

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

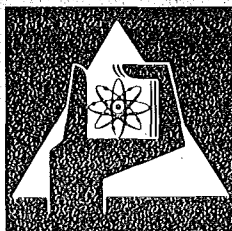
Juni 1975

KFK 2172

Abteilung Strahlenschutz und Sicherheit

**Berechnung der Dosisleistung durch Gammastrahlung
aus der radioaktiven Abluftfahne eines Daueremittenten**

W. Hübschmann, D. Papadopoulos



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

KARLSRUHE

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

KFK 2172

Abteilung Strahlenschutz und Sicherheit

Berechnung der Dosisleistung durch Gammastrahlung
aus der radioaktiven Abluftfahne eines Daueremittenten

von

W. Hübschmann, D. Papadopoulos

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung	Seite	2
2. Ausbreitungsstatistik		3
3. Aktivitätsverteilung		5
3.1. Linienquelle		6
3.2. Flächenquelle		6
3.3. Volumenquelle		7
4. Dosisverteilung		9
4.1. Allgemeines		9
4.2. Punktquelle		10
4.3. Linienquelle		11
4.4. Flächenquelle		12
4.4.1. Der Fall $x \geq R$		13
4.4.2. Der Fall $x < R$		14
4.5. Volumenquelle		15
5. Berechnung der Dosisleistung aus der radioaktiven Abluft mehrerer Emittenten		17
6. Ergebnisse		21
7. Bezeichnungen		25
8. Literatur		26
9. Abbildungen		27

Kurzfassung

Es wird ein Modell der Berechnung der Gamma-Dosisleistung, verursacht durch die radioaktive Abluft eines Daueremittenten, vorgestellt. Dabei wird die Häufigkeitsverteilung der Windrichtung und -geschwindigkeit sowie der Stabilitätskategorien berücksichtigt. Es wird angenommen, daß die dieser Statistik entsprechend kontinuierlich verteilte Aktivität an diskreten Gitterpunkten eines räumlichen Netzes konzentriert ist. Die Maschenweite dieses Netzes sowie die Reichweite der Integration der einzelnen Dosisbeiträge bestimmen sowohl die Genauigkeit als auch die Rechenzeit der Dosisleistungsberechnung. Der Einfluß der in Nachbar-sektoren emittierten Aktivität wird erfaßt.

Die Beispiele wurden mit einem Fehler unter 3 % berechnet. Es wird der Einfluß der in die Nachbarsektoren emittierten Aktivität gezeigt. Die Ergebnisse werden mit der Dosisleistungsverteilung entsprechend dem Submersionsmodell und dem von K.J. Vogt /2/ entwickelten Modell verglichen.

Summary

Calculation of the Gamma-Dose Rate from a Continuously Emitted Plume

A computer model is presented which calculates the long term gamma dose rate caused by the radioactive off-gas continuously emitted from a stack. The statistical distribution of the wind direction and velocity and of the stability categories is taken into account. The emitted activity, distributed in the atmosphere according to this statistics, is assumed to be concentrated at the mesh points of a three-dimensional grid. The grid spacing and the integration limits determine the accuracy as well as the computer time needed. When calculating the dose rate in a given wind direction, the contribution of the activity emitted into the neighbouring sectors is evaluated. This influence is demonstrated in the results, which are calculated with an error below 3 % and compared to the dose rate distribution curves of the submersion model and the model developed by K.J. Vogt /2/.

1. Einführung

Die Berechnung der Gammadosisleistung aus einer radioaktiven Abluftfahne ist wegen der großen Reichweite der γ -Strahlung in Luft und der ungleichmäßigen Verteilung in der Atmosphäre relativ kompliziert. Es gibt eine ganze Reihe von Näherungsverfahren, s. /1/ bis /5/, die meist mehr oder weniger grobe Annahmen bezüglich der Aktivitätsverteilung im Raum treffen. Fast alle Verfahren beziehen sich jedoch auf einzelne Abluftfahnen bei gegebener Ausbreitungssituation in der Atmosphäre, obwohl es sich bei den stärksten Emittenten radioaktiver Gase, nämlich den Kernreaktoren, um Daueremittenten handelt. Nur wenige Verfahren berücksichtigen die Aktivitätsverteilung bei Daueremission. Von diesen ist das in /2/ beschriebene am bekanntesten geworden.

Auch bei diesem Verfahren wird jedoch der Einfluß benachbarter Windrichtungssektoren nur pauschal berücksichtigt, wobei angenommen wird, daß in den Nachbarsektoren die gleiche Aktivitätsverteilung vorliegt wie im Hauptsektor. Diese Annahme ist zwar auch bei der Berechnung der Strahlendosen durch α - oder β -aktive Abgase üblich, führt aber gerade bei Gammastrahlung wegen deren großer Reichweite in Luft zu beträchtlichen Fehlern, je nach den Unterschieden der Windrichtungshäufigkeit benachbarter Sektoren.

Im Kernforschungszentrum mit dem FR2 als relativ starkem Emittenten gamma-aktiver Abgase war es daher notwendig, ein eigenes möglichst genaues Instrument zur Berechnung der Gammadosisverteilung zu besitzen. Da die berechneten Strahlendosen an der Geländegrenze des KFZK in der Größenordnung der für Kernkraftwerke zulässigen Dosen liegen, ist auch ein hoher Rechenaufwand zur Erzielung bestmöglicher Genauigkeit vertretbar. Daher wurde ein Rechenmodell unter folgender Zielsetzung entwickelt:

- 1) Die Verteilung der Aktivität in der Atmosphäre entspricht der örtlichen Ausbreitungsstatistik. Diese Bedingung schließt auch die mögliche Verwendung örtlich angepaßter Ausbreitungsparameter (σ_z -Werte) ein.
- 2) Die Einstrahlung aus Nachbarsektoren wird exakt berücksichtigt.
- 3) Zur Beschränkung der Rechenzeit werden sowohl die maximal zu berücksichtigende "Reichweite der Gammastrahlung" R_0 als auch die Schrittweite der Integration ($\Delta r, \Delta z$) in geeigneter Weise nach oben (R_0) bzw. nach unten ($\Delta r, \Delta z$) begrenzt.

2. Ausbreitungsstatistik

Die Abgabe der Aktivität A über lange Zeitperioden erlaubt die Annahme einer gleichmäßigen Verteilung der Aktivität in einem Sektor der Öffnung Φ . Zur Berechnung der Aktivitätsverteilung ist eine meteorologische Statistik für die S Windrichtungssektoren notwendig.

Es gilt:

$$S \Phi = 2 \pi \quad (2.1)$$

Die Statistik gibt die Häufigkeit f_{sjk} der Windgeschwindigkeitsstufe k für Stabilitätskategorie j in dem Sektor s an.

Es muß also gelten:

$$\sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K f_{sjk} = 1 \quad (2.2)$$

wobei J bzw. K die Zahl der Kategorien bzw. der Windgeschwindigkeitsstufen ist.**

* Zur Definition der "Reichweite der Gammastrahlung" s. Kap.4.1

** Für die im KFZK ausgewertete meteorologische Statistik ist $S = 12$; $J = 6$; $K = 7$.

Die Aktivitätskonzentration ist ^{umgekehrt} proportional der Windgeschwindigkeit. Es können vorab einige Mittelwerte der Windgeschwindigkeit in folg. Weise abgeleitet werden.

In jedem Sektor s wird für jede Kategorie j die mittlere reziproke Windgeschwindigkeit

$$\overline{\left(\frac{1}{u}\right)}_{sj} = \frac{\sum_k \frac{f_{sjk}}{\bar{u}_k}}{\sum_k f_{sjk}}$$

mit \bar{u}_k als mittlere Windgeschwindigkeit der Windgeschwindigkeitsstufe k , berechnet.

Es wird

$$u_{sj} \equiv 1/\overline{\left(\frac{1}{u}\right)}_{sj} \quad (2.4)$$

gesetzt.

$$f_{sj} = \sum_k f_{sjk} \quad (2.5)$$

ist die Häufigkeit dafür, daß der Wind im Sektor s weht und dabei die Stabilitätskategorie j herrscht. Die mittlere reziproke Windgeschwindigkeit in einem Sektor s , unabhängig von der Stabilitätskategorie j , wird durch

$$\overline{\left(\frac{1}{u}\right)}_s = \frac{\sum_j \sum_k \frac{f_{sjk}}{\bar{u}_k}}{\sum_j \sum_k f_{sjk}} \quad (2.6)$$

berechnet.

Es wird

$$u_s \equiv 1 / \left(\overline{\frac{1}{u}} \right)_s \quad (2.7)$$

gesetzt.

$$f_s = \sum_j \sum_k f_{sjk} \quad (2.8)$$

ist die gesamte Windrichtungshäufigkeit im Sektor s .

3. Aktivitätsverteilung

Die mit der Abluft emittierte Aktivität wird schrittweise in die 3 Dimensionen des Raums (axial , azimuthal und vertikal) verteilt.

Zunächst wird für jeden Emittenten die in einen Sektor emittierte Aktivität auf der Mittellinie in der Emissionshöhe konzentriert angenommen (Linienquelle); sodann wird die Linienaktivität auf der Emissionsebene über die ganze Sektoröffnung gleichmäßig verteilt (Flächenquelle); schließlich wird die Aktivität jedes Flächenelements der Flächenquelle in z-Richtung entsprechend dem vertikalen Ausbreitungsparameter $\sigma_{zj}(x)$ und unter Berücksichtigung der Reflexion am Boden normal verteilt (Volumenquelle).

Bei jeder der drei Quellverteilungen wird die an sich kontinuierlich (auf einer Linie, einer Fläche oder im Volumen) verteilte Aktivität in diskrete Einzelaktivitäten oder "Aktivitätspunkte" an den Schwerpunkten der Linien- bzw. Flächen- bzw. Volumenelementen konzentriert (Punktquelle). Die Gammadosis an einem Aufpunkt wird als Summe der Dosisbeiträge aus den einzelnen Punktquellen berechnet.

3.1. Linienquelle

Es wird angenommen, daß ein Emittent der Emissionshöhe h und der Emissionsstärke \dot{A} , die Aktivitätsrate $f_s \cdot \dot{A}$ so abgibt, daß sie in einem sehr schmalen Sektor auf der Emissionshöhe konzentriert bleibt (Linienquelle). Bezeichnen wir mit λ die Zerfallskonstante des emittierten Nuklids, so ist die Aktivitätskonzentration pro Längeneinheit an der Stelle r der Linienquelle

$$C_{Ls} = \frac{\dot{A} f_s}{u_s} e^{-\frac{\lambda r}{u_s}} \quad (3.1)$$

Die Aktivität der Linienquelle wird in eine Kette einzelner Aktivitätselemente aufgeteilt.

$$\Delta A_{Ls} = C_{Ls} \Delta r \quad (3.2)$$

Es ist

$$r = r_n = n \Delta r + \frac{\Delta r}{2}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (3.3)$$

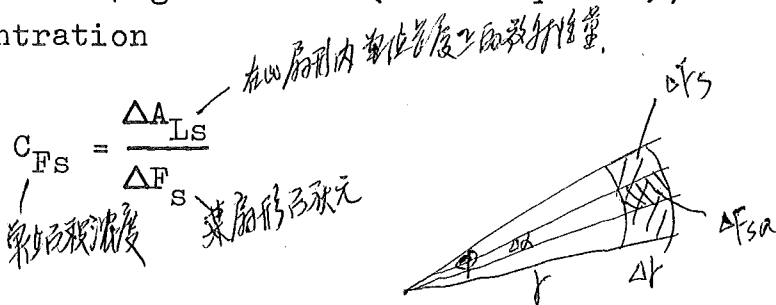
3.2. Flächenquelle

Die Fläche ΔF_s zwischen den Kreisen mit den Radien $r - \frac{\Delta r}{2}$ und $r + \frac{\Delta r}{2}$ innerhalb eines Sektors s der Öffnung Φ ist

$$\Delta F_s = r \Phi \Delta r \quad (3.4)$$

Die Aktivität ΔA_{Ls} sei auf der Fläche ΔF_s der Emissionsebene gleichmäßig verteilt (Flächenquelle); dann ist die Flächenkonzentration

$$C_{Fs} = \frac{\Delta A_{Ls}}{\Delta F_s} \quad (3.5)$$



In einem Flächenelement

$$\Delta F_{sa} = r \Delta a \Delta r \quad (3.6)^*$$

der Fläche ΔF_s befindet sich die Aktivität

$$\Delta A_{Fa} = C_{Fs} \Delta F_{sa} \quad (3.7)$$

Aus den Gleichungen (3.1) bis (3.7) folgt

$$\Delta A_{Fa} = \frac{\dot{A}}{r \Phi} e^{-\frac{\lambda r}{u_s}} \frac{f_s}{u_s} \Delta F_{sa} \quad (3.8)$$

Schreibt man Gleichung (3.8) für eine Kategorie j, so ist

$$\Delta A_{Fja} = \frac{\dot{A}}{r \Phi} e^{-\frac{\lambda r}{u_{sj}}} \frac{f_{sj}}{u_{sj}} \Delta F_{sa} \quad (3.9)$$

die Aktivität auf der Fläche ΔF_{sa} während der Stabilitätskategorie j.

3.3. Volumenquelle

Als Volumenquelle wird hier die den Gesetzen atmosphärischer Ausbreitung entsprechend im Luftstrom verteilte Aktivität eines Emittenten verstanden. Wird die Aktivität ΔA_{Faj} in vertikaler Richtung z nach einer Gaußverteilung der Varianz σ_{zj}^2 verteilt und wird eine vollständige Reflexion am Boden angenommen, so ist die Konzentration der Aktivität ΔA_{Vjai} im Bereich (s. Abb. 1)

$$\Delta z_i = z_{i+1} - z_i \quad (3.10)$$

* Δa wird so gewählt, daß $\Phi/\Delta a$ eine ganze Zahl ist.

gleich:

$$\Delta A_{vjai} = \Delta A_{Fja} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{zj}} \left[\int_{z_i}^{z_{i+1}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{z-h}{\sigma_{zj}} \right)^2} dz + \int_{-z_i}^{-z_{i+1}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{z-h}{\sigma_{zj}} \right)^2} dz \right] \quad (3.11)$$

$$z_i = i \Delta z; \quad i = 0, 1, 2, \dots$$

Δz wird so gewählt, daß

$$\frac{h}{\Delta z} - \frac{1}{2} = p; \quad p = 0, 1, 2, \dots$$

Wir definieren:

$$v \equiv \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{(h-z)}{\sigma_{zj}} \quad (3.12)$$

Es folgt:

$$dv = \frac{dz}{\sqrt{2}\sigma_{zj}} \quad (3.13)$$

Wir schreiben die Fehlerfunktion in folgender Form:

$$\text{ERF}(v_n) \equiv \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{v_n} e^{-v^2} dv \quad (3.14)$$

Aus (3.11) bis (3.14) folgt:

$$\Delta A_{Vjai} = \frac{\Delta A_{Fja}}{2} [\text{ERF}(v_2) - \text{ERF}(v_1) + \text{ERF}(v_4) - \text{ERF}(v_3)] \quad (3.15)$$

mit

$$\begin{aligned} v_2 &= \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{h-z_i}{\sigma_{zj}} \\ v_1 &= \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{h-z_{i+1}}{\sigma_{zj}} \\ v_4 &= \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{h+z_{i+1}}{\sigma_{zj}} \\ v_3 &= \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{h+z_i}{\sigma_{zj}} \end{aligned} \quad (3.16)$$

Theoretisch würde sich nach Gl. (3.11) die Aktivität unendlich weit nach oben erstrecken. Die tatsächlich endliche Aktivitätsverteilung wird durch eine Abschneidenvorschrift berücksichtigt, welche in Kap. 4.5 angegeben ist.

4. Dosisleistung

4.1. Allgemeines

Wegen des quadratischen Abstandsgesetzes (s. Kap. 4.2) nimmt die Strahlungsintensität an einem Aufpunkt mit wachsender Entfernung des Strahlers rasch ab. Ist der Raum gleichmäßig mit Aktivität gefüllt, dann tragen die Aktivitätselemente in größerer Entfernung - relativ zum Beitrag der nähergelegenen - kaum noch zur Gesamtstrahlung bei. Daher kann der Bereich, dessen Aktivität bei der Dosisberechnung berücksichtigt wird, begrenzt werden. In horizontaler Richtung soll ein Kreis um den Aufpunkt mit dem Radius R_0 diesen Bereich begrenzen. Der Radius R_0 wird hier "Reichweite der Gammastrahlung" genannt;

es wird jedoch betont, daß es sich um eine scheinbare Reichweite handelt, die sich nur aus den Anforderungen an die Genauigkeit des Rechenprogrammes herleiten läßt.

Bei der Volumenquelle ist eine Begrenzung des Bereiches auch in vertikaler Richtung erforderlich. Dabei sorgt nicht nur das quadratische Abstandsgesetz, sondern auch die mit der Höhe rasch abnehmende Aktivitätskonzentration dafür, daß die Dosisbeiträge der Aktivitätselemente ab einer bestimmten Höhe vernachlässigt werden können. Eine entsprechende Abschneidevorschrift wird in Kap. 4.5 angegeben.

4.2. Punktquelle

Da alle hier berechneten Strahlendosen bzw. -dosisleistungen sich aus den Beiträgen einzelner Punktquellen der Aktivität A zusammensetzen, wird hier auch die Gleichung zu deren Berechnung angegeben.

$$\dot{D} = \frac{A}{4\pi \rho^2} \sum_g P_g E_g \left(\frac{n_g'}{d}\right) B(E, \mu\rho) e^{-\mu \rho} \quad (4.1)$$

In (4.1) bedeuten:

ρ den Abstand des Aufpunktes von der Punktquelle
 E_g die Energien der Photonen, die durch Übergänge mit den Übergangswahrscheinlichkeiten P_g emittiert werden.

$\left(\frac{n_g'}{d}\right)$ die zu den Photonenenergien E_g gehörenden Massen-Energieabsorptionskoeffizienten der Gewebe bzw. Wasser

$B(E, \mu\rho)$ den Aufbaufaktor

μ den linearen Schwächungskoeffizient in Luft

Für die Bestimmung der spezifischen Gammastrahlenkonstante

$$I = \frac{\sum_g P_g E_g \left(\frac{n_g'}{d}\right)}{4\pi} \quad (4.2)$$

sind die Werte $\left(\frac{n_g'}{d}\right)$ aus /6/ entnommen.

Der Build-up-Faktor hängt von der Energie der γ -Quanten sowie dem Produkt $\mu\rho$ ab. Eine Berechnung dieses Faktors wurde von Goldstein und Wilkins /7/ publiziert, s. Abb. 2. Durch Interpolation können Build-up-Faktoren im Energiebereich $0,25 < E_\gamma < 10$ MeV aus diesen Kurven ermittelt werden. Eine einfache Näherungsformel /8/ Gleichung (4.3) beschreibt den Build-up-Faktor mit ausreichender Genauigkeit im Bereich $0,5 \text{ MeV} \leq E_\gamma \leq 2$ MeV, s. Abb. 2.

$$B(E, \mu\rho) = 1 + \mu\rho + \frac{(\mu\rho)^2}{E_\mu^{2,4}} \quad (4.3)$$

Im Rechenprogramm können wahlweise beide Methoden aufgerufen werden.

4.3. Linienguelle

Die Aktivität ΔA_{Ls} verursacht am Aufpunkt (x, ω) (s. Abb. 3) die Dosisleistung

$$\Delta \dot{D}_{Ls} = \frac{I B(E, \rho)}{\rho^2} \Delta A_{Ls} e^{-\mu\rho} \quad (4.4)$$

mit

$$\rho = \sqrt{x^2 + r^2 - 2 x r \cos(\omega - \alpha) + h^2} \quad (4.5)$$

und r aus Gleichung (3.3)

Die Dosisleistung aus der Aktivität der Linienquelle s ist

$$\dot{D}_{Ls} = \sum_r \Delta \dot{D}_{Ls} \quad (4.6)$$

und die Dosisleistung aus der Aktivität aller Linienquellen

$$\dot{D}_L = \sum_{s=1}^S \dot{D}_{Ls} \quad (4.7)$$

4.4. Flächenquelle

Die Aktivität ΔA_{Fja} verursacht am Aufpunkt (x, ω) die Dosisleistung

$$\dot{D}_{Fja} = \frac{I B(E, \rho)}{\rho^2} \Delta A_{Fja} e^{-\mu \rho} \quad (4.8)$$

Sucht man die Dosisleistung am Aufpunkt (x, ω) aus der gesamten Flächenquelle, so muß man alle Flächenelemente berücksichtigen, die innerhalb eines Kreises mit dem Radius

$$R = R_0 \quad (4.9)$$

liegen* (s. Abb. 4). Die Summe der $\Delta \dot{D}_{Fja}$ über alle Δr und Δa (s. Gl. (3.6)) wird zuerst für konstante r (nach Gl. (3.3)) über alle Δa in den verschiedenen Sektoren und anschließend über alle Entfernungen r des Weges $2R$ gerechnet. Es werden zwei Bereiche unterschieden:

- a) der Kreis R umschließt die Kaminmündung nicht, d.h. $x \geq R$
- b) er umschließt sie, d.h. $x < R$.

* An sich würde es für die Flächenquelle ausreichen, wenn der Radius R aus der Gleichung

$$R = \sqrt{R_0^2 - h^2}$$

berechnet würde. Es ist aber für die Erweiterung des Programms zu Volumenquellen die Kenntnis der Dosisbeiträge der Aktivitäten innerhalb des Kreises R_0 notwendig.

4.4.1. Der Fall $x \cong R$

Abb. 5 gibt die Geometrie zur Berechnung für Aufpunkte (x, ω) mit $x \cong R$ wieder. Nach Gleichung (3.3) nimmt r Werte im folgenden Bereich an:

$$x - R \cong r \cong x + R \quad (4.10)$$

Für jedes r wird der Bereich von a wie folgt abgegrenzt:

$$\omega - \omega' \cong a \cong \omega + \omega' \quad (4.11)$$

Dabei wird ω' aus der Gleichung

$$\omega' = \arccos \left(\frac{x^2 + r^2 - R^2}{2xr} \right) \quad (4.12)$$

berechnet.

Ist

$$\omega - \omega' < 0 \quad (4.13)$$

dann wird in dem Bereich

$$\omega - \omega' \cong a < 0 \quad (4.14)$$

der Wert von a gleich

$$\bar{a} = 2\pi + a \quad (4.15)$$

gesetzt.

Ist

$$\omega + \omega' \cong 2\pi \quad (4.16)$$

dann wird in dem Bereich

$$2\pi \leq a \leq \omega + \omega' \quad (4.17)$$

der Wert von a gleich

$$\underline{a} = a - 2\pi \quad (4.18)$$

gesetzt. Diese Überspeicherung ist notwendig, um den Sektor, der dem Wert von a entspricht, aufrufen zu können.

4.4.2. Der Fall $x < R$

Abb. 6 gibt die Geometrie zur Berechnung für Aufpunkte (x, ω) mit $x < R$ wieder. Nach Gleichung (3.3) nimmt die Variable r Werte in zwei Bereichen an:

$$a) \quad 0 < r \leq R - x \quad (4.19)$$

In diesem Bereich ist

$$0 \leq a \leq 2\pi \quad (4.20)$$

$$b) \quad R - x < r \leq R + x \quad (4.21)$$

In diesem Bereich ist

$$\omega - \omega' \leq a \leq \omega + \omega' \quad (4.22)$$

(s. Kap. 4.4.1.)

ω' wird analog wie in (4.12) berechnet. Für die Werte a des Bereiches (4.22) gelten die Beschränkungen (4.13) bis (4.18).

4.5. Volumenguelle

Die Aktivität ΔA_{Vjai} verursacht am Aufpunkt (x, ω) die Dosisleistung

$$\dot{\Delta D}_{Vjai} = \frac{I B(E, \rho_i)}{\rho_i^2} \Delta A_{Vjai} e^{-\mu \rho_i} \quad (4.23)$$

In Gl. (4.23) wird die Entfernung

$$\rho_i = \sqrt{x^2 + r^2 - 2x r \cos(\omega - a) + z^2} \quad (4.24)$$

mit

$$z = \frac{1}{2}(z_i + z_{i+1}) \quad (4.25)$$

gesetzt (s. Abb. 7).

Die Dosisleistung \dot{D}_V am Aufpunkt (x, ω) durch Bestrahlung aus der radioaktiven Wolke wird als Summe der $\dot{\Delta D}_{Vjai}$ über alle Entfernungen r im Kreis R , über alle Kategorien j , über alle Winkel a und über alle Höhen i gerechnet:

$$\dot{D}_V = \sum_r \sum_j \sum_a \sum_i \dot{\Delta D}_{Vjai} \quad (4.26)$$

Die Summation wird in folgender Weise durchgeführt:

Für einen Aufpunkt (x, ω) wird zuerst der Wertebereich von r nach Gln. (3.3), (4.10) oder (4.19) innerhalb des Kreises R bestimmt; für das jeweils geltende r werden nach der Gleichung

$$\sigma_{zj} = \sigma_{zj}(r) \quad (4.27)$$

die Varianzen σ_{zj}^2 berechnet; für das laufende r wird nach Gln. (4.10) bis (4.18) bzw. (4.20), (4.22) der Wertebereich des Winkels a festgelegt und mit den laufenden Werten r, j, a das z -Feld im Bereich

$$0 \leq z \leq R$$

(4.28)

festgelegt.

Oberhalb der Emissionsebene ($z > H$) nimmt der Beitrag der einzelnen Aktivitätsmengen zur Gesamtdosis mit steigender Höhe rasch ab. Diese Abnahme ist sowohl durch die abnehmende Aktivitätskonzentration als auch durch das quadratische Abstandsgesetz bedingt. Daher kann der z -Bereich entsprechend dem σ_{zj} -Wert begrenzt werden.

Da $ERF(2) = 0,9953$, muß lediglich bis zur Höhe $z = 2\sqrt{2}\sigma_{zj} + H$ summiert werden, um 99,5 % der Aktivität zu berücksichtigen. Die restliche Aktivität (0,5 %) wird, - um die berechnete Dosis nach oben und nicht nach unten abzurunden, jeweils dem letzten Aktivitätspunkt (in der Höhe $z = 2\sqrt{2}\sigma_{zj} + H$) zugeschlagen.

Eine weitere Begrenzung ergibt sich durch das quadratische Abstandsgesetz und kann ähnlich wie die "Reichweite" R_0 formuliert werden. Z.B. bringt bei einer Emissionshöhe $H = 100$ m und einer γ -Energie $E = 1,3$ MeV die Summe aller Dosisbeiträge ab $z_0 = 200$ m einen Beitrag zur Dosisleistung kleiner als 2 % bei. Daher kann bei dieser Genauigkeit ab einer solchen Grenzhöhe z_0 die Summation abgebrochen werden, auch wenn $z_0 < 2\sqrt{\sigma_z} + H$ ist.

5. Berechnung der Dosis aus der radioaktiven Abluft mehrerer Emittenten

Wir betrachten im Folgenden M parallele Ebenen, jeweils in Höhe der Kaminmündung der Emittenten. Wir wählen als Koordinatenursprung den Kaminfuß des ersten Emittenten. Es seien X_m u. Ω_m die Polarkoordinaten des Emittenten m ($m = 2, 3, \dots, M$) und x_m bzw. ω_m die Entfernung bzw. das Azimuth des Aufpunktes (x, ω) bezogen auf den Emittenten m (s. Abb. 8 und 9). Weiterhin betrachten wir, analog wie im Kapitel 3, auf der Ebene m die elementare Fläche $r_m \Delta r_m \Delta a_m$.

r_m bzw. a_m sind die Entfernung bzw. das Azimuth zur Kaminmündung m. Analog zu Gl. (3.9) ist

$$\Delta A_{Fmja} = \frac{\dot{A}_m}{r_m \Phi} e^{-\frac{\lambda_m r_m}{u_{smj}}} \frac{f_{smj}}{u_{smj}} r_m \Delta r_m \Delta a_m \quad (5.1)$$

die Aktivität der Fläche $r_m \Delta r_m \Delta a_m$ der Flächenquelle des Emittenten m. Die Verteilung der Aktivität ΔA_{Fmja} in z-Richtung wird entsprechend Gl. (3.11) aus

$$\Delta A_{Vmjai} = \Delta A_{Fmja} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{zj}} \left[\int_{z_i}^{z_{i+1}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{z - h_m}{\sigma_{zj}} \right)^2} dz + \int_{-z_i}^{-z_{i+1}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{z - h_m}{\sigma_{zj}} \right)^2} dz \right] \quad (5.2)$$

berechnet.

Entsprechend Kap. (4.3) verursacht diese Aktivität am Aufpunkt (x, ω) die Dosisleistung

$$\Delta \dot{D}_{Vmjai} = \frac{I_m B(E_m, \rho_{mi})}{\rho_{mi}^2} \Delta A_{Vmjai} e^{-\mu_m \rho_{mi}} \quad (5.3)$$

mit

$$\rho_{mi} = \sqrt{x_m^2 + r_m^2 - 2 x_m r_m \cos(\omega_m - a_m) + z^2} \quad (5.4)$$

Die Berechnung der Dosis ΔD_{Vmjai} verlangt also die Bestimmung von x_m und ω_m .

Die Entfernung x_m des Aufpunktes (x, ω) vom Emittenten (X_m, Ω_m) ist

$$x_m = \sqrt{X_m^2 + x^2 - 2 X_m x \cos(\Omega_m - \omega)} \quad (5.5)$$

Wir bezeichnen mit k den Blickwinkel, mit dem die Entfernung X_m vom Aufpunkt (x, ω) gesehen wird.

Es ist

$$k = \arccos \frac{x^2 + x_m^2 - X_m^2}{2 x x_m} \quad (5.6)$$

Damit ist für den Fall (s. Abb.8)

$$0 \leq \Omega_m \leq \pi \quad (5.7):$$

$$\omega_m = 2\pi + (\omega - k) \quad \text{wenn } 0 \leq \omega \leq \Omega_m \text{ und } k > \omega \quad (\text{Bereich A}) \quad (5.7a)$$

$$\omega_m = \omega - k \quad \text{wenn } 0 \leq \omega \leq \Omega_m \text{ und } k \leq \omega \quad (\text{Bereich B}) \quad (5.7b)$$

$$\omega_m = \omega + k \quad \text{wenn } \Omega_m < \omega \leq \pi + \Omega_m \quad (\text{Bereich C}) \quad (5.7c)$$

$$\omega_m = \omega - k \quad \text{wenn } \pi + \Omega_m < \omega \leq 2\pi \quad (\text{Bereich D}) \quad (5.7d);$$

und für den Fall (s. Abb. 9).

$$\pi \cong \Omega_m \cong 2\pi \quad (5.8):$$

$$\omega_m = \omega + k \quad \text{wenn } 0 \cong \omega \cong \Omega_m - \pi \quad (\text{Bereich A})(5.8a)$$

$$\omega_m = \omega - k \quad \text{wenn } \Omega_m - \pi < \omega < \Omega_m \quad (\text{Bereich B})(5.8b)$$

$$\omega_m = \omega + k \quad \text{wenn } \Omega_m < \omega \cong 2\pi \text{ und } k \cong 2\pi - \omega \quad (\text{Bereich C})(5.8c)$$

$$\omega_m = \omega + k - 2\pi \quad \text{wenn } \Omega_m < \omega \cong 2\pi \text{ und } k > 2\pi - \omega \quad (" D)(5.8d).$$

Nach der Bestimmung von x_m und ω_m wird der Bereich von r_m festgelegt. R_m sei die "Reichweite der γ -Strahlung" des vom Emittenten m abgegebenen Nuklids.

a) Wenn $x_m \geq R_m$, gilt folgender r_m -Bereich:

$$x_m - R_m \cong r_m \cong x_m - R_m \quad (5.9)$$

Dann ist

$$\omega_m - \omega'_m \cong a_m \cong \omega_m + \omega'_m \quad (5.10)$$

mit

$$\omega'_m = \arccos \frac{x_m^2 + r_m^2 - R_m^2}{2 x_m r_m} \quad (5.11)$$

b) Wenn $x_m < R_m$, gelten folgende r_m -Bereiche:

$$b1) 0 \leq r_m \leq R_m - x_m \quad (5.12)$$

Darin ist

$$0 \leq a_m \leq 2\pi \quad (5.13)$$

$$b2) R_m - x_m < r_m \leq x_m + R_m \quad (5.14)$$

Darin ist

$$\omega_m - \omega'_m \leq \alpha_m \leq \omega_m + \omega'_m \quad (5.15)$$

Auch hier wird entsprechend Gln. (4.13) bis(4.18) α_m durch $\bar{\alpha}_m$ bzw. $\underline{\alpha}_m$ ersetzt.

In dieser Reihenfolge kann also die γ -Dosisleistung am Aufpunkt (x, ω) aus der Wolke des m -ten Emittenten entsprechend Gl. (4.26) aus der Gleichung

$$D_{Vm} = \sum_r \sum_j \sum_a \sum_i \Delta D_{Vmjai} \quad (5.16)$$

berechnet werden.

Die resultierende Dosisleistung aus der gesamten Wolke der M Emittenten ergibt sich aus (4.26) und(5.16)

$$D = D_V + \sum_{m=2}^M D_{Vm} \quad (5.17).$$

6. Ergebnisse

Die Ergebnisse sind in Form normierter Dosisleistung in den Abbn. 10 bis 13 dargestellt. Die Dosisleistung $\dot{D}(x)$ (rem/a) ist jeweils auf die Einheit der Emissionsstärke \dot{A} (Ci/a), der mittleren Windgeschwindigkeit u (m/s) und der Gammadosiskonstanten I ($\frac{\text{rem m}^2}{\text{Ci s}}$) bezogen. Diese Normierung wurde gewählt, um den Vergleich mit anderen Autoren und anderen Rechenmodellen zu erleichtern. Für die Berechnung des Aufbaufaktors $B(E, \mu\rho)$ wurde die γ -Energie 1,29 MeV gewählt. Die Zerfallskonstante λ wurde gleich Null, $\mu = 7,3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ eingesetzt. Es ist jeweils die Dosisleistung auf der Mittellinie eines 30° -Sektors dargestellt. Es wurden die σ_z -Werte nach PASQUILL/GIFFORD, s. /1/, verwendet. Die effektive Emissionshöhe beträgt durchweg $h = 100 \text{ m}$.

Zum besseren Verständnis der Ergebnisse wird die angenommene Aktivitätsverteilung in der Abluftfahne hier nochmals kurz erläutert: Die in einem Sektor emittierte Aktivität (hier mit der Einheitsemissionsrate 1 Ci/a) wird zur Berücksichtigung der Windrichtungsverteilung in azimuthaler Richtung gleichmäßig über die Sektorbreite verteilt. Die so entstandene Flächenquelle wird vertikal entsprechend einer Gaußverteilung mit vollständiger Reflexion am Boden verteilt. Die so entstandene Volumenquelle wird in diskrete Aktivitätspunkte aufgelöst. Die Summe der Dosisbeiträge aller Aktivitätspunkte ergibt die Dosis bzw. Dosisleistung am Aufpunkt.

Die Genauigkeit der Berechnung hängt u.a. von den Schrittweiten und der gewählten "Reichweite" R_0 ab. Es wurde $\Delta r = 20 \text{ m}$, $\Delta z = 15 \text{ m}$ und $R_0 = 700 \text{ m}$ gewählt. Damit rechnet das Programm die Dosisleistung eines Aufpunktes in 50 sec. Der Fehler durch Schrittweite und Reichweite beträgt nicht mehr als 3 %. (Darf dieser Fehler auf 10 % wachsen, dann kann die Rechenzeit um den Faktor 4 reduziert werden.)

Um zunächst den Einfluß der Aktivität in den Nachbarsektoren zu zeigen, wurden mit dem Rechenprogramm WOLGA zwei Fälle gerechnet:

- 1) nur in einen der 12 Windrichtungssektoren wird die Einheitsaktivität emittiert; (Kurven "WOLGA-1-Sektor").
- 2) in jeden der 12 Sektoren wird die Einheitsaktivität emittiert (Kurven "WOLGA-12-Sektoren").

Unmittelbar am Kaminfuß ($x = 10$ m) unterscheiden sich die beiden Dosisleistungen, um den Faktor 12, da im Fall 2 die insgesamt 12-fache Aktivität emittiert wird. Ab Entfernungen von ca. 2000 m fallen beide Kurven zusammen, da in dieser Entfernung der Einfluß der Aktivität in den Nachbarsektoren auf der Sektormittellinie vernachlässigbar klein wird. Der Vergleich beider Kurven zeigt, daß im Entfernungsbereich 0 bis 1000 m der Einfluß der Aktivität in den Nachbarsektoren durchaus erheblich sein kann. Reale Dosisverteilungen ähneln dem Verlauf der "WOLGA-12-Sektoren"-Kurve. Sie weichen umso stärker von dieser ab (nach oben oder unten), je stärker die Aktivitätsbelegung der Nachbarsektoren von der des betrachteten Sektors abweicht.

Dieser Vergleich zeigt, ab welcher Entfernung eine azimuthale Ungleichverteilung an einem Aufpunkt auf der Sektormitte vernachlässigbar ist. Die Abbn. 11 bis 13 zeigen einen Vergleich verschiedener Modelle für die drei Wetterkategorien B, D und F. Der Vergleich zeigt, ab welcher Entfernung die vertikale Ungleichverteilung der Aktivität vernachlässigbar ist. Nimmt man an, daß der gesamte Halbraum über einen Aufpunkt gleichmäßig mit Aktivität erfüllt ist, dann ist die Dosisleistung an diesem Aufpunkt nur von der Konzentration dieser Aktivität abhängig (Submersionsmodell). Es wurden die Konzentration der Aktivität in Bodennähe ($z=0$) und mit Hilfe des Submersionsmodells die zugehörige Dosisleistung berechnet (punktierte Kurven "S"). Diese Kurven haben die Form des axialen Konzentrationsverlaufs in Bodennähe bei vertikaler Gaußverteilung der Aktivität in der Abluft. In Entfernungen jenseits des Maxi-

mums dieser Kurven decken sie sich mit den bereits vorher zusammengefallenen Kurven "WOLGA-1-Sektor" und "WOLGA-12-Sektoren". In diesen Entfernungen liefert das Submersionsmodell - zumindest in der Sektormitte - genaue Ergebnisse. (Bei Kategorie F beginnt dieser Bereich allerdings erst ab 50 km.) Vor dem Maximum fällt die Aktivitätskonzentration und damit die Dosisleistung des Submersionsmodells mit abnehmender Entfernung schnell ab. In diesem Bereich ist das Submersionsmodell unbrauchbar, da die Bodenkonzentration nicht der Konzentration in der höherliegenden Abluftfahne entspricht.

Im Bereich des Maximums liegt die Dosisleistung des Submersionsmodells teils zu hoch (bei labiler Kategorie), teils zu niedrig (bei neutraler und stabiler Kategorie), so daß im allgemeinen erst ab der doppelten Entfernung des Maximums das Submersionsmodell hinreichend genau ist. Das gilt jedoch nur jeweils für die Sektormitte.

Ein anderes Verfahren wurde von VOGT /2/ verwendet. Die Verteilung der Aktivität in einer Abluftfahne wird einer doppelten Gaußverteilung entsprechend angenommen. Diese Verteilung entspricht optimal der realen Verteilung. Zur Berücksichtigung der azimuthalen Windrichtungsverteilung wird diese Fahne gleichmäßig über den betrachteten Aufpunkt hinweggeschwenkt. In jeder Stellung der Fahne wird die Dosisleistung über das gesamte Abluftfahnavolumen integriert, und anschließend der Mittelwert gebildet. Bei diesem Verfahren wird quasi eine gleiche Aktivitätsbelegung der Nachbarsektoren unterstellt. Die in den Abbn. 11 bis 13 gestrichelt eingetragenen Kurven sind /2/ entnommen. Bei ihrer Berechnung wurden die gleichen Parameter verwendet wie im vorliegenden Bericht. Geringe Abweichungen können - neben dem Unterschied der beiden Modelle - in der Ungenauigkeit der Übertragung begründet sein. Bei Entfernungen $x < 300$ m liefert das Programm WOLGA höhere Dosisleistungen, weil auch die Dosisbeiträge der Aktivität auf der anderen Seite des Kamins berücksichtigt werden. Bei Kategorie B liegt die Kurve "Vogt" im gesamten Bereich höher, weil offenbar ein unter-

schiedliches σ_z verwendet wurde; denn bei gleichen σ_z müßten sich die Kurven zumindest in jenem Bereich decken, in dem auch das Submersionsmodell gleiche Ergebnisse liefert.

In der Abb. 10 sind die normierten Dosisleistungskurven für alle Kategorien und die beiden Fälle (1 Sektor bzw. 12 Sektoren mit Aktivität belegt) zusammengefaßt. Aus diesen Kurven kann bei gegebener Ausbreitungsstatistik eines beliebigen Standortes die Dosisleistungsverteilung auf der Mittellinie eines 30° -Sektors ermittelt werden. Werden jeweils die oberen - gestrichelten - Kurven (gleiche Aktivitätsbelegung aller 12 Sektoren) benutzt, dann kann der Fehler durch Nichtberücksichtigung der unterschiedlichen Aktivitätsbelegung der Nachbarsektoren ca. 20 - 30 % betragen. Wird eine höhere Genauigkeit oder die Dosisleistung an einem Aufpunkt außerhalb der Sektormitte gewünscht, dann ist eine Rechnung mit Hilfe des WOLGA-Codes erforderlich.

7. Bezeichnungen

\dot{A}	Emissionsstärke (Ci/s bzw. Ci/a)
E	Gamma-Energie (MeV)
f	Windrichtungshäufigkeit in einem Sektor
h	Kaminhöhe (m)
I	Dosisleistungskonstante $(\frac{\text{rem m}^2}{\text{Ci s}})$
λ	Zerfallskonstante (s^{-1})
μ	Absorptionskoeffizient (m^{-1})
σ_z	Ausbreitungsparameter in z-Richtung (m)
(r, a)	Polarkoordinaten auf der Emissionsebene
(X_m, Ω_m)	Polarkoordinaten des Emittenten m (m = 2, 3, ... M)
(x, w)	Polarkoordinaten des Aufpunktes

Indizes:

a	Winkel
i	Höhe
j	Stabilitätskategorie
k	Windgeschwindigkeitsstufe
m	Emittent
s	Sektor
F	Flächenquelle
L	Linienquelle
V	Volumenquelle

8. Literatur

- /1/ J.W. Healy, E. Baker;
Radioactive Cloud-dose Calculations in Meteorology and
Atomic Energy - 1968 (Editor D.H. Slade),
USAEC July 1968, s. 301-377
- /2/ K.J. Vogt;
Umweltkontamination und Strahlenbelastung durch radioakti-
ve Abluft aus kerntechnischen Anlagen
Jül-637-ST Januar 1970
- /3/ C.A. Willis, G.A. Spangler, W.A. Rhoades;
A new technique for reactor siting dose calculations
Health Physics 19, (1970) 47-54
- /4/ R.E. Cooper;
RADOS, A Code to Estimate Gamma Dose from a Cloud of
Radioactive Gases
USAEC DP-1098 (Rev.1), E.I du Pont de Nemours and Co.,
Savannah River Laboratory, Aiken S.C. (1968)
- /5/ R.E. Cooper, B.C. Rusche;
The SRL Meteorological Programm and Off-Site Dose Calcu-
lations
USAEC DP-1163, (1968)
- /6/ D. Nachtigall;
Physikalische Grundlagen für Dosimetrie und Strahlenschutz
Karl-Thiemig Verlag, München 1971
- /7/ H. Goldstein, J.E. Wilkins, Jr.;
Calculation of the Penetration of Gamma Rays
USAEC NYO-3075, Nuclear Development Associates, Inc.
White Plains, New York 1954
- /8/ J.A. Israel, u.a.; Gamma-Isrucenije, Moskau 1967

9. Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1 Vertikale Verteilung der Aktivität
- Abb. 2 Aufbaufaktor für γ -Strahlung in Luft
- Abb. 3 Geometrie der Dosisberechnung aus einem
Linienelement Δr
- Abb. 4 Geometrie der Dosisberechnung aus einem
Flächenelement ΔF
- Abb. 5 Geometrie der Flächenquelle für den Fall $x \geq R$
- Abb. 6 Geometrie der Flächenquelle für den Fall $x < R$
- Abb. 7 Geometrie der Dosisberechnung aus einem Volumen-
element $\Delta F \cdot \Delta Z$
- Abb. 8 Bodengeometrie zweier Emittenten K_1, K_m für
den Fall $0 \leq \Omega_m \leq \pi$
- Abb. 9 Bodengeometrie zweier Emittenten K_1, K_m für
den Fall $\pi < \Omega_m \leq 2\pi$
- Abb. 10 Normierte γ -Dosisleistung auf der Mittellinie
eines 30° -Sektors
- Abb. 11 Vergleich der normierten γ -Dosisleistungen,
Diffusionskategorie B
- Abb. 12 Vergleich der normierten γ -Dosisleistungen,
Diffusionskategorie D
- Abb. 13 Vergleich der normierten γ -Dosisleistungen,
Diffusionskategorie F

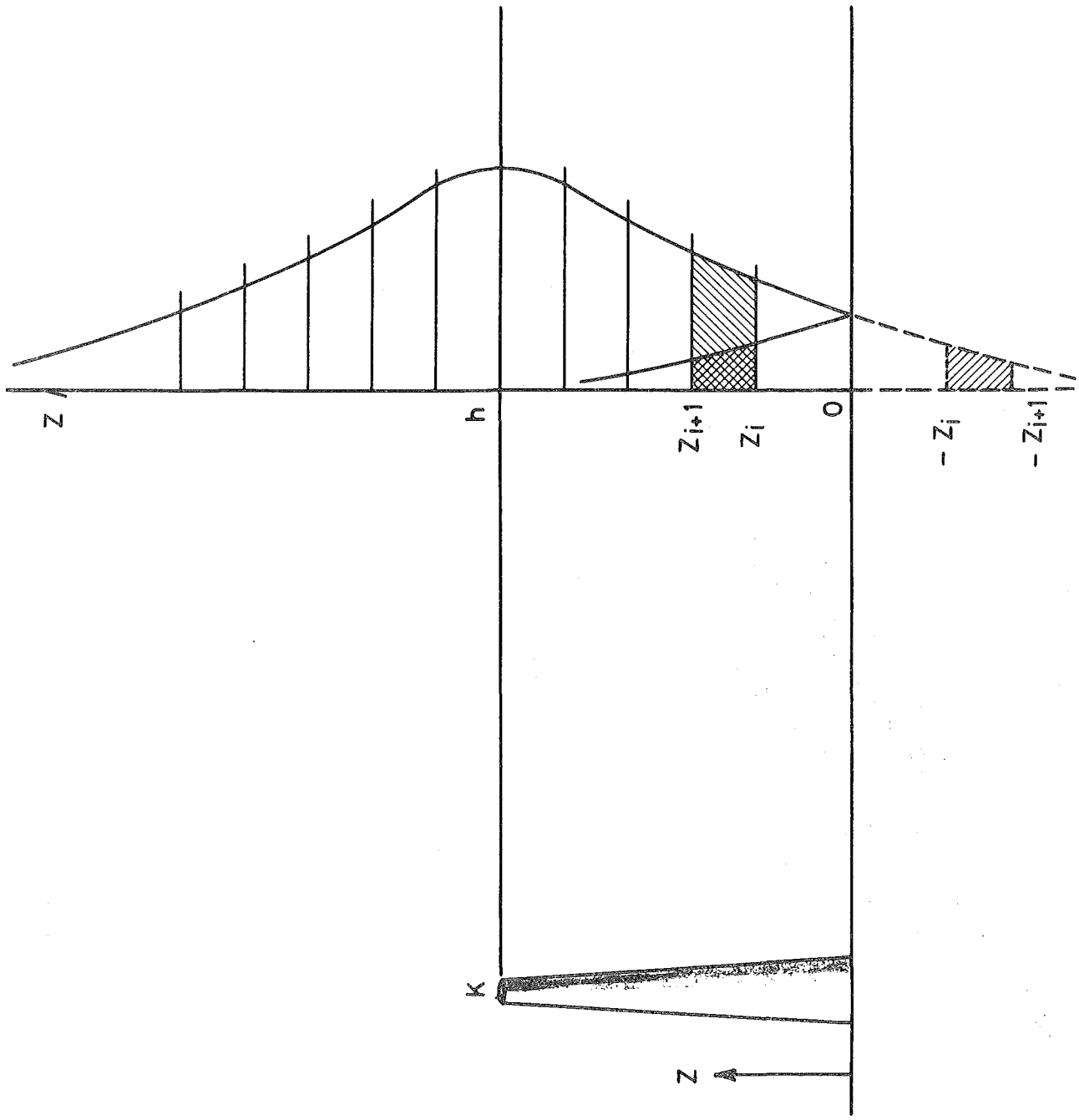


Abb: 1. VERTIKALE VERTEILUNG DER AKTIVITÄT

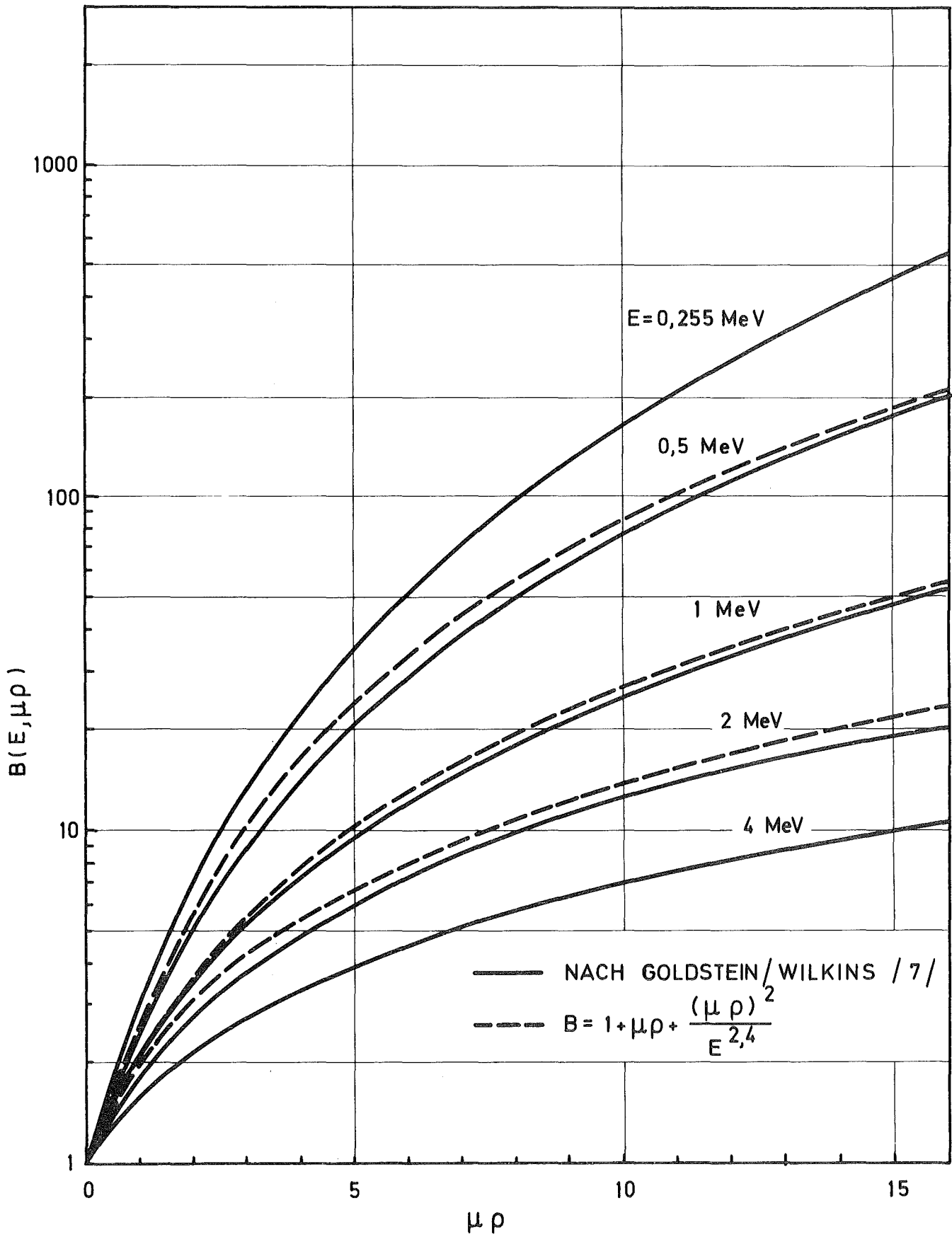


Abb: 2. AUFBAUFAKTOR $B(E, \mu\rho)$ FÜR γ -STRAHLUNG IN LUFT

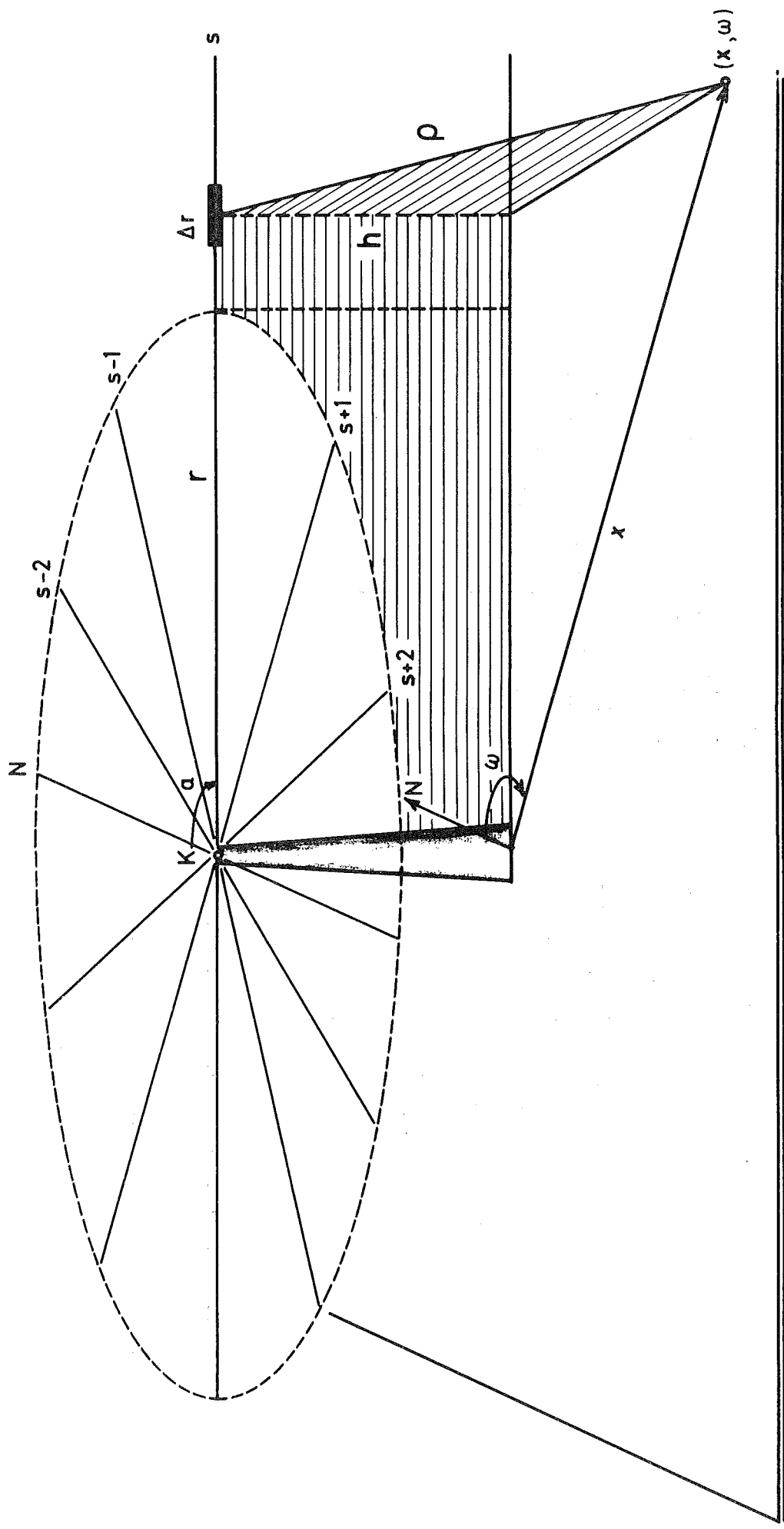


Abb: 3. GEOMETRIE DER DOSISBERECHNUNG AUS EINEM LINIENELEMENT Δr

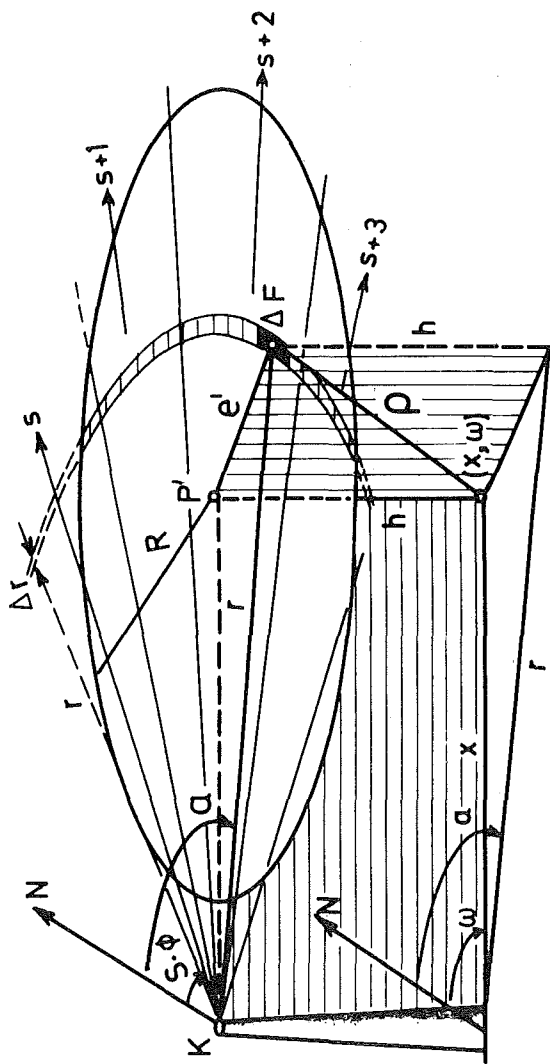


Abb: 4. GEOMETRIE DER DOSISBERECHNUNG AUS EINEM FLÄCHENELEMENT ΔF

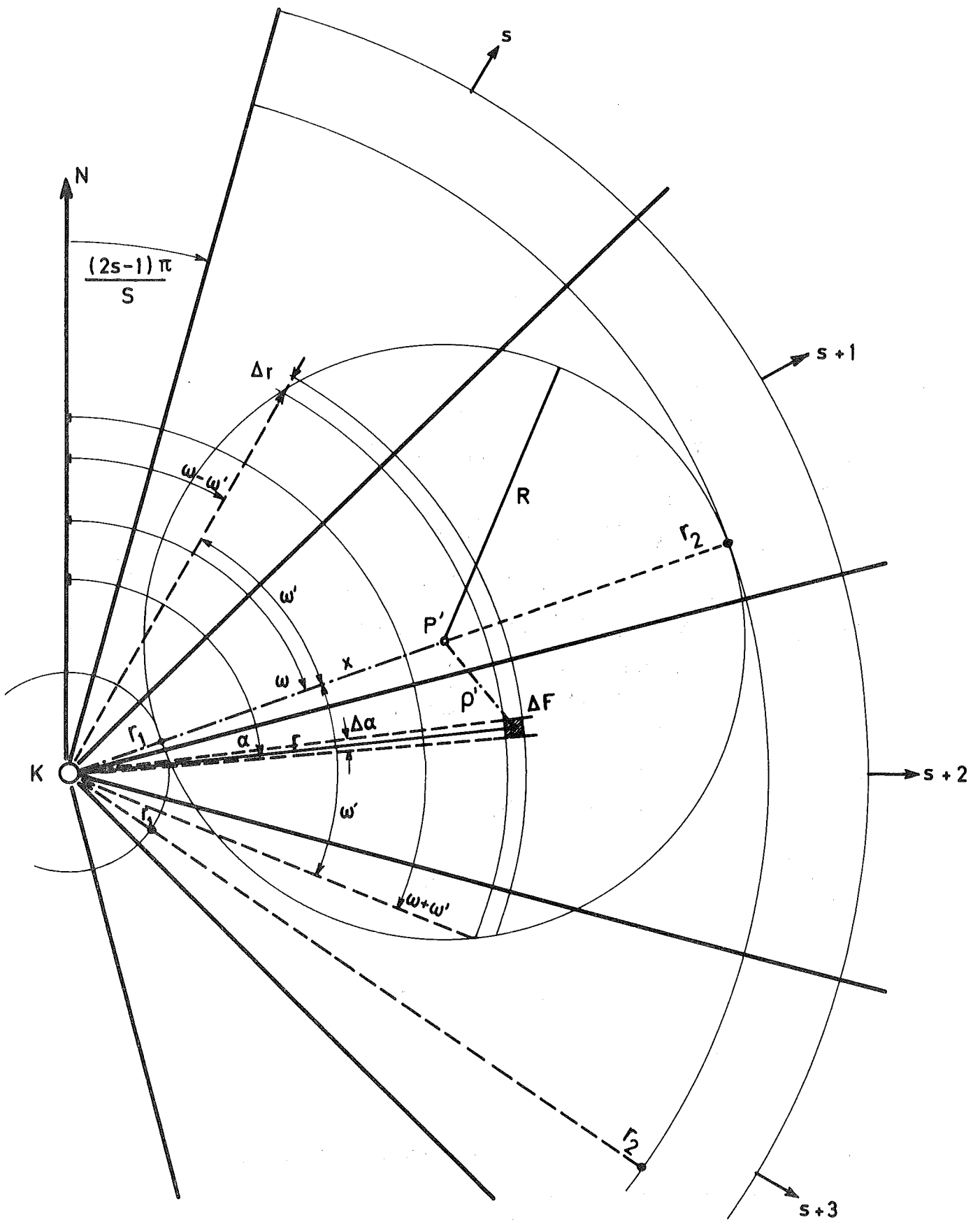


Abb: 5. GEOMETRIE DER FLÄCHENQUELLE FÜR DEN FALL $x \geq R$
 K KAMINMÜNDUNG
 P' PROJEKTION DES AUFPUNKTES (x, ω) AUF DIE KAMINHÖHENEBENE
 ρ' DIE PROJEKTION DER STRECKE ρ AUF DIE KAMINHÖHENEBENE
 $s+i$ SEKTORMITTE ($i=1, 2, \dots$)
 $\omega - \omega', \omega + \omega'$ VARIATIONSBEREICH DES WINKELS α FÜR KONST. r
 r_1, r_2 VARIATIONSBEREICH DER ENTFERNUNG r DER FLÄCHE ΔF

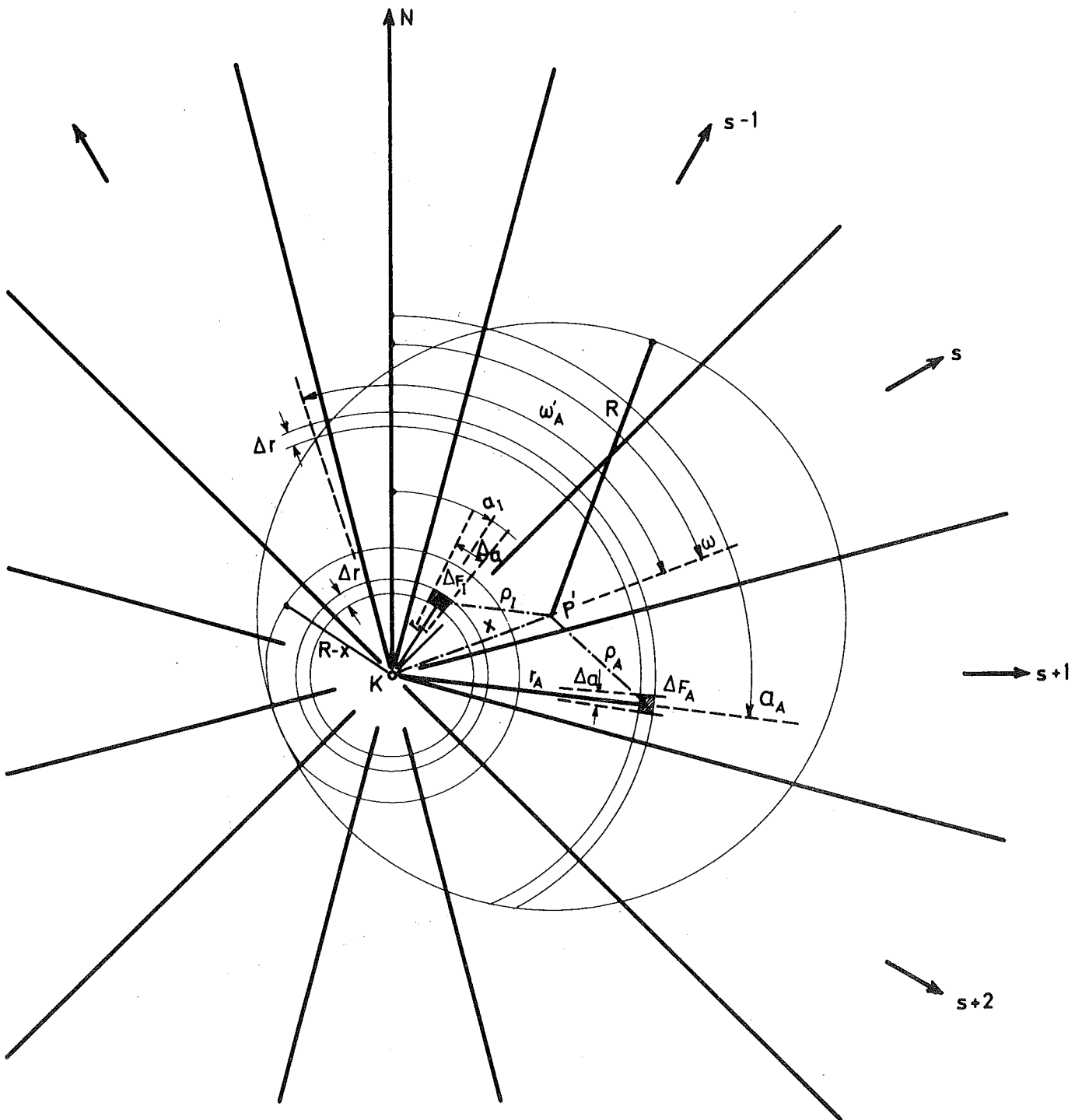


Abb: 6. GEOMETRIE DER FLÄCHENQUELLE FÜR DEN FALL $x < R$
 K KAMINMÜNDUNG
 P' PROJEKTION DES AUFPUNKTES (x, ω) AUF DIE KAMINHÖHENEBENE
 ΔF_I ELEMENTARFLÄCHE INNERHALB DES KREISES $R-x$
 ΔF_A ELEMENTARFLÄCHE AUSSERHALB DES KREISES $R-x$
 INDIZES I BZW A BEZEICHNEN DIE KOORDINATEN DER FLÄCHEN
 INNERHALB BZW AUSSERHALB DES KREISES $R-x$

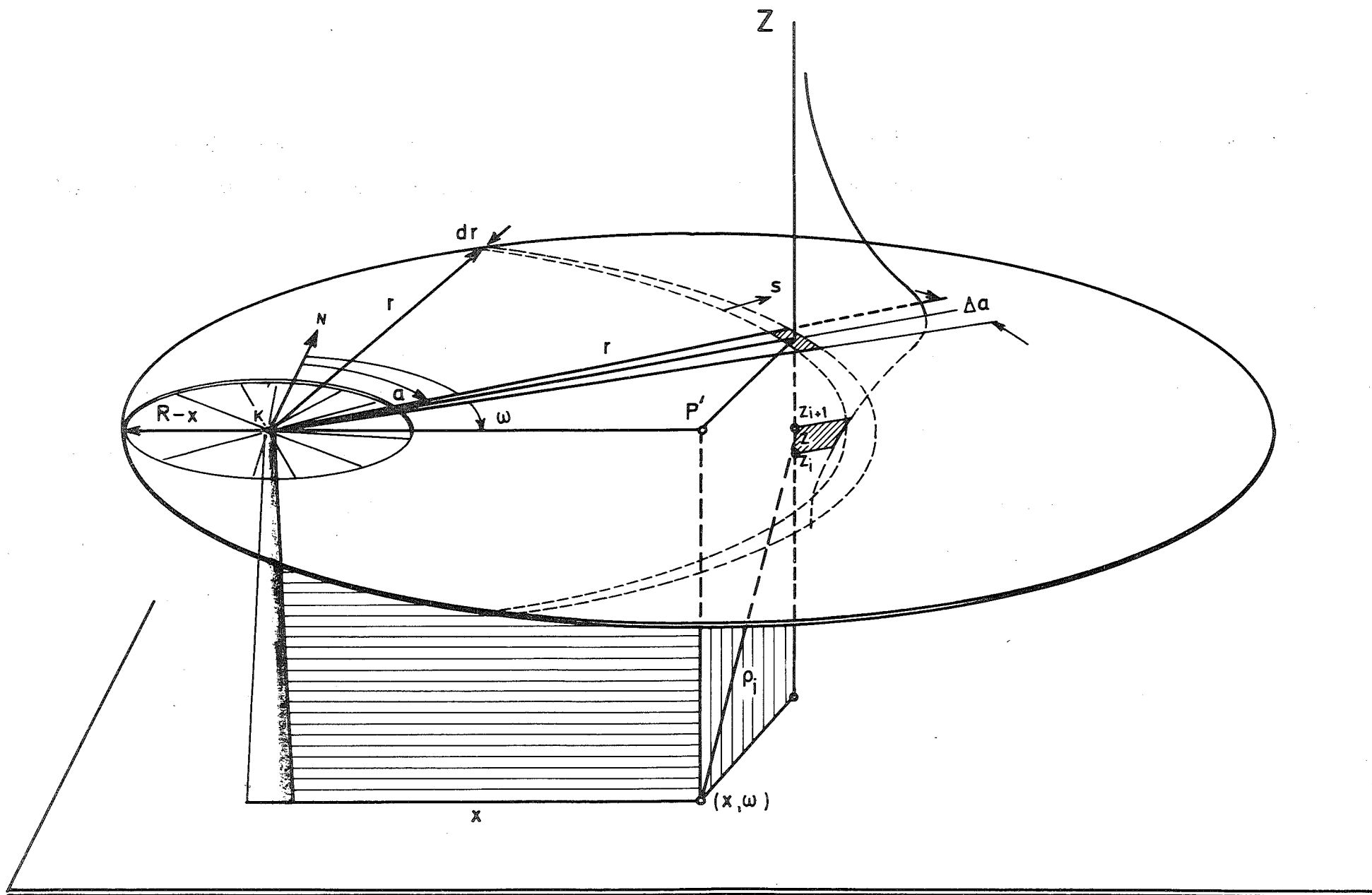


Abb: 7. GEOMETRIE DER DOSISBERECHNUNG AUS EINEM VOLUMENELEMENT $\Delta F \cdot \Delta Z$
 K KAMINMÜNDUNG, P' PROJEKTION DES AUFFUNKTES (x, ω) AUF DIE EMISSIONSHÖHENEBENE,
 (r, α, z) ZYLINDERKOORDINATEN DER AKTIVITÄT ΔA_{Vjai} , s SEKTOR DES WINKELS α

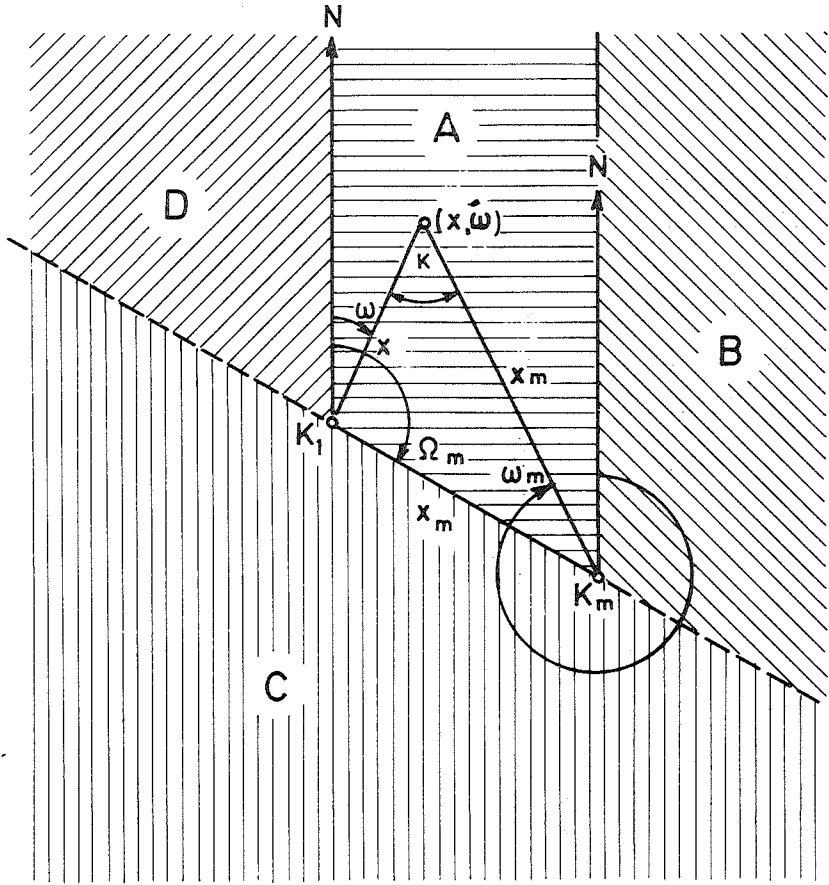


Abb: 8. BODENGEOMETRIE ZWEIER EMITTENTEN
 K_1, K_m FÜR DEN FALL $0 \leq \Omega_m \leq \pi$

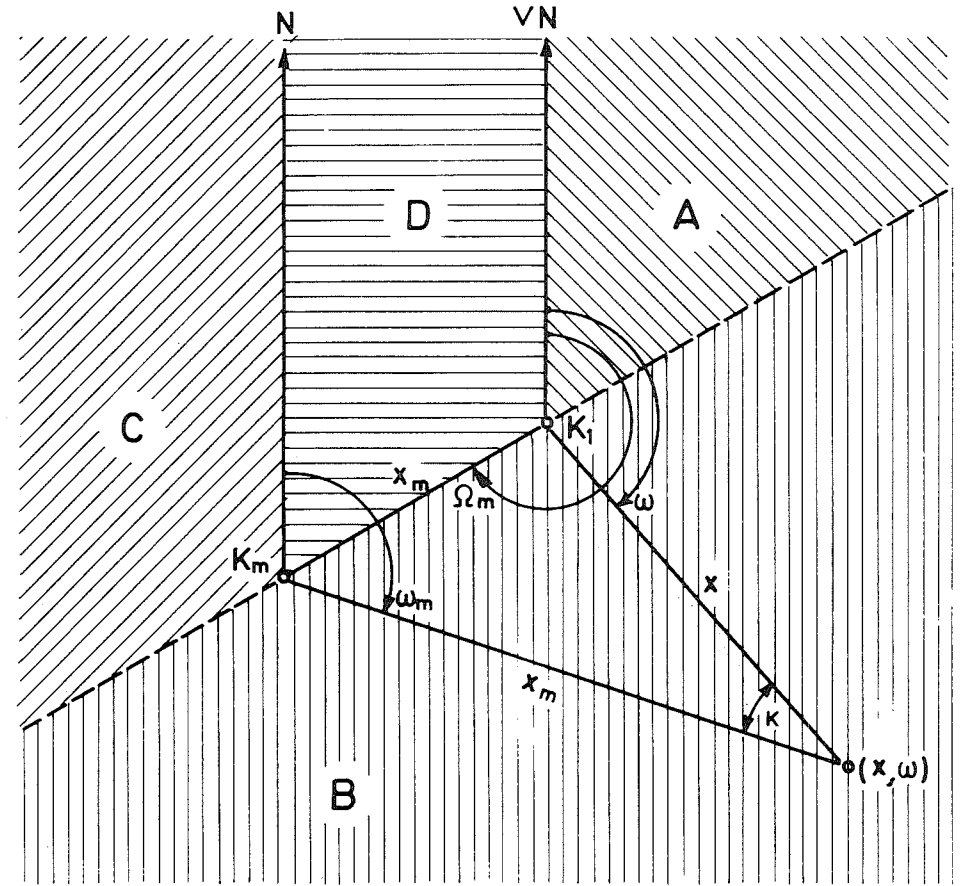


Abb: 9. BODENGEOMETRIE ZWEIER EMITTENTEN
 K_1, K_m FÜR DEN FALL $\pi < \Omega_m \leq 2\pi$

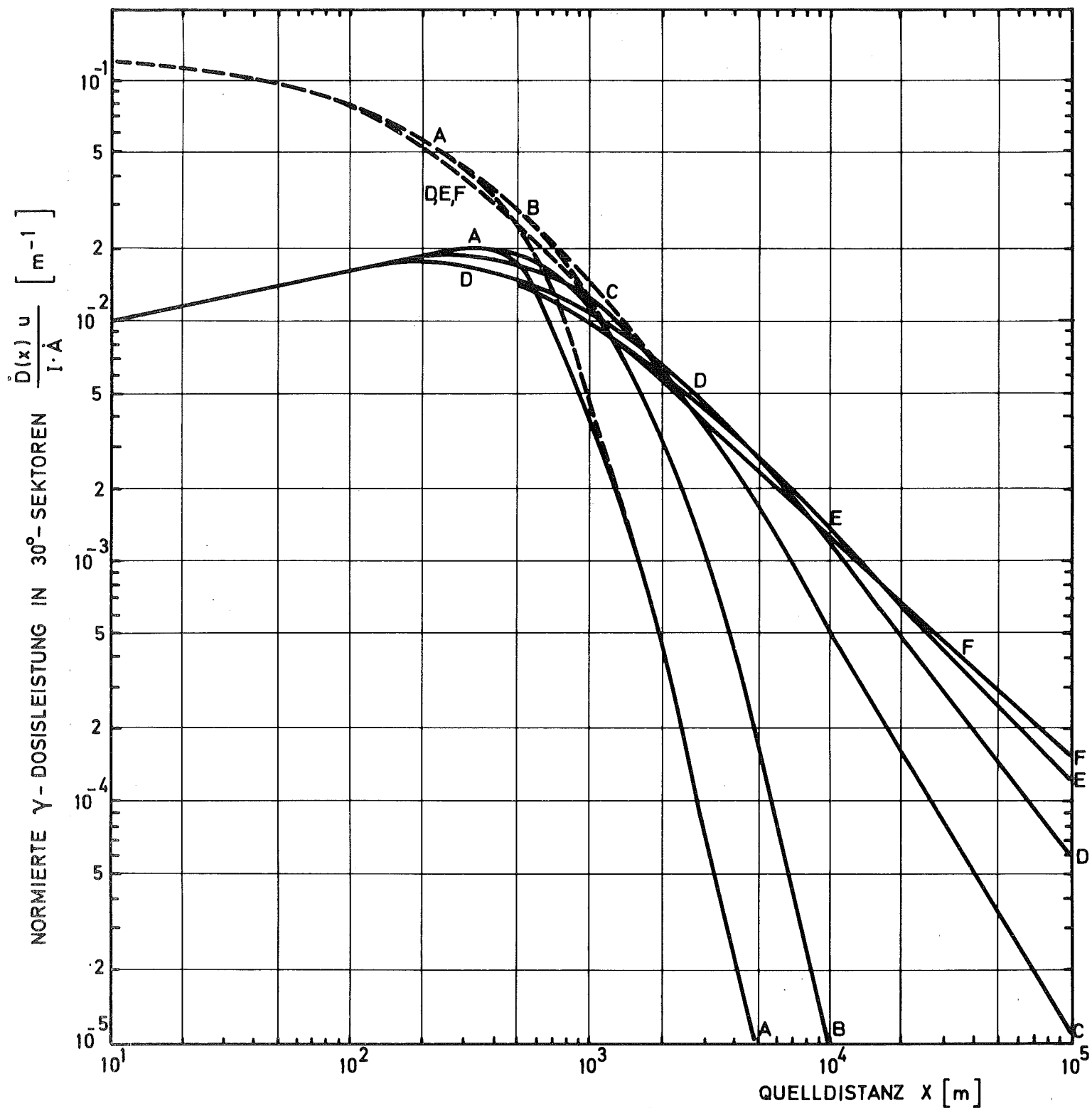


Abb: 10. NORMIERTE γ -DOSISLEISTUNG AUF DER MITTELLINIE EINES 30° -SEKTORS FÜR DIE EMISSIONSHÖHE 100m

- NUR EIN SEKTOR MIT AKTIVITÄT BESETZT (WOLGA-1-SEKTOR)
- - - ALLE SEKTOREN MIT AKTIVITÄT BESETZT (WOLGA-12-SEKTOREN)

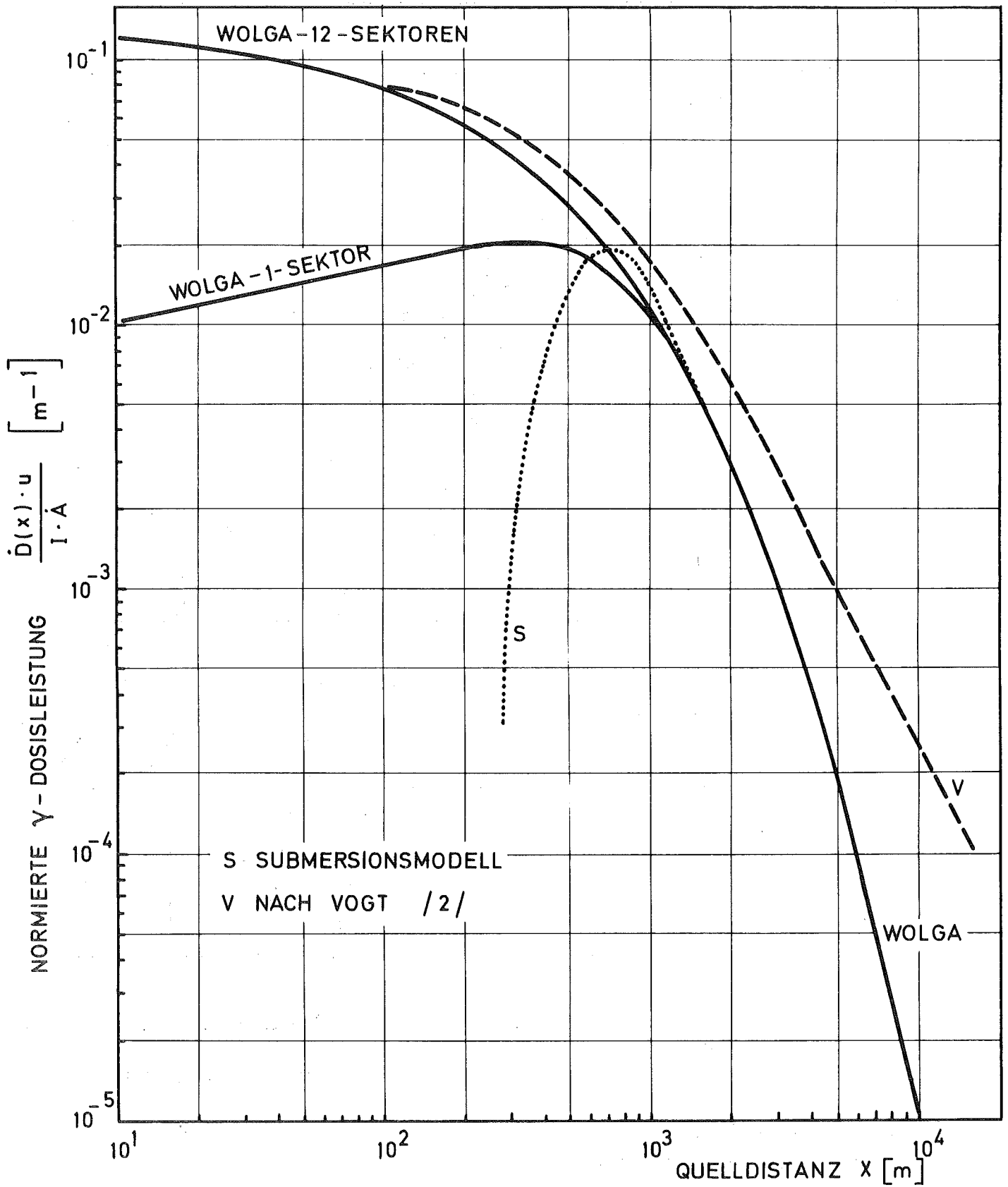


Abb: 11 VERGLEICH DER NORMIERTEN γ -DOSISLEISTUNGEN,
STABILITÄTSKATEGORIE B

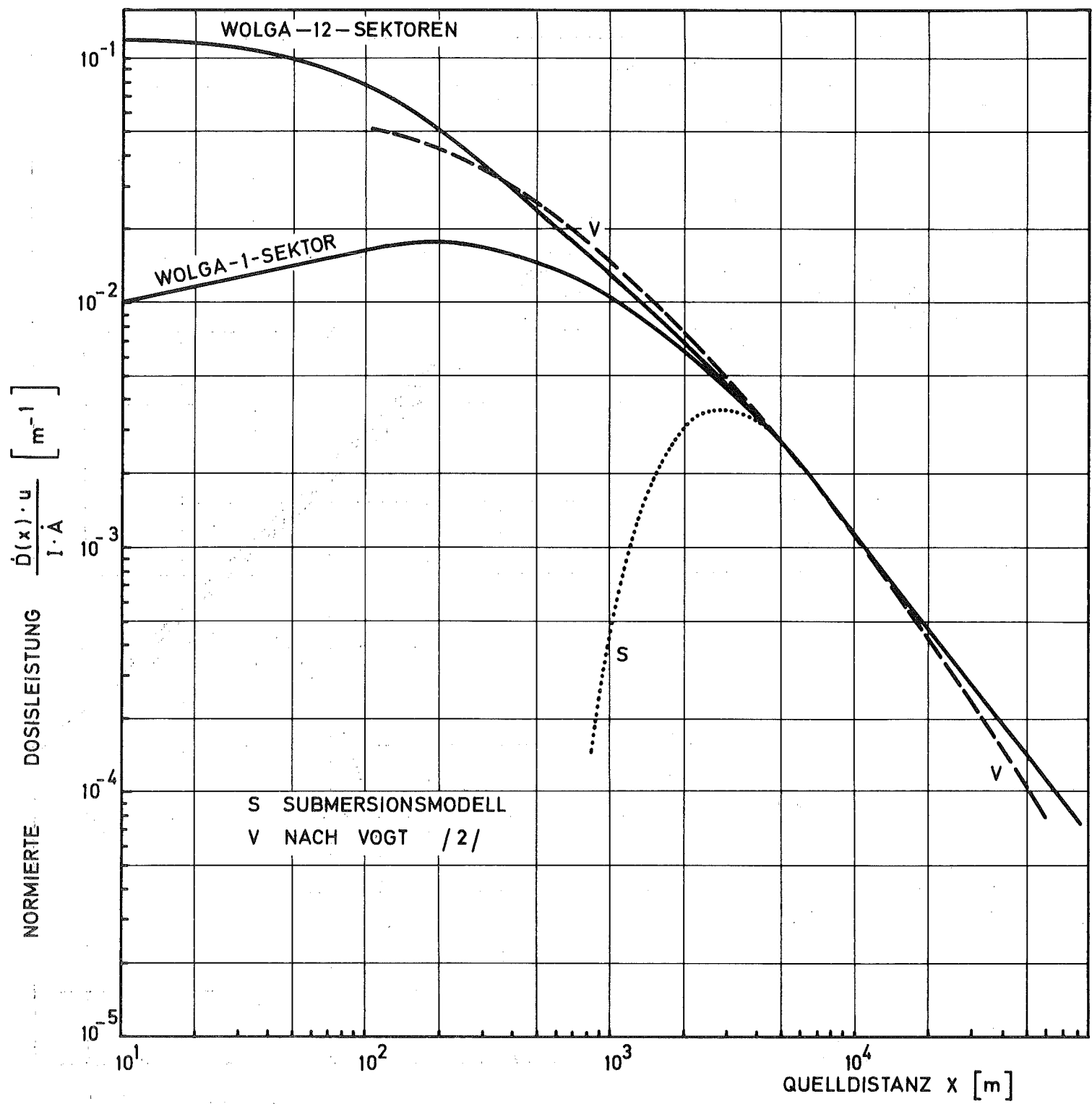


Abb :12. VERGLEICH DER NORMIERTEN γ -DOSISLEISTUNGEN, STABILITÄTSKATEGORIE D

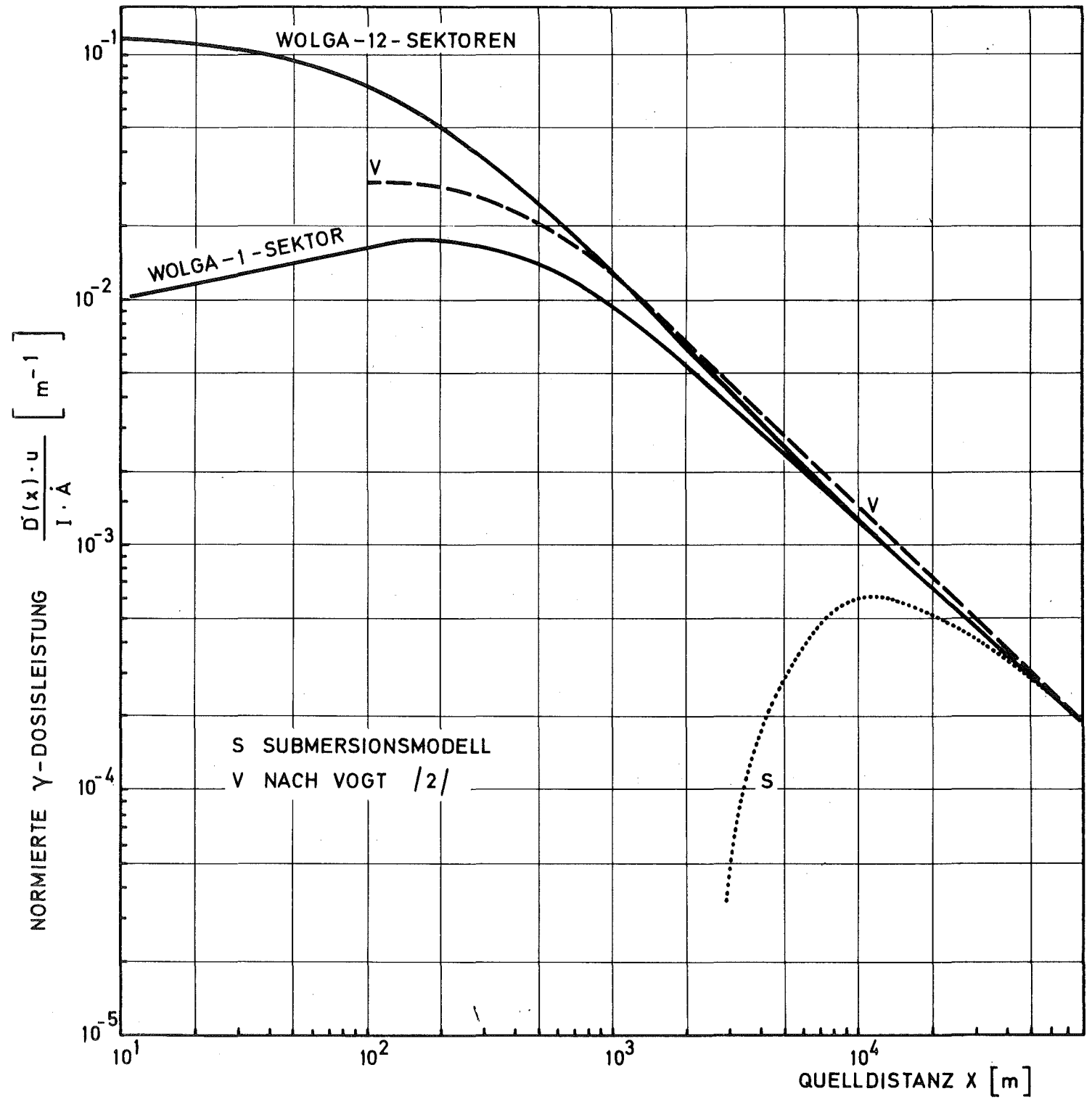


Abb: 13. VERGLEICH DER NORMIERTEN γ -DOSISLEISTUNGEN, STABILITÄTSKATEGORIE F