mit zunehmender Meßzeit zu.

Falls eine gleichförmig kontaminierte Fläche der Breite  $b$  mit einem Detektor mit konstanter Geschwindigkeit  $v$  überstrichen wird, (Länge der kontaminierten Fläche größer der Länge des Detektors) nimmt die Zahl der in den Detektor einfallenden Teilchen und damit die erzeugte Spannung  $U$  theoretisch linear mit der Zeit zu. Sie erreicht ihr Maximum nach der Überstreichzeit  $t_0$ , wenn der Detektor ganz über der kontaminierten Fläche liegt. Wenn der Detektor die Breite  $b$  hat, nimmt bei Weiterbewegung die Zahl der einfallenden Teilchen und damit die erzeugte Spannung theoretisch wieder linear mit der Zeit ab, bis sie zur Zeit  $t = 2 t_0$  wieder 0 erreicht. Wenn die Detektorbreite größer  $b$  ist, steht die maximale Spannung so lange an, wie die kontaminierte Fläche ganz unter dem Detektor liegt und nimmt erst anschließend wieder linear mit der Zeit ab. Praktisch besitzt der Detektor an den Rändern ein verringertes Oberflächenansprechvermögen, so daß Abweichungen vom linearen Verlauf der Spannung  $U$  auftreten.

In Abb. 3 ist der idealisierte Spannung-Zeit-Verlauf für den Fall Detektorbreite = Strahlerbreite aufgezeichnet.

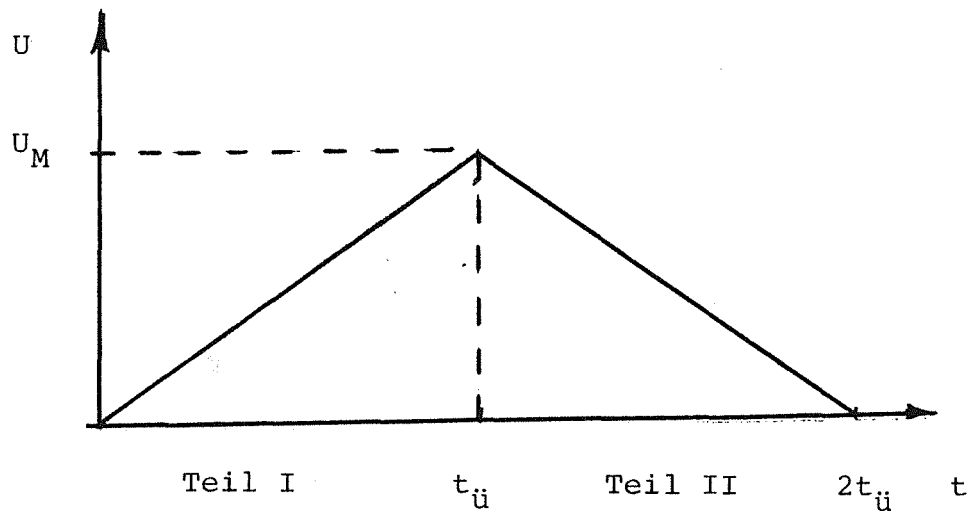


Abb. 3: Idealisierter Verlauf der erzeugten Detektorspannung  $U$  mit der Zeit bei gleichmäßigem Überfahren einer kontaminierten Fläche.

$b$  = Detektorbreite = Strahlerbreite (i. a. = 10 cm)

$v$  = Überstreichgeschwindigkeit in  $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$

$t_{\ddot{u}} = b/v =$  Überstreichzeit in s

Da die erzeugte Spannung proportional der Zählrate ist, sind die Drehspulinstrumente auf Zählraten kalibriert.

Zur Beschreibung der am Drehspulinstrument mit der Ansprechzeit  $\tau$  angezeigten Zählrate gilt die folgende Differentialgleichung:

$$U = U_R + U_C \quad (9)$$

$U$  = erzeugte Spannung

$U_R$  = am Innenwiderstand anstehende Spannung

$U_C$  = am Ladekondensator anstehende Spannung

Für den idealisierten Bewegungsablauf im Teil 1 gilt:

$$U^I = mt, \quad t \leq t_{\ddot{u}}$$

mit  $m = U_M/t_{\ddot{u}}$ , wobei  $U_M$  die maximale Spannung nach  $t_{\ddot{u}}$  ist.

Damit ist folgende Differentialgleichung zu lösen:

$$m \dot{t} = \frac{dQ}{dt} R_i + \frac{Q}{C} \quad (10)$$

- Q = elektrische Ladung
- R<sub>i</sub> = Innenwiderstand des Drehspulinstruments
- C = Kondensatorkapazität des Drehspulinstruments

Mit der Randbedingung U = 0 für t = 0 ergibt sich folgende Zeitabhängigkeit der angezeigten Zählrate (R~U):

$$R^I = R_\infty \frac{\tau}{t_{\ddot{u}}} \left( e^{-t/\tau} + \frac{t}{\tau} - 1 \right), \quad t \leq t_{\ddot{u}} \quad (11)$$

Für t = t<sub>ü</sub> wird im ersten Teil des Bewegungsablaufs die angezeigte Impulsrate maximal:

$$R^I(t_{\ddot{u}}) = R_\infty \frac{\tau}{t_{\ddot{u}}} \left( e^{-t_{\ddot{u}}/\tau} + \frac{t_{\ddot{u}}}{\tau} - 1 \right) \quad (11a)$$

Für den zweiten Teil des Bewegungsablaufs gilt (vergl. Abb. 3):

$$U^{\text{II}} = U_M - m t, \quad t \leq t_{\ddot{u}} \quad (12)$$

Damit ist folgende Differentialgleichung zu lösen:

$$U_M - mt = \frac{dQ}{dt} R_1 + \frac{Q}{C} \quad (12)$$

Mit der Randbedingung  $U(0) = U(t_{\ddot{u}})$  ergibt sich folgende Zeitabhängigkeit der angezeigten Zählrate ( $R \sim U$ ):

$$R^H = R_{\infty} \left[ \frac{\tau}{t_{\ddot{u}}} (e^{-t_{\ddot{u}}/t} + \frac{t_{\ddot{u}}}{\tau} - 2) - 1 \right] e^{-t/\tau} - R_{\infty} \frac{\tau}{t_{\ddot{u}}} \left( \frac{t}{\tau} - 1 \right) + R_{\infty} \quad (13)$$

Die angezeigte Zählrate erreicht im zweiten Bewegungsteil den Maximalwert des gesamten Vorgangs zum Zeitpunkt:

$$t = \tau \ln (2 - e^{-t_{\ddot{u}}/\tau}) \quad (14)$$

Wenn  $t$  aus Gl. (14) in Gl. (13) eingesetzt wird, ergibt sich die maximale Zählrate zu:

$$R_{max} = R_{\infty} \left[ 1 - \frac{t_{\ddot{u}}}{\tau} \ln (2 - e^{-t_{\ddot{u}}/\tau}) \right] = R_{\infty} \cdot g(t_{\ddot{u}}/\tau) \quad (15)$$

Die Bewegungsfunktion  $g(t_{\ddot{u}}/\tau)$  ist ebenfalls in Abb. 1 aufgezeichnet.

Für die Durchführung von Entscheidungsmessungen mit bewegtem Detektor gelten die Ausführungen aus Abschnitt 2 gleichermaßen.

Damit das Meßverfahren geeignet ist, muß die Nachweisgrenze NWG kleiner oder gleich der Zählrate  $R_{GW}$  des Grenzwertes sein.

$$NWG = (k_{1-\alpha} + k_{1-\beta}) \sqrt{\frac{\rho_0}{2} \left( \frac{1}{\tau_0} + \frac{1}{\tau_b} \right)} \leq GW \eta \left( 1 - \frac{t_{\ddot{u}}}{\tau_b} \ln(2 - e^{-t_{\ddot{u}}/\tau_b}) \right) = R_{GW} \quad (16)$$

Mit der Wahl Ansprechzeiten  $\tau = \tau_0 = \tau_b$  und beispielsweise der Parameter  $k_{1-\alpha} = k_{1-\beta} = 1,65$  läßt sich Gl. (16) umstellen:

$$\frac{3,3 \sqrt{\rho_0}}{GW \eta} \leq \left[ \left( 1 - \frac{t_{\ddot{u}}}{\tau} \ln(2 - e^{-t_{\ddot{u}}/\tau}) \right) \right] \sqrt{\tau} \quad (17)$$

Die linke Seite der Ungleichung (17) ist bei vorgegebenem Erwartungswert der Nulleffektzählrate, der Grenzaktivität und des Oberflächenansprechvermögens konstant gleich  $K$ . Die rechte Seite ist eine Funktion  $l(\tau)$  mit dem Parameter  $t_{\ddot{u}}$ .

$$K \leq l(\tau), \text{ Par. } t_{\ddot{u}} \quad (17a)$$

Die Kurvenscharen  $l(\tau)$  mit der Überstreichzeit als Parameter sind in Abb. 4 aufgezichnet. Die Kurven zeigen für  $t_{\ddot{u}}, \tau > 0$  einen Hochpunkt.

Für alle Parametersätze  $t_{\ddot{u}}, \tau$ , für die die Ungleichung (17) erfüllt sind, ist die Nachweisgrenze kleiner oder gleich der Zählrate des Grenzwertes und damit ist das Meßverfahren geeignet. Die Verbindungskurve der Hochpunkte gibt für den Fall  $NWG = R_{GW}$  den Parametersatz  $t_{\ddot{u}}, \tau$  an, für den  $t_{\ddot{u}}$  minimal wird.

Der Hochpunkt läßt sich aus der rechten Seite der Gl. (17) bestimmen. Die numerische Berechnung ergibt die Beziehung:

$$t_{\ddot{u} \text{min}} = 1,08 \tau \quad (18)$$

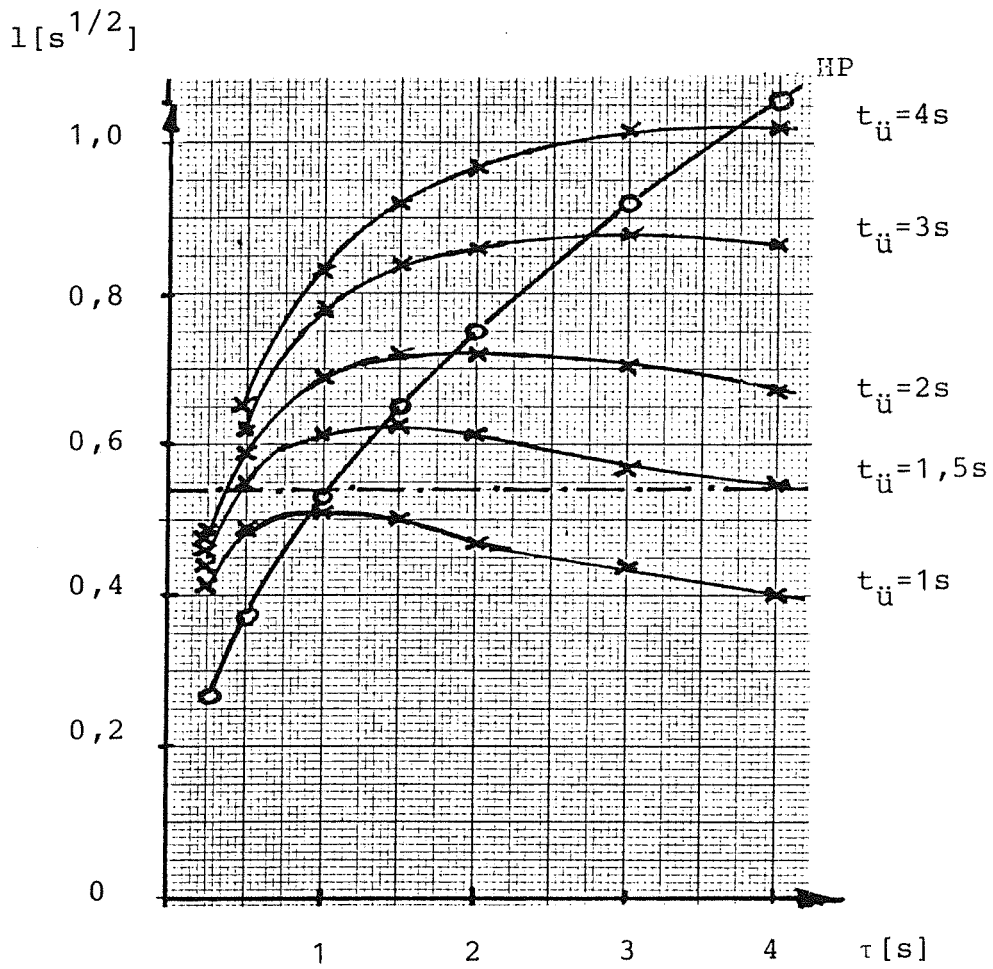


Abb. 4: Nomogramm zur Bestimmung der Ansprech- und Überstreichzeit für ein bewegtes Ratemeter



Dieser Wert für  $t_{\text{ümin}}$  eingesetzt in Gl. (17) führt zu:

$$\tau = 38,7 \frac{\rho_0}{GW^2 \eta^2} \quad (19)$$

und

$$t_{\text{ümin}} = 41,8 \frac{\rho_0}{GW^2 \eta^2} \quad (19a)$$

#### 4. Vergleich der stationären und dynamischen Messung

Ein Vergleich der Gleichungen (8, 8a) mit (19, 19a) zeigt, daß bei den dynamischen Messungen die minimale Überstreichzeit etwa 50 % länger ist, als die minimale Meßzeit bei der stationären Messung. Andererseits sind bei der stationären Messung noch Zwischenzeiten für das Absetzen und Verschieben des Meßgeräts hinzuzurechnen. Diese werden bei relativ kurzen Meßzeiten bzw. Überstreichzeiten bis ca. 2 s den gesamten Zeitaufwand für eine Meßfläche dominieren. Hier sind dynamische Messungen zeitsparender. Bei längeren Meß- und Überstreichzeiten fallen die Zwischenzeiten bei der stationären Messung nicht mehr so ins Gewicht und somit ist diese günstiger.

Generell besteht bei stationären Messungen die Möglichkeit, daß sich eine Kontamination so auf zwei Meßflächen verteilt, daß keine Grenzwertüberschreitung gemessen wird. Andererseits können bei dynamischer Messung durch zu schnelles Überstreichen oder zu großem Abstand des Detektors von der Meßfläche Grenzwertüberschreitungen unerkannt bleiben.

## Literatur

- [1] Nachweisgrenze und Erkennungsgrenze bei Kernstrahlungsmessungen, DIN 25 482, Teil 1, Zählende Messungen ohne Berücksichtigung des Probenbehandlungseinflusses, April 1989
- [2] Bestimmung der Oberflächenkontamination, DIN/ISO 7503, Teil 1, Beta-Strahler (Max. Beta-Energie  $E_{\beta\max}$  größer als 0,15 MeV) und Alpha-Strahler, Juli 1990