

AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN DER DDR

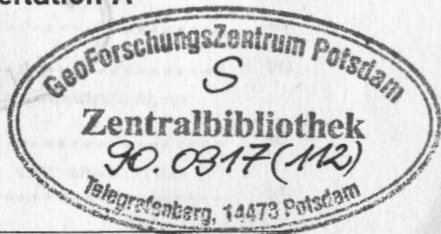


Veröffentlichung Nr. 112

Radiometrische Aschegehaltsbestimmung von Braunkohle unter besonderer Berücksichtigung der Anwendung vorwärtsgestreuter 60 keV-Quantenstrahlung

von Diedrich Fritzsche

am 3. Juni 1988 verteidigte Dissertation A

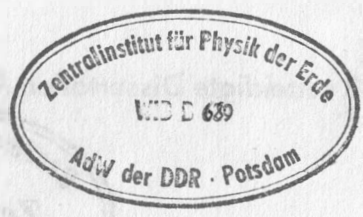


Herausgeber: Zentralinstitut für Physik der Erde Potsdam

Als Manuskript gedruckt

Potsdam 1990

AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN DER DDR



1990.460 /

Gesamtherstellung:
VEB Kongreß- und Werbedruck Oberlungwitz

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| | Zusammenfassung | 5 |
| | Summary | 6 |
| | Danksagung | 7 |
| 1. | Einführung | 8 |
| 2. | Übersicht über radiometrische on-line Meßverfahren zur Kohlequalitätsbestimmung | 10 |
| 2.1. | Qualitätsbestimmung am Kohlestrom | 10 |
| 2.2. | Elementspezifische Verfahren | 11 |
| 2.3. | Dichte- und ordnungszahlempfindliche Verfahren | 14 |
| 3. | Das δ -Absorptionsverfahren | 16 |
| 3.1. | Meßprinzip | 16 |
| 3.2. | Ascheempfindlichkeit | 16 |
| 3.3. | Einfluß von Schwankungen des Korngrößenspektrums ... | 20 |
| 3.4. | Auswahl der δ -Energie | 21 |
| 3.5. | Anwendungsbeispiele | 23 |
| 3.5.1. | Einfache δ -Absorptionsmeßgeräte | 23 |
| 3.5.2. | Kombination mehrerer δ -Absorptionsmeßstrecken | 25 |
| 4. | Das γ -Rückstreuverfahren | 29 |
| 4.1. | Meßprinzip | 29 |
| 4.2. | Mathematische Beschreibung von γ -Streuverfahren.... | 29 |
| 4.3. | Rückstreuung niederenergetischer Quanten | 31 |
| 4.3.1. | Eigenschaften | 31 |
| 4.3.2. | Ascheempfindlichkeit | 33 |
| 4.4. | Rückstreuung harter δ -Strahlung | 40 |
| 4.5. | Anwendungsbeispiele für δ -Rückstreuverfahren | 41 |
| 4.6. | δ -Absorptions- und Rückstreuverfahren in der on-stream Kohlequalitätsmeßtechnik - vergleichende Übersicht | 47 |
| 5. | Das δ -Vorwärtsstreuverfahren | 50 |
| 5.1. | Geometrie, bekannte Eigenschaften und Anwendungen in der radiometrischen Meßtechnik - Literaturübersicht | 50 |
| 5.2. | Vor- und Nachteile bei Anwendung in der on-stream Kohlequalitätsmeßtechnik | 55 |

| | | |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.3. | Zweifach-Comptonstreuemodell zur Signaleberechnung in Vorwärtsstreuengeometrie | 58 |
| 5.3.1. | Zielstellung und Anwendungsbereich | 58 |
| 5.3.2. | Abhängigkeit der Primärquantenflußdichte vom Öffnungswinkel der Quelle | 60 |
| 5.3.3. | Quantenflußdichte im Streumedium | 62 |
| 5.3.3.1. | Berechnung unter Berücksichtigung primärer und einfach gestreuter Quanten | 62 |
| 5.3.3.2. | Radiographische Bestimmung | 68 |
| 5.3.3.3. | Berücksichtigung des build up bei der Berechnung des Vorwärtsstreusignals | 70 |
| 5.3.4. | Berechnung des Quantenflusses im Detektor | 71 |
| 5.3.5. | Einfluß elastischer Streuung | 74 |
| 5.4. | Vergleich berechneter und experimentell bestimmter Vorwärtsstreusignale und -empfindlichkeiten für 60 keV-Quantenstrahlung | 76 |
| 5.4.1. | Experimentelle Daten | 76 |
| 5.4.2. | Meßgeometrie und Versuchsdurchführung | 77 |
| 5.4.3. | Modellberechnung der signalbildenden Strahlungskomponenten | 79 |
| 5.4.4. | Ergebnisse und deren Diskussion | 86 |
| 5.5. | Bisher nicht bekannte Eigenschaften der π -Vorwärtstreuung | 89 |
| 6. | 60 keV- π -Vorwärtsstremessungen zur Aschegehaltsbestimmung von Rohbraunkohle aus den Tagebauen Nochten und Berzdorf | 95 |
| 6.1. | Probenmaterial | 95 |
| 6.2. | Versuchsdurchführung und Meßergebnisse | 97 |
| 6.3. | Korrelative Zusammenhänge von Meßgrößen und Aschegehalt in den untersuchten Probensätzen | 99 |
| 6.3.1. | Dichte - Asche - Korrelation | 99 |
| 6.3.2. | Massenschwächungskoeffizient - Asche - Korrelation | 101 |
| 6.4. | Eisen-, Silizium- und Aluminiumgehalte der untersuchten Rohbraunkohlen | 104 |
| | Literaturverzeichnis | 108 |
| | Anlagen | |

Fritzsche, Dierdrieh

Radiometrische Aschegehaltsbestimmung von Braunkohle unter besonderer Berücksichtigung der Anwendung vorwärtsgestreuter 60 keV-Quantenstrahlung / Dierdrieh Fritzsche. - 118 S.: 140 Lit., 5 Anl.

Potsdam: Akademie der Wissenschaften der DDR, Zentralinstitut für Physik der Erde, Dissertation A

Zusammenfassung

Quantenabsorptions- und -streuverfahren werden hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile beim Einsatz zur on-line Kohlequalitätsbestimmung am Förderstrom verglichen. Ein mathematisches Modell, das ein- und zweifache Comptonstreuprozesse berücksichtigt, wird zur Berechnung des radiometrischen Signals, der Dichte- und der Ascheempfindlichkeit von γ -Vorwärtsstreuerecken vorgeschlagen und für 60 keV-Quanten an experimentellen Daten überprüft. Versuchsmessungen mit vorwärtsgestreuter 60 keV-Strahlung zur Aschegehaltsbestimmung von Braunkohlen unterschiedlicher Herkunft werden vorgestellt und die Einflüsse schwankender chemischer Zusammensetzung von Kohlebestandteilen diskutiert.

Radiometric ash determination of lignite under special consideration of application of forward scattered 60 keV gamma radiation

Summary

Different techniques for on-line ash determinations of coal by means of scattered and transmitted photons are compared. Advantages and disadvantages are stressed with regard to the application of these techniques for on-stream analysis.

A mathematical model is proposed for calculating radiometric signals and sensitivities to variations of density, ash content and layer thickness in forward scattering geometries. It considers photons scattered one and two times by Compton processes. Model calculations are compared with experimental data for 60 keV photons.

Some results of ash determination of lignite from different mines are presented. Influences of varying chemical composition of coal to the radiometric signals are discussed.

Danksagung

Herrn Prof. Dr. sc. J.W. L e o n h a r d t , AdW der DDR, Zentralinstitut für Isotopen- und Strahlenforschung (ZfI) Leipzig, möchte ich für die interessante Themenstellung, die zahlreichen anregenden Diskussionen und die aufmerksame Betreuung dieser Arbeit danken.

Dem Direktor des ZfI, Prof. Dr.habil. Dr.sc. K. W e t z e l , bin ich dafür zu Dank verpflichtet, daß mir 1980 - 1982 die Durchführung der dieser Arbeit zugrunde liegenden Experimente in dem von ihm geleiteten Institut möglich war.

Dem Direktor des Zentralinstitutes für Physik der Erde (ZIPE), AM Prof. Dr.habil. H. K a u t z l e b e n danke ich für die großzügig gewährte Möglichkeit, den theoretischen Teil dieser Arbeit im ZIPE, Potsdam, 1983 - 1986 erarbeiten zu können. Hierfür wurde ich zeitweilig von anderen Dienstaufgaben entlastet und konnte Rechnerkapazitäten des Institutes benutzen.

Herrn Dr.so. H.-W. T h ü m m e l (ZfI) danke ich für viele Hinweise und kritische Bemerkungen zur Arbeit, den Herren Dr. K. F r e y e r und Dipl.-Phys. G. K ö r n e r , beide ZfI, für die Unterstützung bei experimentellen Untersuchungen sowie den Kollegen der Abteilung 2 des Bereiches Isotopenanwendung (ZfI) und der Abteilung Polarforschung (ZIPE) für Ihr verständnisvolles Entgegenkommen.

Bei der technischen Fertigstellung der Arbeit waren mir die Damen H. K i r m s e (Pädagogische Hochschule Potsdam) und A. H u d l (ZIPE) behilflich.

1. Einführung

Braunkohle ist in der DDR der Hauptenergieträger (70 % Anteil an der Energieerzeugung) und einer der wichtigsten einheimischen Rohstoffe /22,44/. Für ihre effektive Nutzung, die in der Phase der intensiv erweiterten Reproduktion der Volkswirtschaft eine ständig wachsende Rolle spielt, ist die qualitätsgerechte Förderung, Sortierung und Verarbeitung entscheidende Voraussetzung. Hierfür ist eine kontinuierliche Qualitätsüberwachung erforderlich, die mit konventionellen Methoden nicht möglich ist.

Wesentliche Mängel der traditionellen diskontinuierlichen Qualitätsbestimmung sind die geringe Repräsentanz der Probenahme und die zeitliche Verzögerung, mit der die Informationen verfügbar sind. Chemisch bestimmte Laborwerte liegen in der Praxis frühestens nach einem Tag vor. Die Analysenzeit läßt sich durch die seit einigen Jahren im Einsatz befindlichen β -Rückstreugeräte zur Aschegehaltsbestimmung auf 1 - 2 Stunden reduzieren, jedoch ist auch diese Zeitverzögerung in vielen Fällen zu groß, um auf Kohlequalitätsänderungen noch während des Verarbeitungsprozesses reagieren zu können. Die herkömmlich ermittelten Kennziffern dienen daher nur der zwischenbetrieblichen Abrechnung /21/.

Die für die Steuerung und Regelung von Prozessen in der Kohleförderung und -verarbeitung erforderlichen on-line Qualitätsinformationen sind durch radiometrische Meßverfahren gewinnbar. Mit Ausnahme der auf Mikrowellen-, NMR- oder kapazitiven Methoden beruhenden Feuchtemessung von Kohlen /8,40,97/ konnten sich kontinuierlich arbeitende nichtradiometrische Qualitätsbestimmungsverfahren in der Kohleindustrie international nicht durchsetzen. Die Gründe hierfür lagen im großen Meßfehler, in der zu langen Analysenzeit oder im zu kleinen Anwendungsbereich /79/.

Die zu ermittelnden Qualitätskennziffern der Kohle sind je nach Einsatzfall unterschiedlich. Elementgehalte müssen z.B. für Belange des Umweltschutzes (S) /40/, für die Kontrolle des Ascheschmelzverhaltens (Si, Fe, Al, Ca, Ti, Na, K) /40, 74/ und bei der Karbidherzeugung (C, Ca) bestimmt werden und erfordern elementspezifische Analyseverfahren. In vielen Bereichen der kohleverarbeitenden Industrie sind on-line Informationen über Aschegehalt, Heizwert

und Wassergehalt erforderlich, die mit einfachen Meßmethoden erhalten werden können. Wesentliche Eigenschaften der Kohle hängen vom Aschegehalt ab, weshalb gebräuchliche Qualitätsbestimmungsverfahren meist der Ermittlung des Aschegehaltes dienen. Radiometrische Qualitätsbestimmungsverfahren, die auf der Absorption bzw. Streuung von β - oder γ -Strahlung beruhen, gestatten die Messung der effektiven Ordnungszahl oder Dichte der Kohle, die je nach Kohletyp unterschiedlich stark mit dem Aschegehalt bzw. Heizwert korreliert sind.

β -Vorwärts- /50,51/ und β -Rückstreuverfahren /17,18/ sind für on-line Gehaltsbestimmungen an Transportbändern i. allg. nicht verwendbar, da sie sehr feinkörniges Meßgut erfordern. Diese Meßmethoden werden hier nicht näher betrachtet.

Mit der vorliegenden Arbeit soll ein Beitrag zur Anwendung vorwärtsgestreuter 60 keV-Quantenstrahlung zur radiometrischen Aschegehaltsbestimmung von einheimischer Braunkohle geleistet werden. Der Entwicklung eines gegenüber früheren Arbeiten /92, 93/ verbesserten mathematischen Modells zur Beschreibung der Flußdichte vorwärtsgestreuter Quantenstrahlen in Medien kleiner Ordnungszahl und dessen Überprüfung an Laborexperimenten mit geeigneten Modellsubstanzen wurde besonderes Augenmerk geschenkt. Ergebnisse des Einsatzes der 60 keV- β -Vorwärtstreuung zur Aschegehaltsbestimmung von Rohbraunkohle aus den Tagebauen Nochten und Berzdorf werden vorgestellt.

2. Übersicht über radiometrische on-line Meßverfahren zur Kohlequalitätsbestimmung

2.1. Qualitätsbestimmung am Kohlestrom

Seit mehr als 30 Jahren werden in praktisch allen kohlefördernden Ländern der Welt radiometrische Kohlequalitätsbestimmungsmethoden und -geräte entwickelt /10,18,25/. In seinem umfassenden Überblick über die entsprechende Literatur bis etwa 1978 unterscheidet ONIŠČENKO /79/ drei Entwicklungslinien der Schaffung von Methoden und Geräten zur Aschegehaltsbestimmung:

- an vorbereiteten Laborproben
- an unvorbereiteten Laborproben
- kontinuierlich am Transportstrom (on-stream)

Für Aufgaben der Prozeßüberwachung und -steuerung sind on-stream Meßmethoden besonders geeignet, da sie

- die repräsentative Überwachung großer Kohlemengen gestatten
- die Qualitätsinformationen praktisch verzögerungslos zur Verfügung stellen (on-line monitoring)
- keine bzw. nur geringfügige Probenahme- und -aufbereitungseinrichtungen benötigen.

Die Entwicklung der radiometrischen on-stream Meßtechnik steht international seit etwa 10 Jahren im Vordergrund. Die unterschiedlichen dabei zur Anwendung gelangten radiometrischen Meßprinzipien bestimmen sowohl den erforderlichen gerätetechnischen Aufwand als auch die Anforderungen an die Art der Kohle-darbietung. Verfahren, die empfindlich auf Korngrößen- und damit verbundene Schüttdichteschwankungen sowie auf unterschiedliche Transportbandbeladungen reagieren oder geringe Korngrößen verlangen, können nur an speziell für Meßzwecke präparierten Teilströmen (Bypass) eingesetzt werden. Der Aufwand für derartige Nebenbandanlagen ist relativ hoch (i.d.DDR mindestens 500 TM /1/), sie bedürfen der ständigen Wartung und ihr Einbau ist, bedingt durch die Anlagengröße, nicht an beliebiger Stelle im Verarbeitungsprozeß möglich.

Die Nachteile von Nebenbandanlagen werden durch die Möglichkeit der operativen Reaktion auf Kohlequalitätsänderungen ökonomisch kompensiert. Für die seit 1980 im Routinebetrieb befindliche Bypass-Aschemeßanlage an der Zugverladestation des Tagebaus Nochten liegen betriebswirtschaftliche Erfahrungen vor. Das radiometrische on-line Signal wird vom Leitstandfahrer des Tagebaus zur Einstufung der Kohle in Brikkettier- und Kesselkohle benutzt. Mit Einführung der radiometrischen Aschemeßanlage erhöhte sich der Anteil qualitätsgerecht verteilter Züge auf 136,5 %. Die Rückflußdauer, bezogen auf den gesamten einmaligen Aufwand für die Anlage, beträgt nur 60 - 70 % des Normativs, was ihren Einsatz ökonomisch rechtfertigt /21,47/.

Die gegenwärtig zur Qualitätsbestimmung von Kohle verwendeten radiometrischen Meßverfahren werden nachfolgend unter dem Gesichtspunkt ihrer Einsetzbarkeit am Kohlestrom beschrieben. Der Schwerpunkt der Entwicklung neuer Aschebestimmungsverfahren und -geräte liegt in vielen Ländern auf der Schaffung von robusten Systemen, die Messungen am Hauptband ermöglichen.

2.2. Elementspezifische Verfahren

Die Anwendung von Quantenverfahren (hauptsächlich energiedispersive Röntgenfluoreszenz) zur Bestimmung von Elementgehalten in Kohle wird durch die Energie und die damit verbundene Reichweite der vom angeregten Atom emittierten charakteristischen Strahlung begrenzt. Praktisch sind Elemente mit Ordnungszahlen $Z < 15$ ($< S$, $E_{K\alpha} < 2,3$ keV) in Kohle sehr schwer röntgenfluoreszenzanalytisch bestimmbar. Im Routinebetrieb werden die brennbaren Bestandteile (C,N,O,H) und die wichtigsten aschebildenden Elemente Al und Si nicht erfaßt. Zur Verringerung von Absorptionsverlusten erfolgt die Bestimmung leichter Elemente im Vakuum, weshalb eine vorherige Trocknung der Kohle erforderlich ist. Zur Erzielung einer ausreichenden Probenhomogenität muß die Kohlekorngroße $< 0,1$ mm betragen, wodurch die Röntgenfluoreszenztechnik nur an hochgradig aufbereiteten Teilströmen anwendbar ist /12,74/.

Neutronentechniken kommen in der industriellen Praxis zunehmend zur Anwendung. Für Messungen am beladenen Kohlezug wurde eine Technik vorgeschlagen, bei der die Neutronenaktivierung und die Messung der induzierten, das interessierende Element charakterisierenden Aktivität zeitlich und räumlich voneinander getrennt erfolgen. Über die Reaktion $^{27}\text{Al} (n, \tau) ^{28}\text{Al}$ wird das radioaktive Isotop ^{28}Al ($T_{1/2} = 2,246 \text{ min}$) erzeugt. Die Intensität der beim Zerfall dieses Nuklids emittierten $1,78 \text{ MeV}$ - τ -Strahlung dient als Maß für den Al-Gehalt der Kohle /13/.

Größere Bedeutung erlangten Verfahren, bei denen die durch Einfang thermischer Neutronen (n, τ) oder inelastische Neutronenstreuung ($n, n' \tau$) induzierte prompt e τ -Strahlung analytisch genutzt wird. Die Detektion der elementspezifischen Strahlung erfolgt während der Neutronenbestrahlung der Kohle, was besondere Anforderungen an die Strahlenresistenz des Detektors stellt. Das Verfahren gestattet bei Einsatz von Neutronenquellen mit Energien oberhalb der Schwellwertenergie der interessierenden Kernreaktion und unter Benutzung eines hochauflösenden Detektionssystems die on-line Bestimmung aller wichtigen in der Kohle enthaltenen Elemente mit sehr hoher Genauigkeit. Nachteilig wirken sich die hohen geräte- und strahlenschutztechnischen Aufwendungen aus (vgl. Tab. 1).

Aufgrund der meist sehr engen Korrelation zwischen den Gehalten der hauptsächlich die Asche bildenden Elemente Al und Si und dem Aschegehalt sind elementspezifische radiometrische Verfahren auch ausgezeichnet zur Aschegehaltsbestimmung geeignet (vgl. Kap.6.).

Tab. 1: Elementspezifische Kohleanalytik mittels neutroneninduzierter prompter γ -Strahlung

| | |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| erforderl. Geräte | Neutronenquelle: ^{252}Cf , $^{241}\text{Am/Be}$ /12/, $^{238}\text{Pu/Be}$ /113/ oder Neutronengenerator /43,73/ Detektor: Halbleiterdetektor Ge(Li), Hp Ge /11/, bei Bestimmung weniger Elemente auch NaJ(Tl) /40,43, 73/ Vielkanal-analysator |
| bestimmbare Qualitätsgrößen | Elemente H,S,C,N,Cl,Si,Al,Fe,Ca,Ti,K,Na /40/ bei Verwendung einer Neutronenquelle mit hohem Anteil schneller Neutronen (Energ. > 6,129 MeV) auch O bestimmbar /12/ Aschegehalt Heizwert Feuchte durch Kombination mit Mikrowellenmeßgerät /40/ |
| Meßfehler | kleiner als der von Standardverfahren im Routinebetrieb /40/, z.B. A^d : $\pm 0,5\%$ Heizwert: ± 300 kcal/kg S : $\pm 0,1\%$ H_2O : $\pm 1,5\%$ (nach /66/) |
| Nachteile | hohe Gerätekosten N_2 -gekühlter Halbleiterdetektor (bei Mehrelementbest.) begrenzte Lebensdauer des Ge-Detektors im Feld schneller Neutronen (ca. 1 Jahr bei n-Typ) /12/ hoher Strahlenschutz Aufwand |
| realisiertes Gerät | CONAC (USA) /40/ |
| Einsatz | seit 1981 an Nebenbandanlagen; Steinkohle |

2.3. Dichte- und ordnungszahlempfindliche Verfahren

Zur on-stream Kohlequalitätsbestimmung sind Verfahren geeignet die auf Absorptions- und Streueffekten von γ -Strahlung in der Kohle beruhen. Sie zeichnen sich durch eine relativ einfache und robuste Meßtechnik aus, die den Anforderungen des Einsatzes an Bandanlagen gerecht wird. Als Strahlungsquellen dienen heute fast nur noch langlebige Radionuklide. Das radiometrische Signal reagiert auf Änderungen der effektiven Ordnungszahl und/oder der Dichte der Kohle. Verfahren, die energiereiche γ -Strahlung benutzen, ($E_\gamma > 300$ keV) sind ausschließlich dichteempfindlich.

Aus der radiometrisch bestimmten effektiven Ordnungszahl bzw. Dichte kann auf den Aschegehalt und bei bekannter oder gleichbleibender Feuchte auf den Heizwert /14,56/ der Kohle geschlossen werden, wenn die folgenden Voraussetzungen erfüllt sind:

1. Die Kohle ist hinreichend gut durch ein Zweistoffmodell beschreibbar, d.h., sie stellt eine Mischung aus brennbarem ($Z_B \sim 6$, Dichte ρ_B) und nichtbrennbarem (je nach chemischer Zusammensetzung dieser Komponente $Z_{Ad} = 10,8 \dots 16$, Dichte ρ_{Ad}) Anteil dar, wobei die beiden Komponenten der jeweils untersuchten Kohlecharge sich hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung und/oder Dichte nicht verändern dürfen.
In realen Kohlen wird die brennbare Komponente aus den Hauptelementen H,C,N,O, z.T. S, der nichtbrennbare Mineralstoffanteil aus Na,Mg,Al,Si, z.T. S,(K),Ca und Fe gebildet. Kohlen unterschiedlicher Herkunft, aber auch solche, die aus einer Lagerstätte stammen, weisen mehr oder minder starke Schwankungen der chemischen Zusammensetzung und Dichte der Einzelkomponenten auf, wodurch Schwankungen der effektiven Ordnungszahl und der Dichte der Kohle hervorgerufen werden, die nicht mit dem Aschegehalt oder Heizwert korreliert sind und die den Meßfehler der radiometrischen Kohlequalitätsbestimmung wesentlich bestimmen. Besonders stark wirken sich Gehaltsschwankungen der schweren Elemente Fe und Ca in der Mineralstoffkomponente auf das Meßergebnis aus.

2. Die Kalibrierung des radiometrischen Signals zur Aschegehaltsbestimmung erfolgt durch Vergleich mit dem durch Wägung des Glührückstandes /89/ ermittelten Aschegehalt A^d der Kohle. Da die radiometrische Messung an der unverbrannten Kohle erfolgt, beeinflussen nicht der Asche- sondern der Mineralstoffgehalt die Meßgröße Z bzw. g . Zwischen Mineralstoff- und Aschegehalt besteht ein quantitativer Unterschied, der von der chemischen Zusammensetzung der Kohle abhängt /70/. Voraussetzung der radiometrischen Aschegehaltsbestimmung ist, daß Mineralstoff- in Aschegehalte unmittelbar umrechenbar sind. Dies ist, wie BOTHE /3/ nachweist, für einheimische Braunkohlen unterschiedlicher Herkunft, offenbar im Gegensatz zu Steinkohlen /12/, nicht immer erfüllt.

Die verwendete γ -Energie und die Meßgeometrie bestimmen die Empfindlichkeit des Verfahrens gegen Änderungen der Meßgrößen Z und g und beeinflussen Korngrößeneffekte. Entscheidend für die Wahl von γ -Energie und Meßgeometrie ist daher die Güte des in der zu messenden Kohle vorhandenen Zusammenhangs zwischen dem zu bestimmenden Aschegehalt A^d und den meßbaren Größen Dichte g oder effektive Ordnungszahl Z einerseits und die Qualität der mechanischen Kohleaufbereitung und die Art ihrer Bearbeitung an der vorgesehenen Meßstelle andererseits.

Hinsichtlich der Meßgeometrie und mit ihr verbundener charakteristischer Eigenschaften sind

- γ -Absorptions-
- γ -Rückstreu- und
- γ -Vorwärtsstreuverfahren

zu unterscheiden. γ -Absorptions- und γ -Rückstreuverfahren entwickelten sich seit den 50er Jahren zu on-stream Meßverfahren der Kohlequalitätsüberwachung. Die Vorwärtsstreuung von γ -Strahlung wurde 1973 von RUDANOVSKI /96/ als Aschebestimmungsverfahren vorgeschlagen und wird seither hauptsächlich in der Sowjetunion angewendet. Bevor im 5. Kapitel die durch Modellrechnungen und Experimente gefundenen Merkmale dieses international noch wenig beachteten Verfahrens beschrieben werden, sind im Abschnitt 3 und 4 Eigenschaften und Anwendungen von γ -Absorption und -Rückstreuung als Aschemethoden dargestellt.

3. Das γ -Absorptionsverfahren

3.1. Meßprinzip

Beim γ -Absorptionsverfahren werden ausschließlich Quanten registriert, die das Meßgut ohne Wechselwirkung passiert haben. Dies wird durch eine geeignete Meßanordnung erreicht. Das von einer eng kollimierten Quelle ausgehende Strahlungsbündel durchdringt das zu messende Gut. Dabei wird die Quantenflußdichte als Folge von Photoabsorption und Streuung von Quanten aus der Primärstrahlrichtung verringert. Der Strahlungsdetektor befindet sich auf der der Quelle entgegengesetzten Meßgutseite und wird zur Verhinderung der Registrierung mehrfach gestreuter Quanten meist ebenfalls eng kollimiert.

Das radiometrische Signal I ist eine Funktion der durchstrahlten Meßgutschichtdicke d und der Dichte ρ und genügt der Beziehung

$$\begin{aligned} I &= I_0 [\mu(A^d), \rho(A^d)] & (1) \\ &= I_0 \exp(-\mu \rho d) \end{aligned}$$

I_0 bezeichnet das Signal ohne Absorptionsmedium ($d = 0$).

μ ist der Massenschwächungskoeffizient, der von der chemischen Zusammensetzung des Meßgutes abhängt. $\mu = \mu(A^d)$ gilt nur in Zweistoffnäherung für die Kohle.

3.2. Ascheempfindlichkeit

Die Ascheempfindlichkeit jedes dichte- und ordnungszahlempfindlichen radiometrischen Meßverfahrens ist abhängig von - kohletypspezifischen relativen Änderungen von Massenschwächungskoeffizient und Dichte als Folge von Aschegehaltsänderungen $\mu_{A^d}^S$ bzw. $\rho_{A^d}^S$. Die relative Änderung des Massenschwächungskoeffizienten ist außerdem abhängig von der verwendeten γ -Energie.

- meßgeometriespezifischen relativen Signalempfindlichkeiten S_{μ} und S_g gegen relative Änderungen von μ bzw. g . Beide Empfindlichkeiten sind von der γ -Energie abhängig.
(Vgl. Anlage 1)

Für das γ -Absorptionsverfahren erhält man die Größen S_{μ}^{TM} und S_g^{TM} nach Gl.(A 5) und (A 6) (Anlage 1) aus den entsprechenden partiellen Ableitungen von Gl.(1)

$$S_{\mu}^{TM} = S_g^{TM} = -\mu S^d = -\mu \eta S_K^d \quad (2)$$

womit sich die Ascheempfindlichkeit der γ -Absorption nach Gl.(A 4) unter Beachtung von Gl.(A 12) und (A 16) angeben läßt

$$S_{A^{TM}}^d = -\frac{\eta S_K^d}{100\%} \left[(\mu_{A^d} - \mu_B) - \mu S_K \left(\frac{1}{S_{A^d}} - \frac{1}{S_B} \right) \right] \quad (3)$$

$$= -\eta S_K^d (\mu_{A^d} S_{A^d} + \mu S_{A^d} S_{A^d}) \quad (4)$$

S_K bezeichnet die Dichte der Rohkohle im Flöz;
 η den Füllungskoeffizienten bei geschütteter Kohle.

Typische Merkmale der Ascheempfindlichkeit des γ -Absorptionsverfahrens $S_{A^{TM}}^d$ lassen sich folgendermaßen verifizieren:

Da

- $S_{A^d}^d$ für $g_{A^d} > g_B$ stets positiv, energieunabhängig und wegen $S_K = S_K(A^d)$ aschegehaltsabhängig (Gl.(A 16)),
- $\mu_{A^d}^d$ für $\mu_{A^d} > \mu_B$ ebenfalls positiv, energieabhängig und aschegehaltsunabhängig (Gl.(A 12)) sowie
- der Massenschwächungskoeffizient energieabhängig sind, gilt

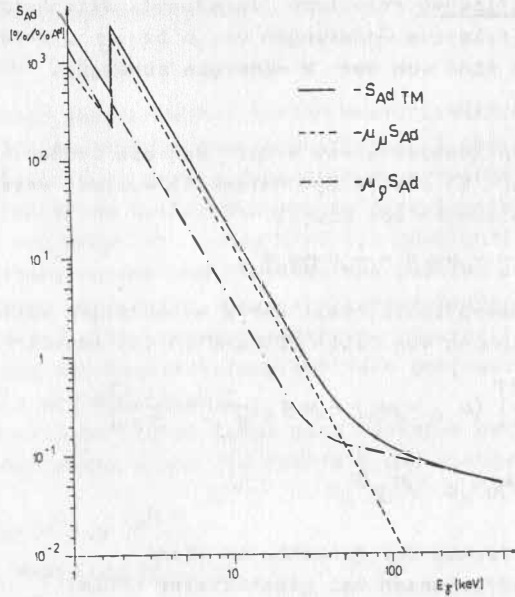


Abb. 1: Ascheempfindlichkeit der γ -Absorption S_{AdTM} und ihre Komponenten $\mu_{\mu} S_{Ad}$ und $\mu_g S_{Ad}$ als Funktion der γ -Energie, berechnet nach Gl.(4) für Kohle mit 20 % A^d Aschegehalt unter den Voraussetzungen $\eta_{gK}^d = 1 \text{ kg/m}^2$; $Z_B = 6$, $\rho_B = 1,2 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$; $Z_{Ad} = 10,8$, $\rho_{Ad} = 2,5 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$, d.h. einer aus Quarz (SiO_2) bestehenden Asche

- Die Ascheempfindlichkeit des γ -Absorptionsverfahrens
- wird von 2 in ihrer Wirkung gleichgerichteten Komponenten erzeugt,
 - ist stets negativ (Gl.(4)), d.h. Aschegehaltszunahmen bewirken Signalschwächungen,
 - ist proportional der durchstrahlten Flächemasse und
 - ist energieabhängig.

Die Energieabhängigkeit der Ascheempfindlichkeit $S_{A_{TM}}^d$ und ihrer Komponenten $\mu_{A^d}^S$ und $\mu_{g_{A^d}}^S$ wurde für Modellkohle (Gemisch von C und 20 Gew. % SiO_2) bei konstanter Flächenmasse berechnet und als relative Signaländerung pro Gew. % Aschegehaltsänderung ($\% / \% A^d$) in Abbildung 1 dargestellt. Daraus ist ersichtlich:

- im Energiebereich $\sim 2 \text{ keV} \geq E_\gamma \geq 50 \text{ keV}$ dominiert der Einfluß der Wirkung von Aschegehaltsänderungen auf den Massenschwächungskoeffizienten ($\mu_{A^d}^S$)
- für $E_\gamma > 50 \text{ keV}$ überwiegt der Einfluß der Wirkung von Aschegehaltsänderungen auf die Kohledichte ($\mu_{g_{A^d}}^S$)
- für $E_\gamma > 300 \text{ keV}$ ist $S_{A_{TM}}^d \sim g_K^2$. Das σ -Absorptionsverfahren reagiert bei diesen Energien auf Aschegehaltsschwankungen ausschließlich über deren Auswirkungen auf die Kohledichte.

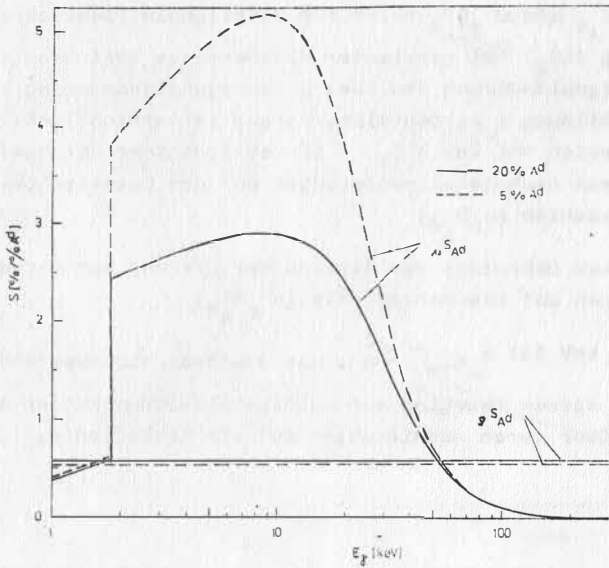


Abb. 2: Relative Änderung von Massenschwächungskoeffizient $\mu_{A^d}^S$ und Dichte $\rho_{A^d}^S$ infolge von Aschegehaltsänderung als Funktion der γ -Energie, berechnet für Kohlen mit Aschegehalten von 5 % A^d und 20 % A^d unter den Voraussetzungen $Z_B = 6$, $\rho_B = 1,2 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$; $Z_{A^d} = 10,8$, $\rho_{A^d} = 2,5 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$

3.3. Einfluß von Schwankungen des Korngrößenspektrums

Das Korngrößenspektrum bestimmt den Füllungskoeffizienten η und damit die radiometrisch wirksame Schüttdichte ρ der Kohle. Durch Schwankungen des Korngrößenspektrums hervorgerufene Dichteänderungen führen zu Aschegehaltsbestimmungsfehlern radiometrischer Meßstrecken.

Für das σ -Absorptionsverfahren ergibt sich die durch relative Änderung des Füllungskoeffizienten $d\eta/\eta$ vorgetäuschte Aschegehaltsänderung dA^d aus der Differentiation von Gl.(1) unter Beachtung von (A 14)

$$\frac{dI}{I} = -\mu\eta g_K d \frac{d\eta}{\eta} \quad (5)$$

und aus Gl.(A 1) und (4)

$$\frac{dI}{I} = -\mu\eta g_K d(\mu_{A^d}^S + g_{A^d}^S) dA^d \quad (6)$$

zu

$$dA^d = \frac{1}{\mu_{A^d}^S + g_{A^d}^S} \frac{d\eta}{\eta} \quad (7)$$

Für die im Abschnitt 3.2. betrachtete Modellkohle sind $\mu_{A^d}^S$ und $g_{A^d}^S$ für Aschegehalte von 5 %^{A^d} und 20 %^{A^d} als Funktion der σ -Energie in Abbildung 2 dargestellt. $\mu_{A^d}^S$ ist energieabhängig, besitzt bei $E_\sigma \sim 10$ keV ein Maximum und wird für $E_\sigma > 300$ keV Null. $g_{A^d}^S$ ist energieunabhängig.

Der Einfluß von Füllungskoeffizientenänderungen auf den Aschemeßwert ist für $E_\sigma \sim 10$ keV am geringsten und für $E_\sigma > 300$ keV am größten.

3.4. Auswahl der σ -Energie

Die Reichweite von γ -Quanten in Medien steigt mit zunehmender Energie (abnehmendes μ - vgl. Abb. 3; siehe Gl.(1)). Damit wächst auch die Möglichkeit, an größeren Kohleschichtdicken sowie an kohlefördernden Anlagen, wie Gurtbandförderern, stahlummantelten Schurren oder Röhren, zu messen. Einerseits wächst mit größer werdender Kohleschichtdicke das erfaßte Meßgutvolumen, wodurch Anforderungen an Homogenität und Korngröße der Kohle geringer

werden; andererseits sinkt mit zunehmender Energie die Meßempfindlichkeit; Dichte- und Körnungseinflüsse wachsen (Abb. 1, Abschnitt 3.3.).

Die Auswahl der γ -Energie erfolgt nach Prüfung der korrelativen Zusammenhänge zwischen dem Aschegehalt und den Meßgrößen Massenschwächungskoeffizient und Schüttdichte. Zu beachten sind weiterhin

- konstruktive Beschaffenheit der vorgesehenen Meßstelle
- Art der Kohledarbietung (Schichtdicke, Homogenität und Körnung des Kohlestroms)
- Strahlungsuntergrund und Verfügbarkeit geeigneter γ -Strahlungsquellen (langlebige Radionuklide)

Kriterium für die optimale γ -Energie ist die Minimierung des Asche-meßfehlers unter den Bedingungen der vorgesehenen Meßstelle.

Ist ein enger Zusammenhang von Aschegehalt und Massenschwächungskoeffizient gegeben, so wird durch die gewählte γ -Energie ein von den o.g. Bedingungen abhängender Kompromiß zwischen Ascheempfindlichkeit und Beeinflußbarkeit des Meßergebnisses durch Kohleinhomogenitäten realisiert. Die 60 keV-Quantenstrahlung des Radioisotops ^{241}Am hat sich unter den vorherrschenden Gegebenheiten an Fördereinrichtungen von Kohleverarbeitungsanlagen besonders bewährt. Sie ist bei Quellaktivitäten um 10^{10} Bq in der Lage, Braunkohlenschichtdicken bis zu 25 cm und Gurtbandstärken von 1 - 2 cm bei auswertbarer Signalintensität zu durchdringen. Im Vergleich zu ^{137}Cs - (660 keV) oder ^{60}Co - (1,17/1,33 MeV) Quellen ist der Strahlenschutz Aufwand sehr gering.

Bei Vorhandensein eines engen Zusammenhangs zwischen Schüttdichte und Aschegehalt sind Strahlungsenergien $E_{\gamma} > 300$ keV anwendbar. Derartige ausschließlich dichteempfindliche Meßstrecken werden besonders stark von Schwankungen des Korngrößenspektrums beeinflusst. Dieses ist von zeit- und verschleißbedingten technologischen Parametern abhängig, weshalb die Kalibrierung der auf der Schüttdichtemessung basierenden radiometrischen Aschebestimmung in bestimmten Abständen zu kontrollieren ist.

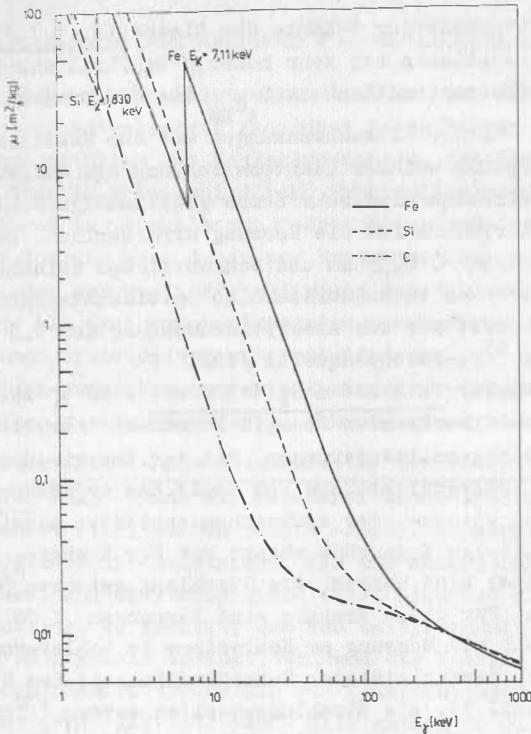


Abb. 3: Abhängigkeit des totalen Massenschwächungskoeffizienten von der Quantenenergie E_γ für Kohlenstoff, Silizium und Eisen nach /134/

3.5. Anwendungsbeispiele

3.5.1. Einfache τ -Absorptionsmeßgeräte

Die radiometrische Aschegehaltsbestimmung mittels einer einzigen Meßstrecke, die auf dem τ -Absorptionsprinzip beruht und damit Gl.(1) genügt, setzt konstante Durchstrahlungsdicken voraus. Dies ist für Messungen an Rohren und Schurren /86/, Brikett-
preßsträngen /45/, Küvetten /57/ oder an Meßbändern mit dosierter Kohlezuführung /79/ gegeben.

Die Ascheempfindlichkeit des τ -Absorptionsverfahrens (Abb. 1) und die Durchdringungsfähigkeit der verwendeten Strahlung sind energieabhängig, weshalb auch die Anwendungen des Verfahrens nach der benutzten τ -Energie unterschieden werden.

γ -Energien unterhalb der K-Kante des Eisens ($E_{\gamma} < 7,11$ keV, vgl. Abb. 3) ermöglichen bei sehr hoher μ -Empfindlichkeit und daher großer Ascheempfindlichkeit S_{A}^{dTM} die Unterdrückung des Einflusses von Eisengehaltsschwankungen auf das Meßsignal. Wegen der hohen Absorption weicher Quantenstrahlung und aufgrund von Inhomogenitätseffekten sind sehr dünne gleichmäßige Schichten hochaufgemahlener Kohle für die Messung erforderlich. Berichtet wird von Korngrößen $< 0,35$ mm und Schichtdicken zwischen 0,3 und 2,0 mm /111/. Das in Großbritannien entwickelte Aschemessgerät MINITEC beruht auf der Absorptionsmessung der 5,9 keV γ -Strahlung einer ^{55}Fe -Isotopenquelle /79/.

Im Energiebereich $7,11$ keV $\leq E_{\gamma} \leq 300$ keV sind γ -Absorptionsaschemessgeräte mit wachsender Energie zunehmend unempfindlicher gegen μ - und Aschegehaltsänderungen. Mit der Energie nimmt die durchdringbare Kohleschichtdicke und damit das erfassbare Volumen zu, wodurch sich Dichte- oder Ascheinhomogenitäten ausmitteln. Die maximal zulässige Korngröße wächst mit der Energie.

Weit verbreitet sind Geräte, die Strahlung zwischen 50 und 60 keV benutzen. Für diese Energie sind Körnungen < 20 mm /52/ zulässig, weshalb die Messung am Kohlestrom in kohleverarbeitenden Anlagen bei noch gewährleisteter Z-Empfindlichkeit des Signals möglich wird (Abb. 1). Als Strahlungsquellen werden ^{170}Tm (benutzt wird die 52 keV-Strahlung der Tochter ^{170}Yb , $T_{1/2} = 128,6$ d) /55/ und in letzter Zeit zunehmend das leichter handhabbare ^{241}Am (60 keV, $T_{1/2} = 458$ a) verwendet. Entsprechende Geräte wurden u.a. in der Sowjetunion (RKT-1 /79/) und in der DDR (Prototyp /45/) entwickelt. In beiden Fällen wurden ^{241}Am -Quellen eingesetzt.

γ -Absorptionsmeßgeräte, die Energien $E_{\gamma} > 300$ keV verwenden, basieren auf einer Schüttdichte-Asche-Korrelation, die wegen Schwankungen des Korngrößenspektrums oder der Kohlefeuchte nicht in jedem Fall gegeben ist. Die Anforderungen an die maximale Korngröße sind gering (< 150 mm), so daß diese Geräte ohne Probenahme- und Aufbereitungsvorrichtungen am Kohlestrom einsetzbar sind. Ihre Ascheempfindlichkeit ist bei größerem Meßfehler geringer als die der niederenergetischen γ -Absorptionsaschemesser. Bekannt wurde ein unter der Bezeichnung WSKZ in der Sowjetunion entwickeltes Gerät, das ^{137}Cs (660 keV, $T_{1/2} = 30,1$ a) als Strahlungsquelle benutzt /79,86/.

3.5.2. Kombination mehrerer γ -Absorptionsmeßstrecken

γ -Absorptionsmeßstrecken besitzen bei Verwendung unterschiedlicher Quantenenergie gegenüber Schwankungen z.B. der chemischen Zusammensetzung der Kohlekomponenten, des Körnungsspektrums oder der Feuchte unterschiedliche Empfindlichkeiten. Die geeignete Kombination der Signale von γ -Absorptionsmeßstrecken unterschiedlicher Energie kann daher zur Unterdrückung von Störgrößeneinflüssen oder zur Qualitätsbestimmung von Kohlen, die nicht hinreichend genau als Zweikomponentensystem beschreibbar sind, benutzt werden. Je nach Zielstellung unterscheidet man

- flächenmassekompensierte Zweienergie-Transmissions- von
- störelementkompensierten Mehrenergie-Transmissionsverfahren.

Beim flächenmassekompensierten Zweienergie-Transmissionsverfahren /123/ (auch als Zweikanal-Gamma-Absorptionsmethode bezeichnet /14/) werden zwei γ -Absorptionsmeßstrecken geeigneter Energie derart kombiniert, daß das Meßergebnis unabhängig von der durchstrahlten Flächenmasse wird. Dazu ist die Energie der ersten Meßstrecke so gewählt, daß das entsprechende μ_1 von Z und damit vom Aschegehalt abhängt, während die Energie E_2 der zweiten γ -Absorptionsmeßstrecke ein von Z unabhängiges $\mu_2 \approx \text{const.}$ garantiert (vgl. Abb. 3). Damit gilt analog zu Gl. (1)

$$I_1 = I_{01} \exp(-\mu_1(A^d)gd) \quad (8)$$

$$I_2 = I_{02} \exp(-\mu_2 g d),$$

woraus folgt

$$A^d \sim \mu_1 = \mu_2 \frac{\ln(I_{01}/I_1)}{\ln(I_{02}/I_2)} \quad (9)$$

Mit den Konstanten I_{01} , I_{02} und μ_2 ist μ_1 aus den Signalen I_1 und I_2 nach Gl.(9) ohne Kenntnis der durchstrahlten Flächenmasse $g \cdot d$ berechenbar. Unter Beachtung der für den gemessenen Kohletyp als bekannt vorausgesetzten Beziehung zwischen μ_1 und A^d ergibt sich der Aschegehalt der Kohle.

Die Meßempfindlichkeit des Verfahrens $S_{A^d 2TM}$ beträgt

$$S_{A^d 2TM} = \mu^d S_{A^d} \quad (10)$$

und ist folglich bei großen durchstrahlten Flächenmassen ($\mu^d > 1$), kleiner als die eines einfachen τ -Absorptionsverfahrens mit der Energie E_1 (vgl. Gl.(4)).

Das flächenmassekompenzierte Zweienergie-Transmissionsverfahren ist für on-stream Meßaufgaben an Förderbändern mit schwankender Bandbelastung /60/ oder an in Rohren transportierten Kohleschlamm (slurries), bei denen Flächenmasseschwankungen infolge von Variationen des Feststoffgehaltes eintreten /72/, vorteilhaft einsetzbar. Häufig wird die o.g. Voraussetzungen erfüllende Kombination der τ -Energien 60 keV (^{241}Am) und 660 keV (^{137}Cs) benutzt /60,72,123/. In /11/ und /79/ wird über ein in Japan unter der Bezeichnung R-1 entwickeltes Gerät berichtet, das die Messung von Trockenkohle (Körnung $< 25 \text{ mm}$ /11/ bzw. $< 15 \text{ mm}$ /79/, $A^d = 0 \dots 30 \%$ /11/ bzw. $5 \dots 25 \%$ /79/) mittels 60/660 keV-Zweifachtransmission gestattet. Der Meßfehler beträgt $\pm 0,6$ /11/ bzw. $\pm 1 \%$ A^d /79/.

In der Kohleindustrie der DDR wurde das 60/660 keV-Transmissionsverfahren zu Beginn der 80er Jahre erprobt /60/ und weiterentwickelt /61,120,124/. Im Zentralinstitut für Isotopen- und Strahlenforschung der AdW der DDR (ZfI) existiert ein Geräteprototyp KRAS-2, bei dem die Verknüpfung der digitalen Signale I_1 und I_2 der 60 bzw. 660 keV-Meßstrecken sowie die Meßzyklensteuerung mittels Mikrorechner erfolgt /122/.

Verschiedenartige störelementkompenzierte Mehrenergie-Transmissionsverfahren sind beschrieben worden. Hauptsächlich in Australien wurde ein Zweienergie-Transmissionsverfahren entwickelt, das wenig empfindlich gegen Schwankungen der Zusammensetzung der Mineralstoffkomponente, insbesondere gegenüber Fe-Gehaltsvariationen, ist. FOOKES u.a. /35/ bestimmten an Kohlepreßlingen konstanter Flächenmasse (ca. 10 kg/m^2) mit Hilfe von τ -Absorptionsmeßstrecken unterschiedlicher Energie die entsprechenden Massen-

schwächungskoeffizienten μ_1 und μ_2 . Für Kohlen mit bekanntem Aschegehalt c_{A^d} wurden entsprechend dem Ansatz

$$c_{A^d} = c_1\mu_1 + c_2\mu_2 + c_3 \quad (11)$$

die Konstanten c_1 , c_2 und c_3 und damit die Eichfunktion des Verfahrens ermittelt.

Theoretische Berechnungen und experimentelle Ergebnisse weisen für australische Kohlen unterschiedlicher Herkunft Aschebestimmungsfehler von 0,67 % A^d für die Energiekombinationen 16/22,1 keV und 22,1/34,5 keV aus. Für diese Energien ist das Verfahren weniger von der Kohlezusammensetzung abhängig als eins, das die weiche K-Fluoreszenzstrahlung des Eisens zur Kompensation nutzt. Weiterhin ist wegen der größeren Reichweite der benutzten energiereicheren Strahlung grobkörnigere Kohle als mit den RFA-Techniken analysierbar. Energiekombinationen von 34,5/45 keV und 45/60 keV ergaben eine Vergrößerung des Meßfehlers.

Zu ähnlichen Ergebnissen kommen WATT u.a. /138/, die ein Dreienergie-Transmissionsverfahren mit dem Ziel der Fe- und Flächenmassekompensation vorschlagen. Ein derartiges Verfahren ist u.a. zur on-stream Aschegehaltsbestimmung an Förderbändern einsetzbar. Für die Energiekombination 22/25/356 keV, bei der die Signale der τ -Absorptionsmeßstrecken ähnlich Gl.(11) mit dem Aschegehalt verknüpft werden

$$c_{A^d} = \frac{c_4 \log(I_{22}/I_{022}) + c_5 \log(I_{35}/I_{035})}{\log(I_{356}/I_{0356})} + c_6 \quad (12)$$

wurde an australischer Kohle ($A^d = 11 \dots 25$ %) ein Bestimmungsfehler von 0,67 % A^d erreicht.

Das zu geringsten Meßfehlern führende Optimum der Energiepaarung beim Zweienergie-Transmissionsverfahren hängt von der Zusammensetzung und vom Aschegehalt der Kohle sowie von den Schwankungen der Störelemente (Fe, gelegentlich Ca) ab. CSOM /14/ findet für die im Wärmekraftwerk Pécs (VR Ungarn) zur Verbrennung kommenden Kohlen ein Optimum für die Kombination 10/30keV.

Für on-stream Messungen ist zu beachten, daß die Genauigkeit der von der Zählstatistik beeinflussten Signale I_1 und I_2 den Meßfehler mitbestimmen. Das Energiepaaroptimum wird daher auch noch von der durchstrahlten Flächenmasse und deren Schwankungen sowie von der Quellstärke und der verfügbaren Meßzeit bestimmt. ONIŠČENKO /77/ gibt für zwei Kohlenmodellannahmen optimale Energiepaare als Funktion der Flächenmasse an. Für 119 kg/m^2 ergibt z.B. die Paarung 40/105 keV ein Optimum.

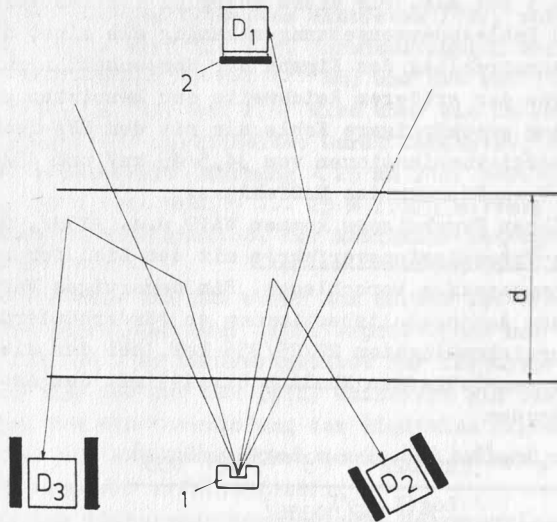


Abb. 4: Verschiedene Detektoranordnungen zur Registrierung von Streustrahlung

1 - Strahlungsquelle

2 - Bleiblende

D₁ - Detektor für vorwärtsgestreuete Quantenstrahlung

D₂ - Detektor für vorwiegend einfach rückgestreuete Quantenstrahlung (kollimiert)

D₃ - Detektor für mehrfach gestreute Quantenstrahlung (kollimiert)

4. Das γ -Rückstreuverfahren

4.1. Meßprinzip

Beim γ -Rückstreuverfahren sind γ -Quelle und Detektor auf einer Seite des Meßgutes angeordnet. Dies ermöglicht Messungen im Bohrloch und am Kohlestoß, wofür γ -Absorptions- und γ -Vorwärtsstreuverfahren nicht einsetzbar sind. Spitzwinklige Meßgeometrien mit vorherrschender Einfachstreuung (Abb. 4, D_2) sind von solchen mit paralleler Orientierung der Achsen von Quelle und Detektor (Abb. 4, D_3) zu unterscheiden. In letzterer Anordnung tragen mehrfachgestreute Quanten überwiegend bis ausschließlich zur Signalbildung bei.

Asche- und Störempfindlichkeiten des γ -Rückstreuverfahrens sind wie beim γ -Absorptionsverfahren wesentlich von der gewählten γ -Energie abhängig, weshalb niederenergetische Quantenrückstreuung ($E_\gamma < 100$ keV) sinnvoll von der Rückstreuung harter γ -Strahlung (300 keV $< E_\gamma < 3$ MeV) zu unterscheiden sind. Empfindlichkeiten sind z.T. stark von geometrischen Parametern, wie Abstände Quelle-Meßgut, Quelle-Detektor, Meßgut-Detektor, Winkel zwischen Quell- und Detektorachse, Kollimation von Quelle und Detektor, abhängig. Die quantitative Beschreibung dieser Einflüsse ist empirisch oder aufgrund eines mathematischen Modells möglich.

Wegen ihrer spezifischen Eigenschaften, die in diesem Kapitel erläutert werden, sind γ -Rückstreuverfahren an unterschiedlichen Meßstellen seit Jahrzehnten erfolgreich zur Aschegehaltsbestimmung von Kohle im Einsatz.

4.2. Mathematische Beschreibung von γ -Streuverfahren

Meßverfahren, die auf der Registrierung gestreuter γ -Quanten beruhen, benutzen Anordnungen, bei denen durch Meßgeometrie und Abschirmmaßnahmen gewährleistet ist, daß keine direkte Strahlung zum Detektor gelangt. Zur Erzielung hoher Streuintensität verwendet man meist weit geöffnete Primärstrahlbündel, wodurch wesentlich größere Meßgutvolumina als bei der γ -Absorption erfaßt werden. Nach der Anordnung von Quelle und Detektor sind Vorwärts-

und Rückstreugeometrien zu unterscheiden (Abb. 4). Die Meßempfindlichkeit und der Einfluß von Störgrößen auf das Meßsignal sind von der Energie und von den gewählten geometrischen Parametern der Anordnung abhängig, weshalb zur Minimierung des Meßfehlers eine Optimierung dieser Größen anzustreben ist. Experimentell bereitet dies wegen der Anzahl von Freiheitsgraden erheblichen Aufwand. Theoretisch setzt das Optimierungsproblem die mathematische Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Quantenflußdichte und Stoffparametern voraus, was für σ -Streuverfahren durch Algorithmen bestenfalls näherungsweise möglich ist.

Ein mathematisches Quantenstreumodell muß im Gegensatz zum simplen σ -Absorptionsmodell (Gl.(1)) alle relevanten Wechselwirkungsarten von σ -Strahlung und Materie differenziert berücksichtigen. Für den hier betrachteten Energiebereich von 1 keV - 1 MeV sind nur Wechselwirkungen mit den Elektronen der Atome des Meßgutes bedeutsam. Folgende Effekte sind zu beachten

- Photoelektrischer Effekt: dominiert bei kleinen Energien, $\sim Z^5$
- kohärente oder Rayleighstreuung: am größten für kleine Streuwinkel θ ; $\sim Z^2 \dots Z^3 / 16/$
- inkohärente oder Comptonstreuung: um 1 MeV dominierend; $\sim Z^2$

Wechselwirkungen zwischen Kern und Quanten, wie Kernphotoeffekt ((σ, x)-Reaktionen), kohärente oder inkohärente Streuung am Kern, sowie Wechselwirkungen zwischen einem Coulombfeld und Quanten, wie Paarzeugung und Delbrück-Streuung sind vernachlässigbar bzw. treten nicht auf, weil ihre Schwellwertenergien oberhalb 1 MeV liegen /19/.

Für den Transport von Quanten in Materie kann allgemein die Boltzmannsche Transportgleichung aufgestellt werden, deren Lösung im Prinzip die Quantenflußdichten an den Orten der Strahlungsregistrierung ($D_1 - D_3$, Abb. 4) liefert. Die direkte numerische Integration dieser Gleichung ist in begrenzten und heterogenen Medien kompliziert und ist wegen des hohen rechentechnischen Aufwandes auf einfachste Verhältnisse beschränkt. Zur exakten Berechnung des Strahlungstransports sind Monte-Carlo-Verfahren und die Methode der sukzessiven Streuungen angewendet worden. Bei der letzteren werden die Beiträge der ungestreuten, der ein-

fach, zweifach usw. gestreuten Strahlung zur Gesamtflußdichte getrennt berechnet /105/.

Monte-Carlo-Verfahren haben sich zur Berechnung von Flußdichte und Energiespektrum rückgestreuter Quantenstrahlung bewährt /37/, sind jedoch für Vorwärtsstreuordnungen wegen der mit zunehmender Schichtdicke rasch sinkenden Ausbeute auf dünne Schichten beschränkt.

BRAUNE /5/ verwendet ein Modell, das den Quantentransport durch orthogonale Hakenwege in zellierten Probekörpern beschreibt und zur Energiespektrenberechnung vorwärts- und rückgestreuter Quanten verwendbar ist.

Wesentlich vereinfacht ist das Problem der mathematischen Modellberechnung von Quantenstreuintensitäten für zentrale Vorwärts- und spitzwinklige Rückstreugeometrien (D_1 und D_2 , Abb. 4), bei denen überwiegend einfach gestreute Quanten zur Flußdichte im Detektor beitragen. Für Substanzen niedriger Ordnungszahl (Kohle) und für große Streuwinkel ist der kohärente gegenüber dem Comptonstreuanteil klein /64/. In der Näherung der Einfachcomptonstreuung sind Modellrechnungen für Vorwärtsstreugeometrien versucht worden /92,93,96/.

Das in der vorliegenden Arbeit für Rechnungen in zentral-symmetrischer Vorwärtsstreugeometrie benutzte Modell vernachlässigt ebenfalls den kohärenten Streuanteil, unterscheidet sich jedoch von dem von RUDANOVSKI /92,93,96/ vorgeschlagenen Ansatz dadurch, daß zweifach gestreute Quanten berücksichtigt und statt Punktquellen kollimierte Flächenpräparate betrachtet werden (siehe 5.3.).

4.3. Rückstreuung niederenergetischer Quanten

4.3.1. Eigenschaften

Einige Eigenschaften rückgestreuter niederenergetischer Quanten können qualitativ anhand der näherungsweise in Sättigungsrückstredicke gültigen Beziehung für die Rückstreuimpulsrate I_{RS} verifiziert werden. Es gilt (siehe Anlage 2, Gl.(A 21))

$$I_{RS} = \left(\frac{d\sigma_{St}}{d\Omega} \right)_{\theta=\pi} \omega_i \frac{L}{A} a \frac{1}{\mu + \mu'} \quad (13)$$

Mit steigender Ordnungszahl nehmen $d\sigma_{St}/d\Omega$, A, μ' und μ'' zu, wobei der Einfluß von A, μ' und μ'' auf die Rückstreurate dominiert.

Die Rückstreurate niederenergetischer Quanten verringert sich mit wachsender Ordnungszahl. Die Ascheempfindlichkeit ist negativ.

Eine Meßgeometrie, die die Gl.(13) zugrunde liegenden Näherungen ideal erfüllt, ist unempfindlich gegenüber Dichteänderungen. Über derartige realisierte τ -Rückstreuanordnung ist berichtet worden /42/. Allgemein reagieren τ -Rückstreumeßstrecken je nach der verwendeten Meßgeometrie sehr unterschiedlich auf Veränderungen der Dichte. Für Anordnungen, bei denen die Quanten im Streumaterial große Wege l (vgl. Gl.(A 19)) zurücklegen, wächst die Rückstreurate zunächst mit zunehmender Dichte, erreicht ein Maximum und sinkt mit weiterem Dichtewachstum. Geometrien mit einer bei steigender Dichte monoton zunehmenden und sich einem Grenzwert nähernden Rückstreurate sind beschrieben /105/. Für die Ordnungszahl- und Dichteverhältnisse der Kohle gilt nach /52/

Der Einfluß der Dichte auf die Rückstreurate niederenergetischer Quanten ist stark meßgeometrieabhängig. Die Rückstreurate steigt mit wachsender Dichte, d.h., die Dichteempfindlichkeit ist positiv.

Die Erhöhung des Aschegehaltes führt zur Vergrößerung sowohl der effektiven Ordnungszahl als auch der Dichte der Kohle. Da Ordnungszahl- und Dichteempfindlichkeit der τ -Rückstreuung unterschiedliches Vorzeichen haben, können bei dichteempfindlichen Meßgeometrien ascheempfindlichkeitssenkende Kompensationseffekte auftreten.

Zur Erzielung maximaler Meßempfindlichkeit ist bei der Aschegehaltsbestimmung mittels niederenergetischer τ -Rückstreuung die Kohledichte konstant zu halten oder eine dichteunempfindliche Meßgeometrie zu benutzen.

4.3.2. Ascheempfindlichkeit

Das Ascheempfindlichkeitsmaximum der τ -Rückstreuung wird nicht wie bei der τ -Absorption bei Quantenenergien unmittelbar oberhalb der K-Kanten der aschebildenden Elemente, sondern zwischen 15 und 60 keV /12,14/ beobachtet. Dies ist für on-stream Anwendungen des Verfahrens von zentraler Bedeutung, da hierdurch der für Messungen am Förderstrom notwendige Übergang zu τ -Strahlung zumindest mittlerer Energie (z.B. 60 keV) auch unter dem Gesichtspunkt der Realisierung maximaler Meßempfindlichkeit gerechtfertigt wird.

Die Energielage des Empfindlichkeitsmaximums hängt von der effektiven Ordnungszahl der Asche, der Kohlenfeuchte (1-s) und von der Untergrundstrahlung ab. In der Literatur finden sich unterschiedliche Angaben.

CLAYTON /12/ berechnet für Trockenkohlen mit Aschegehalten von 5 und 20 % A^d nach der in Anlage 2 angegebenen Beziehung (A 24) Maximalempfindlichkeiten um 15 keV, weist aber, ohne dies zu quantifizieren, darauf hin, daß je nach Aschegehalt und Feuchte das Empfindlichkeitsmaximum zwischen den Strahlungsenergien der Isotope ^{109}Cd (22 keV) und ^{241}Am (60 keV) liegen kann.

CSOM /14/ benutzt den Ansatz (A 26) (Anlage 2) für die Sättigungsrückstreureate und findet unter Berücksichtigung der Untergrundstrahlung maximale Ascheempfindlichkeiten zwischen 50 und 60 keV für Trockenkohle mit einem Gehalt von 50 % A^d .

Zur Überprüfung des Gültigkeitsbereiches der Angaben beider Autoren und zur Quantifizierung der Wirkung der genannten Einflüsse auf die Ascheempfindlichkeit wurden in Anlehnung sowohl an die von CLAYTON als auch an die von CSOM benutzten Modellsätze für die Berechnung der τ -Rückstreuraten eigene Empfindlichkeitsberechnungen für unterschiedliche Modellkohlen durchgeführt.

Die Ascheempfindlichkeitsberechnungen erfolgten jeweils im Energiebereich von 10 bis 60 keV nach den Beziehungen (A 24) und (A 27). Wie in der Originalarbeit wurde für die Berechnung der Ascheempfindlichkeit $S_{A^d_{RS}}$ nach CSOM (A 27) der Streuwinkelbereich $\theta = 170 \dots 175^\circ$ zugrunde gelegt ($c = 5,693 \cdot 10^{-3}$). Die ver-

wendeten Massenschwächungskoeffizienten entstammen /134/, wobei kohärent wie inkohärent gestreute Quanten behandelt wurden.

In Abbildung 5 sind die Ascheempfindlichkeiten für Trockenkohlen ($s = 1$) unterschiedlichen Aschegehaltes dargestellt. Zur Untersuchung des Einflusses der chemischen Zusammensetzung der Asche wurden Rechnungen mit effektiven Ordnungszahlen des Ascheanteils von $Z_{\text{eff}} = 10,8$ (entspricht SiO_2), $Z_{\text{eff}} = 13$ und $Z_{\text{eff}} = 16$ (entspricht einer Asche mit 50 % Fe_2O_3 -Gehalt) durchgeführt, womit die natürliche Schwankungsbreite der Zusammensetzung von Kohlenaschen voll erfaßt ist. Für das Brennbare der Kohle wurde $Z_{\text{eff}} = 6$ (Kohlenstoff) angesetzt.

Abbildung 6 zeigt die der Abbildung 5 entsprechenden Rechnungen für Rohbraunkohle ($s = 0,4$). Die dargestellten Ascheempfindlichkeiten unterscheiden sich hinsichtlich der Energielage des Empfindlichkeitsmaximums nicht von denen, die sich für Kohleschlämme (slurries) mit einem Feststoffgehalt $s = 0,1$ ergeben. Deshalb wurde auf die Darstellung der Ascheempfindlichkeit für slurries verzichtet.

In den Abbildungen 5 und 6 zugrunde liegenden Rechnungen wurde Untergrundstrahlung nicht berücksichtigt. Strahlungsmessungen sind jedoch stets mit der Registrierung eines Untergrundanteils verbunden, der durch den Nulleffekt und durch Quantenstreuung an Halterungen oder Gefäßwandungen hervorgerufen wird und unabhängig vom Aschegehalt der Kohle ist. Untergrundstrahlung erlangt besondere Bedeutung bei Rückstreumessungen an Küvetten, Schurren oder durch Förderbänder hindurch, da die Reflektionen an den zwischen Strahlungsquelle und Kohle gelegenen Materialien Rückstreuraten I_U hervorrufen, die in der Größenordnung des in der Kohle rückgestreuten meßsignalbildenden Strahlungsanteils I_{RS} liegen können.

$$\text{Aus } I = I_{RS}(A^d) + I_U$$

folgt die Ascheempfindlichkeit $U^S_{A^d_{RS}}$ der τ -Rückstreuung (siehe Gl.(A 1)) mit Berücksichtigung der Untergrundstrahlung

$$U^S_{A^d_{RS}} = \frac{1}{1 + \frac{I_U}{I_{RS}}} S_{A^d_{RS}} = k S_{A^d_{RS}} \quad (14)$$

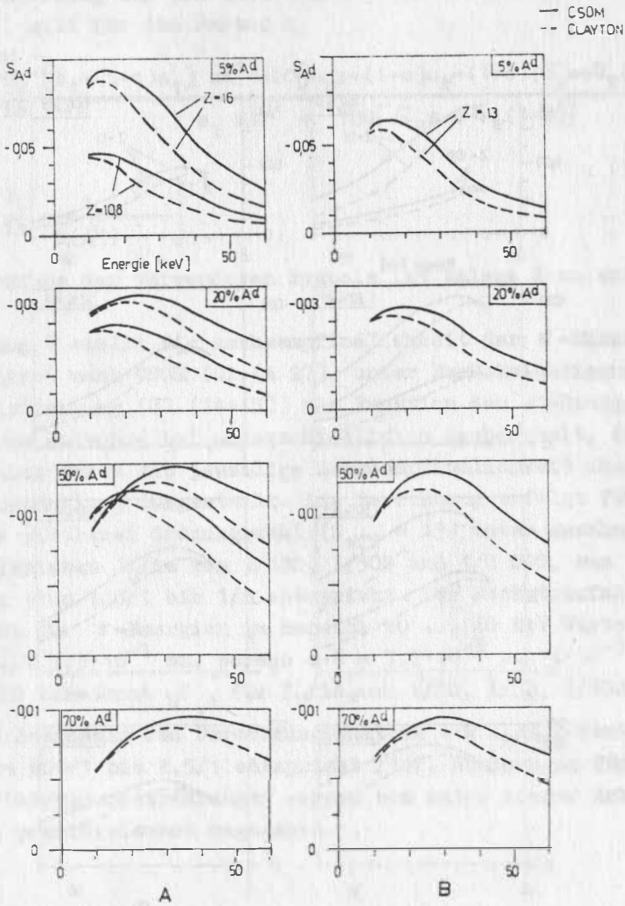


Abb.5: Ascheempfindlichkeit der τ -Rückstreuung für Trockenkohle als Funktion von τ -Energie und Aschegehalt, berechnet für
A) Aschen mit extrem hoher ($Z_{\text{eff}} = 16$) und niedriger ($Z_{\text{eff}} = 10,8$),
B) Asche mit mittlerer ($Z_{\text{eff}} = 13$) effektiver Ordnungszahl

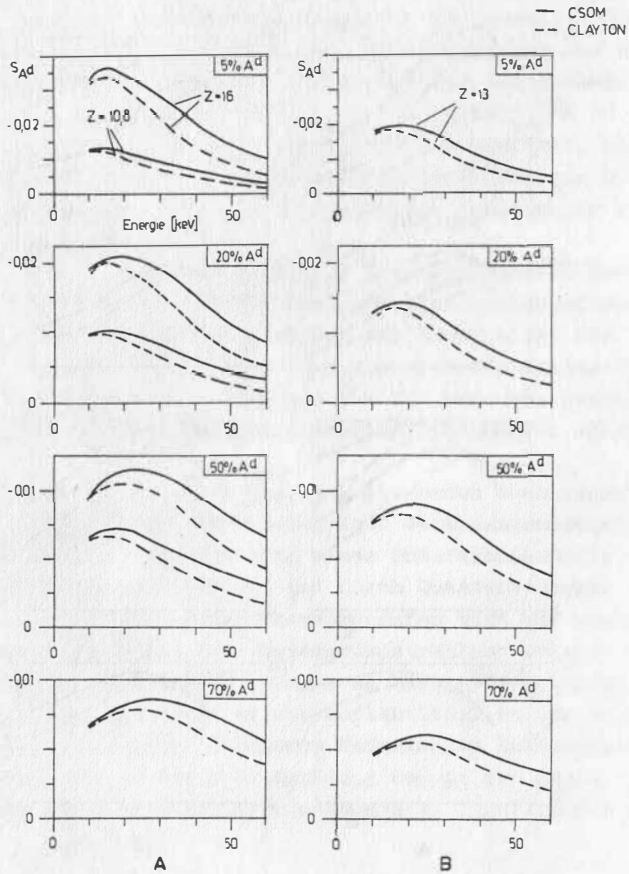


Abb.6: Ascheempfindlichkeit der $\bar{\sigma}$ -Rückstreuung für Rohkohle (Feststoffgehalt $s = 0,4$) als Funktion von $\bar{\sigma}$ -Energie und Aschegehalt, berechnet für
A) Aschen mit extrem hoher ($Z_{\text{eff}} = 16$) und niedriger ($Z_{\text{eff}} = 10,8$),
B) Asche mit mittlerer ($Z_{\text{eff}} = 13$) effektiver Ordnungszahl

Unter Benutzung der von CSOM verwendeten Beziehung für I_{RS} (Gl.(A 26)) gilt für den Faktor k

$$k = \left[1 + \frac{1}{c} \frac{I_U}{I_A} \frac{[b_1 - (1-c)a_1] sA^d + 100[\mu_B s + (1-s)\mu_W - (1-c)(G_B s + G_W(1-s))]}{a_1 sA^d + 100[G_B s + G_W(1-s)]} \right]^{-1}$$

$$= \left[1 + \frac{1}{c} \frac{I_U}{I_A} \frac{1}{R(A^d)} \right]^{-1} \quad (15)$$

Die Erläuterung der verwendeten Symbole ist Anlage 2 zu entnehmen.

Abbildung 7 stellt die Ascheempfindlichkeit der γ -Rückstreuung, berechnet nach CSOM (Gl.(A 27)) unter Berücksichtigung der Untergrundstrahlung (Gl.(14+15)) als Funktion der γ -Energie für Trocken- und Rohkohle bei unterschiedlichem Aschegehalt, dar. Zum Vergleich wurde die jeweilige Ascheempfindlichkeit ohne Untergrundstrahlung dargestellt. Die Berechnung erfolgt für eine Asche mittlerer Ordnungszahl ($Z_{\text{eff}} = 13$) unter Annahme von Verhältnissen I_U/I_A von 1/100, 1/500 und 1/2 000, was I_U/I_{RS} von etwa 100/1 bis 1/8 entspricht. Der Rückstreufaktor $R(A^d)$ nimmt für γ -Energien im Bereich 10 ... 60 keV Werte von $1,4 \cdot 10^{-2}$... $7,3 \cdot 10^{-1}$ an, woraus $c \cdot R = 7,7 \cdot 10^{-5}$... $4 \cdot 10^{-3}$ folgt. CSOM berechnet U_A^S für I_U/I_A von 1/20, 1/50, 1/100, was unter Beachtung des Umrechnungsfaktors $c \cdot R$ I_U/I_{RS} -Verhältnissen von 600/1 bis 2,5/1 entspricht /14/. Rechnungen für derart hohe Untergrundstrahlungen werden vom Autor dieser Arbeit als nicht praxisrelevant angesehen.

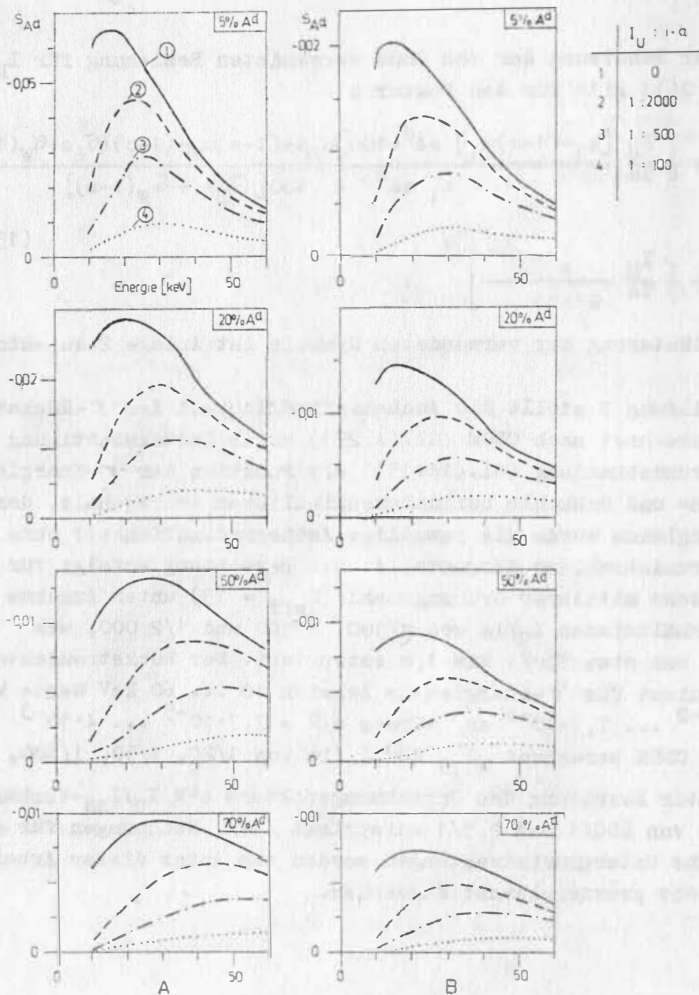


Abb. 7: Ascheempfindlichkeit der γ -Rückstreuung als Funktion von γ -Energie und Aschegehalt unter Berücksichtigung verschiedener Verhältnisse von Untergrund- I_U : Primärstrahlung I_a , berechnet nach CSOM /14/ für Asche mittlerer Ordnungszahl ($Z_{eff} = 13$)
 Spalte A: für Trockenkohle
 Spalte B: für Rohkohle (Feststoffgehalt $s = 0,4$)

Aus den Rechnungen lassen sich zusammenfassend folgende
Schlußfolgerungen ziehen:

- Eine Erhöhung der Kohlefeuchte führt stets zur Senkung der Ascheempfindlichkeit der γ -Rückstreuung
- Untergrundstrahlung bewirkt eine Verringerung der Ascheempfindlichkeit (vgl. Gl.(14) und (15); immer gilt $k \leq 1$)
- Die Energie $E_{\sigma_{\max}}$, für die eine maximale Ascheempfindlichkeit beobachtet wird, hängt wie folgt von der effektiven Ordnungszahl Z_{eff} der Asche und der Kohlenfeuchte ab;
 - für $Z_{\text{eff}} = 10,8$ (SiO_2) ist nahezu unabhängig von Asche- und Feuchtegehalt der Kohle
 - $E_{\sigma_{\max}} = 15 \dots 20 \text{ keV}$
 - für $Z_{\text{eff}} = 13 \dots 16$ nimmt $E_{\sigma_{\max}}$ mit dem Aschegehalt zu.
Bei 50 % A^d findet man
 - $E_{\sigma_{\max}} \sim 30 \text{ keV}$ für Trockenkohle
 - $E_{\sigma_{\max}} = 20 \dots 30 \text{ keV}$ für Rohkohle
 - Die Energie $E_{\sigma_{\max}}$ hängt stark vom Strahlungsuntergrund ab. Für etwa gleich große Untergrund- I_U und Rückstreuraten I_{RS} (entsprechend $I_U : I_{RS}$ von $\sim 1 : 2\ 000$ für $E_{\sigma} \leq 30 \text{ keV}$ bzw. $\sim 1 : 500$ für $E_{\sigma} > 30 \text{ keV}$) ergeben sich für Trocken- und Rohkohlen mit Aschen mittlerer Ordnungszahl ($Z_{\text{eff}} = 13$)
 - $E_{\sigma_{\max}} \sim 30 \text{ keV}$ für $A^d = 5 \dots 20 \%$ und
 - $E_{\sigma_{\max}} = 40 \dots 50 \text{ keV}$ für $A^d = 50 \dots 70 \%$

Nach dem Modell von CSOM ergeben sich maximale Ascheempfindlichkeiten bei bis zu 5 keV höheren Energien als nach CLAYTON. Die Berücksichtigung von Mehrfachstreuung (CSOM) führt generell zu höheren Ascheempfindlichkeiten als das Einfachstreumodell.

4.4. Rückstreuung harter γ -Strahlung

Für $300 \text{ keV} < E_\gamma < 3 \text{ MeV}$ ist die wesentliche Wechselwirkungsart von γ -Strahlung mit Materie die Comptonstreuung. Das Rückstreuungssignal ist in diesem Energiebereich proportional der Elektronendichte n_E im Streumaterial

$$I_{RS} \sim n_E \sigma_E \quad (16)$$

Der Wirkungsquerschnitt der Comptonstreuung eines Quants am als ungebunden genäherten Elektron σ_E ist für eine definierte γ -Energie konstant. Für n_E (in Elektronen/ m^3) gilt

$$n_E = L \left(\frac{Z}{A} \right) \rho \quad (17)$$

Für alle Hauptelemente der Kohle, mit Ausnahme des Wasserstoffs, gilt $Z/A \approx 0,5$. Wasserstoff ($Z/A \approx 1$) trägt bei Kohle (Zusammensetzung $(\text{CH})_n$) nicht wesentlich zum Z/A -Wert des Moleküls bei $/12/$, weshalb näherungsweise gilt

Verfahren, die auf der Registrierung rückgestreuter harter γ -Strahlung im Energiebereich $300 \text{ keV} < E_\gamma < 3 \text{ MeV}$ beruhen, liefern ein der Dichte der Kohle proportionales Meßsignal.

Die Rückstreuung harter γ -Strahlung wird besonders zur Dichte- und Feuchtebestimmung als geophysikalisches Bohrlochverfahren (γ - γ -Methode) eingesetzt. Aschegehaltsbestimmung ist auf der Grundlage vorhandener Dichte-Asche-Korrelationen möglich.

Wird infolge von Mehrfachstreuprozessen die Energie der harten primären γ -Strahlung soweit verringert, daß Photoabsorptionsprozesse wirksam werden, dann beeinflußt die chemische Zusammensetzung der Kohle das Meßsignal direkt. In verschiedenen Energiekanälen registrierte Signale, die unterschiedliche Empfindlichkeiten gegenüber der Zusammensetzung des Streugutes besitzen, ermöglichen in ihrer Verknüpfung die Behandlung des Meßgutes als Mehrkomponentensystem und damit die Elimination von Störgrößen.

In Rückstreugeometrien, in denen das Signal überwiegend durch mehrfachgestreute Quanten erzeugt wird, können durch geeignete Kombination energieselektiv gewonnener Daten Einflüsse der Gehaltsschwankungen störender Elemente (insbesondere des Eisens), der Feuchte, Körnung und Dichte auf das Meßsignal verringert werden /140/.

Das Prinzip der spektrometrischen Signalauswertung wird auch in der geophysikalischen Bohrlochmeßtechnik angewendet (selektive γ - γ -Methode) /9,36/.

4.5. Anwendungsbeispiele für γ -Rückstreuverfahren

Die meisten der im Routinebetrieb arbeitenden Aschegehaltsmeßgeräte beruhen auf γ -Rückstreuverfahren. Sie nutzen den Vorteil der Unabhängigkeit des Meßsignals von der Kohleschichtdicke, die für Schichtstärken oberhalb der Sättigungsrückstredicke gegeben ist.

ONISCENKO^{XX} und GRABOV geben eine ausgezeichnete Übersicht über γ -Rückstreuasche-meßgeräte /79/. Hier werden nur die wesentlichen Merkmale der entwickelten Verfahren gegliedert nach der verwendeten primären γ -Energie, unter dem Gesichtspunkt ihrer Anwendbarkeit in der on-stream Meßtechnik angegeben.

Für γ -Energien $E < 7,11$ keV wird das Rückstreusignal kaum von Eisengehaltsschwankungen beeinflusst, da der Massenschwächungskoeffizient des Eisens etwa dem der Hauptaschebildner Al und Si entspricht (Abb. 3). Als Strahlungsquelle kann zweckmäßig ⁵⁵Fe ($E_{\gamma} = 5,9$ keV) dienen. Da der Massenschwächungskoeffizient des Ca bei dieser Energie etwa 3mal höher ist, als der von Fe, Si und Al, wirken sich Ca-Gehaltsschwankungen der Asche auf das Meßergebnis aus. Eine Ca-Kompensation kann erfolgen durch

- energieselektive Registrierung des Rückstreu- und des Ca-Fluoreszenzpeaks (3,7 keV), z.B. mittels Proportionalzählrohr, und geeignete Verknüpfung beider Signale
- Detektion der Intensität von Rückstreu- und Fluoreszenzstrahlung, nachdem beide ein Al-Filter optimierter Dicke passiert haben.

Bei der zweiten Methode wird unter Ausnutzung des Massenschwächungskoeffizientenunterschieds von Al für 5,9 keV und 3,7 keV die Filterdicke so gewählt, daß die Verringerung des Rückstreusignals durch Ca-Gehaltserhöhung exakt durch die zunehmende Ca-Fluoreszenzstrahlung kompensiert wird /83,85/.

Die Anwendung weicher Röntgenstrahlung erfordert äußerst homogene feinkörnige ($< 0,2$ mm) Kohle. Der Einsatz von on-stream Qualitätsbestimmungsgeräten, die dieses Prinzip verwenden, ist nur an speziell für Meßzwecke aufbereiteten Strömen getrockneter Kohle möglich. Die für Trocknung, Mahlung, Mischung und Zuführung der Probe erforderliche Zeit von 10 - 12 min ist für viele Anwendungsfälle nicht akzeptabel /7/. Nachteilig ist weiterhin der hohe Aufwand für Probenahme- und -verarbeitungseinrichtungen, deren Einbau nicht an allen Stellen erfolgen kann. Das von DIJKSTRA und SIESWERDA /20/ in den Niederlanden entwickelte Gerät CENDREX (Strahlungsquelle: Röntgenröhre 6,9 keV) wurde in Großbritannien in Serie produziert. Sein Ascheeßfehler beträgt $\pm 0,3 \%A^d$ für 3 - 7 $\%A^d$ und 1,49 $\%A^d$ für 17 - 31 $\%A^d$ (nach /6/). In der Sowjetunion wurde unter der Bezeichnung ZAR - 2 ein analoges Gerät entwickelt, für das Meßfehler von $\pm 0,5 \%A^d$ für 4 - 14 $\%A^d$ und $\pm 0,7 \%A^d$ für 14-24 $\%A^d$ angegeben werden /140/. Ob die genannten Geräte Ca-kompensiert arbeiten, ist dem Autor nicht bekannt. Berichtet wird über den störenden Einfluß von S-Gehaltsschwankungen, besonders bei niedrigem Aschegehalt /4/.

Im Energiebereich $7,11 \text{ keV} < E_\gamma < 30 \text{ keV}$ besitzen γ -Rückstreuverfahren eine hohe Ascheempfindlichkeit, die für Kohlen mit mittlerer chemischer Zusammensetzung und Aschegehalten $< 50 \%A^d$ bei 15 - 20 keV ihr Maximum erreicht (vgl. 4.3.2.). Das Rückstreusignal ist hauptsächlich von der chemischen Zusammensetzung der Kohle abhängig.

Die Anforderungen an Homogenität und Korngröße werden mit wachsender Energie geringer. Bei $E_\gamma \sim 15 \text{ keV}$ ist die Feuchte- und Korngrößenempfindlichkeit (maximale Korngröße 5 mm) bereits so weit gesunken, daß auf das Trocknen und Mahlen der Kohle verzichtet werden kann /4/. Die Probenvorbereitungszeit wird dadurch wesentlich verkürzt; auf spezielle Probennehmer und zusätzliche Brecher kann in den meisten Anwendungsfällen nicht verzichtet werden.

Sehr störend wirken Eisengehaltsschwankungen auf das Meßsignal, weshalb eine Fe-Kompensation erforderlich ist. Sie wird analog zum oben beschriebenen Ca-Kompensationsverfahren entweder durch energieselektive Registrierung von Rückstreu- und Fe-Fluoreszenzsignal, oder, wie bei dem in Großbritannien entwickelten Seriengerät SORTEX (Strahlungsquelle: ^{238}Pu , $E_{\gamma} = 15 \dots 17 \text{ keV}$), durch die Registrierung der Summe beider Peaks hinter einem Al-Filter optimierter Dicke realisiert /4,12/.

BOYCE /4/ zeigt für verschiedene Steinkohlen aus den USA und Großbritannien, daß bei Rückstreuenergien um 15 keV keine Ca-Kompensation erforderlich ist. URBANSKI /127/ weist darauf hin, daß Ca-Gehaltsschwankungen die Aschegehaltsbestimmung von Braunkohlen bei dieser Energie beeinflussen und daß das Eisenkompensationsverfahren nach der Al-Filtermethode nur in einem begrenzten Eisengehaltsbereich anwendbar ist. Er korrigiert deshalb den aus dem 15 - 17 keV-Rückstreusignal (^{238}Pu -Quelle) ermittelten Aschegehalt mit den von derselben Quelle angeregten Fluoreszenzpeaks von Ca und Fe /126,127,135/. BOCCENIN /2/ benutzt Strahlungsquellen unterschiedlicher Energie zur Anregung dieser Fluoreszenzlinien ($^{109}\text{Cd}/22 \text{ keV}$ zur Fe-Bestimmung; $^{55}\text{Fe}/5,9 \text{ keV}$ zur Ca-Bestimmung).

RHODES u.a. /91/ schlugen die Verwendung einer $^3\text{H}/\text{Zr}$ Bremsstrahlungsquelle (5 - 9 keV) zur Aschegehaltsbestimmung mit Fe-Kompensation nach der Al-Filtermethode vor. Das Prinzip wurde vom National Coal Board (Großbritannien) im AERE/MARK-1 (NCB Phase I Monitor) realisiert, der jedoch einen ähnlich großen Probenvorbereitungsaufwand wie das CENDREX-Gerät notwendig machte. Die Verwendung von ^{238}Pu - und ^{109}Cd -Quellen gestattete die Messung an wesentlich größerer Kohle. Das on-stream Seriengerät SORTEX (NCB Phase III A2 Ash Monitor) aus Großbritannien benutzt ^{238}Pu und ist nach der Al-Filtermethode eisenkompensiert. Typisch sind Meßfehler von $2,2 \% \text{A}^{\text{d}}$ (26) im Bereich $10 \dots 40 \% \text{A}^{\text{d}}$ /7/; für kleinere Aschebereiche werden $\pm 0,5 \dots 1 \% \text{A}^{\text{d}}$ angegeben /109/. Die Korngröße liegt zu 85 % unter 5 mm. Das sowjetische Gerät BRA-9 gestattet die Aschegehaltsbestimmung an Einzelproben

($A^d < 50 \% A^d$: relat. Fehler 6 %) aus dem ^{238}Pu Rückstreupeak und die Messung der Fluoreszenzstrahlung des Fe und anderer Elemente /79,140/.

Rückstreuverfahren, die γ -Quanten mittlerer Energie (30 keV $\leq E_\gamma < 100$ keV) verwenden, beruhen auf der Z-Empfindlichkeit des Signals (vgl. Abschnitt 4.3.2.) und sind für Messungen an gebrochener Kohle einsetzbar. Durch Optimierung der Meßgeometrie wird die Dichteempfindlichkeit möglichst klein gehalten. Jüngste Geräteentwicklungen ermöglichen on-stream Aschegehaltsbestimmungen ohne Probenahme- und -vorbereitungseinrichtungen. Bei Messungen an Transportbändern ist die Einhaltung der mit wachsender γ -Energie zunehmenden Mindestschütthöhe zu beachten (Sättigungsstrecke für 60 keV-Strahlung je nach Aschegehalt 120 - 200 mm /8,14/). Der Massenschwächungskoeffizientenunterschied von Fe und Ca gegenüber den Hauptaschebildnern Al und Si ist bei mittleren γ -Energien im Vergleich zum Bereich 7,11 - 30 keV geringer, weshalb meist auf die Fe- und Ca-Kompensation verzichtet wird. Als Strahlungsquelle wird gegenwärtig fast ausschließlich das bequem handhabbare Isotop ^{241}Am ($E_\gamma = 60$ keV) verwendet.

In der Sowjetunion wurde das mit einer Röntgenröhre als Strahlungsquelle ($E_\gamma = 35 - 40$ keV) ausgestattete Rückstreumeßgerät RAM-1M zur Aschegehaltsbestimmung von Flotationsprodukten angewendet /86/. Es wurde in Kleinserie produziert. Der relative Aschebeßfehler soll im Bereich 17,6 ... 34 $\% A^d$ bei Körnungen < 13 mm ± 5 % betragen. Neben der bei dieser Energie hohen Eisenempfindlichkeit besteht ein Nachteil des Gerätes in der notwendigen Kühlung der Röntgenröhre. Bei einem Probendurchsatz von 40 kg/min ist das RAM-1M für on-stream Messungen am Nebenstrom geeignet.

Ebenfalls am Nebenstrom einsetzbar ist das von HARDT Anfang der 60er Jahre entwickelte und von der Firma Berthold (BRD), später von der Westfalia Dinnendahl Gröppel AG (WEDAG), in Serie produzierte Aschebeßgerät, das auf der 60 keV-Rückstreuung beruht. Dabei wird die Kohle mittels Förderschnecke durch ein Kunststoffrohr gepreßt. Minimale Dichteempfindlichkeit wird durch Optimierung des Abstandes zwischen dem Quelle-Detektor-Ensemble und dem Meßrohr erreicht. Für Steinkohle mit 5,9 - 8,3 $\% A^d$ und

Körnung < 10 mm liegt der Aschemeßfehler unter $\pm 0,5 \%A^d$ /53,79/. In /112/ wird eine Weiterentwicklung des Verfahrens vorgeschlagen, bei der die Kohlezuführung und mechanische Verdichtung im vertikal angeordneten Meßrohr derart erfolgen, daß die Dichte im Meßvolumen konstant ist.

Am Transportband einsetzbar sind die in den 70er Jahren entwickelten und in Kleinserie produzierten Geräte RKTP 2 (ältere Bezeichnung STRAUME 2) aus der Sowjetunion /62,79,86,98,110/ und Typ G der Firma EMAG (VR Polen) /8,79,97/. Bei beiden Geräten erfolgt die 60 keV- γ -Rückstreuung direkt am Gurtbandförderer von oben. Der Kohlestrom wird zur Realisierung konstanter geometrischer Bedingungen vor der Meßstelle durch Leitbleche und Walzen geglättet. Die Montage der Quelle-Detektor-Einheit erfolgt entweder starr über dem Kohlestrom /98/ oder an einer beweglichen Aufhängung /97,110/, die einen relativ gleichbleibenden Abstand zwischen Kohloberfläche und Meßsystem gewährleistet. Minimale Empfindlichkeiten gegen Schwankungen dieses Abstandes (± 15 mm) sowie der Dichte (± 200 kg/m³) und Feuchte der Kohle werden beim RKTP 2 durch Geometrieoptimierung unter Benutzung von zwei 60 keV-Strahlungsquellen erreicht /98/. Das RKTP 2 ist im Bereich 4 - 40 %A^d an Steinkohle der Körnung < 100 mm eingesetzt worden. Im Niedrigaschebereich (6,8 - 8,8 %A^d) soll der Meßfehler $\pm 0,34 \%A^d$ betragen /62/. Andere Autoren geben $\pm 1,5 \%A^d$ /110/ für Körnungen < 100 mm und $\pm 0,5 \%A^d$ /98/ für Laborproben mit Körnungen < 35 mm an. Beim polnischen Aschemesser Typ G beträgt der Meßfehler (Körnung < 30 mm): $\pm 1 \%A^d$ (3 - 10 %A^d); $\pm 1,4 \%A^d$ (10 - 20 %A^d); $\pm 1,8 \%A^d$ (20 - 40 %A^d) /8/.

In der DDR wurden γ -Rückstreuemessungen zur Ascheghaltsbestimmung an Braunkohle mit ¹⁷⁰Tm-Strahlungsquellen an der TU Dresden /52-54,69/ durchgeführt. Im VEB Braunkohlenkombinat Senftenberg gibt es Erfahrungen über die Anwendung von 60 keV- γ -Rückstreuverfahren (²⁴¹Am-Quelle) zur Ascheghaltsbestimmung in einem transportablen Ascheschnellbestimmungsgerät /102,103/ und direkt am Gurtbandförderer von unten, d.h. durch das Transportband hindurch /104/. Analoge 60 keV- γ -Rückstreuemessungen am Band wurden vom Autor am ZI für Isotopen- und Strahlenforschung der AdW durchgeführt /29/.

Die Intensität einfach gestreuter γ -Quanten hängt für $E_\gamma > 300$ keV ausschließlich von der Dichte ab. Aufgrund der vorhändigen Asche-Dichte-Korrelation in der anstehenden Kohle ist es möglich, durch Bohrlochmessungen Kohle und Zwischenmittel im Flöz zu unterscheiden und auch Aschegehaltsbestimmungen mit einem Fehler von $\pm 4 \%A^d$ (16) durchzuführen /12/. Für Braunkohlen aus dem Tagebau Berzdorf (DDR) wurde an sorgfältig im Labor geschütteten Proben vom Autor ein ähnlicher Wert ($4,2 \%A^d$ (16)) für die Streuung der Aschegehalte um die Regressionsgrade der Dichte-Asche-Korrelation ermittelt /29/. Auf Förderbändern ist jedoch infolge wechselnder technologischer Einflußgrößen mit größeren Streuungen zu rechnen. Dies ist ein Grund dafür, weshalb dichteempfindliche Rückstreuverfahren in der on-stream Meßtechnik wenig Bedeutung erlangten. Ein weiterer besteht darin, daß die notwendige Sättigungsrückstredicke (bei $E_\gamma = 660$ keV ca. 300 mm) an vielen Bandanlagen nicht erreicht wird.

Im sowjetischen on-stream Gerät RKTP 1 (früher STRAUHE 1) wird eine ^{137}Cs -Strahlungsquelle (660 keV) eingesetzt, wodurch die spezifischen Vorteile der Verwendung harter γ -Strahlung wirksam werden. Diese bestehen in der Erfassbarkeit großer Meßvolumina, im geringen Einfluß der Korngröße und in der Möglichkeit, durch starke stahlbewehrte Transportgurte hindurch messen zu können. Durch geeignete Anordnung der unter dem Gurtband montierten Strahlungsquelle und des Detektors wird gewährleistet, daß mehrfachgestreute Quanten die Signale in 3 Kanälen (30-50 keV, ca. 90 keV, ca. 200 keV) bilden. Die unterschiedliche Empfindlichkeit in den verschiedenen Energiebereichen ermöglicht die Kompensation der Einflüsse von Dichte- und Eisengehaltsschwankungen auf das durch Kombination der 3 Signale ermittelte Meßergebnis. Das RKTP 1 ist am Hauptband (Bandgeschwindigkeit bis 4,5 m/s) eingesetzt worden und erreichte Asche-meßfehler von $\pm 1,78 \%A^d$ im Bereich $20-50 \%A^d$ bei Korngrößen < 300 mm. Bei Unterschreitung der Sättigungsrückstredicke auf dem Transportband schaltet sich das Gerät selbstständig ab /62,79,98,140/.

In den 80er Jahren wurden mehrere Vorschläge gemacht, die der Erhöhung der Meßgenauigkeit und des Anwendungsbereiches von Quanten-Streuverfahren in der on-stream Meßtechnik dienen sollen.

Viele von ihnen basieren auf der durch Mikrorechnereinsatz gegebenen Möglichkeit der on-line Signalverknüpfung im Meßgerät und schlagen die Kombination von 2 und mehr Rückstreu-, Transmissions- oder Vorwärtsstreumeßstrecken meist mit unterschiedlicher Strahlungsenergie vor, wodurch eine Kompensation verschiedener Störeinflüsse erreicht werden soll /24,61,82,108,112,117,123,136-139/.

4.6. γ -Absorptions- und Rückstreuverfahren in der on-stream Kohlequalitätsmeßtechnik - vergleichende Übersicht

a) Radiometrische Meßmethoden, die auf der Schwächung eng kollimierter γ -Strahlen beruhen, werden als γ -Absorptionsmeßverfahren bezeichnet. Ihre Signale sind über das exponentielle Schwächungsgesetz (1) mit den kohlequalitätsabhängigen Parametern Massenschwächungskoeffizient μ und Dichte ρ sowie mit der durchstrahlten Schichtdicke d verknüpft. Für die on-stream Kohlequalitätsanalytik besitzen sie folgende

Vorteile

- hohe Ascheempfindlichkeit
- schnelle Auswertbarkeit der Signale
- einfache Algorithmen für die Signalverknüpfung bei Kombination von γ -Absorptionsmeßstrecken unterschiedlicher Energie mit dem Ziel der Minimierung des Meßfehlers
- einfache Flächenmassekompensation durch Energiekombination
- leichte Berechenbarkeit von Asche- und Störempfindlichkeiten, sowie von optimalen Energiekombinationen, wenn die chemische Zusammensetzung und die Dichte der Kohle, die durchstrahlte Flächenmasse sowie die Schwankungen dieser Parameter bekannt sind.

Nachteile sind /35,138/

- geringe Repräsentanz wegen der kleinen erfaßbaren Volumina; daher Gefahr systematischer Fehler infolge von Kohleentmischung quer zur Durchstrahlungsrichtung (vgl. /5/)
- hohe Empfindlichkeit der einfachen γ -Absorption gegen Schichtdickenschwankungen; daher Einsatz ohne Flächenmassekompensation an Förderbändern nur bedingt möglich

- hoher gerätetechnischer Aufwand bei der Realisierung von Mehr-energie-Kombinationen (mehrere Strahlungsquellen, mehrere Detektionssysteme bzw. mehrkanaliges energieselektives Detektionssystem, Signalverknüpfungseinheit)
- Die Kombination mehrerer σ -Absorptionsmeßstrecken setzt voraus
- Identität der von jeder Meßstrecke erfaßten Kohle erfordert: genaue Justierung der Meßstrecken, Abstimmung der Meßzyklen
 - hohe Genauigkeit der zu verknüpfenden Zählraten erfordert: lange Meßzeiten oder Integration über große Anzahl von Meßzyklen
 - Konstanz der durchstrahlten Flächenmasse und der chemischen Zusammensetzung der Kohle während eines Meßzyklus ($\mu g d \approx const.$) erfordert: kurze Meßzyklen oder spezielle Zähltechniken /23/
- b) Radiometrische Meßmethoden, die auf der Registrierung einfach- oder **mehrfachgestreuter** Quanten beruhen und bei denen sich die Strahlungsquelle und der Detektor auf derselben Meßgutseite befinden, werden als σ -Rückstreuverfahren bezeichnet. Das Meßsignal nimmt mit wachsender Meßgutdicke bis zu einem Sättigungswert zu. Die meisten Anwendungen setzen Meßgutschichtdicken größer als die Sättigungsrückstreichdicke voraus.

Analytisch ist ein mathematischer Zusammenhang zwischen Signal und kohlequalitätsabhängigen Parametern nicht gegeben. Für einfachgestreute niederenergetische Quantenstrahlung ($E_{\sigma} < 100 \text{ keV}$) ist das Meßsignal proportional dem Verhältnis des Streuquerschnitts zum Absorptionskoeffizienten und unter bestimmten geometrischen Randbedingungen dichteunabhängig. Für einfachgestreute Quanten höherer Energie ($300 \text{ keV} < E_{\sigma} < 3 \text{ MeV}$) ist das Signal proportional der Meßgutdicke.

Für die on-stream Kohlequalitätsanalytik besitzen σ -Rückstreuverfahren folgende

Vorteile

- Unabhängigkeit des Signals von der Meßgutschichtdicke, wenn die Sättigungsrückstreichdicke überschritten ist; daher Einsatz ohne Flächenmassenkorrektur an Förderbändern möglich

- Zugänglichkeit des Meßgutes nur von einer Seite her erforderlich
- höhere Repräsentanz als γ -Absorptionsverfahren infolge der größeren erfaßbaren Meßvolumina

bei Kombination mehrerer Meßstrecken:

- gegenüber der γ -Absorption geringere Anforderungen an die Justierung der Meßstrecken /137/
- Integration über viele kurze Meßzyklen entfällt wegen der Schichtdickenunabhängigkeit des Signals

Nachteile sind

- ungleichmäßige Erfassung des Meßgutes, da der Einfluß von Kohlevolumina auf das Signal mit wachsender Tiefenlage in der Meßschicht abnimmt;
daher Gefahr systematischer Fehler infolge von Kohleentmischung vertikal zum Rückstreugerät
- Kalibrierkurven, Stöempfindlichkeiten und Algorithmen zur Signalverknüpfung bei Kombination mehrerer Meßstrecken nicht analytisch bestimmbar
- Notwendigkeit der Geometrieoptimierung zur Reduzierung von Stöempfindlichkeiten;
hierzu aufwendige Versuchsreihen und/oder Rechenprogramme erforderlich
- hohe Untergrundimpulsraten bei Messungen an Schurren oder durch Transportbänder hindurch führen zur Reduzierung der Meßenempfindlichkeit; Gurtbandinhomogenitäten können bei Messungen durch laufende Transportbänder Aschegehaltsschwankungen vortäuschen

5. Das τ -Vorwärtsstreuverfahren

5.1. Geometrie, bekannte Eigenschaften und Anwendungen in der radiometrischen Meßtechnik - Literaturübersicht

Beim τ -Vorwärtsstreuverfahren befindet sich das Meßgut zwischen τ -Quelle und Detektor (Abb. 4, D_1). Im Unterschied zum τ -Absorptionsverfahren verwendet man schwach kollimierte Primärstrahlbündel. Registriert werden die im Meßgut in Richtung Detektor gestreuten Quanten. Bei nahezu allen für Gehaltsbestimmungen zur Anwendung gelangten Anordnungen befinden sich Quelle und Detektor auf einer Achse. Die Registrierung ungestreuter Strahlung wird durch eine Abschirmblende zwischen Quelle und Detektor verhindert, die entweder auf der Seite der τ -Quelle /92,93,96,138/, meist aber auf der Detektorseite montiert ist.

Geometrien, bei denen sich der Detektor zur Registrierung vorwärtsgestreuter Quanten außerhalb des Primärstrahlkegels befindet und die keine Abschirmblende erfordern, wurden von ONISCENKO /78/ vorgeschlagen, bleiben aber in dieser Arbeit unberücksichtigt.

In τ -Vorwärtsstreuordnungen wirken inelastisch (Compton-Effekt) und elastisch (Rayleigh-Streuung) an Elektronen in Detektorrichtung gestreute Quanten signalbildend, weshalb mit wachsender **Flächenmasse und der damit zunehmenden Elektronenzahl in dem vom Primärstrahlbündel erfaßten Meßgutvolumen das Vorwärtsstreusignal** zunächst wächst. Andererseits erfolgt eine mit der Flächenmasse zunehmende Verringerung primärer und sekundärer Quantenflußdichten infolge von Absorptionsprozessen bei der Durchdringung des Meßgutes. In Auswirkung dieser beiden konkurrierenden Effekte ergibt sich die bekannte charakteristische Abhängigkeit des τ -Vorwärtsstreusignals I_{VS} von der Flächenmasse $g \cdot d$ (Abb. 8). Der Bereich A der flächenmasseproportionalen Signalzunahme geht infolge des wachsenden Absorptionseinflusses in einen mehr oder minder großen Bereich B der Unabhängigkeit des Signals von der Flächenmasse über, in dem sich beide Effekte kompensieren. Für noch höhere Flächenmassen überwiegt die τ -Absorption, weshalb das Vorwärtsstreusignal mit zunehmendem $g \cdot d$ kleiner wird.

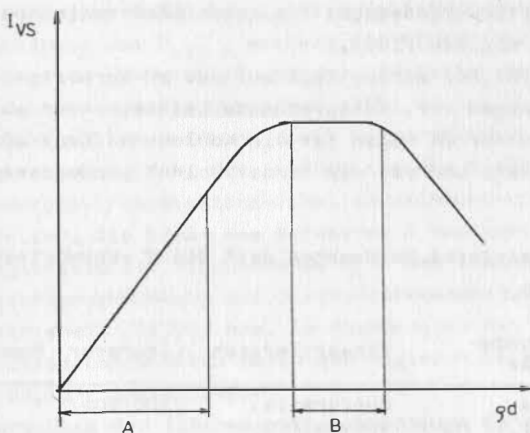


Abb. 8: Abhängigkeit des γ -Vorwärtsstreusignals I_{VS} von der Flächenmasse $g \cdot d$ des durchstrahlten Meßgutes (schematisch). Der lineare Zusammenhang im Bereich A ist bei Verwendung harter γ -Strahlung ($\mu \sim \text{const.}$) vorteilhaft zur Konstruktion radiometrischer Bandwaagen nutzbar. Gehaltsbestimmungen an Meßgutströmen mit schwankender Flächenmasse sind bei Verwendung weicher Quantenstrahlung ($\mu = f(Z)$) im Bereich B möglich

Die Flächenmasse von Meßgütern mit schwankender chemischer Zusammensetzung und niederer Ordnungszahl läßt sich durch Vorwärtsstreuung hochenergetischer Quanten unterhalb des Bereiches B (Abb. 8) bestimmen, da der Massenschwächungskoeffizient für harte γ -Strahlung nahezu unabhängig vom Z_{eff} des Materials und der Z/A proportionale Comptonstreuquerschnitt (vgl. Gl.(17)) im Bereich $Z = 2 \dots 35$ ($Z/A \approx 0,5$) ungefähr konstant sind. Beschränkt man sich auf den Bereich A, in dem der Zusammenhang zwischen Vorwärtsstreusignal und Flächenmasse linear ist, können vorteilhaft radiometrische Bandwaagen konstruiert werden. Bei diesen sind die Flächenmesseintegration über Meßzeiten mit schwankender Bandbelastung und die Parallelschaltung mehrerer Detektoren, die zur

Kontrolle der gesamten Bandbreite häufig erforderlich ist, ohne den für γ -Absorptionsbandwaagen typischen elektronischen Aufwand (Linearisierung) möglich /106/.

KOWALCZYNSKI /63,88/ schlug 1962 auf dem γ -Vorwärtsstreuprinzip basierende Bandwaagen vor. Entsprechende Geräte wurden ab Mitte der 60er Jahre in der VR Polen für die Kohle- und Kunstdüngerindustrie entwickelt und von der Firma "Polon" produziert (Tabelle 2).

Tab. 2: Radiometrische Bandwaagen nach dem γ -Vorwärtsstreu-
prinzip

| Bezeichnung | Strahlungsquelle | Einsatzbereich | Literatur | Bemerkungen |
|-------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------------------------------------------------------|
| WIT-2 | ^{60}Co (1,33/1,17 MeV/ 0,2 GBq) | Bandbreite: 400...1200 mm Bandbeladung: 20...100kg/m (Linearitätsbereich) | /100,101/ | |
| 210 | ^{60}Co | Bandbreite: 500...650 mm Bandbeladung: 8 ... 40 kg/m | /87/ | Meßfehler der Geräte 210 und 110 ca. 3 % rel. |
| 110 | ^{137}Cs | Bandbeladung: 2 ... 10 kg/m | | |

Der Einsatz einer Vorwärtsstreubandwaage mit ^{60}Co -Quelle zur Bestimmung der Masse von Zinkbleierz wurde versucht. Feuchte- ($Z/A(H) \approx 1$) und Bleigehaltsänderungen ($Z/A(\text{Pb}) \approx 0,4$) und Überschreitungen des Linearitätsbereiches führten zu einer Vergrößerung des Meßfehlers auf mehr als $\pm 5\%$ /39/.

Dem Nachteil des begrenzten Linearitätsbereichs von Vorwärtsstreubandwaagen begegnet SEDA mit einer Meßgeometrie, die γ -Absorption und γ -Vorwärtsstreuung in sich vereinigt. Durch experimentell zu bestimmende Kollimations- und Blendenabmessungen sollen die beiden Strahlungskomponenten so aufeinander abgestimmt

werden, daß über einen großen Bereich Linearität zwischen Flächenmasse und radiometrischem Signal besteht /107/.

Bei σ -Energien < 300 keV ist der Massenschwächungskoeffizient μ abhängig vom Z_{eff} , weshalb die Flußdichte vorwärtsgestreuter Quanten im Detektor von der chemischen Zusammensetzung des Meßgutes abhängt. Im Bereich B (Abb. 8) ist eine flächenmasseunabhängige Gehaltsbestimmung durch Vorwärtsstreuung niederenergetischer Quanten möglich, die ähnlich wie das σ -Rückstreu- oder das Zweienergie-Transmissions-Gehaltsbestimmungsverfahren on-stream einsetzbar ist. Die Größe des Bereiches B bestimmt die zulässige Schwankungsbreite der Flächenmasse $\rho \cdot d$ des Transportstromes (z.B. die Schütthöhenschwankung auf Gurtbandförderern). Sie ist durch die Geometriewahl /92,96/ bzw. in Anordnungen mit Vorwärtsstreu- und Absorptionskomponenten durch den Abgleich beider Strahlungsanteile /80,107/ beeinflussbar.

Der Vorschlag der flächemassenunabhängigen Gehaltsbestimmung von Zweistoffsystemen durch niederenergetische vorwärtsgestreute Quantenstrahlung stammt von RUDANOVSKIJ (1973) /96/. In der Sowjetunion wurde das Verfahren zur Aschegehaltsbestimmung von Steinkohle entwickelt. In der DDR wurde es auf Rohbraunkohle übertragen. Seit 1979 erfolgt hier der Einsatz nicht optimierter 60 keV-Vorwärtsstreuordnungen zur Messung an Laborproben, Nebenbandanlagen und Hauptbändern mit relativ gleichbleibender Kohleschichtdicke (Tabelle 3).

Die Vergrößerung des Flächemassenunabhängigkeitsbereiches /129/ und die Verringerung der Eisenempfindlichkeit /130/ der σ -Vorwärtsstreuung ist durch spektrale Signalauswertung möglich.

Eine andere auf der σ -Vorwärtsstreuung basierende Gehaltsbestimmungsmethode nutzt die hohe Z-Abhängigkeit elastisch gestreuter Quantenstrahlung. DAHN (1967) /67/ führte Materialuntersuchungen mit gestreuter harter σ -Strahlung durch (Strahlungsquellen: ^{203}Hg , $E_{\sigma} = 279$ keV; ^{137}Cs , $E_{\sigma} = 661$ keV). Er registrierte summarisch elastisch und inelastisch gestreute Quanten (Zintillationssonde) und beobachtete aufgrund des hohen Rayleighstreuanteils für metallische Elemente bei Streuwinkeln $< 10^{\circ}$ eine Abhängigkeit des Signals von der Kernladungszahl $\sim Z^2$. KÜHN und SCHATZLER (1980) /64/ benutzen das σ -Vorwärtsstreuverfahren zur

Abb. 3: Anwendungen des α -Vorwärtsstreuverfahrens zur Gehaltsbestimmung von Kohle

| Meßaufgabe | Anwendungsbereich | Gerätebezeichnung | Strahlungsquelle (Energie/Aktivität) | Lit. | Bemerkungen |
|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Asche-schnellbestimmung an Laborproben | Steinkohle | Labormuster (UdSSR) | ^{75}Se (220 keV) | /93,96/ | diskontinuierliches Verfahren, Probenahme und Kohleaufbereitung erforderlich, Messung an Probenküvetten |
| | | | ^{170}Tm (84,3/52 keV) | /129,130/ | |
| | Rohbraunkohle | (DDR) | ^{241}Am (60 keV) | /92,96/ | |
| | Steinkohle | CEAZ (nach/84/ EÄZ) (UdSSR) | ^{241}Am (60 keV/100 GBq) | /33/ | dsgl., Probenmasse ca. 40 kg |
| | Körnung: <25mm/79,94/ <50mm/132/ Feuchte: 15 Gew. % | | ^{241}Am (60 keV/7,4 GBq) | /79,84,94, 95,132/ | dsgl., Probenmasse 6,6-8,5 kg, Meßwert 6 min nach Probenahme verfügbar |
| on-stream Aschegehaltsbestimmung an Förderbändern | Steinkohle | RKTP-3 (frühere Bezeichnung. AZUK (UdSSR)) | ^{241}Am (60 keV/37 GBq) | /38,81,128, 131,133/ | für Förderbänder mit formiertem Kohlestrom Meßfehler: $\pm 1 \dots 2\% \text{A}^d$ |
| | | | Körnung <100mm Feuchte <10 Gew. % Schichtdicke: 120...180 mm /79/ | | |
| | Rohbraunkohle Nebenband | Prototyp (DDR) | ^{241}Am (60 keV/111 GBq) | /21,99/ | Zugverladestation Tagebau Nochten |
| | dsgl. | KRAS 1 (DDR) | dsgl. | /29,60/ | Ausgang Tagebau Berzdorf |
| | Braunkohle Rohbraunkohle | Prototyp (DDR) | dsgl. | /59/ | Kohleschichtdicke ± 20 mm konstant |
| | Körnung <6 mm Feuchte <60 Gew. % | | | | |

Bestimmung des Fettanteils in Fleisch und erreichen durch getrennte Registrierung elastisch und inelastisch gestreuter 60 keV-Quanten (HP Ge-Detektor) bei Streuwinkeln um 48° eine Abhängigkeit des Verhältnisses beider Strahlungsanteile von $Z^{3,5}$.

5.2. Vor- und Nachteile bei Anwendung in der on-stream Kohlequalitätsmeßtechnik

Der Einsatz der σ -Vorwärtsstreuung zur Aschegehaltsbestimmung von Kohle hat gegenüber σ -Rückstreu- und σ -Absorptionsverfahren die in sowjetischen Veröffentlichungen /79,81,94,95,130-132/ hervorgehobenen spezifischen

Vorteile

- Unabhängigkeit des Meßsignals von Schwankungen der Schütthöhe (innerhalb bestimmter Grenzen)
 - geringe Empfindlichkeiten gegen Schwankungen der Feuchte, des Körnungsspektrums und der Dichte
 - hohe Ascheempfindlichkeit
 - linearer Zusammenhang zwischen Meßsignal und Aschegehalt
- nach Auffassung des Autors ist zu ergänzen
- höhere Repräsentanz und Richtigkeit als das σ -Rückstreuverfahren, da
 - die gesamte Kohleschicht durchstrahlt wird
 - der Beitrag eines Streupunktes zum Meßsignal nicht so stark von seiner Tiefenlage im Meßgut abhängt, wodurch die Gefahr systematischer Fehler als Folge vertikaler Kohleentmischung geringer ist (untermauert durch Untersuchungen von THÜMMEL zum Einfluß von Probeinhomogenitäten auf das Signal der σ -Vorwärtsstreuung /119/).

Demgegenüber besitzt das Verfahren die folgenden

Nachteile

- Bereich der Unabhängigkeit des Signals von der Meßgutdicke d (Plateau) ist begrenzt; deshalb ist der Einsatz nur an Nebenbandanlagen oder an Hauptbändern mit gleichmäßiger Dosierung möglich

- Plateaulage hängt vom Aschegehalt der Kohle ab; deshalb ist eine für Kohlen eines bestimmten mittleren Aschegehalts günstige Meßgeometrie nicht unbedingt zur Messung von Kohlen mit anderen Aschemittelwerten geeignet. Geometrieanpassungen sind für neue Anwendungen oft erforderlich.
- Schwankende Kohleschichtdicken führen bei den in der DDR bislang untersuchten Geometrien zur Veränderung der Kalibrierkurve und des Einflusses von Störgrößen (Asche-, Dichte- und Störempfindlichkeiten sind dickenabhängig) /121/; deshalb sind Meßwerte bei größeren Schichtdickenschwankungen zu korrigieren.
- Kalibrierkurven, Störempfindlichkeiten und Algorithmen zur Signalverknüpfung sind wie beim σ -Rückstreuverfahren nicht analytisch bestimmbar. Es existieren bisher keine Ansätze, die Empfindlichkeitsabschätzungen in Abhängigkeit von der Meßgutschichtdicke, der verwendeten σ -Energie und der Meßgeometrie gestatten;
- Fehlen eines hinreichend genauen numerischen Verfahrens zur Berechnung des Vorwärtsstreusignals als Funktion der Meßgutzusammensetzung, der Dichte und der Schichtdicke; deshalb sind Geometrieanpassungen und -optimierungen nur durch aufwendige Versuchsreihen möglich.

Die begrenzte Schichtdickenunabhängigkeit des Meßsignals und der Einfluß der Meßgutschichtdicke auf Empfindlichkeiten sind limitierende Faktoren für die on-stream Anwendung des Verfahrens. Man kann ihnen begegnen durch

- Vergrößerung der entsprechenden Bereiche durch Optimierung der Meßgeometrie /93/ und/oder
- gleichzeitige Messung des Vorwärtsstreusignals und der aktuellen Schichtdicke und Meßwertkorrektur z.B. durch Kombination der Vorwärtsstreu- mit einer σ -Absorptionsmeßstrecke.

Zur Elimination von Störeinflüssen kombinierte WATT (1975) /138,139/ Vorwärtsstreuordnungen mit anderen radiometrischen Meßstrecken. THÜMMELE schlägt eine schichtdickenunabhängige Gehaltsbestimmung durch Kombination niederenergetischer Vorwärtsstreu- und hochenergetischer σ -Absorptionsmeßstrecken (z.B.

60 keV VS/660 keV TM) /117/ bzw. deren Vereinigung in einer Meßanordnung /118/ vor. Der Vorteil gegenüber der bekannten flächenmassen kompensierten Zweifachtransmission besteht in der geringeren erforderlichen Genauigkeit des Korrektursignals, da die σ -Vorwärtsstreuung ein weniger schichtdickenabhängiges Signal als die σ -Absorption liefert /121,123/. Von LEONHARDT /67,68/ wird auf die Verringerung des Meßfehlers einer am Nebensband eingesetzten 60 keV - σ -Vorwärtsstreuemeßstrecke durch Kombination mit einem 660 keV -Transmissionssignal von 4 %^d auf 2,5 %^d (15%) hingewiesen.

Eine dickenunabhängige Gehaltsbestimmung durch Kombination zweier Vorwärtsstreuemeßstrecken unterschiedlicher Energie wird von FRENZEL vorgeschlagen /24/.

Meßstreckenkombinationen unter Benutzung von Vorwärtstreuengeometrien möglichst geringer Störempfindlichkeit werden vom Autor als vorteilhaft angesehen, da hierdurch die Meßgenauigkeit des Korrektursignals, die Anforderungen an Signalverknüpfungsalgorithmen und die Frequenz der Signalkorrektur gesenkt werden können.

Geometrieoptimierungen und -anpassungen, Ermittlung von Empfindlichkeiten und von Beziehungen zur Signalverknüpfung erfolgen bisher experimentell. Effektiver ist die Computersimulation (automatisierbar), zumindest aber ein durch Computereperimente gestütztes Verfahren, wozu ein mathematisches Modell der σ -Vorwärtsstreuung erforderlich ist. Monte-Carlo-Verfahren sind wegen der geringen Ausbeuten ($\sim 10^{-6}$ in den untersuchten Geometrien) nicht anwendbar; das von RUDANOVSKIJ /93/ vorgeschlagene Einfach-Comptonstreuemodell spiegelt die experimentellen Ergebnisse mit unzureichender Genauigkeit wider /92/.

Der Autor stellt im folgenden Abschnitt ein Zweifach-Comptonstreuemodell vor, das für 60 keV-Quantenstrahlung in erprobten Geometrien gute Übereinstimmung mit den Meßdaten zeigt.

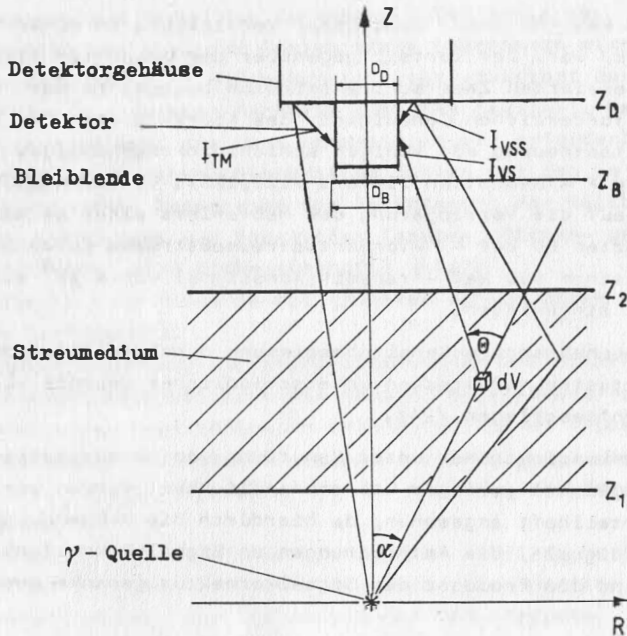


Abb. 9: Die γ -Vorwärtsstreugeometrie mit den im Zweifach-Comptonstreumodell benutzten Bezeichnungen

5.3. Zweifach-Comptonstreumodell zur Signalberechnung in Vorwärtsstreugeometrie

5.3.1. Zielstellung und Anwendungsbereich

Des 1985 vom Autor erstmals vorgestellte Modell wurde für die computergestützte Geometrieoptimierung von γ -Vorwärtsstreuemeßstrecken geschaffen /34/. RUDANOVSKIJs Einfach-Comptonstreumodell /93/ ist für diesen Zweck nicht genau genug. Es wurde als Ausgangspunkt benutzt, jedoch in folgenden Punkten verändert:

- Berücksichtigung zweifachgestreuter Quanten (Kap. 5.3.3.)
- Berücksichtigung von kollimierten Kreisflächenpräparaten entsprechenden Primärquantenflußdichten durch Einführung eines vom Öffnungswinkel abhängenden Gewichtungsfaktor (Kap. 5.3.2.) - RUDANOVSKIJ rechnet mit Punktquellen
- Exaktere Beschreibung des Raumwinkels in dem sich, vom aktuellen Streuzentrum aus gesehen, der Detektor befindet

Hinsichtlich der Ordnungszahl des Meßgutes und der primären γ -Energie ist die Anwendung des Modells auf Bereiche beschränkt, in denen der Comptoneffekt gegenüber anderen Streuungsarten überwiegt (vgl. 5.3.5.).

Das erarbeitete Rechenprogramm (Anlage 4) ermöglicht Kalkulationen nach dem Zweifach-Comptonstreuemodell in rotationssymmetrischen Meßanordnungen mit detektorseitiger Blende (Abb. 9) und beliebiger Dimension

- der Abstände Quelle - Meßgut (Z_1)
Quelle - Detektor (Z_D)
Quelle - Blende (Z_B)
- der Durchmesser des Detektors (D_D)
der Blende (D_B)
- des maximalen Öffnungswinkels des Primärstrahlkegels α_{max} und
- der Meßgutschichtdicke $Z_2 - Z_1$.

Die chemische Zusammensetzung des als homogen genäherten Meßgutes wird durch Eingabe des Massenschwächungskoeffizienten μ für die verwendete Primäretrahlungsenergie und der Elektronenkonzentration n_E berücksichtigt. Die Meßgutdichte ρ ist frei einstellbar.

In der vorliegenden Version erlaubt das Programm die Intensitätsberechnung von in planparallelen Meßgutschichten vorwärts gestreuten 60 keV-Quanten. Bei mittlerer Genauigkeit benötigt es auf dem ungarischen Tischrechner Typ EMG 666 B ca. 30 min zur Berechnung von 17 den Meßgutschichtdicken 1,7 ... 28,9 cm (Schrittweite 1,7 cm) entsprechenden Vorwärtsstreuimpulsraten.

Ein Vergleich von berechneten Vorwärtsstreuimpulsraten und -empfindlichkeiten mit experimentellen Ergebnissen, die an Modellsustanz mit variiertem Dichte und chemischer Zusammensetzung (Al-Gehalt) gewonnen wurden, erfolgt in Kapitel 5.4.

5.3.2. Abhängigkeit der Primärquantenflußdichte vom Öffnungswinkel der Quelle

Die Berechnung von Vorwärtsstreuraten setzt eine exakte Beschreibung der Flußdichte i_0 der von der Quelle kommenden Primärquanten voraus. Für ideale punktförmige Strahlungsquellen ist diese im Vakuum allein Funktion des Abstandes zur Quelle. Für Punktquellen, deren Öffnungswinkel α durch Kollimatoren auf α_{\max} beschränkt ist, gilt für abstandsgleiche Bezugspunkte

$$\begin{aligned} i_0 &= \text{const. für } \alpha < \alpha_{\max} \\ i_0 &= 0 \quad \text{für } \alpha \geq \alpha_{\max} \end{aligned} \quad (18)$$

Diese von RUDANOVSKIJ benutzte Betrachtungsweise ist für reale Strahlungsquellen nicht exakt.

Präparate endlicher Ausdehnung liefern Quantenflußdichten i_0 , die vom Öffnungswinkel α abhängen

$$i_0 = i_{00} f(\alpha), \quad (19)$$

wobei i_{00} der Flußdichte für $\alpha = 0$ entspricht und $f(\alpha)$ die Winkelcharakteristik der jeweiligen Quelle berücksichtigt.

Die in dieser Arbeit experimentell benutzte Quelle, für die die Vergleichsrechnungen nach dem Comptonstreumodell durchgeführt wurden, besteht aus einem Kreisflächenpräparat (Radius $a_Q = 5,3 \text{ mm} / 90^\circ$) in einer Halterung mit zylinderförmiger Kollimationsöffnung (Radius $a_{K01} = 7,5 \text{ mm}$, Länge $h_{K01} = 20,8 \text{ mm}$). $f(\alpha)$ wurde für sie experimentell durch photometrische Auswertung einer im Abstand von 106 mm exponierten Photoplatte bestimmt (Abb. 10).

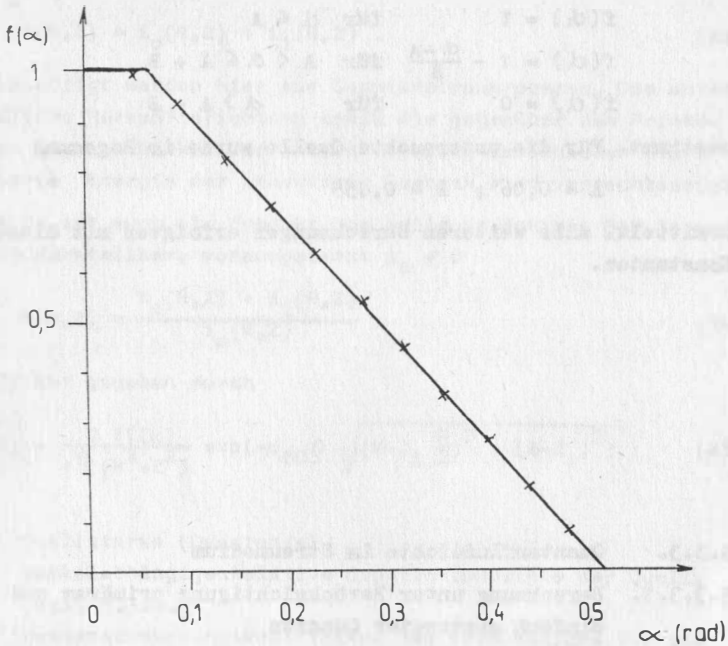


Abb. 10: Relative Primärquantenflußdichte $f(\alpha)$ als Funktion des Öffnungswinkels der in dieser Arbeit verwendeten Quelle, bestehend aus einem Kreisflächenpräparat mit dem Radius $a_Q = 5,3$ mm in einer Halterung mit zylinderförmiger Kollimationsöffnung (Radius $a_{Kol} = 7,5$ mm, Länge $h_{Kol} = 20,8$ mm)

----- Näherungsfunktion Gl. (20)

x radiographisch bestimmte Werte

In guter Näherung ist $f(\alpha)$ durch die Funktion

$$\begin{aligned} f(\alpha) &= 1 && \text{für } \alpha \leq A \\ f(\alpha) &= 1 - \frac{\alpha - A}{B} && \text{für } A < \alpha \leq A + B \\ f(\alpha) &= 0 && \text{für } \alpha > A + B \end{aligned} \quad (20)$$

bestimmt. Für die untersuchte Quelle wurde im Bogenmaß

$$A = 0,06 ; B = 0,455$$

ermittelt. Alle weiteren Berechnungen erfolgten mit diesen Konstanten.

5.3.3. Quantenflußdichte im Streumedium

5.3.3.1. Berechnung unter Berücksichtigung primärer und einfach gestreuter Quanten

Die Berechnung der Quantenflußdichte erfolgt in Zylinderkoordinaten (\mathcal{J}, R, Z) . Für rotationssymmetrische Vorwärtsstreuordnungen ist die Quantenflußdichte i unabhängig von \mathcal{J} , d.h. $i = i(R, Z)$. Am Ort (R, Z) ist i näherungsweise beschreibbar als Summe der Quantenflußdichten der primären von der Quelle kommenden Strahlung $i_0(R, Z)$ und der sekundären durch einen Streuakt in

der Umgebung von (R, Z) zum betrachteten Punkt gestreuten Strahlung i_1

$$i(R, Z) = i_0(R, Z) + i_1(R, Z) \quad (21)$$

Berücksichtigt werden hier nur Comptonstreuungsprozesse. Die unterschiedliche Herkunftsrichtung sowie die gegenüber den Primärquanten je nach Winkel der ersten Streuung verschieden stark reduzierte Energie der sekundären Quanten wird vernachlässigt.

$i(R, Z)$ ist auch als Produkt des build up Faktors $B(R, Z)$ und $i_0(R, Z)$ darstellbar, vorausgesetzt $i_0 \neq 0$

$$B(R, Z) = \frac{i_0(R, Z) + i_1(R, Z)}{i_0(R, Z)} \quad (22)$$

$i_0(R, Z)$ ist gegeben durch

$$i_0(R, Z) = \frac{Q f(\alpha)}{4\pi(R^2 + Z^2)} \exp(-\mu_{60} \rho \sqrt{(R - Z_1 \frac{R}{Z})^2 + (Z - Z_1)^2}) \quad (23)$$

mit

Q Quellstärke (Quanten/s)

$f(\alpha)$ winkelabhängige relative Quantenflußdichte der Quelle (vgl. 5.3.2.)

μ_{60} Massenschwächungskoeffizient des Streumediums für die Primärenergie der Quanten (hier 60 keV)

Die Berechnung von $i_1(R, Z)$ erfolgt durch Integration aller Strahlung, die in den Elementarvolumina am Ort $(\vec{r}_{Str}, R_{Str}, Z_{Str})$ gestreut wurde und zum Punkt (\vec{r}, R, Z) gelangt (wegen der Rotationssymmetrie ist die Wahl des \vec{r} für den Betrachtungspunkt willkürlich).

Der Abstand A_{Str} zwischen dem Zentrum $(\vec{r}_{Str}, R_{Str}, Z_{Str})$ des jeweiligen Streuvolumens und dem Betrachtungspunkt ergibt sich nach dem Kosinussatz

$$A_{Str}^2 = (Z_{Str} - Z)^2 + R_{Str}^2 + R^2 - 2RR_{Str} \cos(\vec{r}_{Str} - \vec{r}) \quad (24)$$

Der Strahlungsbeitrag di_1 der Elementarzelle dV_{Str} zur gesamten Sekundärstrahlung am Ort (\mathcal{N}, R, Z) wird angesetzt mit

$$di_1 = \frac{i_0(R_{Str}, Z_{Str})}{4\pi} \sigma_E n_E \varrho \frac{1}{A_{Str}^2} \exp(-\mu(\Theta) \varrho A_{Str}) dV_{Str} \quad (25)$$

mit

$$\begin{aligned} \sigma_E &= 2\pi r_E^2 \left\{ \frac{1+\xi}{\xi^2} \left[\frac{2(1+\xi)}{1+2\xi} - \frac{1}{\xi} \ln(1+2\xi) \right] + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2\xi} \ln(1+2\xi) - \frac{1+3\xi}{(1+2\xi)^2} \right\} \\ &= 5,455 \cdot 10^{-29} \text{ m}^2 \quad (\text{für } 60 \text{ keV Quanten}) \end{aligned} \quad (26)$$

$$\xi = \frac{h\nu}{m_E c^2} = \frac{E_\gamma}{511 \text{ keV}} \quad r_E = \frac{e^2}{m_E c^2} = 2,8177 \cdot 10^{-15} \text{ m} \quad /48/$$

σ_E ist der Wirkungsquerschnitt für Comptonstreuung am Elektron. $i_0(R_{Str}, Z_{Str})$ ergibt sich aus Gl.(23).

Dem Ansatz Gl.(25) liegt die Näherung zugrunde, daß

1. die Comptonstreuung isotrop, d.h. mit der gleichen Wahrscheinlichkeit um jeden Streuwinkel Θ erfolgt.

Der Vergleich mit winkelabhängigen differentiellen Wirkungsquerschnitten $\frac{d\sigma}{d\Omega}(\Theta)$, berechnet nach KLEIN-NISHINA-TAMM (Abb. 11), zeigt, daß für 60 keV-Quantenstrahlung der tatsächliche Wirkungsquerschnitt für kleine Streuwinkel bis zu 50 % über und für Streuwinkel um $\pi/2$ bis zu 40 % unter dem Wert der isotropen Näherung liegt. Mit zunehmender Energie wachsen die Abweichungen wegen der relativ größer werdenden Wahrscheinlichkeit der Streuung um kleine Winkel /19, S. 51/. Bei der Übertragung des Modells auf höhere Quantenenergien ist dies zu beachten.

2. die Elektronen im Streumedium ungebunden sind.

Die Abweichung der Wirkungsquerschnitte nach Gl.(26) von den Bindungsenergien berücksichtigenden Werten nach VEIGELE /134/ ist für 60 keV-Quantenstrahlung im Bereich niedriger Ordnungszahlen kleiner als 10 %. (Tabelle 4) Der Einfluß der Bindungsenergie wächst mit zunehmender Kernladungszahl und kleiner werdender Quantenenergie.

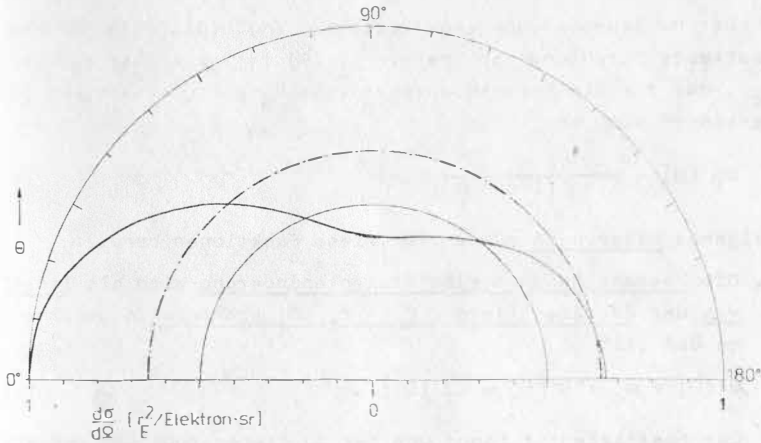


Abb. 11: Differentieller Wirkungsquerschnitt $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ als Funktion des Streuwinkels θ für Comptonstreuung von 60 keV-Quantenstrahlung
 — nach KLEIN-NISHINA-TAMM
 - - - isotrope Näherung

Tab. 4: Wirkungsquerschnitte ($10^{-28} \text{ m}^2/\text{Atom}$) für inkohärente Streuung für unterschiedliche Ordnungszahlen und Quantenenergien, berechnet
 A) nach KLEIN-NISHINA-TAMM für Comptonstreuung an freien Elektronen
 B) unter Berücksichtigung der Bindungsenergie (Angaben nach VEIGELE /134/)

| Z | Quantenenergie /keV/ | | | | | |
|---------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 30 | | 60 | | 100 | |
| | A | B | A | B | A | B |
| 1 (H) | 0,597 | 0,592 | 0,545 | 0,544 | 0,493 | 0,492 |
| 6 (C) | 3,58 | 3,31 | 3,27 | 3,19 | 2,96 | 2,92 |
| 13 (Al) | 7,76 | 6,58 | 7,09 | 6,66 | 6,41 | 6,22 |
| 26 (Fe) | 15,5 | 12,0 | 14,2 | 12,6 | 12,8 | 12,1 |

Der Massenschwächungskoeffizient $\mu(\Theta)$ (Gl.(25)) für die gestreute Strahlung der Energie $E_1(\Theta)$ ist gegenüber dem Wert μ_0 , der für die Primärquantenenergie E_0 gilt, erhöht. $E_1(\Theta)$ berechnet sich aus

$$E_1(\Theta) = \frac{E_0}{1 + \xi(1 - \cos \Theta)} \quad (27)$$

Folgende Näherungen wurden für diese Funktionen benutzt:

3. Die Massenschwächungskoeffizientenänderung wird als linear von der Energiedifferenz $E_0 - E_1(\Theta)$ abhängig angenommen, so daß gilt

$$\mu(\Theta) = \mu_0 + \sigma[E_0 - E_1(\Theta)] \quad (28)$$

Der Koeffizient σ hängt von der Quantenenergie und der chemischen Zusammensetzung des Meßgutes ab. Für $Z_{\text{eff}} \sim 8$ (das entspricht einer Kohle mit einem Gehalt an Asche mittlerer Zusammensetzung von 30 %A^d) ergibt sich für Energien im Bereich 50 ... 60 keV

$$\sigma = 2,4 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}^2}{\text{kg keV}} \quad (29)$$

Dieser für alle folgenden Rechnungen benutzte Wert ist bei der Übertragung des Modells auf andere Energie- oder Z-Bereiche entsprechend zu modifizieren.

4. Zur Berechnung von $i_1(R,Z)$ wird ein mittleres $\mu(\Theta)$ angenommen, das einem Streuwinkel $\Theta = \pi/2$ entspricht. Für 60 keV-Strahlung ergibt sich

$$\mu(\pi/2) = \mu_{60} + 1,513 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^2}{\text{kg}} \quad (30)$$

$i_1(R,Z)$ wird durch numerische Integration von Gl.(25) berechnet. Diese erfolgt schrittweise durch Summation der Strahlungsbeiträge, die aus einer konzentrisch zum Punkt (R,Z) liegenden Kugel und aus ebenso gelagerten Hohlkugeln stammen (Anlage 4, Unterprogramm 1). Zur Verdeutlichung der verwendeten Bezeichnungen siehe Anlage 5.

Im 1. Integrationsschritt wird der Anteil der Streustrahlung ${}_1\Delta i_1(R,Z)$ berechnet, der aus der Umgebung $\Delta A_{Str}/2$ um (R,Z) stammt. ${}_1\Delta V_{Str}$ ist dann eine Kugel für die, wie für alle weiteren ΔV_{Str} , vorausgesetzt wird, daß die Primärquantenflußdichte i_0 in jedem Punkt innerhalb ΔV_{Str} gleich groß ist. Nach Gl.(25) gilt

$$\begin{aligned}
 {}_1\Delta i_1(R,Z) &= i_0(R,Z)n_E g \mathcal{G}_E \int_0^{\Delta A_{Str}/2} \exp(-\mu(\theta) g A_{Str}) dA_{Str} \\
 &= i_0(R,Z)n_E g \mathcal{G}_E \frac{1}{\mu(\theta) g} \left[1 - \exp(-\mu(\theta) g \frac{\Delta A_{Str}}{2}) \right] \quad (31)
 \end{aligned}$$

wegen

$$dV_{Str} = 4\pi A_{Str}^2 dA_{Str} \cdot$$

In den weiteren n Integrationsritten werden Streustrahlungsanteile ${}_n\Delta i_1$ berechnet, die aus Hohlkugeln mit dem Innenradius $A_{Str} - \Delta A_{Str}/2$ und dem Außenradius $A_{Str} + \Delta A_{Str}/2$ stammen. Dabei wird A_{Str} bei jedem Schritt um ΔA_{Str} vergrößert, bis das Gesamtvolumen erfaßt ist. Die in dieser Arbeit vorgestellten Rechenbeispiele wurden mit konstantem $\Delta A_{Str} = 1$ cm ausgeführt. Für A_{Str} der n -ten Hohlkugel gilt

$$A_{Str} = (n-1)\Delta A_{Str} \cdot \quad (n \geq 2) \cdot \quad (32)$$

Um die mit A_{Str} wachsenden Unterschiede der Primärquantenflußdichte $i_0(R_{Str}, Z_{Str})$ innerhalb der Hohlkugel zu berücksichtigen, wird diese durch 2 bezüglich des Koordinatensystems und zueinander orthogonal stehende Ebenen, deren Schnittgerade durch (R,Z) verläuft, in 4 Sektoren unterteilt. Für den jeweiligen Sektor wird ein $i_0(R_{Str}, Z_{Str})$ als repräsentativ angesehen, das für die folgenden Punkte der entsprechenden Hohlkugel berechnet wird (siehe Gl. (23)).

$$\begin{aligned}
 R_{\text{Str } 1} &= \sqrt{\left(R + \frac{A_{\text{Str}}}{2}\right)^2 + \left(\frac{A_{\text{Str}}}{2}\right)^2} & Z_{\text{Str } 1} &= Z + \frac{A_{\text{Str}}}{\sqrt{2}} \lambda_{\text{Str } 1} = \frac{1}{4}\pi \\
 R_{\text{Str } 2} &= \sqrt{\left(R - \frac{A_{\text{Str}}}{2}\right)^2 + \left(\frac{A_{\text{Str}}}{2}\right)^2} & Z_{\text{Str } 2} &= Z + \frac{A_{\text{Str}}}{\sqrt{2}} \lambda_{\text{Str } 2} = \frac{3}{4}\pi \\
 R_{\text{Str } 3} &= \sqrt{\left(R - \frac{A_{\text{Str}}}{2}\right)^2 + \left(\frac{A_{\text{Str}}}{2}\right)^2} & Z_{\text{Str } 3} &= Z - \frac{A_{\text{Str}}}{\sqrt{2}} \lambda_{\text{Str } 3} = \frac{5}{4}\pi \\
 R_{\text{Str } 4} &= \sqrt{\left(R + \frac{A_{\text{Str}}}{2}\right)^2 + \left(\frac{A_{\text{Str}}}{2}\right)^2} & Z_{\text{Str } 4} &= Z - \frac{A_{\text{Str}}}{\sqrt{2}} \lambda_{\text{Str } 4} = \frac{7}{4}\pi
 \end{aligned}
 \tag{33}$$

Die entsprechenden Winkel $\gamma_{\text{Str } 1,2,3,4}$ betragen $\frac{1}{4}\pi, \frac{1}{4}\pi, -\frac{1}{4}\pi, -\frac{1}{4}\pi$.
 Für das Volumen der Viertel-Hohlkugel $n \Delta V_{\text{Str}}$ gilt

$$n \Delta V_{\text{Str}} = 2\pi A_{\text{Str}}^2 \left(\frac{\Delta A_{\text{Str}}}{2}\right) + \frac{2}{3}\pi \left(\frac{\Delta A_{\text{Str}}}{2}\right)^3 \tag{34}$$

Damit ergibt sich der Streuetragungsbeitrag aus dem i -ten Sektor der n -ten Hohlkugel $n_i \Delta i_1$ aus Gl.(25).

Die Summation der Strahlungsbeiträge erfolgt über alle Hohlkugelsektoren, die innerhalb des Meßgutes liegen. Es gilt

$$Z_1 \leq Z_{\text{Str}} \leq Z_2$$

5.3.3.2. Radiographische Bestimmung

Zur Überprüfung des in Kapitel 5.3.3.1. vorgestellten Modells wurden die tatsächlichen Quantenflußdichten im Streumedium radiographisch bestimmt und mit den berechneten primären und einfach-gestreuten Quantenflußdichten verglichen.

Im dazu durchgeführten Versuch wurde ein Stapel von 4 Preßspanplatten (je 1,68 cm stark) und 3 lichtdicht verpackten Autoradiographiefilmen in den Positionen 1 - 3 (Abb. 12) mit der in Kapitel 5.3.2. beschriebenen 60 keV- β -Strahlungsquelle ($Q = 11,1$ GBq) bestrahlt. Die Expositionszeit betrug 40', die Entfernung Quelle - Streugut (Abb. 9) $Z_1 = 9,5$ cm. Die densitometrisch bestimmbaren Schwärzungen der Fotoplatten lagen bei diesen Werten im Linearitätsbereich, so daß sie direkt als Maß für die Quantenflußdichten am jeweiligen Punkt dienen konnten.

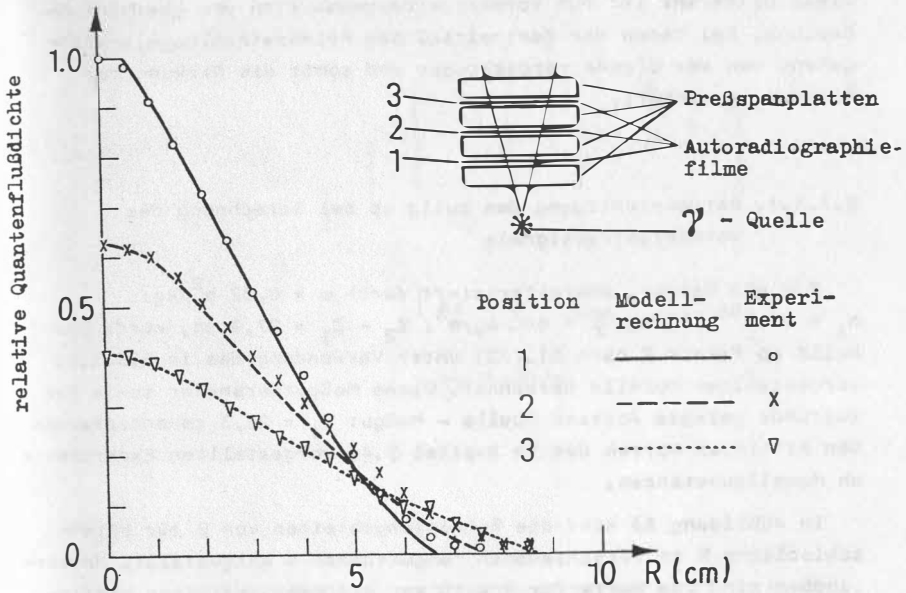


Abb. 12: Vergleich von berechneten und radiographisch bestimmten 60 keV-Quantenflußdichten in einem Stapel von 4 Preßspanplatten für 3 Stapelebenen als Funktion des Abstandes zur Symmetrieachse R

Abbildung 12 zeigt die relativen Quantenflußdichten als Funktion des Abstandes zur Symmetrieachse R für die 3 untersuchten Stapelebenen (entsprechend $Z = 11,2; 12,9; 14,6$ cm). Die radiographisch bestimmten Werte sind den nach dem Streumodell berechneten ($\mu_{60} = 0,02 \text{ m}^2/\text{kg}$; $n_E = 3 \cdot 10^{26} \text{ El./kg}$; $\rho = 700 \text{ kg/m}^3$) gegenübergestellt. Der für $R = 0, Z = 11,2$ cm berechnete wurde dem radiographisch für diesen Punkt bestimmten Wert gleichgesetzt (Normierung). Für kleine R besteht hervorragende Übereinstimmung zwischen Modell und experimentell bestimmten Quantenflußdichten. In den Randzonen des Strahlungskegels und in der inneren Stapelebene liegen die tatsächlichen etwas über den berechneten Werten, was auf Streustrahlungsanteile höherer Ordnung hinweist.

Diese Differenz ist für Vorwärtsstreugeometrien von gewisser Bedeutung, bei denen der Zentralteil des Primärstrahlkegels weitgehend von der Blende verdeckt ist und somit die Wirkung der Randzone dominiert.

5.3.3.3. Berücksichtigung des build up bei Berechnung des Vorwärtsstreusignals

Für ein Meßgut, charakterisiert durch $\mu = 0,02 \text{ m}^2/\text{kg}$; $n_E = 3 \cdot 10^{26} \text{ El./kg}$; $Q = 640 \text{ kg/m}^3$; $Z_2 - Z_1 = 27,9 \text{ cm}$, wurde der build up Faktor B nach Gl.(22) unter Verwendung des in 5.3.3.1. vorgestellten Modells berechnet. Diese Meßgutparameter sowie der zugrunde gelegte Abstand Quelle - Meßgut $Z_1 = 23,3 \text{ cm}$ entsprechen den mittleren Werten der in Kapitel 5.4. vorgestellten Experimente an Modellsubstanzen.

In Abbildung 13 sind die Schwankungsbreiten von B für unterschiedliche R in verschiedenen Meßgutebenen d dargestellt. Hervorgehoben sind die Werte für $R = 10 \text{ cm}$, die den jeweiligen mittleren build up Faktoren in der angegebenen Geometrie sehr nahe kommen.

Zur Verkürzung der Rechenzeit wurden in den Modellrechnungen für Kapitel 5.4. die build up Faktoren nur für $R = 10 \text{ cm}$ berechnet und für alle Punkte (R,Z) der jeweiligen Schicht als repräsentativ angesehen (Anlage 4, UP 1).

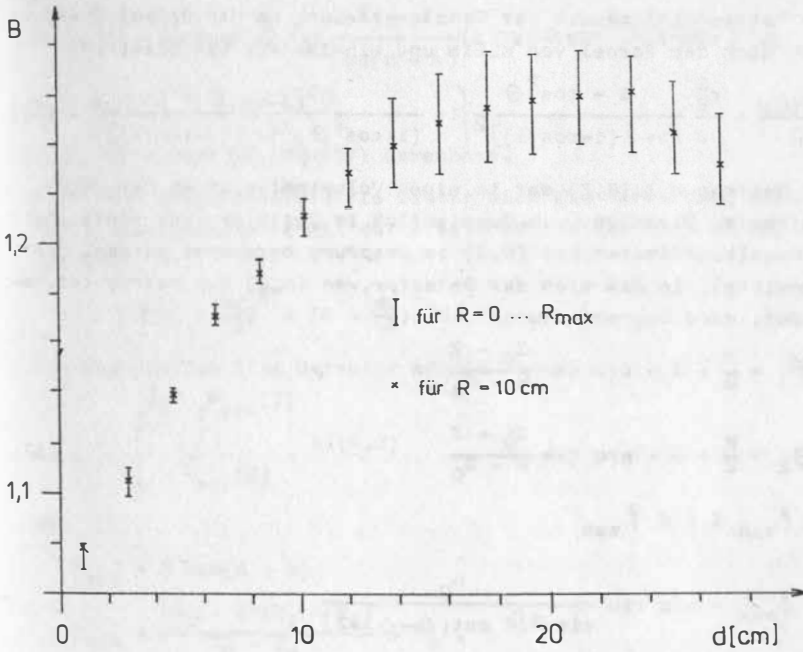


Abb. 13: Build up Faktor B, berechnet für verschiedene Schichten $d = Z - Z_1$ innerhalb eines Streugutes der Dicke von 27,9 cm

5.3.4. Berechnung des Quantenflusses im Detektor

Die Quantenflußdichte i im Meßgut ist für rotationssymmetrische Geometrien unabhängig von \mathcal{N} und berechnet sich unter Berücksichtigung der bereits einmal im Meßgut gestreuten Quanten nach Gl.(21) bzw. ist unter Verwendung von Gl.(22) ausdrückbar durch

$$i(R,Z) = B i_0(R,Z) \quad (35)$$

Die Wahrscheinlichkeit der Comptonstreuung um den Winkel Θ ergibt sich nach der Formel von KLEIN und NISHINA für ein Elektron

$$\frac{dG(\Theta)}{d\Omega} = \frac{r_E^2}{2} \frac{1 + \cos^2 \Theta}{[1 + \epsilon(1 - \cos \Theta)]^2} \left\{ 1 + \frac{\epsilon^2 (1 - \cos \Theta)^2}{(1 + \cos^2 \Theta)[1 + \epsilon(1 - \cos \Theta)]} \right\} \quad (36)$$

Der Beitrag $dI(R, Z)$ der in einem Volumenelement am Ort (R, Z) gestreuten Strahlung zum Quantenfluß im Detektor kann vorteilhaft in Kugelkoordinaten mit (R, Z) im Ursprung berechnet werden. Der Raumwinkel, in dem sich der Detektor, von (R, Z) aus betrachtet, befindet, wird begrenzt durch

$$\begin{aligned} \Theta_1 &= \frac{\pi}{2} + \alpha - \arctan \frac{Z_B - Z}{R - R_B} \\ \Theta_2 &= \frac{\pi}{2} + \alpha - \arctan \frac{Z_D - Z}{R - R_D} \end{aligned} \quad (37)$$

$$-f_{\max} \leq f \leq f_{\max}$$

mit

$$f_{\max} = \arctan \frac{R_D}{\sin \alpha [R \cot(\Theta - \alpha) + Z]}$$

vorausgesetzt, daß keine von (R, Z) kommende Strahlung zwischen Blende und Detektor hindurchgelangt, ohne den Detektor zu treffen (z.B. im Fall einer ins Meßgut eintauchenden Sonde oder bei großen Abständen Blende - Detektor ist dies nicht erfüllt).

Für $dI(R, Z)$ gilt

$$dI(R, Z) = N_E i(R, Z) r_E^2 \int_{\Theta_1}^{\Theta_2} \int_0^{f_{\max}} \frac{dG(\Theta)}{d\Omega} D(\Theta, f) \sin \Theta df d\Theta \quad (38)$$

mit

N_E Anzahl der Elektronen im Volumenelement dV

$D(\Theta, f)$ Faktor zur Berücksichtigung der Strahlungsschwächung im Meßgut nach der Streuung in (R, Z) .

Es gilt

$$D(\Theta, \varphi) = \exp[-\mu(\Theta) \varrho \frac{Z_2 - Z}{\cos(\Theta - \alpha)} (1 + \tan \alpha \cos^2 \Theta (1 - \cos \varphi))] \quad (39)$$

$$N_E = n_E \varrho dV$$

$\mu(\Theta)$ wird nach Gl.(27)-(29) berechnet.

Wegen der Rotationssymmetrie bietet sich die Verwendung ringförmiger Volumenelemente mit der Breite dR und der Höhe dZ an, für die gilt

$$dV = \pi \left[\left(R + \frac{dR}{2} \right)^2 - \left(R - \frac{dR}{2} \right)^2 \right] dZ \quad (40)$$

Den Quantenfluß I im Detektor erhält man aus

$$I = \int_{Z_1}^{Z_2} \int_{R_{\min}(Z)}^{R_{\max}(Z)} dI(R, Z) \quad (41)$$

mit

$$R_{\max} = Z \tan(\alpha + \beta)$$

$$R_{\min} = \frac{(Z_D - Z)(R_B - R_D)}{Z_D - Z_B} + R_D$$

Das Modell berücksichtigt nicht die Absorption und Streuung von γ -Quanten in Luft.

Im verwendeten Programm (Anlage 4, Hauptprogramm) erfolgt die Berechnung des Integrals I durch Summation von $\Delta I(R, Z)$, die ΔV mit vorgebbaren ΔR und ΔZ entsprechen. Die Anzahl der Elemente in die die Winkel Θ und φ bei der Berechnung der $\Delta I(R, Z)$ zu unterteilen sind, ist ebenfalls vorzugeben (Parameter m und p).

5.3.5. Einfluß elastischer Streuung

Das in dieser Arbeit vorgestellte Comptonmodell zur Berechnung von 60 keV- γ -Vorwärtsstreuraten vernachlässigt andere Streumechanismen. Neben der Comptonstreuung spielt im hier betrachteten Energiebereich ($E_\gamma < 1$ MeV) die elastische Streuung, die auch als kohärente oder Rayleighstreuung bezeichnet wird, eine Rolle. Bei der verwendeten Maßgeometrie (Kap. 5.4.) ist sie im Ordnungszahlbereich der Kohle ($Z_{\text{eff}} = 6 \dots 10$) für 60 keV-Quanten vernachlässigbar (s.u.). Beim Übergang zu kleinen Streuwinkeln und höheren Energien bzw. zu höheren Ordnungszahlen nimmt der elastische Streuanteil zu und ist gegebenenfalls zu beachten (vgl. Kap. 5.1.).

Der Anteil der Rayleighstreuung kann aufgrund veröffentlichter Untersuchungen und Beziehungen wie folgt abgeschätzt werden:

- a) Winkelabhängigkeit der Rayleighstreuung als Funktion von γ -Energie und Ordnungszahl

Der Wirkungsquerschnitt der Rayleighstreuung ist für Streuwinkel $\Theta \rightarrow 0$ am größten, energieunabhängig und $\sim Z^2$. Er nimmt rasch mit wachsendem Streuwinkel ab. Die Art der Winkelabhängigkeit der Wahrscheinlichkeit elastischer Streuung ist von der Ordnungszahl des Meßgutes und der γ -Energie abhängig. Mehr als 3/4 der Quanten werden elastisch um einen Winkel gestreut, der kleiner ist als $\Theta_R / 19^\circ$

$$\Theta_R = 2 \arcsin \frac{13,33 Z^{1/3}}{E_\gamma [\text{keV}]} \quad (42)$$

Das bedeutet, daß die Bevorzugung kleiner Streuwinkel mit zunehmender Energie und kleiner werdender Kernladungszahl wächst, wobei der Energieeinfluß größer als der der Ordnungszahl ist.

Für Kohle ($Z_{\text{eff}} = 7$) ergibt sich für 60 keV-Quanten

$$\Theta_R = 50,3^\circ$$

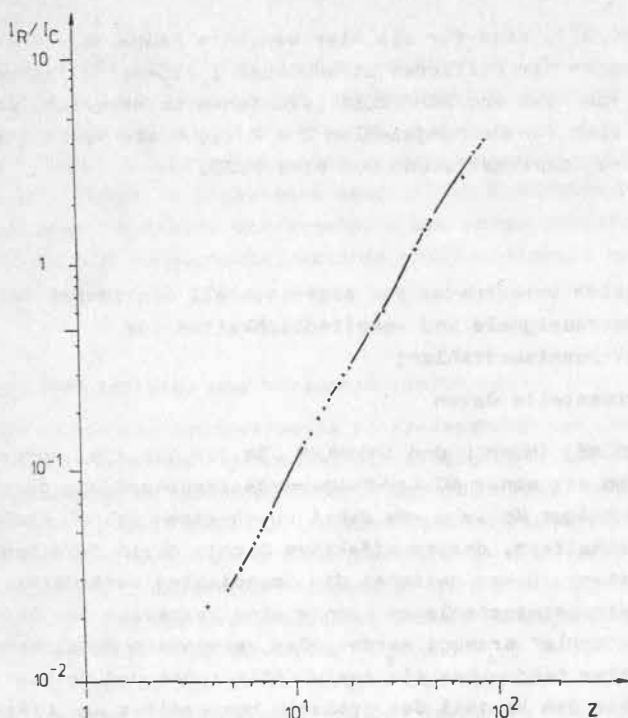


Abb. 14 Verhältnis von Rayleigh- und Comptonstreuung I_R/I_C für 60 keV-Quanten als Funktion der Ordnungszahl Z (nach /64/)

b) Ordnungszahlabhängigkeit der Rayleighstreuung von 60 keV-Quanten

Das Verhältnis von Rayleigh- und Comptonstreuung I_R/I_C ist wegen der Winkelcharakteristika beider Streuungsarten (vgl. auch Gl.(36) und Abb. 11) von der γ -Energie und vom Streuwinkel abhängig. Experimentell bestimmte Verhältnisse lassen sich daher nur auf ähnliche Meßgeometrien übertragen.

KÜHN und SCHÄTZLER /64/ untersuchten die Ordnungszahlabhängigkeit des Verhältnisses beider Strahlungsanteile für 60 keV-Quanten (Abb. 14). Sie benutzten dafür eine Meßanordnung, bei der Streuungen um $\Theta = 24^\circ \dots 66^\circ$ (Mittelwert ca. 48°) auftreten. In der in dieser Arbeit verwendeten Anordnung (Kap. 5.4.) beträgt der Streuwinkel $\Theta = 12^\circ \dots 48^\circ$ (Mittelwert ca. 34°). Da der "Bündelungeffekt" der Rayleighstreuung bei 60 keV nicht sehr ausgeprägt

ist ($\Theta_R = 50,3^\circ$), sind für die hier benutzte Meßgeometrie trotz der Abweichungen der mittleren Streuwinkel I_R/I_C -Verhältnisse ähnlich den von KÜHN und SCHÄTZLER gefundenen zu erwarten. Danach ergibt sich für Ordnungszahlen $Z = 7 \dots 8$ ein Verhältnis von Rayleigh-: Comptonstreuung von etwa 1:20.

5.4. Vergleich berechneter und experimentell bestimmter Vorwärtstreusignale und -empfindlichkeiten für 60 keV-Quantenstrahlung

5.4.1. Experimentelle Daten

Von FRITZSCHE, THÜMMEL und THÜMLER /34,119,121,125/ wurden Labormessungen mit einer 60 keV- γ -Vorwärtstreuanordnung durchgeführt. Das Meßgut Kohle wurde dabei durch einen Stapel Preßspanplatten simuliert, dessen effektive Dichte durch Zwischenlegen von Distanzstücken zwischen die Spanplatten veränderbar war. Mit Aluminiumzwischenlagen konnte eine Variation des Aschegehaltes der "Kohle" erzeugt werden. Das verwendete Modellmeßgut ist leichter handhabbar als reale Kohleproben und besitzt ihnen gegenüber den Vorteil der größeren Homogenität und bietet die Möglichkeit der definierten Veränderung von Meßguteigenschaften. Massenschwächungskoeffizient und Dichte der Preßspanplatten entsprechen der aschefreien Rohkohle. Ziel der Versuche war es, eine zur radiometrischen Aschegehaltsüberwachung von Rohbraunkohle am Transportband geeignete Meßgeometrie zu finden und für diese die Asche- und Dichteempfindlichkeit zu ermitteln. Dementsprechend wurden ausschließlich industriefeste Meßgeräte und Sonden verwendet.

Im Hinblick auf Modellgütetests sind diese Experimente nicht als optimal zu betrachten. Das Gehäuse der verwendeten Szintillationssonde (Typ 23 149, Hersteller: VEB Robotron, Meßelektronik Dresden) befand sich nicht vollständig im Primärstrahlschatten der Bleiblende. Infolgedessen waren Effekte der am SONDENGÄHÄUSE rückgestreuten Quanten zu verzeichnen. Dieser Einfluß mußte beim Vergleich Modell - Experiment berücksichtigt werden, wodurch die

Rechnungen komplizierter wurden und durch Ungenauigkeiten bei der Verhältnisbestimmung der Modellstrahlungskomponenten zusätzliche Fehler entstanden (siehe Kap. 5.4.3.).

Trotz dieser Unzulänglichkeiten werden die Daten hier zu einem Vergleich Modell - Experiment benutzt, da Meßreihen mit vollkommen abgeschattetem Sondengehäuse und vergleichbar großer Variation von Meßgutdicke, -dichte und Aschegehalt nicht verfügbar waren.

5.4.2. Meßgeometrie und Versuchsdurchführung

Mit Hilfe der Laborversuche an Preßspanplatten und Al-Folien wurde eine Geometrie gefunden, die erfolgreich für Messungen an realen Kohlen im Labor einsetzbar war /26,27,33/ und die, leicht modifiziert, seit 1982 zur radiometrischen Aschegehaltsbestimmung von Rohbraunkohle am Transportband im Kraftwerk "Völkerfreundschaft" Hagenwerder eingesetzt wird /29,60/. Für diese Anordnung sind die Empfindlichkeiten des Meßsignals gegenüber Dichte- und Al-Gehaltsänderung (S_D und S_{Al}) in Abhängigkeit von der Meßgutdicke, wie im vorhergehenden Kapitel beschrieben, bestimmt worden. Die Meßgeometrie ist bezeichnet (vgl. Abb. 9) durch:

$$\begin{array}{lll} Z_1 = 24,0 \text{ cm} & Z_B = 59,9 \text{ cm} & Z_D = 65,0 \text{ cm} \\ R_B = 2,65 \text{ cm} & R_D = 1,9 \text{ cm} & \end{array}$$

In dieser Geometrie wurden die Vorwärtsstreußählraten für Meßgutdicken $d = Z_2 - Z_1 = 0 \dots \sim 30 \text{ cm}$ bestimmt. Dichte und Al-Gehalt des Untersuchungsmaterials wurden variiert (Abb. 15: Al = 0 Gew.%; $\rho = 700/640/590 \text{ kg/m}^3$; Abb. 16: Al = 10,3/18,6/25,6 Gew.%). Bei allen Messungen (mit Ausnahme $Z_2 - Z_1 = 0$) simulierte eine Piacrylunterlage ($Z_2 - Z_1 = 1 \text{ cm}$) unter dem Spanplattenstapel das Transportband. Piacryl entspricht hinsichtlich seines Massenschwächungskoeffizienten und seiner Dichte etwa einem Förderbandmaterial aus einem Gummi ohne Stahleinlagen.

Aus den Meßdaten wurde die Dichteempfindlichkeit S_g in Anlehnung an Gl.(A 6) (Anlage 1) aus den Differenzenquotienten wie folgt berechnet

$$S_g = \frac{I(700 \text{ kg/m}^3) - I(590 \text{ kg/m}^3)}{I(640 \text{ kg/m}^3)} \cdot \frac{110 \text{ kg/m}^3}{640 \text{ kg/m}^3} \quad (43)$$

und als Funktion der Meßgutdicke d dargestellt (Abb. 17). Analog wurde bei der Berechnung der Al-Empfindlichkeit S_{Al} verfahren, die sich nach Gl.(A 1) ergibt

$$S_{Al} = 100 \% \frac{I(0 \% \text{ Al}) - I(18,6 \% \text{ Al})}{I(10,3 \% \text{ Al})} \cdot \frac{1}{d} = 18,6 \% \text{ Al} \cdot \frac{1}{d} \quad (44)$$

Die Al-Empfindlichkeit (Signaländerung in % / Al-Gehaltsänderung um 1 Gew.-%) ist in Abhängigkeit von der Meßgutdicke in Abbildung 18 dargestellt.

Die experimentellen Daten in Abbildung 15 - 17 sind Mittelwerte der vorliegenden Einzelmessungen. Sie wurden aus folgenden Meßwertanzahlen ermittelt:

- Al-Gehalt 0 % $g = 700 \text{ kg/m}^3$: je 6 Werte
- $g = 640/590 \text{ kg/m}^3$: je 2 Werte
- Al-Gehalt 10,3 % : je 4 Werte
- 18,6 % , $d \leq 17,02 \text{ cm}$: je 4 Werte
- $d > 18,8 \text{ cm}$: je 1 Wert
- 25,6 % , $d \leq 11,98 \text{ cm}$: je 2 Werte
- $d > 13,81 \text{ cm}$: je 1 Wert

Die in Abbildung 15 und 16 angegebenen Streuungen (2 σ) der Einzelwerte liegen mit $\pm 1 \dots 10 \%$ (entsprechend $\pm 20 \dots 150$ Imp./s) deutlich über dem zählstatistisch bedingten Fehler (0,2 ... 0,5 %). Als Ursache dafür werden Veränderungen der sehr kritischen Justierung von Quell- und Sondenachse von Versuch zu Versuch, aber auch während einer Meßreihe angesehen. Der Fehler der Empfindlichkeiten ΔS_g und ΔS_{Al} (Abb. 17 und 18) wurde aus den Meßwertstreuungen ΔI für die jeweilige Schichtdicke d berechnet. Aus Gl.(43) bzw. (44) folgt nach dem Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetz

$$\Delta S_g = \frac{640 \text{ kg/m}^3}{110 \text{ kg/m}^3} \frac{1}{I(640 \text{ kg/m}^3)} * \quad (45)$$

$$* \sqrt{\Delta I^2(700 \text{ kg/m}^3) + \Delta I^2(590 \text{ kg/m}^3) + \left(\frac{I(700) - I(590)}{I(640)} \Delta I(640)\right)^2}$$

$$\Delta S_{Al} = \frac{100}{18,6} \frac{1}{I(10,3\%Al)} * \quad (46)$$

$$* \sqrt{\Delta I^2(0\%Al) + \Delta I^2(18,6\%Al) + \left(\frac{I(0\%Al) - I(18,6\%Al)}{I(10,3\%Al)} \Delta I(10,3\%Al)\right)^2}$$

Der Fehler ΔS_{Al} wurde für $d \geq 18,8$ cm ohne Berücksichtigung der Streuung $\Delta I(18,6\%Al)$ berechnet, da in diesem Bereich nur ein Wert für $I(18,6\%Al)$ vorlag. Er ist daher größer als in Abbildung 18 angegeben (gestrichelte Darstellung).

5.4.3. Modellberechnung der signalbildenden Strahlungskomponenten

Meßreihen, die unter Verwendung der Sonde 23 149 mit einem NaJ(Tl)-Kristall von 38 mm Durchmesser und 38 mm Länge gewonnen wurden, zeigen für Meßgutdicken $d = 0$ die höchsten Impulsraten (Abb. 15 u. 16). Da Vorwärtsstreuung ohne Streumaterial nicht auftreten kann (vgl. Abb. 8), ist dieser Effekt nur durch eine Strahlungskomponente I_{TM} erklärbar, die durch Reflexion der von der Strahlungsquelle kommenden Primärstrahlung am Sondengehäuse signalwirksam wird (vgl. Abb. 9). Durch geeignete Sondenabschirmungen kann der für die Rückstreuung in den Detektorkristall wirksame Winkel verkleinert werden, wodurch sich der Einfluß dieser Strahlungskomponente verringern, aber nicht vollständig unterdrücken läßt.

Die reflektierte Primärstrahlung wird mit wachsender Meßgutdicke zunehmend durch Quantenabsorption und -streuung geschwächt. Hier wird die Gültigkeit einer exponentiellen Strahlenschwächung vorausgesetzt, so daß man unter Vernachlässigung des wegen $\alpha \neq 0$ gegenüber $d = Z_2 - Z_1$ etwas längeren tatsächlich im Meßgut zurückgelegten Weges der Primärquanten analog zu Gl.(1) erhält

$$I_{TM} = I_0 \exp(-\mu_{60} \Omega d) . \quad (47)$$

I_0 entspricht der gemessenen Impulsrate ohne Streugut nach Subtraktion des Nulleffektes.

In gleicher Weise wie primäre werden auch vorwärtsgestreute Quanten am Sondengehäuse in den Detektorkristall gestreut (Abb. 9). Zur Berücksichtigung dieses Einflusses wurde die Flußdichte vorwärtsgestreuter Quanten an der Sondengehäusefront I_{VSS} für jede Meßgutdicke nach dem in 5.3. vorgestellten Modell berechnet. Als Ort der Rückstreuung wurde ein 1 mm breiter Gehäusekreisring unmittelbar um den Detektorkristall (Innendurchmesser D_D) angenommen, der aus folgenden Gründen als bevorzugt anzusehen ist:

- a) die Wahrscheinlichkeit der Rückstreuung in den Kristall hinein ist hier wegen des größten wirksamen Streuwinkels (maximal Π) am höchsten
- b) Rückstreuersättigungsdicke für 60 keV-Quanten ist wegen eines im Sondeninneren befindlichen zylinderrohrförmigen Distanzstückes nur in diesem Bereich gegeben.

Die Komponenten I_{VSS} und I_{VS} der im Meßgut zur Sondengehäusefront bzw. direkt in den Detektor gestreuten Strahlung wurden für die in Abbildung 15 und 16 dargestellten Meßreihen unter Verwendung der in Tabelle 5 zusammengestellten Stoffparameter berechnet. Der Einfluß der Placrylunterlage ist dabei berücksichtigt worden.

Tab. 5: Dichte ρ , Massenschwächungskoeffizient für 60 keV-Quanten μ_{60} und Elektronenkonzentration n_E der experimentell verwendeten Meßgutmaterialien

| Material | ρ /kg/m ³ / | $\mu_{60}^{1)}$ /m ² /kg/ | n_E /10 ²³ El./g/ |
|-------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------|
| Spanplatte | 700 4) | 0,01925 2) | 3,195 2) |
| | 640 4) | | |
| | 590 4) | | |
| ----- | | | |
| Spanplatte mit Al-Zwischenlagen entsprechend 3) | | | |
| 10,3 Gew.%Al | 758 | 0,02015 2) | 3,165 2) |
| 18,6 " | 812 | 0,02085 2) | 3,14 2) |
| 25,6 " | 863 | 0,02145 2) | 3,12 2) |
| Piacryl | 1 200 | 0,0192 5) | 3,22 5) |

1) nach /134/

2) berechnet unter der Annahme einer aus reiner Zellulose (C₆H₁₀O₅)_n bestehenden Spanplatte

3) berechnet für - Dicke der Spanplatte: 1,68 cm
 - Dicke der Al-Folie : 0,05 cm
 - Dichte von Al: 2 694 kg/m³

4) Dicke der Distanzstücke: 0,05 cm

5) berechnet für die Summenformel von Piacryl (C₄H₆O₂)_n

Der Vergleich von berechneten Quantenflüssen mit den experimentell bestimmten Vorwärtstreusignalen ist nicht unmittelbar möglich, da zur Umrechnung der Strahlungskomponenten I_{VSS} und I_{VS} in Impulsdichten der absolute Quantenfluß der verwendeten δ -Quelle, der Rückstreuoeffizient des Sondengehäuses und die Detektoreffektivität exakt bekannt sein müßten.

Zur Ermittlung der unbekanntenen Größen wurden als Anschlußmessung die an Spanplatten ($\rho = 700 \text{ kg/m}^3$) gewonnenen mittleren Meßwerte verwendet. Für diese war die Meßwertanzahl am größten, und es sind keine systematischen Fehlerbeiträge durch Abweichungen

der Dicken der verwendeten Distanzstücke oder Al-Folien von den der Rechnung zugrunde liegenden Werten zu befürchten. Unter Benutzung des Ansatzes

$$I_{\text{Exp korr}} = c_1 I_{\text{VS}} + c_2 I_{\text{VSS}} \quad (48)$$

wurden die Umrechnungskoeffizienten nach der Methode der kleinsten mittleren quadratischen Abweichung zu

$$c_1 = 8,849 \cdot 10^{-3} \quad \text{und} \quad c_2 = 2,655 \cdot 10^{-2}$$

(gültig für eine Quellstärke der Modellquelle von $5 \cdot 10^{-9}$ Quant./s) bestimmt. Dabei ist

$$I_{\text{Exp korr}} = I_{\text{Exp}} - I_{\text{Oo}} - I_{\text{TM}} \quad (49)$$

mit

- I_{Exp} gemessene Impulsdichte
- I_{Oo} Nulleffekt
- I_{TM} Impulsdichte nach Gl.(47) als Folge der Reflexion primärer Quanten am Sondengehäuse

Die aus der Anschlußmessung ermittelten Umrechnungsfaktoren c_1 und c_2 wurden für alle in Abbildung 15 und 16 dargestellten Meßreihen verwendet. Die Modellimpulsrate I_{MOD} ergibt sich als Summe der einzelnen Modellkomponenten

$$I_{\text{MOD}} = c_1 I_{\text{VS}} + c_2 I_{\text{VSS}} + I_{\text{TM}} + I_{\text{Oo}} \quad (50)$$

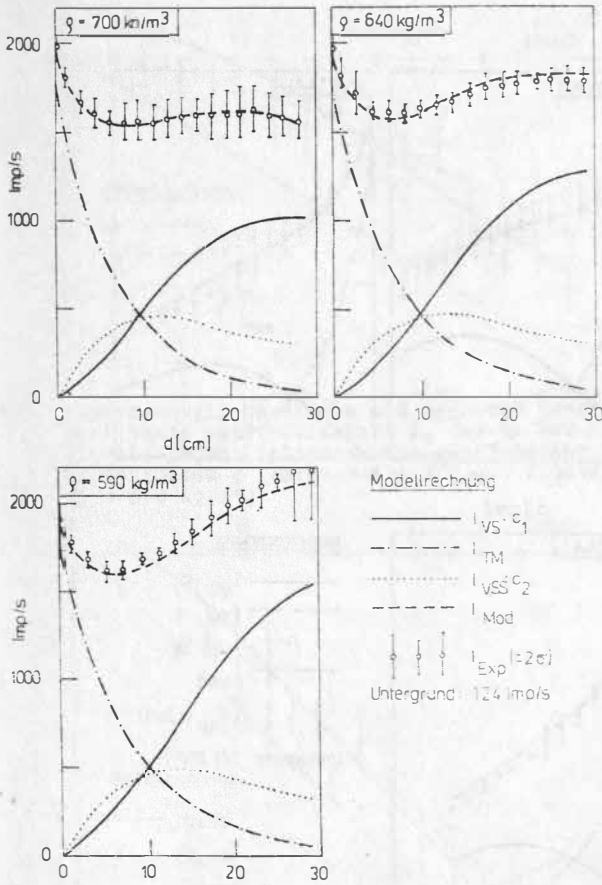


Abb. 15: Vergleich experimenteller und nach dem vorgestellten Comptonstreumodell berechneter 60 keV- γ -Vorwärtsstreuimpulsraten für Spanplattenstapel unterschiedlicher Dicke d und Dichte ρ

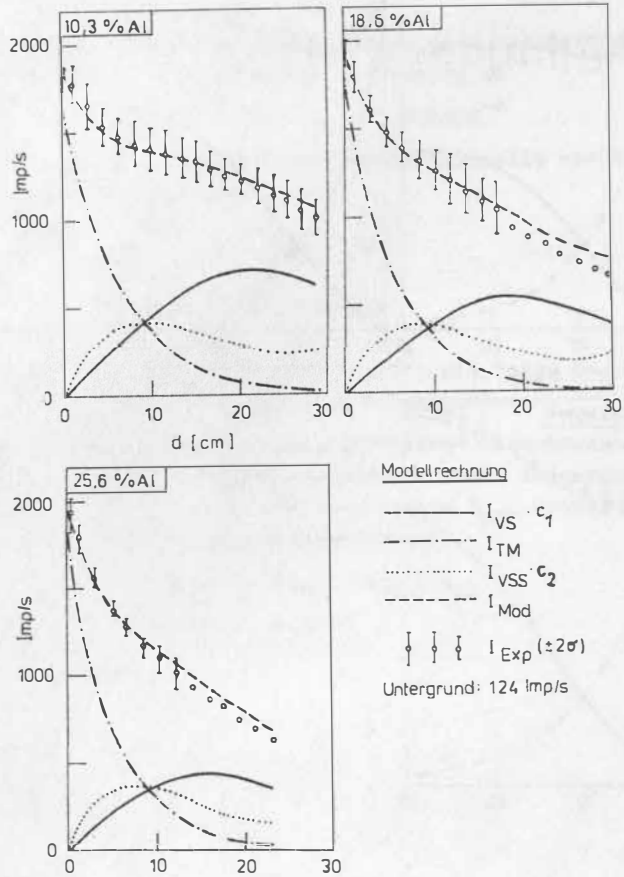


Abb. 16: Vergleich experimenteller und nach dem vorgestellten Comptonstreumodell berechneter 60 keV- γ -Vorwärtsstreueimpulsraten für Stapel aus Spenplatten und Al-Folien unterschiedlicher Dicke d mit verschiedenen Al-Gehalten

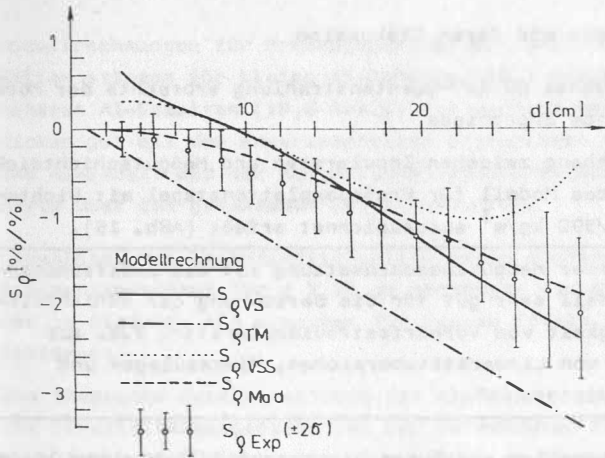


Abb. 17: Experimentell bestimmte und nach dem Comptonstreumodell berechnete Empfindlichkeit S_Q des 60 keV- γ -Vorwärtsstreusignals gegen Dichteänderung als Funktion der Meßgutschichtdicke d (dargestellt für $\mu = 0,01925 \text{ m}^2/\text{kg}$, $Q = 640 \text{ kg/m}^3$)

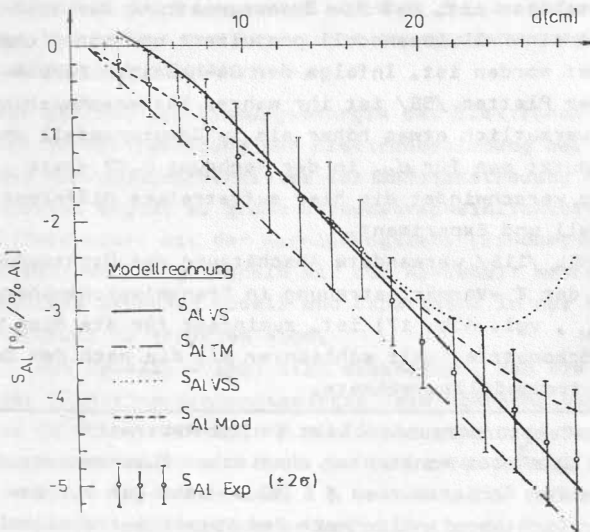


Abb. 18: Experimentell bestimmte und nach dem Comptonstreumodell berechnete Empfindlichkeit S_{Al} des 60 keV- γ -Vorwärtsstreusignals gegen Änderung des Al-Gehaltes als Funktion der Meßgutschichtdicke d (dargestellt für 10,3 % Al-Gehalt entsprechend $\mu = 0,02015 \text{ m}^2/\text{kg}$, $Q = 758 \text{ kg/m}^3$)

5.4.4. Ergebnisse und deren Diskussion

Für die untersuchte 60 keV-Quantenstrahlung erbrachte der Modellgütetest folgende Ergebnisse

- 1) Der Zusammenhang zwischen Impulseraten und Meßgutechichtdicken wird durch das Modell für Preßspanplattenstapel mit Dichten von 700/640/590 kg/m³ ausgezeichnet erfaßt (Abb. 15).

Bei konstanter Meßgutzusammensetzung ist das Zweifachcomptonstreumodell sehr gut für die Berechnung der Schichtdickenabhängigkeit von Vorwärtstreuimpulseraten, z.B. zur Ermittlung von Linearitätsbereichen, Plateaulagen und -längen geeignet.

- 2) Die experimentellen absoluten Dichteempfindlichkeiten liegen systematisch etwa 0,1 %/‰ über den Modellwerten. Diese Differenz ist kleiner als die mittlere Streuung (1σ) der Meßwerte und muß nicht unbedingt als Fehler des Streumodells gewertet werden. Zu beachten ist, daß die Zusammensetzung der Spanplatten durch ein Zellulosemodell postuliert und nicht chemisch bestimmt worden ist. Infolge der Ba-haltigen Farbbeschichtung der Platten /58/ ist ihr wahrer Massenschwächungskoeffizient vermutlich etwas höher als im Comptonmodell angenommen. Benutzt man für μ_{60} in der Rechnung 0,02 statt 0,01925 m²/kg, verschwindet die hier aufgetretene Differenz zwischen Modell und Experiment.

Die von THÜMMEL /115/ verwendete Abschätzung der Dichteempfindlichkeit der σ -Vorwärtstreuung in Transmissionsnäherung ($S_{gMOD} = S_{gTM}$, vgl. Abb. 17) ist, zumindest für die hier betrachtete Meßgeometrie, weit schlechter als die nach dem Zweifach-Comptonstreumodell berechnete.

Das Zweifach-Comptonstreumodell ist im Dichtebereich 700 ... 590 kg/m³ bei konstanter chemischer Zusammensetzung des Meßgutes für Schichtdicken $d < 30$ cm sehr gut zur Berechnung der Dichteempfindlichkeit des Vorwärtstreuensignals geeignet.

3) Modellrechnungen für Preßspanplatten mit zwiechengelegten Al-Folien stimmen für kleine Al-Gehalte (10,3 Gew.%) und bei höheren Al-Gehalten (18,6 Gew.%) für geringe Meßgutschichtdicken gut mit den experimentellen Ergebnissen überein. Mit dem Al-Gehalt und der Meßgutdicke zunehmend, liegen die Modellwerte über den gemessenen Daten (Abb. 16).

Die absoluten Modellempfindlichkeiten gegen Al-Gehalteänderung sind dementsprechend für $d > 18$ cm gegenüber den experimentellen Werten zu niedrig. Als Ursachen für diesen Effekt sind zu diskutieren:

a) Die chemische Zusammensetzung der Al-Folien

Die Elastizitätseigenschaften der verwendeten Folien weisen darauf hin, daß diese nicht aus reinem Al bestehen /58/. Nimmt man Legierungsmetalle an, die durch Veränderung von Massenschwächungskoeffizient, Dichte und Elektronenkonzentration so wirken, als betrüge der Al-Gehalt der Modellschicht 10,9 statt 10,3 bzw. 19,6 statt 18,6 Gew. %Al, so liefert das Modell mit dem Experiment übereinstimmende Impulsraten und Al-Empfindlichkeiten.

b) Der Einfluß der Bindungsenergie der Elektronen

Die Vernachlässigung der Elektronenbindung bei der Berechnung des Wirkungsquerschnittes der Comptonstreuung nach KLEIN-NISHINA ergibt zu große Streuwahrscheinlichkeiten. Dieser Effekt nimmt mit der Kernladungszahl (Bindungsenergie der Elektronen) zu, weshalb mit dem Al-Gehalt wachsende Unterschiede zwischen Modell und Experiment in der beobachteten Richtung zu erwarten sind.

Aus Tabelle 4 läßt sich abschätzen, daß die Vergrößerung der Elektronenbindungsenergie beim Übergang von Zellulose zu Zellulose mit 25,6 % Al-Gehalt eine Differenz zwischen experimenteller und nach dem benutzten Modell berechneten Impulsraten von maximal 1 % bewirkt. Die tatsächlich beobachteten Unterschiede betragen bis zu 10 %.

c) Der Einfluß von Mehrfachstreuung

Die vom Modell nicht erfaßte Mehrfachstreuung liefert einen mit der Meßgutschichtdicke zunehmenden Signalanteil. Möglicherweise äußert sich dieser im Falle 0 % Al, $\rho = 700 \text{ kg/m}^3$ durch das gewählte Normierungsverfahren nicht in gegenüber dem Modell erhöhten Meßwerten, sondern bewirkt bei wachsenden Al-Gehalten den beobachteten Effekt von gegenüber dem Modell verringerten Impulsraten. Die Zunahme von Dichte und Massenschwächungskoeffizient mit dem Al-Gehalt bewirkt eine Abnahme der Reichweite mehrfachgestreuter Quanten, wodurch die beobachteten Erhöhungen der absoluten experimentellen Al-Gehaltsempfindlichkeiten erklärt werden könnten. Bei Annahme eines meßwirksamen Mehrfachstreueffektes wird jedoch die sehr gute Übereinstimmung von Modell und Experiment hinsichtlich der Dichteempfindlichkeit S_ρ unverständlich, da sich die Halbwertsschichtdicke $d_{1/2}$ für 60 keV-Quanten beim Übergang von $\rho = 700 \rightarrow 590 \text{ kg/m}^3$ ($d_{1/2} = 5,14 \rightarrow 7,87 \text{ cm}$) stärker ändert, als beim Übergang von 0 \rightarrow 18,6 % Al ($d_{1/2} = 5,14 \rightarrow 4,09 \text{ cm}$).

d) Der Einfluß elastischer Streuung

Das Verhältnis von elastisch und inelastisch gestreuten Quanten ist eine Funktion der effektiven Ordnungszahl Z_{eff} des Streumediums und läßt sich aus Abbildung 14 abschätzen. Für Zellulose ($Z_{\text{eff}} = 6,68$) beträgt der elastische Anteil ca. 4 %. Er erhöht sich für Zellulose mit 25,6 % Al-Gehalt ($Z_{\text{eff}} = 8,3$) auf ca. 6 %. Wegen des angewendeten Normierungsverfahrens wird lediglich die Änderung des Rayleighstreuanteils wirksam und führt zu gegenüber dem Modell um maximal 2 % erhöhten Meßwerten, bei Al-Gehalten bis zu 25,6 %. Die elastische Streuung wirkt also entgegengesetzt zum beobachteten Effekt. Ihr Einfluß dürfte wegen der hohen Meßwertstreuungen nur schwer im Datenmaterial nachweisbar sein.

e) Der experimentelle Fehler

Zur Berechnung von S_{Al} waren für $d > 18$ cm und 18,6 %Al-Gehalt nur je ein Meßwert verfügbar. In diesem Datensatz sind, vermutlich infolge einer anderen Justierung des Meßaufbaus, systematisch niedrigere Impulsraten als in den anderen Meßreihen zu verzeichnen. Dadurch verstärkt sich die Differenz der Al-Gehaltsempfindlichkeit von Modell und Messung für $d > 18$ cm.

Das Zweifachcomptonstreumodell ist gut zur Berechnung von Vorwärtsstreimpulsraten und Gehaltsempfindlichkeiten für Meßgut mit unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung bei Schichtdicken $d < 18$ cm geeignet. Für ein aus Preßspanplatten mit Al-Zwischenlagen bestehendes Modellmeßgut traten bei Schichtdicken $d > 18$ cm sowie bei Al-Gehalten $> 18,6$ Gew. % Al deutliche Unterschiede zu den experimentellen Werten auf, deren Ursachen nicht vollständig geklärt werden konnten. Als Hauptgrund wird eine andere chemische Zusammensetzung der verwendeten Al-Folien als die im Modell angesetzte vermutet.

5.5. Bisher nicht bekannte Eigenschaften der δ -Vorwärtsstreuung

Die für vorliegende Arbeit durchgeführten experimentellen und theoretischen Untersuchungen zur δ -Vorwärtsstreuung ließen einige in der Literatur bisher nicht oder nur ungenau beschriebene Eigenschaften dieser Meßanordnung deutlich werden. Sie ermöglichen unter bestimmten Gegebenheiten der Meßstelle eine vorteilhafte Anwendung der δ -Vorwärtsstreuung für radiometrische Problemstellungen auch außerhalb der Aufgabe der Kohlequalitätsüberwachung und waren die Grundlage für mehrere Patentanmeldungen.

Im einzelnen wurden gefunden

- 1) Rechnungen für den im Meßgut vorwärts- und am Sondengehäuse zurückgeetreuten Strahlungsanteil I_{VSS} weisen auf die Existenz eines Dickenbereiches hin (hier um 24 cm, vgl. Abb. 16 und 18), innerhalb dessen sowohl die Impulsrate als auch die Gehaltsempfindlichkeit unabhängig von der Meßgutdicke sind. Bisher ließen sich für 60 keV-Vorwärtsstreuanordnungen mit zylindrischen Detektoren experimentell nur Bereiche der Schichtdickenunabhängigkeit des Meßsignals nachweisen, in denen die Aecheempfindlichkeit proportional der durchstrahlten Meßgutdicke war. THOMMEL stellt daher fest, daß die γ -Vorwärtsstreuung wegen der Abhängigkeit ihrer Eichkurve von der Meßgutdicke nur in Verbindung mit einer aktuellen Meßgutdickeninformation als on-stream Gehaltsbestimmungsverfahren einsetzbar ist. Er schlägt hierfür eine Kombination von 60 keV- γ -Vorwärtsstreuung und 660 keV- γ -Transmission vor /121/.

Eine experimentelle Bestätigung des vom Modell prognostizierten Bereiches der Schichtdickenunabhängigkeit von Impulsrate und Gehaltsempfindlichkeit für eine Vorwärtsstreuanordnung mit ringförmigem Detektor steht noch aus. Eine Vergrößerung der Plateaulänge durch Veränderung geometrischer Parameter ist denkbar.

Modellrechnungen weisen auf die Existenz von Schichtdickenbereichen mit konstanter Impulsrate und Gehaltsempfindlichkeit der γ -Vorwärtsstreuung hin. Innerhalb solcher Bereiche ist das γ -Vorwärtsstreuverfahren ohne zusätzliche Dickenkorrektur als on-stream Verfahren einsetzbar.

- 2) Die Dichteempfindlichkeit S_g der γ -Vorwärtsstreuung ist für kleine durchstrahlte Meßgutdicken d positiv, für große negativ. Es existiert eine Dicke d_0 mit $S_g = 0$, für die das Meßsignal gegen Gehaltsänderung empfindlich ist (Abb. 19).

Die γ -Vorwärtsstreuung ist zur dichteunabhängigen Gehaltsbestimmung von Fördergütern bei konstanter Durchstrahlungsdicke des Meßgutes d_0 geeignet.

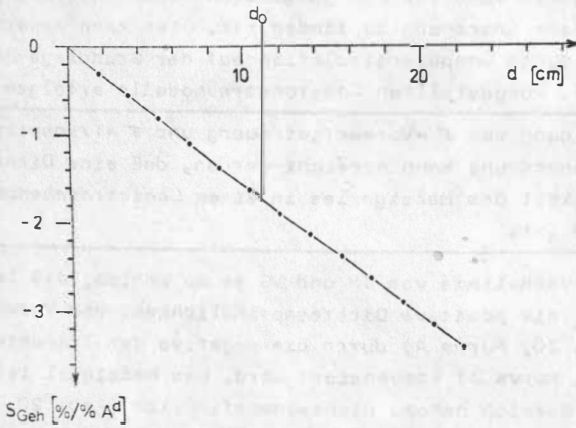
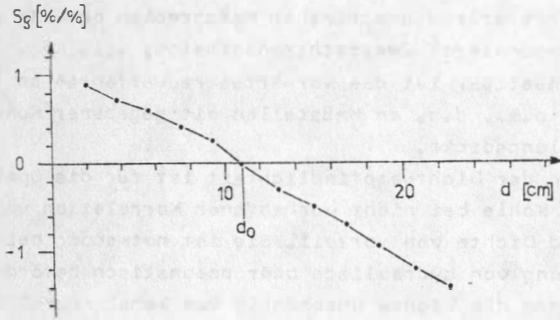


Abb. 19: Dichte- (S_G) und Gehaltsempfindlichkeit (S_{Geh}) einer 60 keV- γ -Vorwärtsstreuemeßstrecke

Diese Lösung ist einfacher und billiger als die bekannten Methoden der dichteunabhängigen Gehaltsbestimmung, die auf der Kombination mehrerer radiometrischer Meßstrecken beruhen (z.B. flächenmassekompenzierte Zweifachtransmission, vgl. Kap. 3.5.2.). Vorteilhaft einsetzbar ist das Vorwärtsstreuverfahren an Schurren und Rohren o.ä., d.h. an Meßstellen mit gegebener Konstanz der Durchstrahlungsdicke.

Die Elimination der Dichteempfindlichkeit ist für die Qualitätsbestimmung von Kohle bei nicht vorhandener Korrelation von Aschegehalt und Dichte von Vorteil. Sie ist notwendig bei der Gehaltsbestimmung von hydraulisch oder pneumatisch beförderten Gütern, bei denen die Dichte unabhängig vom Gehalt durch Luftblasen oder den Anteil des Fördergutes im Luftstrom bestimmt wird.

Die Durchstrahlungsdicke d_0 ist abhängig von der gewählten Meßgeometrie, weshalb eine für den jeweiligen Anwendungsfall geeignete geometrische Anordnung zu finden ist. Dies kann experimentell und/oder durch Computersimulation auf der Grundlage des im Kapitel 5.3. vorgestellten Comptonstreuomodells erfolgen /32/.

Durch Vereinigung von σ -Vorwärtsstreuung und σ -Transmission in einer Meßanordnung kann erreicht werden, daß eine Dichteunempfindlichkeit des Meßsignales in einem Schichtdickenbereich gegeben ist.

Dabei ist das Verhältnis von TM und VS so zu wählen, daß im Bereich $d < d_0$ die positive Dichteempfindlichkeit der Vorwärtsstreuung (Abb. 20, Kurve A) durch die negative der Transmission (Abb. 20, Kurve B) kompensiert wird. Das Meßsignal ist dann in einem Bereich nahezu dichteunempfindlich (Abb. 20, Kurve C). Das erforderliche Verhältnis TM/VS kann z.B. durch eine Bohrung entsprechenden Durchmessers in der Blende der VS-Anordnung realisiert werden. Es ist mit Hilfe des vorgestellten mathematischen Modells vorherberechenbar.

Zur Gehaltsbestimmung ist die vorgeschlagene TM/VS-Anordnung wegen der Schichtdickenabhängigkeit der Gehaltsempfindlichkeit S_{Geh} ebenfalls nur bei konstanter Durchstrahlungsdicke einsetzbar (Abb. 20). Sie besitzt gegenüber einer reinen VS-An-

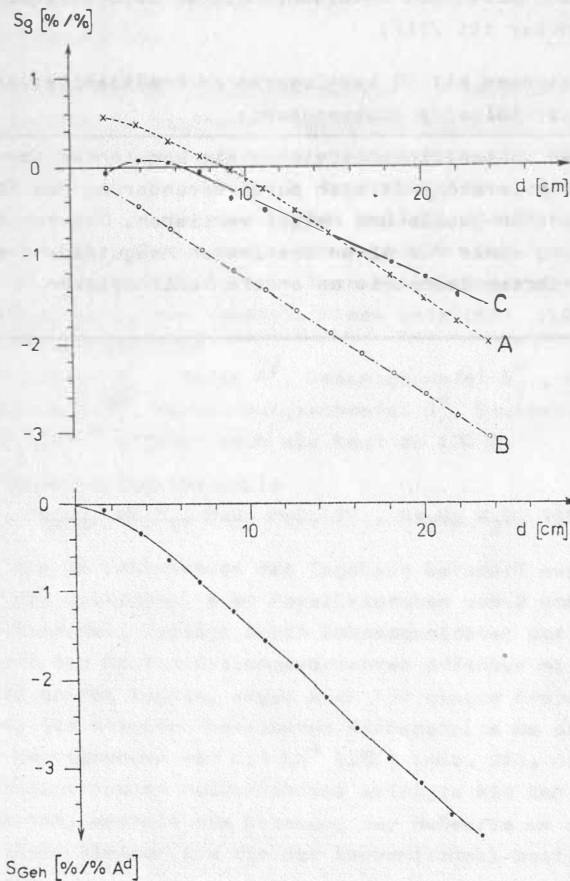


Abb. 20: Dichteempfindlichkeit S_g einer 60 keV- σ -Vorwärtsstreu- (A) und einer σ -Transmissionsmeßstrecke (B) sowie einer Meßanordnung, in der beide Methoden kombiniert worden sind (C). Die Gehaltsempfindlichkeit S_{Geh} ist für die TM/VS-Kombination dargestellt.

ordnung den Vorteil, daß eine gefundene Geometrie für verschiedene Meßstellen mit unterschiedlichen Durchstrahlungsdicken anwendbar ist /31/.

- 3) Bei Labormessungen mit 60 keV-Quanten an Preßspanplatten ergab sich der folgende Zusammenhang:

Die Lage des Schichtdickenbereiches mit konstanter Vorwärtsstreuimpulsrate läßt sich durch Veränderung des Abstandes zwischen Quelle und Meßgut variieren. Dadurch ist die Anpassung einer für einen bestimmten Meßgutdickenbereich optimierten Geometrie an andere Schichtdicken möglich /30/.

6. 60 keV- γ -Vorwärtsstreuungsmessungen zur Aschegehaltsbestimmung von Rohbraunkohle aus den Tagebauen Nochten und Berzdorf

6.1. Probenmaterial

Im Rahmen der Entwicklungsarbeiten für eine on-stream Aschegehaltsmeßstelle im Kraftwerk "Völkerfreundschaft" (KWV) Hagenwerder wurden Versuchsmessungen an Rohkohlen mit vorwärtsgestreuten 60 keV- γ -Quanten durchgeführt, deren Ergebnisse in diesem Kapitel vorgestellt und diskutiert werden sollen. Die 73 Kohleproben (Masse $>$ 50 kg) stammten aus den Tagebauen Nochten und Berzdorf (vgl. Tab. 6). Ihre chemische Zusammensetzung war aus vorliegenden Kohlevollanalysen bekannt. Diese umfaßten:

- die Kohlekomponenten

Gesamtwasser W_t^r , Asche A^d , Gesamtschwefel S_t^d , Kohlenstoff C^d , Wasserstoff H^d , Verbrennungsschwefel S_c^d ; Sauerstoff und Stickstoff (O+N)^d ergaben sich als Rest zu 100 %

- die Aschehauptbestandteile

SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , CaO, MgO, SO_3 , Na_2O , K_2O , TiO_2 .

Für die 26 Kohleproben des Tagebaus Berzdorf aus dem Jahre 1982 wurden die Aschegehalte an Parallelproben von 2 unabhängigen Labors bestimmt. Bedingt durch Inhomogenitäten der Gesamtprobe, die durch das Routineteilungsverfahren offenbar nicht völlig ausgeschaltet werden können, ergab sich für diesen Probensatz eine Streuung der chemisch bestimmten Aschegehalte um den Mittelwert beider Bestimmungen von 1,2 %A^d (16) (Abb. 21). Die Kalibrierung des radiometrischen Meßverfahrens erfolgte mit den chemischen Aschewerten, weshalb die Streuung der Meßwerte um die Kalibrierkurve nicht kleiner als die der konventionell bestimmten Aschewerte sein kann.

Tab. 6: Kohleproben, an denen Versuchsmessungen mit vorwärtsge-
streuter 60 keV- γ -Strahlung zur Aschegehaltsbestimmung
durchgeführt wurden

| Herkunft | Tagebau Nochten | | Tagebau Berzdorf | |
|--------------------------------|-----------------|--|------------------|---------------|
| Kurzbezeichnung | Nochten 80 | | Berzdorf 81 | Berzdorf 82 |
| Zeitraum der Probenahme | Nov.-Dez. 80 | | 7.7.-10.7.81 | 15.4.-29.4.82 |
| Anzahl der Proben | 30 | | 17 | 26 |
| Körnung /mm/ | 0 - 30 | | 0 - 10 | 0 - 10 |
| Wassergeh. %/ | 53,3 - 58,3 | | 49,2 - 57,3 | 43,7 - 56,2 |
| Aschegehalt % ^d / | 5,7 - 26,3 | | 16,3 - 39,3 | 8,9 - 51,8 |
| in der Asche %/: | | | | |
| SiO ₂ | 20,8 - 62,2 | | 46,2 - 53,4 | 37,4 - 56,8 |
| Al ₂ O ₃ | 2,7 - 16,3 | | 27,2 - 32,5 | 24,7 - 33,5 |
| Fe ₂ O ₃ | 8,0 - 23,2 | | 3,8 - 6,7 | 3,8 - 13,4 |
| CaO | 5,6 - 19,1 | | 1,5 - 9,3 | 2,4 - 10,5 |
| MgO | 0,9 - 8,8 | | 2,2 - 4,8 | 0,2 - 2,3 |
| SO ₃ | 3,0 - 25,2 | | 1,5 - 5,1 | 2,2 - 9,0 |
| Na ₂ O | nicht best. | | 0,1 - 0,4 | 0,03- 0,54 |

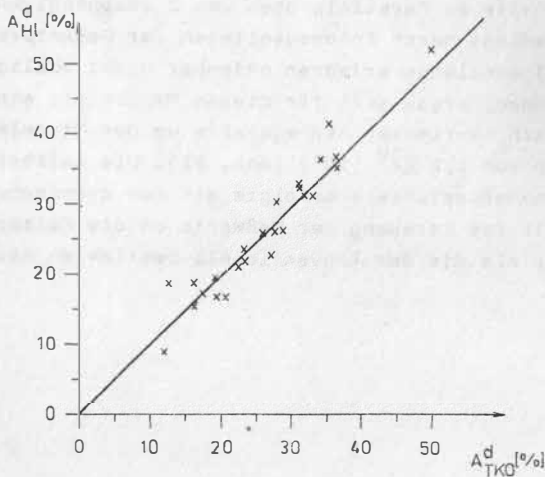


Abb. 21: Aschegehalte des Probensatzes Berzdorf 82, bestimmt an
Parallelproben durch zwei unabhängige Labors

6.2. Versuchsdurchführung und Meßergebnisse

Vorwärtsstremessungen erfolgten an 73 unbewegten Kohleproben bei gleichbleibender Schütthöhe im Labormeßstand. Die für die Untersuchungen an Modellsubstanzen verwendete Meßgeometrie (siehe Kap. 5.4.2.) wurde beibehalten.

Zur Messung wurden die Kohleproben in einen Meßgutkasten (Innenmaße: 41 x 56 x 20 cm³) geschüttet, der zur Simulation des an der Meßstelle im KWV eingesetzten Gurtbandes mit einem 10 mm starken Piecrylboden versehen war. Zur Vermeidung von subjektiven Einflüssen auf die Schüttdichte der Kohle wurde jede Probe auf einem Rütteltisch verdichtet. Nach Glättung der Kohleoberfläche mittels Abstreifer (Schütthöhe (200±5)mm) erfolgten die Wägung und radiometrische Messung der Probe. Die Gesamtprozedur wurde jeweils 5 - 10mal durchgeführt, woraus sich die Meßwertstreuung für die Einzelprobe ergab. Die Mittelwerte des σ -Vorwärtsstreusignals I_{VS} wurden mit den chemischen Aschewerten kalibriert (Abb. 22). Die Berechnung der Kalibrierkurve erfolgte durch lineare Regression. Die Linearität des Zusammenhangs von Aschegehalt und Vorwärtsstreuimpulsrate wurde hier, wie auch sonst in der Literatur üblich /131/, angenommen. Die Verwendung des Ansatzes $A^d = c_1 + c_2 \ln I_{VS}$ ergab für die untersuchten Kohlen um 0,1 bis 0,2 %A^d kleinere Streuungen der Aschewerte.

Tab. 7: Ergebnisse der 60 keV- σ -Vorwärtsstremessungen zur Aschegehaltsbestimmung von Rohbraunkohleproben

| Probensatz | Regressionsgerade | Korrelationskoeffizient | Streuung σ /%A ^d / | mittlere Meßwertstreuung der Einzelprobe (% rel.) |
|------------------------------------------|------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Nochten 80 | $A^d = 59,8 - 0,0079 I_{VS}$ | - 0,884 | 2,0 | 2,1 |
| Berzdorf 81 | $A^d = 75,4 - 0,0112 I_{VS}$ | - 0,943 | 2,3 | 1,2 |
| Berzdorf 82 | $A^d = 61,3 - 0,0091 I_{VS}$ | - 0,885 | 4,4 | 1,8 |
| Nochten 80 Berzdorf 81 Berzdorf 82 | $A^d = 57,2 - 0,0076 I_{VS}$ | nicht berechnet | 3,6 | 1,8 |

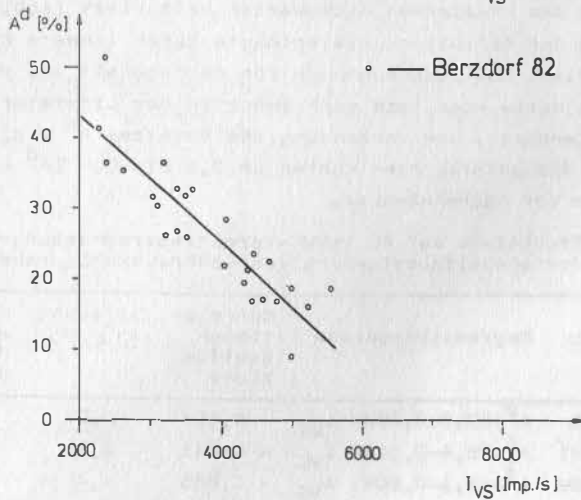
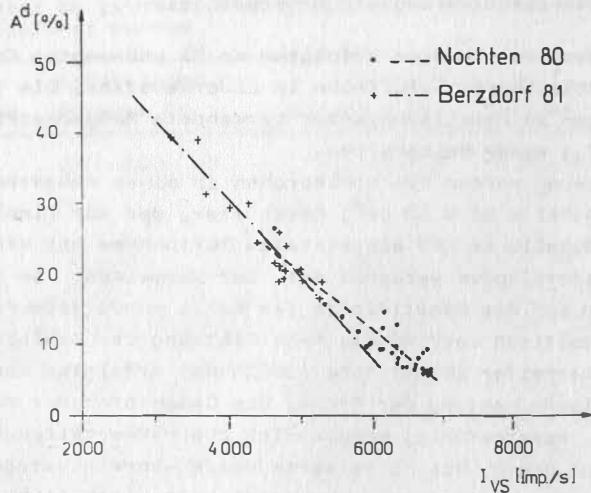


Abb. 22: Kalibrierung des 60 keV- γ -Vorwärtstreusignals I_{VS} zur Aschegehaltsbestimmung von Rohbraunkohle aus den Tagebauen Nochten und Berzdorf

Wie Abbildung 22 und Tabelle 7 zeigen, ergeben sich für die untersuchten Probensätze unterschiedliche Kalibrierkurven. Beachtenswert ist, daß sich diese für den Tagebau Berzdorf für Proben aus den verschiedenen Jahren unterscheiden. Die Verwendung einer gemeinsamen Kalibriergeraden für alle Proben führt zu einer Erhöhung des Aschebestimmungsfehlers (Tab. 7, 4. Zeile).

Für die Aschegehaltsbestimmung nach dem 60 keV- γ -Vorwärtstreuverfahren gelten für Rohbraunkohlen verschiedener Herkunft unterschiedliche Kalibrierkurven. Für Mischkohlen ist daher mit einer Vergrößerung des Meßfehlers zu rechnen. Für einen Tagebau kann sich die Kalibrierkurve mit der Zeit verändern. Ihre Kontrolle wird in bestimmten Abständen empfohlen.

Für den Probensatz Berzdorf 1982 wurde eine deutlich höhere Streuung der Meßwerte um die Regressionsgerade als für die übrigen Kohleproben gefunden. Ähnliche Werte ergeben sich für 96 Einzelmessungen mit vorwärts- ($\sigma = 4,4 \%A^d$) und rückgestreuter ($\sigma = 5,0 \%A^d$) 60 keV- γ -Strahlung, die im Versuchszeitraum 1982 parallel zu den vorgestellten Aschegehaltsbestimmungen am Meßband des KWV durchgeführt wurden /29/.

6.3. Korrelative Zusammenhänge von Meßgrößen und Aschegehalt in den untersuchten Probensätzen

6.3.1. Dichte - Asche - Korrelation

Die Bestimmung der Kohleschüttdichte erfolgte für alle 73 Proben nach dem in 6.2. beschriebenen Verfahren. Zur Prüfung des Zusammenhanges der das Meßsignal beeinflussenden Schüttdichte (siehe Abb. 15 und 17) und des Aschegehaltes wurden die mittleren Dichten mit den chemisch bestimmten Aschegehalten nach einem linearen Regressionsansatz korreliert (Tab. 8, Abb. 23).

Für die beiden Probensätze aus dem Tagebau Berzdorf ergaben sich ähnliche $\rho - A^d$ -Korrelationen, die sich signifikant von der für Nochtener Kohle ermittelten Dichte - Asche - Beziehung unterscheiden.

Aus den gefundenen Dichte-Asche-Korrelationen lassen sich die zu erwartenden Aschebestimmungsfehler radiometrischer Dichtemeßverfahren (vgl. 3.5.1. und 4.4.) ableiten. Sie liegen deutlich über den für das 60 keV- γ -Vorwärtsstreuverfahren gefundenen Werten. Eine Aschegehaltsbestimmung durch Dichtemessung an Mischkohlen der Tagebaue Berzdorf und Nochten erscheint wenig aussichtsreich.

Tab. B: Korrelation von Schüttdichte ρ und Aschegehalt für Rohbraunkohlen der Tagebaue Nochten und Berzdorf

| Probensatz | Regressionsgerade | Korrelationskoeffizient | Streuung $\sigma_{\%A^d}$ |
|-------------|-----------------------------|-------------------------|---------------------------|
| Nochten 80 | $A^d = -76,4 + 0,118 \rho$ | 0,53 | 3,8 |
| Berzdorf 81 | $A^d = -125,0 + 0,205 \rho$ | 0,806 | 4,2 |
| Berzdorf 82 | $A^d = -106,6 + 0,187 \rho$ | 0,772 | 6,2 |

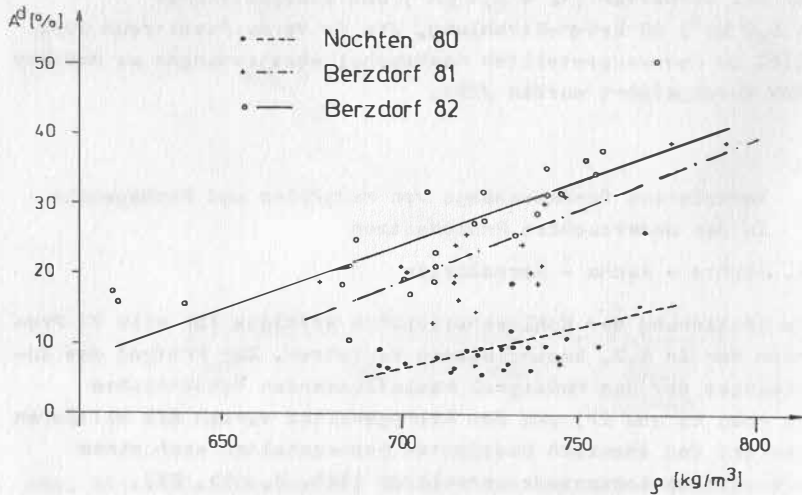


Abb. 23: Zusammenhang von Schüttdichte ρ und Aschegehalt für die untersuchten Rohbraunkohleproben

6.3.2. Massenschwächungskoeffizient - Asche - Korrelation

Die Massenschwächungskoeffizienten für 60 keV- γ -Strahlung μ_{60}^r wurden für die untersuchten Proben aus Kohlevollanalysen unter Verwendung der Tabellenwerte von VEIGELE /134/ berechnet und mit den chemisch bestimmten Aschegehalten korreliert (Tab. 9, Abb. 24).

Für die Probensätze Nochten 80 und Berzdorf 81 ergeben sich bei ähnlichen Korrelationskoeffizienten und Streuungen der Aschewerte ungefähr parallele Regressionsgeraden, die sich im Anstieg deutlich von der für den Probensatz Berzdorf 82 gefundenen unterscheiden.

Die beobachteten Differenzen der Kalibrierkurven des 60 keV- γ -Vorwärtsstreuverfahrens für die verschiedenen Probensätze lassen sich als Folge der aufgezeigten Unterschiede der Zusammenhänge von Massenschwächungskoeffizient und Aschegehalt unter Beachtung der unterschiedlichen Dichte-Asche-Korrelationen (vgl. Kap.6.3.1.) interpretieren. Die gefundenen Aschebestimmungsfehler des 60 keV- γ -Vorwärtsstreuverfahrens entsprechen den Streuungen der Aschewerte um die Regressionsgerade der $\mu_{60} - A^d$ - Korrelation, wenn man den Fehler der chemischen Aschegehaltsbestimmung berücksichtigt. Tagebautypische Korrelationen von Massenschwächungskoeffizient und Aschegehalt erhält man unter Verwendung der Analysendaten aus Erkundungsbohrungen stammender Proben und kann damit Aussagen zur Einsetzbarkeit des 60 keV- γ -Vorwärtsstreuverfahrens als Aschebestimmungsmethode für ein Abbaugebiet machen /29/.

Zusammenfassend ist festzustellen:

Der Aschebestimmungsfehler des 60 keV- γ -Vorwärtsstreuverfahrens in der verwendeten Meßgeometrie scheint hauptsächlich durch die Korrelation von Massenschwächungskoeffizient und Aschegehalt bestimmt zu werden.

Tab. 9: Korrelation von Massenschwächungskoeffizienten für 60 keV- γ -Strahlung μ_{60}^r und Aschegehalten für Rohbraunkohlen der Tagebaue Nochten und Berzdorf

| Probensatz | Regressionsgerade | Korrelationskoeffizient | Streuung $\frac{\sigma}{\%A^d}$ |
|-------------|-------------------------------------|-------------------------|---------------------------------|
| Nochten 80 | $A^d = -503,7 + 24\ 820 \mu_{60}^r$ | 0,872 | 1,1 |
| Berzdorf 81 | $A^d = -557,8 + 27\ 830 \mu_{60}^r$ | 0,975 | 1,6 |
| Berzdorf 82 | $A^d = -251,9 + 12\ 970 \mu_{60}^r$ | 0,905 | 4,1 |

Der Aschebestimmungsfehler einer radiometrischen μ -Meßmethode (z.B. der des flächemassekompensierten Zweienergie-Transmissionsverfahrens, vgl. Kap. 3,5.2.) läßt sich gleichfalls aus der berechneten $\mu - A^d$ -Korrelation abschätzen. Zu beachten ist jedoch, daß in den Rechnungen der Fehler der chemischen Aschegehaltsbestimmung nicht enthalten ist und schwankende Differenzen zwischen Asche- und Mineralstoffgehalt auftreten können (vgl. Kap. 2.2.). Daher ist, ähnlich wie beim 60 keV- γ -Vorwärtsstreuverfahren beobachtet, für ein μ -Meßverfahren ein tatsächlicher Aschebestimmungsfehler zu erwarten, der größer als der hier berechnete ist. Das bestätigte sich für Messungen mit dem flächemassekompensierten 60/660 keV-Zweienergie-Transmissionsverfahren am Probensatz Berzdorf 81, bei denen der Bestimmungsfehler 2,5 % A^d betrug /29/.

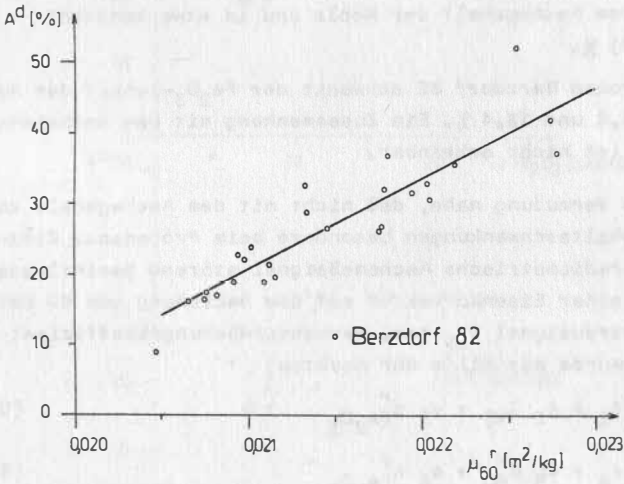
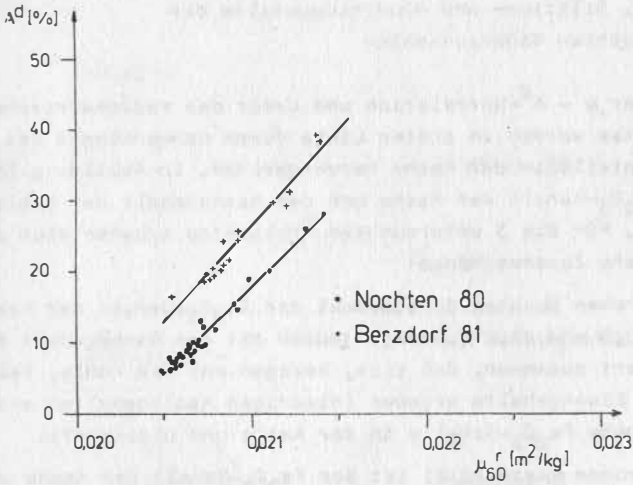


Abb. 24: Zusammenhang von Massenschwächungskoeffizient für 60 keV- γ -Strahlung μ_{60}^r und Aschegehalt für die untersuchten Rohbraunkohleproben

6.4. Eisen-, Silizium- und Aluminiumgehalte der untersuchten Rohbraunkohlen

Störungen der $\mu - A^d$ -Korrelation und damit des radiometrischen Aschemeißwertes werden in erster Linie durch Schwankungen des Eisenanteils in der Asche hervorgerufen. In Abbildung 25 sind der Fe_2O_3 -Gehalt der Asche und der Aschegehalt der Kohle dargestellt. Für die 3 untersuchten Probesätze ergeben sich unterschiedliche Zusammenhänge:

- Für die Proben Nochten 80 schwankt der Fe_2O_3 -Gehalt der Asche zwischen 8,0 und 23,2 %, hängt jedoch mit dem Aschegehalt der Kohle derart zusammen, daß sich, bezogen auf die Kohle, relativ konstante Eisengehalte ergeben (niedrigen Aschegehalten entsprechen hohe Fe_2O_3 -Gehalte in der Asche und umgekehrt).
- Für die Proben Berzdorf 81 ist der Fe_2O_3 -Gehalt der Asche unabhängig vom Aschegehalt der Kohle und in etwa konstant (5,4 \pm 0,8) %.
- Für die Proben Berzdorf 82 schwenkt der Fe_2O_3 -Gehalt der Asche zwischen 3,8 und 13,4 %. Ein Zusammenhang mit dem Aschegehalt der Kohle ist nicht erkennbar.

Es lag die Vermutung nahe, daß nicht mit dem Aschegehalt korrelierte Fe-Gehaltsschwankungen besonders beim Probensatz Berzdorf 82 das radiometrische Aschemeißsignal störend beeinflussen. Die Wirkung einer Eisenkorrektur auf die Beziehung von 60 keV- δ -Vorwärtsstreusignal I_{VS} bzw. Massenschwächungskoeffizient und Aschegehalt wurde mit Hilfe der Ansätze

$$A^d = c_1 + c_2 I_{VS} + c_3 c_{Fe_2O_3}^r \quad (51)$$

und

$$A^d = c_4 + c_5 \mu_{60}^r + c_6 c_{Fe_2O_3}^r \quad (52)$$

untersucht. $c_{Fe_2O_3}^r$ bezeichnet den Gehalt des Fe_2O_3 in der Rohkohle. Die entsprechenden Koeffizienten sind nach der Methode der kleinsten quadratischen Abweichungen für die Daten einzelner Probesätze und zur Prüfung der Möglichkeit der Benutzung einer gemeinsamen Kalibrierfunktion (Mischkohlen) für den Gesamtdatensatz bestimmt worden. Die Ergebnisse wurden in Tabelle 10 zusammengestellt.

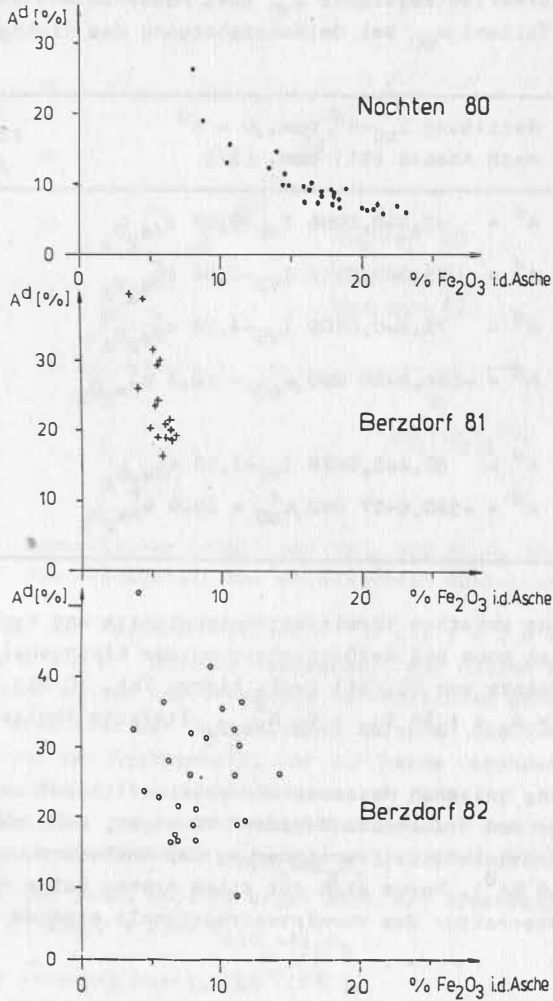


Abb. 25: Fe₂O₃-Gehalte in der Asche im Vergleich zum Aschegehalt der untersuchten Kohleproben

Tab. 10: Beziehungen zwischen Aschegehalt A^d und 60 keV- γ -Vorwärtsstreusignal I_{VS} bzw. Massenschwächungskoeffizient μ_{60} bei Berücksichtigung des Eisengehalts

| Probensatz | Beziehung $I_{VS}-A^d$ bzw. $\mu - A^d$ nach Ansatz (51) bzw. (52) | Streuung σ /% A^d / |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Nochten 80 | $A^d = 43,3 - 0,0066 I_{VS} + 9,67 c_{Fe_2O_3}^r$ | 1,8 |
| Berzdorf 81 | $A^d = 75,4 - 0,0112 I_{VS} - 0,04 c_{Fe_2O_3}^r$ | 2,3 |
| Berzdorf 82 | $A^d = 73,2 - 0,0109 I_{VS} - 4,59 c_{Fe_2O_3}^r$ | 4,1 |
| | $A^d = -394,6 + 20 260 \mu_{60}^r - 12,3 c_{Fe_2O_3}^r$ | 2,0 |
| Nochten 80 | $A^d = 60,4 - 0,0079 I_{VS} - 1,93 c_{Fe_2O_3}^r$ | 3,6 |
| Berzdorf 81 | | 3,3 |
| Berzdorf 82 | | $A^d = -530,9 + 27 040 \mu_{60}^r - 19,9 c_{Fe_2O_3}^r$ |

Der Zusammenhang zwischen Vorwärtsstreusignalsrate und Aschegehalt verbesserte sich kaum bei Berücksichtigung der Eisengehalte nach dem linearen Ansatz von Gl.(51) (vgl. hierzu Tab. 10 mit Tab. 7). Der Ansatz $A^d = c_1 + c_2 \ln I_{VS} + c_3 c_{Fe_2O_3}^r$ lieferte ähnliche Ergebnisse.

Die Beziehung zwischen Massenschwächungskoeffizient und Aschegehalt wird für den Probensatz Berzdorf 82 enger, wenn man den Eisengehalt berücksichtigt (Verminderung der Aschestreuung von 4,1 % A^d auf 2,0 % A^d). Warum sich für diese Proben keine Möglichkeit der Eisenkorrektur des Vorwärtsstreusignals ergeben hat, ist unklar.

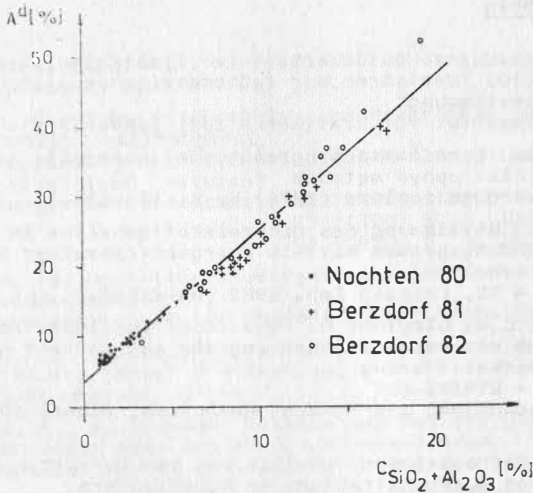


Abb. 26: Summarischer Gehalt von SiO_2 und Al_2O_3 im Vergleich zum Aschegehalt der untersuchten Kohleproben

Zwischen den Hauptaschebildnern Silizium und Aluminium und dem Aschegehalt der Kohlen aus Nochten und Berzdorf wurden hervorragende Korrelationen gefunden. Bemerkenswert erscheint der Zusammenhang zwischen der Summe beider Komponenten und dem Aschegehalt, der für beide Tagebaue nahezu identisch ist /28/.

Für alle hier untersuchten Kohleproben ist der Gehalt an SiO_2 und Al_2O_3 in der Rohkohle $c^r_{\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3}$ dem Aschegehalt gegenübergestellt worden (Abb. 26). Es ergab sich der Zusammenhang

$$A^d = 3,2 + 2,18 c^r_{\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3}$$

mit einer Streuung von 1,5 % A^d (16).

Die Ermittlung des Aschegehaltes über eine Al- und Si-Bestimmung, die z.B. mit Hilfe eines elementspezifischen radiometrischen Verfahrens erfolgen könnte, erscheint günstig. Dies gilt besonders, wenn Kohlen unterschiedlicher Herkunft oder Mischkohlen zu analysieren sind.

Literaturverzeichnis

- 1 Autorenkollektiv: Abschlußbericht zur Staatsplanleistung ZF 01.16.2301 "Verfahren zur radiometrischen Brennstoffqualitätsbestimmung"
ORGREB - Institut für Kraftwerke 1981 (unveröff.)
- 2 Bočanin, V.I.: O sniženii progresnostej kontrolja zol'nosti uglja radioizotopnym metodom
Chimija tverdogo topliva (1976) 5, S. 173-175
- 3 Bothe, H.-K.: Bestimmung des Mineralstoffgehaltes in Braunkohlenerkundungsproben mittels energiedispersiver Röntgenfluoreszenzanalyse
ZfI - BIA - 28, Leipzig Feb. 1982 (unveröff.)
- 4 Boyce, I.S.; C.G. Clayton; D. Page: Some considerations relating to the accuracy of measuring the ash content of coal by x-ray backscattering
IAEA - SM - 216/43
Nuclear Techniques and Mineral Resources, Vienna 1977, S. 135-165
- 5 Braune, M.: Mathematische Modellierung der Vorwärts- und Rückstreuung von Quantenstrahlung an Schüttgütern
Dissertation A, TH Leipzig, 1985
- 6 Cammack, P.: Ash monitors for "on stream" coal analysis
Conf. Bulk Solids in Transit, London 1974
Paper C 59/74
- 7 Cammack, P.; A. Balint: On-stream ash in coal monitoring for profit
SME-Transactions 260 (1976), S. 361-366
- 8 Cerpisz, S.; W. Mironowicz; C. Mirkowski: Systemy kontrolja kaczectwa uglja
VIII. Int. Kongr. für Steinkohlenaufbereitung
E. Untersuchung und Überwachung der Kohlequalität
- Vorträge S. 43-79, Donezk 1979
- 9 Charbucinski, J.: Lösung der Inversionsprobleme in der Spektrometrie der Gamma-Streustrahlung für Parameterbestimmung an Erzen (in polnisch)
Bergakademie Kraków
Zeszyty Naukowe 44, Kraków 1980
- 10 Clayton, C.G.; C.F. Coleman: Some comments on current developments and applications of nuclear techniques in the coal industry
IAEA Advisory Group Meeting on Gamma, X-ray and Neutron Techniques in the Coal Industry
Vienna, 4 - 5 th Dec. 1984
- 11 Clayton, C.G.; M.R. Wormald: The use of nuclear techniques for coal analysis in exploration, mining and processing
IAEA - CN - 40/119, Grenoble 1981
- 12 Clayton, C.G.; M.R. Wormald: Coal analysis by nuclear methods
Int.J.Appl. Radiat. Isot. 34 (1983) 1, S. 3-22

- 13 Clayton, C.G.; M.R. Wormald: Kohleüberwachungsgerät
BRD-Patent DE 2 939 817 (IPC G 01 N 23/10)
- 14 Csom, G.: Szén fűtőértékének meghatározása radioaktiv
izotópok segítségével
(Bestimmung des Heizwertes von Kohle mit Hilfe von
radioaktiven Isotopen)
Energia és Atomtechnika 22 (1969) 11-12, S. 590-596
23 (1970) 3, S. 133-143
23 (1970) 6, S. 290-296
- 15 Dahn, E.: Aschegehaltsbestimmung von Braunkohle mittels
 β -Rückstreuung
Isotopentechnik 1 (1960/61) 5/6, S. 150-151
- 16 Dahn, E.: Materialuntersuchungen mit Hilfe der elastischen
Streuung harter γ -Strahlung
Isotopenpraxis 3 (1967) 8, S. 309-313
- 17 Dahn, E.; G. Brunner: Erfahrungen bei der Qualitätsprüfung
von Kohle nach dem β -Rückstreuverfahren
Isotopentechnik 2 (1962) 7, S. 201-204
- 18 Dains, M.: Nuclear techniques for analysis of coal for
caloric value, ash and moisture
AAEC - LIB/BIB No. 449 (1976)
- 19 Davisson, C.M. Interaction of α -radiation with matter
in: K. Siegbahn (ed.): Alpha-, Beta- and Gamma-ray
Spectroscopy Vol. 1
Amsterdam 1966, S. 37-78
- 20 Dijkstra, H.; B.S. Sieswerda: Apparatus for the automatic
determination of the ash content of coal
3rd Int. Coal Prepar. Congress
Annales des Mines de Belgique, Brüssel 1958, S. 645 f.
(zitiert nach /4/)
- 21 Eichfeld, E.; J. Neubert; G. Seidel: Nutzeffekt der radiome-
trischen Aschegehaltsbestimmung von Rohbraunkohle
Freiberger Forschungshefte D 167
Leipzig 1986, 88 S.
- 22 Felfe, W.: Bericht des Politbüros an die 7. Tagung des
ZK der SED
Neues Deutschland 38 (1983) 278, vom 25.11.1983, S. 4
- 23 Frenzel, M.: A new method to exclude the influence of sample
inhomogeneties on the signal of ratiometric transmission
methods
in /71/, Vol. II, S. 747
- 24 Frenzel, M.: Vorrichtung zur dickenunabhängigen radiometri-
schen Gehaltsbestimmung
DDR-Patent DD 209 281 (IPC G 01 N 23/12), 1984.
- 25 Fritzsche, D.: Radiometrische Verfahren zur Kohlequalitätsbe-
stimmung - Weltstandsvergleich
ZfI - BIA - 19-1, Leipzig Sep. 1981 (unveröff.)

- 26 Fritzsche, D.: Experimentelle Untersuchungen mit der radiometrischen Meßtechnik zur Aschetrendmessung im KVV Hagenwerder - kleintechnischer Versuch
ZfI - BIA - 19-2, Leipzig Sep. 1981 (unveröff.)
- 27 Fritzsche, D.: Jahresbericht 1981 zum Wirtschaftsvertrag
IBK - ZfI
ZfI - BIA - 18, Leipzig Okt. 1981 (unveröff.)
- 28 Fritzsche, D.: Radiometrische Aschegehaltsbestimmung von Rohbraunkohle am Förderstrom
ZfI - BIA - 29, Leipzig Mai 1982 (unveröff.)
- 29 Fritzsche, D.: Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes von γ -Meßverfahren zur kontinuierlichen radiometrischen Aschebestimmung von Rohbraunkohle im Kraftwerk "Völkerfreundschaft" Hagenwerder
A 2 - Bericht
ZfI - BIA - 43, Leipzig Dez. 1982 (unveröff.)
- 30 Fritzsche, D.: Vorrichtung zur Gehaltsbestimmung an Schüttgütern auf Transportbändern
DDR-Patent DD 159 815 (IPC G 01 N 9/24), 1983
- 31 Fritzsche, D.: Anordnung zur Gehaltsbestimmung und Verfahren zur Parameterermittlung dafür
DDR-Patent DD 240 602 (IPC G 01 N 9/24), 1986
- 32 Fritzsche, D.; M. Frenzel: Vorrichtung zur Gehaltsbestimmung und Verfahren zur Parameterermittlung dafür
DDR-Patent DD 240 605 (IPC G 01 N 23/02), 1986
- 33 Fritzsche, D.; W. Dolak: Radiometric determination of ash content of raw lignites
ZfI-Mitteilungen 71 (1983), S. 150-153
- 34 Fritzsche, D.; H.-W. Thümmel: A scatter model for calculation of gamma rays in scatter-transmission geometry
in /71/, Vol. III, S. 777-790
- 35 Fookes, R.A.; V.L. Gravitis; J.S. Watt: Determination of ash content of coal by mass absorption coefficient measurements of two x-ray energies
IAEA - SM 216/5
Nuclear Techniques and Mineral Resources,
Vienna 1977, S. 167-182
- 36 Galimbekov, D.K.; B.E. Luchminskij: Optimizacija zondovogo ustrojstva dlja selektivnogo gamma-gamma-karotaža Atomnaja Energija 47 (1979) 6, S. 394-396
- 37 Gardner, R.P.; K. Verghese: Use of Monte Carlo methods in the calibration and design optimization of radiation gauges and analyzers
ZfI-Mitteilungen 69 (1983), S. 24-41
- 38 Garkušin, Ju.K.; A.M. Oniščenko; A.G. Vasil'ev; V.M. Slavinskij; A.I. Kandala; A.A. Cvetkov: Ispytanija analizatora zol'nosti AZUK na COF "Čumakovckaja"
Obogašćenie i briketirovanie uglja (1976) 1, S. 5-7

- 39 Girczys, J.; A. Piatowski: Próby przemysłowe izotopowej wagi tężmowej (Industrieuntersuchungen der Isotopenbandwaage - in polnisch)
Rudy i Metale Nieżelazne 12 (1967) 7, S. 359-362
- 40 Gozani, T.; D. Brown; R. Bozorgmanesh: Coal and mineral process control with on-line nucoalyser
Prog. of "Coal Technology - Europe '81", June 1981, Cologne, BRD
- 41 Gradštein, I.S.; I.M. Ryžik: Tablicy integralov, summ, rjadov i proizvedenij
Moskau 1971
- 42 Hardt, L.: Ein Schnellverfahren zum Bestimmen des Aschegehalts von Feinkohle mit Hilfe weicher Quantenstrahlung
Glückauf 98 (1962), S. 823-831 (zitiert nach /53/)
- 43 Heinrich, B.; K. Irmer; R. Pötschke: Fast analysis of carbon content by inelastic scattering of neutrons
in: /71/, Vol. III, S. 841-847
- 44 Honecker, E.: Bericht des ZK der SED an den XI. Parteitag
Neues Deutschland 41 (1986) 91 vom 18.4.1986
- 45 Irmer, K.; S. Richter; S. Koch: Radiometrische Verfahren zur kontinuierlichen Qualitätskontrolle von Rohkohle und Brikette
Isotopenpraxis 2 (1966), S. 131-135
- 46 Isotopen-Bandförderwaagen
in Prospekt: Tage der polnischen Technik in Österreich
4. - 12.12.1975
- 47 Jankowski, L.: Cost - benefit aspects of radioisotope methods
in /71/, Vol. II, S. 565-570
- 48 Jaworski, B.M.; A.A. Detlaf: Physik griffbereit
Berlin 1972
- 49 Kendall, E.J.M.: Gammastrahlenanalyse von Mehrkomponentenmaterialien
BRD-Patent DE 3 146 253 (IPC G 01 N 23/08), 1982
- 50 Klempner, K.S.: Sposob kontrolja sostava binarnych sred
SU-Patent SU 441 484 (IPC G 01 N 23/00)
- 51 Klempner, K.S.; V.V. Parchomenko: Izmerenie zol'nosti uglja po rassejaniju beta-izlučenija vpered
Zavod.Labor. (1974) 4, S. 421-423
- 52 Koch, S.: Bestimmung des Aschegehaltes von Braunkohlen durch radiometrische Verfahren
Bergbautechnik 13 (1963) 12, S. 648-651
- 53 Koch, S.: Ergebnisse der radiometrischen Bestimmung des Aschegehalts von Kohle
Die Technik 21 (1966) 8, S. 501-504
Die Technik 21 (1966) 9, S. 568-570
- 54 Koch, S.; W. Liebig: Bestimmung des Aschegehaltes von Braunkohle mittels Gamma-Rückstreuung
Isotopentechnik 2 (1962) 12, S. 353-356

- 55 Koch, S.; S. Richter; D. Hempel: Ein Gerät zur kontinuierlichen Messung des Aschegehalts von Kohle nach dem Durchstrahlungsverfahren
Die Technik 20 (1965) 8, S. 543-548
- 56 Koch, S.: S. Richter: Untersuchung der Möglichkeiten der radiometrischen Bestimmung des Heizwertes von Braunkohle VVB Kraftwerke, Institut für Kraftwerke V 3, 1966 (unveröff.)
- 57 Koch, S.; R. Windelband: Messung des Aschegehalts von Braunkohle nach dem σ -Durchstrahlungsverfahren mit dem Radionuklid ^{170}Tm
Wiss. Zeitschr. der TU Dresden 13 (1964) 1, S. 23-30
- 58 Körner, G.: ZfI, Leipzig, persönl. Mitteilung, 1987
- 59 Körner, G.; W. Dolak; D. Fritzsche: Radiometrische Aschegehaltsbestimmung, Brikettfabrik Ost GKSP, Experiment Mai 1980
ZfI - StA - 70-3, Leipzig Juni 1980 (unveröff.)
- 60 Körner, G.; G. Fischer; D. Fritzsche; J. Leonhardt; K. Rosenbaum; H.-W. Thümmel: Experience in radiometric on-line determination of the ash content of raw lignite at the Hagenwerder power station
in /71/, Vol. III, S. 819-829
- 61 Körner, G.; M. Steinert; E. Trobitzsch; H.-W. Thümmel; G. Fischer; E. Graf; K. Rosenbaum; D. Schingnitz: Verfahren und Anordnung zur schichtdickenunabhängigen Gehaltsbestimmung an Schüttgütern bei schnell veränderlicher Schütthöhe
DDR-Patent DD 217 027 (IPC G 01 N 23/02), 1985
- 62 Komova, E.N.; A.G. Loksın; P.I. Grabov: Sozdaniye opytnoj partii priborov "STRAUME" dlja kontrolja zol'nosti uglja v potoke (Otčet IOTT)
Obogašćenije i briketirovanije uglja (1980) 7, S. 10-14
- 63 Kowalczyński, J.K.: Układ do pomiaru ilości masy przesuwanego materiału
VR Polen - Patent 46 809 (IPC G 01 f 42 e 14), 1964
Vorrichtung zur Messung der Masse eines sich verschiebenden Materials
DDR-Patent DD 42 552 (IPC G 01 g - 11/00), 1965
- 64 Kühn, W.; H.-P. Schätzler: Verfahren zur Bestimmung von Substanzen niederer Ordnungszahl
BRD-Patent DE 2 920 364 (IPC G 01 N 23/22), 1980
- 65 Leonhardt, J.W.: Radionuclides in energetics
in /71/, Vol. I, S. 151-170
- 66 Leonhardt, J.W.: Radionuklide in der Energetik
ZfI-Mitteilungen 100 (1984), S. 97-119
- 67 Leonhardt, J.W.: Eindimensionale Näherungsformel für die Intensität vorwärtsgestreuter 60 keV-Quanten in Abhängigkeit von Aschegehalt und Flächenmasse in Rohbraunkohle
Isotopenpraxis 22 (1986) 12, S. 417-419

- 68 Leonhardt, J.W.; D. Fritzsche; G. Körner; H.-W. Thümmel: Ash on-line determination in brown coal by means of scattered forward and transmitted 60 keV and 660 keV Photons Isotopenpraxis 21 (1985) 10, S. 352-354
- 69 Liebig, W.: Aschegehaltsbestimmung von Braunkohle mittels Gamma-Rückstreuung Diplomarbeit, TU Dresden 1962
- 70 Lissner, A.: A. Tau: Die Chemie der Braunkohle, Band I Halle 1956
- 71 Luther, D. (ed.): 3rd Working Meeting "Radioisotope Application and Radiation Processing in Industry" Leipzig, 23. - 27. Sept. 1985 Proceedings Vol. I - IV, Leipzig 1986, 1453 S.
- 72 Lyman, G.J.; R.J. Cheshire: On-stream analysis for ash in coal slurries Paper C-1 5 th Int. Conf. on Coal Research, Düsseldorf 1980
- 73 Martin, T.C.; J.D. Hall; I.L. Morgan: An on-line nuclear analysis system in: Radioisotope Instruments in Industry and Geophysics Proc. of the IAEA-Symp., Warsaw, 18. - 22.10.1965 Vienne 1966, S. 411-421
- 74 Maul, E.; H.-W. Thümmel; D. Wagner: Untersuchungen der Möglichkeiten zur Schnellbestimmung des Gehaltes an ausgewählten Aschekomponenten in Kohle - Überwachung des Ascheschmelzverhaltens - (Durchführbarkeitsstudie) ZfI - 8IA - 1, Leipzig 1980 (unveröff.)
- 75 "METRONIX" (VR Polen): Die Isotopenbandwaage für kleine Belastungen Typ 110, Prospekt o.J.
- 76 Millen, M.J. et al.: Field trial of a pair production gauge for the on-line determination of ash in coal on a conveyor belt Int.J.Appl.Rad. and Isotopes (in press) (zitiert nach /10/)
- 77 Onišenko, A.M.: Optimizacija dvuchlučevogo gamma-absorbcionnogo zolomera Zavod. Labor. (1981) 10, S. 27-31
- 78 Onišenko, A.M.; P.I. Grabov; L.P. Starčik; A.K. Abremovskaje; A.I. Kuznecove: Sposob izmerenija zol'nosti uglje Koks i chimije (1979) 4, S. 7-10
- 79 Onišenko, A.M.; P.I. Grabov: Radioisotopnye metody i pribory kontrolje zol'nosti uglje Koks i chimije (1979) 10, S. 7-10
- 80 Onišenko, A.M.; A.G. Vasil'ev; Z.A. Černjak; V.M. Slavinskij: Sposob aneliza sostava mineralov v potoke SU-Patent SU 504 141 (IPC G 01 N 23/22)
- 81 Onišenko, A.M.; A.G. Vasil'ev; V.M. Slavinskij; A.I. Kuznecove: Kontrol' zol'nosti uglje na lentočnom konvejjere o primeneniiem rassejannogo vpered izlučenija Koks i chimija (1976) 11, S. 9-12

- 82 Page, D.; E.J. Fox: Verfahren und Vorrichtung zum Bestimmen des Aschegehaltes von Kohle durch Bestrahlen
BRD-Patent DE 3 029 709 (IPC G 01 N 23/22), 1982
- 83 Pak, Ju.N.: K metodike povyyeniya tochnosti radioizotopnogo analiza zol'nosti uglja
Zavod. Labor. (1980) 8, S. 743-744
- 84 Pak, Ju.N.; L.P. Starčik: Sovremennoe sostojanie i perspektivy razvitiya jaderno-fizičeskich metodov i sredstv dlja kontrolja zol'nosti uglja
Izvestija vyssich učebnyh zavedenij, Gornyj Žurnal (1980) 4, S. 9-15
- 85 Pak, Ju.N.; V.M. Terechov: Sposob kontrolja zol'nosti uglja s pomošč'ju mjaškogo gamma-izlučeniya
Gornyj Žurnal (1980) 7, S. 129-132
- 86 Pepenin, R.R.; N.Ja. Konstantinov; L.F. Dolina: Fizičeskie metody kontrolja kačestva uglej i produktov ich pererabotki
Express-Information des CNIEUgol, Moskau 1979, S. 1-28
- 87 "Polon", Vereinigte Betriebe für kernphysikalische Einrichtungen: Isotopowa waga tasmociagowa do średnich obciazen Typ 210, Prospekt o.J.
- 88 Probulski, S.; A. Wykpiś: Zastowanie promieniowania rozprosnego do badan i pomiarów niektórych wilkości fizycznych
(Anwendung der diffusen Strahlung für Untersuchungen und Messungen einiger physikalischer Größen - in polnisch)
Nukleonika XII (1967) 9, S. 849-856
- 89 Prüfung fester Brennstoffe - Bestimmung der Asche
TGL 9493
- 90 The Radiochemical Centre Amersham
Radioactive products 1969/70, S. 165
- 91 Rhodes, J.R.; J.C. Daghish; C.G. Clayton: A coal-ash monitor with low dependence on ash composition
in: Radioisotope Instruments in Industry and Geophysics
Proc. of the IAEA-Symp., Warsaw, 18. - 22.10.1965
Vienna 1966, S. 447-462
- 92 Rudanovskij, A.A.; A.G. Vasil'ev; A.M. Oniščenko: Kontrol' zol'nosti uglja s pomošč'ju registracii rassejanogo vpered gamma-izlučeniya americija-241
Zavod. Labor. 39 (1973) 7, S. 821-824
- 93 Rudanovskij, A.A.; A.G. Vasil'ev; A.M. Oniščenko: Parametry i charakteristiki metoda kontrolja zol'nosti uglja s pomošč'ju registracii rassejanogo vpered gamma-izlučeniya selena-75
Izvestija vyssich učebnyh zavedenij, Gornyj Žurnal (1973) 10, S. 177-180
- 94 Rudanovskij, A.A.; A.G. Vasil'ev; A.M. Oniščenko: Ėkspres-analizator zol'nosti uglja
Ugol (1973) 12, S. 45-47

- 95 Rudanovskij, A.A.; A.G. Vasil'ev; A.M. Oniščenko; K.S. Klempner; O.B. Kramarev: Datčik dlja škspress-kontrolja zol'nosti uglje
Zavod. Labor. (1975) 8, S. 995-996
- 96 Rudanovskij, A.A.; A.G. Vasil'ev; P.Ja. Verbebnij: Metod kontrolja vešestvennogo sostava binarnych smesej
Dokl.Akad.Nauk SSSR 203 (1073) 6, S. 1330-1333
- 97 Rudolph, M.: Reisebericht über die Teilnahme an Versuchen zur Asche- und Feuchtemessung in Katowice, VR Polen vom 20. - 24.10.1981
IBK, Schwarze Pumpe Nov. 1981 (unveröff.)
- 98 Rudolph, M.: Reisebericht über die Teilnahme an Versuchen zur Aschemessung in Novokusnezsk/UdSSR
BKK Senftenberg 1982 (unveröff.)
- 99 Rudolph, M.; H. Schäfer; M. Grüneberg: Experience end results of rediometric ash content measurement et the Nochten lignite open-cut mine
Isotopenpraxis 22 (1986) 7, S. 245-247
- 100 Scharf, W.: Izotopowa wage tašmociagowa (in polnisch)
Nukleonika XII (1967) 1/2, S. 121-128
- 101 Scharf, W.: Wägen mit Isotopen
Wägen und Dosieren (1972) Märzheft, S. 30-35
- 102 Schmidt, M.: Erfahrungen und Ergebnisse der Isotopenanwendung im Industriezweig Braunkohle
Isotopenpraxis 12 (1976) 9, S. 355-360
- 103 Schmidt, M.; H. Schäfer; W. Häusler; R. Ciesielski; S. Richter: Transportable Einrichtung zur radiometrischen Aschegehaltsbestimmung von Braunkohle, insbesondere Rohbraunkohle
DDR-Patent DD 105 668 (IPC G 01 N 33/22)
- 104 Schneider, K.: BKK Senftenberg, Institut f. Braunkohlenbergbau (IBK) S 043 - persönliche Mitteilung
- 105 Schuricht, V.: Strahlenschutzphysik
Berlin 1975, 422 S.
- 106 Šeda, J.: Anlage für kontinuierliche Wägung der Fördermenge mit Hilfe von Radioisotopen
Atompraxis 15 (1969) 5, S. 315-319
- 107 Šeda, J.: Spusob měreni technických veličin prozařovací metodou při aplikacích ionosugičního zářeni
(Meßweise technischer Größen mit Hilfe der Durchstrahlungsmethode unter Anwendung ionisierender Strahlung)
CSSR-Patent 136 032 (IPC G 01 t), 1970
- 108 Sipilä, H.; E. Kiuru; S. Vajjärvi: Verfahren und Vorrichtung zum Analysieren von Erz unter Einsatz von γ -Strahlen
BRD-Patent DE 3 136 343 (IPC G 01 N 23/22), 1982
- 109 SORTEX-on-line ash monitor for coal
Prospekt der Firma Gunson's Sortex Ltd., England ca.1977

- 110 Starčik, L.P. u.a.: Pribor dlja kontrolja zol'nosti uglja na lente konvejera
Koks i chimija (1978) 3, S. 30-32
- 111 Sternes, P.E.; J.W.G. Clark: The continuous automatic analysis of dry powders and aqueous suspensions using radioisotope techniques
in: Radioisotope Instruments in Industry and Geophysics
Proc. of the IAEA-Symp., Warsaw, 18. - 22.10.1965
SM - 68/14
vienna 1966
- 112 Strauß, W.: Asche-Schnell-Bestimmungs-Gerät
BRD-Patent DE 3 120 064 (IPC G 01 N 23/06), 1982
- 113 Sowerby, B.D.: Measurement of specific energy, ash and moisture in bulk coal samples by a combined neutron and gamma-ray method
Nucl. Instruments and Methods 160 (1979), S. 173-182
- 114 Sowerby, B.D.; V.N. Ngo; W.K. Ellis: Bulk analysis of ash in coal using annihilation radiation
Second Applied Physics Conf., Australien Inst. of Physics
Melbourne, Vic. 30.11. - 4.12.1981
- 115 Thümmel, H.-W.: Kontinuierliche radiometrische Aschemessung, Brikettfabrik Ost GSP, Diagnostikexperiment 1980
- Dimensionierung der Meßstrecken
ZfI-StA-70-2, Leipzig, März 1980 (unveröff.)
- 116 Thümmel, H.-W.: Probleme der radiometrischen Aschemessung: Meßempfindlichkeit der Gamma-Rückstreu-Methode
ZfI-StA-72-1, Leipzig, März 1980 (unveröff.)
- 117 Thümmel, H.-W.: Verfahren und Vorrichtung zur schichtdickenunabhängigen Gehaltsbestimmung an Schüttgütern
DDR-Patent 00 159 816 (IPC G 01 N 9/24), 1983
- 118 Thümmel, H.-W.: Vorrichtung zur schichtdickenunabhängigen Gehaltsbestimmung an Schüttgütern
DDR-Patent 00 212 108 (IPC G 01 N 23/00), 1984
- 119 Thümmel, H.-W.; M. Frenzel; D. Fritzsche; T. Cechak; J. Kluson: Influence of sample inhomogenities on the signal of 60 keV scatter-transmission ash gages
in /71/, Vol. III, S. 849-863
- 120 Thümmel, H.-W.; M. Frenzel; G. Körner; G. Fischer; E. Graf; K. Olma; K. Rosenbaum; P. Schingnitz: Verfahren zur Gehaltsbestimmung am Meßgut mit schnell veränderlicher Flächenmasse
DDR-Patent 00 220 130 (IPC G 01 N 23/12), 1985
- 121 Thümmel, H.-W.; D. Fritzsche; J. Leonhardt: Experimental and theoretical sensitivities of the 60 keV scatter-transmission method to sample composition and density
in /71/, Vol. II, S. 735-746
- 122 Thümmel, H.-W.; G. Körner; Ch. Beutel; W. Riedel; U. Gräfenhain; J. Leonhardt: KRAS 2 a gage for on-stream determination of ash content in raw lignite at power stations
in /71/, Vol. III, S. 769-776

- 123 Thümmel, H.-W.; G. Körner; D. Fritzsche: Compensation for thickness variations in determining the bulk material composition on conveyor belts using combined scatter-transmission and thickness measuring methods
Zfi-Mitteilungen 71 (1983), S. 144-149
- 124 Thümmel, H.-W.; G. Körner; J. Leonhardt: State and performance of on-stream ash content determination in lignite and black coal using the 2 energy-transmission technique in /71/, Vol. III, S. 757-767
- 125 Thümmel, H.: Untersuchungen zum Einfluß der Schichtdicke auf 60 keV- γ -Vorwärtsstreuungsanordnungen
Lehrlingsarbeit
Zfi-8IA-20, Leipzig, November 1981 (unveröff.)
- 126 Urbafski, P.; S. Karamuz; D. Wagner: Some aspects of industrial application of radiometric methods illustrated by the example of the determination ash, calcium and iron in brown coal using XRF-technique and the low-energy X-ray scattering method
in /71/, Vol. II, S. 431-450
- 127 Urbafski, P.; D. Wagner; M. Jankowska; E. Kowalska: Determination of calcium and iron and measurements of ash content in the brown coal
Zfi-Mitteilungen 70 (1983), S. 88-96
- 128 Vasil'ev, A.G. et al.
Koks i chimija (1979) 2, S. 37-40
- 129 Vasil'ev, A.G.; A.M. Oniščenko: Ispol'zovanie scintilljacionnogo detektora pri kontrolja zol'nosti uglja izotopy v SSSR 47 (1976), S. 15-19
- 130 Vasil'ev, A.G.; A.M. Oniščenko: Povyšenie točnosti pri kontrole zol'nosti uglja po intensivnosti rassejanogo vpered gamma-izlučenija
Zavod. Labor. (1977) 1, S. 51
- 131 Vasil'ev, A.G.; A.M. Oniščenko; V.M. Slavinskij; A.I. Kuznacova: Ispol'zovanie rassejanogo vpered gamma-izlučenija dlja kontrolja zol'nosti uglja v potoke
Zavod. Labor. (1977) 4, S. 476-477
- 132 Vasil'ev, A.G.; A.M. Oniščenko; V.M. Slevinskij; B.I. Meniovič; V.I. Pivnjak; N.F. Gordjonko; A.N. Lichenko; V.I. Vasilenko; E.S. Antonovskij: Ekspres-analizator zol'nosti, ocnovannyj na registracii rassejanogo vpered gamma-izlučenija
Koks i chimija (1974) 5, S. 52-54
- 133 Vasil'ev, A.G.; P.T. Skljär: Schaffung von Aschegehaltsanalysatoren (AZUK) zur Gütekontrolle der Kohle auf dem Förderband (in Russ.)
Obogašćenje i briketirovanje uglja (1980)2, S. 1-2
- 134 Veigele, W.M.J.: Photon cross sections from 0.1 keV to 1 MeV for elements Z=1 to Z=94
Atomic Data Tablee 5 (1973), S. 51-111

- 135 Wagner, D.; P. Urbanski; S. Karamuz: Zur röntgenfluoreszenz-analytischen Bestimmung des Kalziumoxid-, Eisenoxid- und Aschegehaltes in Braunkohle
Isotopenpraxis 20 (1984) 10, S. 381-385
- 136 Watt, J.S.: Verfahren zur Bestimmung des Feststoff-Gewichtsanteils einer Aufschlämmung
BRD-Patent DE 3 036 381 (IPC G 01 N 23/06), 1981
- 137 Watt, J.S.; R.A. Fookes; V.L. Gravitis: Verfahren und Vorrichtung zur Analyse von Kohle oder Koks
BRD-Patent 3 023 453 (IPC G 01 N 33/22), 1981
- 138 Watt, J.S.; V.L. Gravitis: Verfahren zum Analysieren von Kohle und Koks
BRD-Patent 2 648 434 (IPC G 01 N 23/02), 1977
- 139 Watt, J.S.; V.L. Gravitis: Verfahren und Vorrichtung zur Analyse des Asche- oder Mineralgehaltes von Kohle
BRD-Patent 3 114 668 (IPC G 01 N 23/06), 1982
- 140 Zajcev, I.F.; V.K. Polkovnikov; L.P. Starčik; V.A. Ul'š'in:
Issledovanie i razrabotka metodov i sredstv nepereryvnogo kontrolja kaczestva uglja
Koks i chimija (1980)9, S. 10-12

Ascheempfindlichkeit dichte- und ordnungszahlempfindlicher radiometrischer Meßverfahren

Die Ascheempfindlichkeit eines Meßverfahrens S_{A^d} wird definiert als relative Signaländerung dI/I , hervorgerufen durch eine Aschegehaltsänderung um den Betrag dA^d (A^d in Masseprozent).

$$S_{A^d} = \frac{dI/I}{dA^d} \quad (A 1)$$

Für ein von der Dichte ρ und vom Massenschwächungskoeffizienten μ und damit von der effektiven Ordnungszahl abhängendes radiometrisches Signal (vgl. Gl.(1)) gilt

$$\frac{dI}{dA^d} = \frac{\partial I}{\partial \mu} \frac{d\mu}{dA^d} + \frac{\partial I}{\partial \rho} \frac{d\rho}{dA^d} \quad (A 2)$$

Woraus folgt

$$S_{A^d} = \left(\frac{\partial I}{I} / \frac{\partial \mu}{\mu} \right) \cdot \left(\frac{d\mu}{\mu} / dA^d \right) + \left(\frac{\partial I}{I} / \frac{\partial \rho}{\rho} \right) \cdot \left(\frac{d\rho}{\rho} / dA^d \right) \quad (A 3)$$

$$= S_{\mu} \cdot \mu S_{A^d} + S_{\rho} \cdot \rho S_{A^d} \quad (A 4)$$

Die relativen Empfindlichkeiten des Meßsignals gegenüber Massenschwächungskoeffizienten- (S_{μ}) bzw. Dichteänderung (S_{ρ})

$$S_{\mu} = \frac{\partial I}{I} / \frac{\partial \mu}{\mu} \quad (A 5)$$

$$S_{\rho} = \frac{\partial I}{I} / \frac{\partial \rho}{\rho} \quad (A 6)$$

sind energie- und meßgeometrieabhängige Größen, während die Änderungen von μ und ρ infolge Aschegehaltsänderung um dA^d

$$\mu S_{A^d} = \frac{d\mu}{\mu} / dA^d \quad (A 7)$$

$$S_{A^d} = \frac{d\rho}{\rho} / dA^d \quad (A 8)$$

energie- und kohletypabhängig sind.

Die $\mu = \mu(Z; E_{\gamma})$ gilt (vgl. Abb. 3, Kap. 3.4), sind für einen dem Zweistoffmodell entsprechenden Kohlentyp die Aschekomponente durch ρ_{A^d} und $\mu_{A^d}(Z_{A^d}; E_{\gamma})$ und das Brennbare durch ρ_B und $\mu_B(Z_B; E_{\gamma})$ charakterisiert. Der effektive Massenschwächungskoeffizient einer Mischung beider Komponenten (Modellkohle), die durch ihren Ascheanteil c_{A^d} (in Masseanteilen; $c_{A^d} = A^d/100\%$) gekennzeichnet ist, berechnet sich

$$\mu = c_{A^d} \mu_{A^d} + (1 - c_{A^d}) \mu_B \quad (A 9)$$

$$= \mu_B + \frac{A^d}{100\%} (\mu_{A^d} - \mu_B) \quad (A 10)$$

Daraus folgt

$$\frac{d\mu}{dA^d} = \frac{\mu_{A^d} - \mu_B}{100\%} \quad (A 11)$$

und

$$\mu_{A^d}^S = \frac{\mu_{A^d} - \mu_B}{100\% \mu} \quad (A 12)$$

Analog ergibt sich die effektive Dichte der Mischung ρ_K

$$\rho_K = \left[\frac{1}{\rho_B} + \frac{A^d}{100\%} \left(\frac{1}{\rho_{A^d}} - \frac{1}{\rho_B} \right) \right]^{-1} \quad (A 13)$$

ρ_K bezeichnet die Dichte der Kohle im Flöz. Bei gebrochener oder gemahlener Kohle entspricht ρ_K der Dichte des Kohlekorns. Radiometrisch wirksam ist die Schüttdichte

$$\rho = \eta \rho_K \quad (A 14)$$

η kennzeichnet den Füllungskoeffizienten ($\eta \leq 1$), der von der Korngröße abhängig ist.

Es gilt

$$\begin{aligned} \frac{dg}{dA^d} &= - \frac{\eta}{100\% \left[\frac{1}{g_B} + \frac{A^d}{100\%} \left(\frac{1}{g_{A^d}} - \frac{1}{g_B} \right) \right]^2} \left(\frac{1}{g_{A^d}} - \frac{1}{g_B} \right) \\ &= - \frac{\eta g_K^2}{100\%} \left(\frac{1}{g_{A^d}} - \frac{1}{g_B} \right) \end{aligned} \quad (A 15)$$

und unter Beachtung von Gl.(A 8)

$$g_{A^d}^S = - \frac{g_K}{100\%} \left(\frac{1}{g_{A^d}} - \frac{1}{g_B} \right). \quad (A 16)$$

Die Ascheempfindlichkeit der γ -Rückstreuung in den Näherungen von CLAYTON /12/ und von CSOM /14/

Für radiometrische Verfahren, die auf der Streuung von Quantenstrahlung beruhen, ist die Abhängigkeit der Impulsrate von der effektiven Ordnungszahl und der Dichte des untersuchten Materiale und damit im Falle der Kohlequalitätsbestimmung die Ascheempfindlichkeit nicht exakt angebar (vgl. 4.1.). Die von CLAYTON und von CSOM benutzten Beziehungen für die γ -Rückstreurate lassen sich aus dem folgenden von KOCH (nach /105/, S. 136 f.) entwickelten Einfachstreumodell, das Streuung um den Winkel π erlaubt, ableiten.

Für ein paralleles Strahlenbündel der Quantenflußdichte i beträgt die Rate dI_{RS} der im Volumenelement dV des Mediums der Dichte ρ gestreuten und in den Detektor gelangenden Quanten

$$dI_{RS} = \frac{d\sigma_{St}}{d\Omega} \omega i n_{at} e^{-\mu' \rho l_1} e^{-\mu \rho l_2} dV \quad (A 17)$$

wobei

- $\frac{d\sigma_{St}}{d\Omega}$ die Wahrscheinlichkeit der Streuung eines γ -Quanten an einem Atom in das Raumwinkелеlement $d\Omega$ (kohärente und inkohärente Streuung),
- ω den Raumwinkel, in dem der Detektor von dV aus erscheint,
- n_{at} die Atomdichte (Atomzahl/Volumeneinheit) mit
$$n_{at} = \frac{L}{A} \quad (A 18)$$

L Avogadro-Konstante ($6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$)
 A molare Masse,

μ', μ'' den Massenschwächungskoeffizienten vor und nach dem Streuakt ($\mu' \neq \mu''$ für inkohärente Streuung) darstellen.

Die Gesamtrückstreurate I_{RS} ist aus (A 17) einfach zu berechnen, wenn man voraussetzt, daß das parallele Strahlenbündel senkrecht auf das Streumaterial trifft und der Detektor nur die um $\pi - d\theta \leq \theta \leq \pi + d\theta$ gestreuten Quanten registriert. Für kleine

Werte von $d\theta$ wird dann $l_1 = l_2 = l$. Ist weiterhin der Abstand Detektor - Streugut groß gegen die Streugutschichtdicke d , kann das Streuvolumen dV als Zylinder der Querschnittsfläche a und der Höhe dl angenähert werden.

Unter diesen Bedingungen gilt unter Beachtung von Gl.(A 18)

$$I_{RS} = \left(\frac{dG_{St}}{d\Omega} \right)_{\theta=\pi} \omega_i \frac{L}{A} a g \int_0^d e^{-g(\mu' + \mu'')l} dl \quad (A 19)$$

und nach Integration

$$I_{RS} = \left(\frac{dG_{St}}{d\Omega} \right)_{\theta=\pi} \omega_i \frac{L}{A} a \frac{1}{\mu' + \mu''} \left[1 - e^{-g(\mu' + \mu'')d} \right] \quad (A 20)$$

Mit wachsender Streugutschichtdicke d nähert sich die σ -Rückstreureate asymptotisch dem oberen Grenzwert (Sättigungswert)

$$I_{RS} = \left(\frac{dG_{St}}{d\Omega} \right)_{\theta=\pi} \omega_i \frac{L}{A} a \frac{1}{\mu' + \mu''} \quad (A 21)$$

Daraus folgt bei Verwendung der Schreibweise $\mu = \mu' + \mu''$ und unter Vernachlässigung der Winkelabhängigkeit der Streuwahrscheinlichkeit der von CLAYTON verwendete Ansatz für die σ -Rückstreureate

$$I_{RS} = f \frac{G}{\mu} \quad (A 22)$$

Für ein Kohle-Wasser-Gemisch ergibt sich

$$I_{RS} = f \frac{G_{A^d} c_{A^d} s + G_B (1 - c_{A^d}) s + G_W (1 - s)}{\mu_{A^d} c_{A^d} s + \mu_B (1 - c_{A^d}) s + \mu_W (1 - s)} \quad (A 23)$$

wobei

B, A^d, W Indizes für den brennbaren (B), den Asche (A^d) und den Wasseranteil (W),

G den Streukoeffizienten der Kohle bzw. des indizierten Anteils,

s den Feststoffanteil im Kohle-Wasser-Gemisch,

f eine Konstante

darstellen.

Aus Gl.(A 23) ergibt sich die Ascheempfindlichkeit (siehe Gl.(A 1)) der γ -Rückstreuung nach CLAYTON

$$S_{A^{dRS}} = A_1 - \frac{b_1 s}{b_1 s A^d + 100 [\mu_W(1-s) + \mu_B s]} \quad (A 24)$$

mit

$$A_1 = \frac{a_1 s}{a_1 s A^d + 100 [\zeta_W(1-s) + \zeta_B s]}$$

$$a_1 = \zeta_{A^d} - \zeta_B$$

$$b_1 = \mu_{A^d} - \mu_B$$

Die Gl.(A 17-A 24) gelten in Einfachstreuung. CSOM versucht Mehrfachstreuanteile zu berücksichtigen, indem er für die Rate dI_{RS} der in der Schicht dl rückgestreuten und in den Detektor gelangenden Strahlung ansetzt

$$dI_{RS} = c a_1 \zeta g e^{-(\mu' + \mu'') g l} e^{(1-c) \zeta g l} dl \quad (A 25)$$

mit $c = \omega / 4\pi$.

Sein Modell sieht nur zwei Streurichtungen vor. Der Anteil $(1-c)$, der in der jeweiligen Schicht dl nicht zum Detektor hingestreuete Strahlung wird als in Richtung Primärstrahl gestreut betrachtet. Dadurch erhöht sich die Primärquantenflußdichte um den Faktor $e^{(1-c) \zeta g l}$, der die Quantenflußdichteerhöhung durch Mehrfachstreuung berücksichtigen soll. Gl.(A 25) folgt unter den vor Gl.(A 19) genannten Voraussetzungen und unter Beachtung dieses Faktors aus Gl.(A 17). Analog zu Gl.(A 19-A 21) ergibt sich nach Integration von Gl.(A 25) die Sättigungsrückstreuereate nach CSOM

$$I_{RS} = \frac{c a_1 \zeta}{\mu - (1-c) \zeta} \quad (A 26)$$

Hieraus folgt in der für Gl.(A 24) benutzten Schreibweise die Ascheempfindlichkeit nach CSOM

$$S_{A^{dRS}} = A_1 - \quad (A 27)$$

$$- \frac{b_1 s - (1-c) a_1 s}{[b_1 s - (1-c) a_1 s] A^d + 100 \{ \mu_W(1-s) + \mu_B s - (1-c) [\zeta_W(1-s) + \zeta_B s] \}}$$

Verzeichnis der wichtigsten verwendeten Formelzeichen
und Symbole

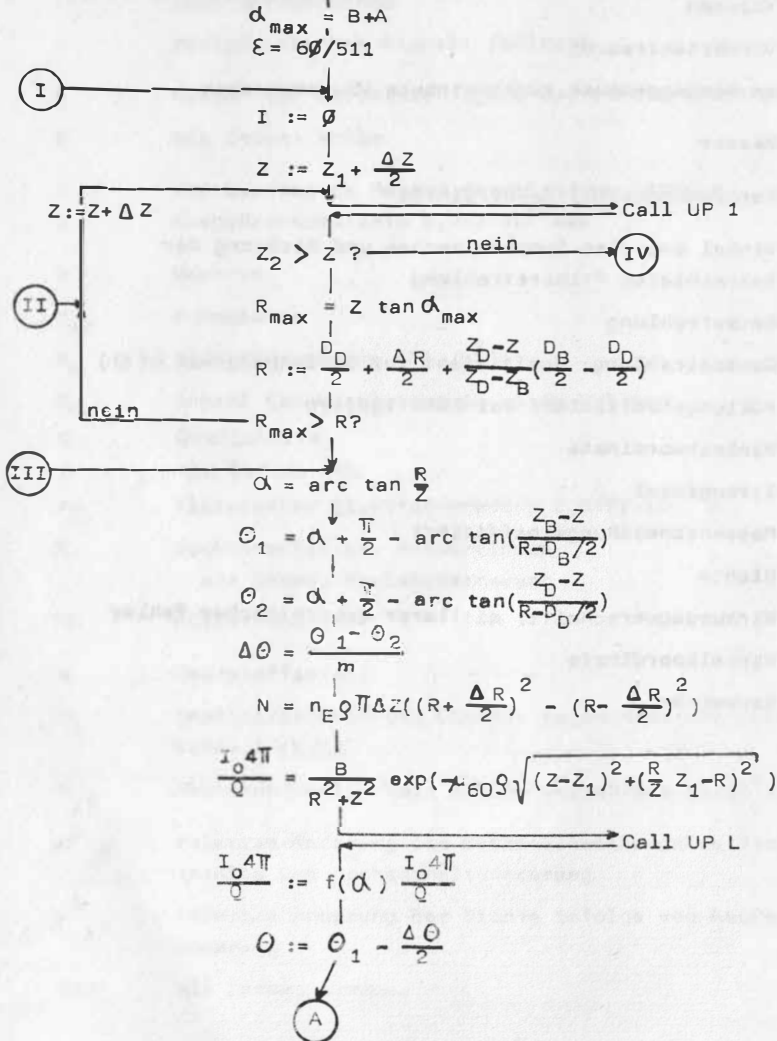
| | |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| a | Querschnittsfläche |
| a_1 | $\sigma_A - \sigma_B$ |
| a_Q | Radius des Kreisflächenpräparate |
| a_{Kol} | Radius der Kollimationsbohrung |
| A | molare Masse; Massenzahl |
| A^d | Aschegehalt, bezogen auf Trockenmasse als Index: nichtbrennbarer Anteil $\%A^d$ Aschegehalt in Masseprozent |
| A_{Str} | Abstand zwischen Punkt (R,Z) und einem Streuzentrum |
| b_1 | $\mu_A - \mu_B$ |
| B | build up Faktor als Index: Blende; brennbarer Anteil |
| c_a | relativer Gehalt der Komponente a |
| c_i | i-ter Eichfaktor |
| C | als Index: Comptonstreuung |
| d | Meßgutschichtdicke als Index: trocken |
| $d_{1/2}$ | Halbwertsschichtdicke |
| D | Detektor |
| eff | als Index: effektiv |
| E | Energie als Index: Elektron E_{γ} γ - Energie E_K Bindungsenergie der K-Elektronen |

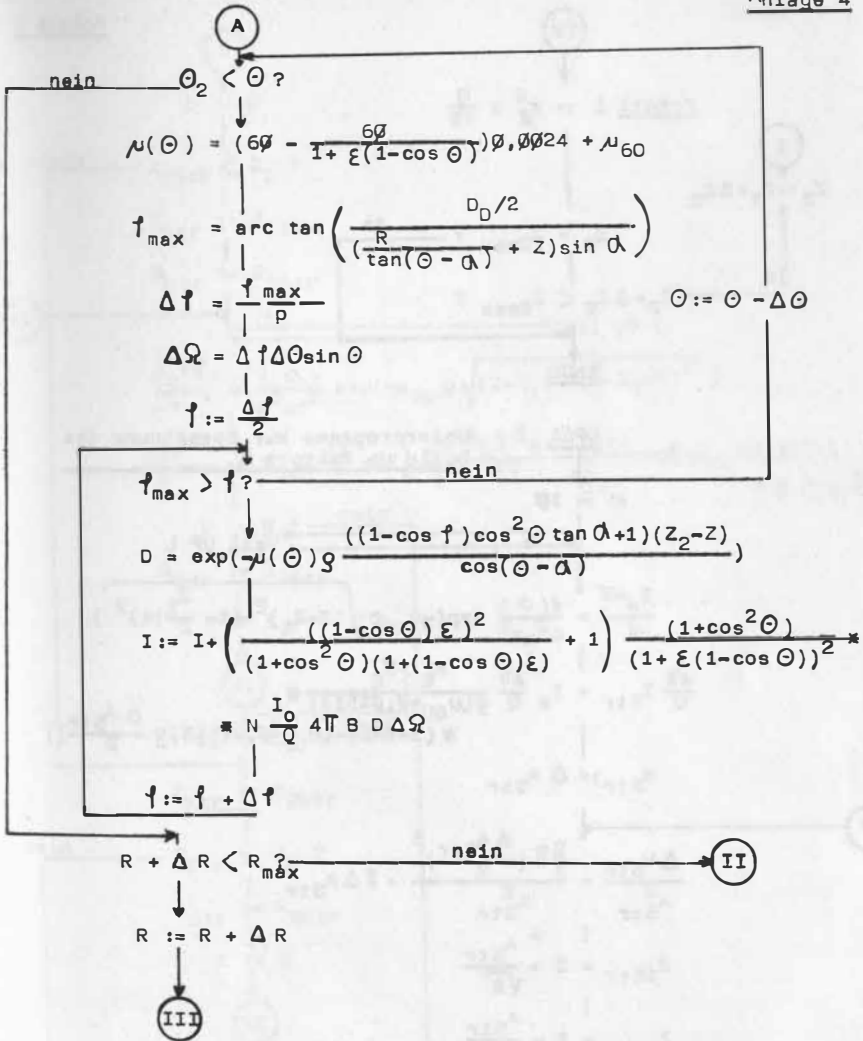
| | |
|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| f | Konstante |
| f(α) | winkelabhängige relative Quantenflußdichte |
| F | Präparatefläche |
| i | Quantenflußdichte |
| I | radiometrisches Signal; Zählrate |
| k | Faktor zur Berücksichtigung der Untergrundstrahlung |
| K | als Index: Kohle |
| l | von Quanten im Meßgut durchlaufene Strecke |
| L | Avogadro-Konstante $6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ |
| n | Neutron |
| n_{at} | Atomdichte |
| n_E | Elektronendichte ($\text{El.}/\text{m}^3$) |
| N_E | Anzahl der Elektronen in einem Volumen |
| Q | Quellstärke |
| r | als Index: roh |
| r_E | klassischer Elektronenradius $2,8177 \cdot 10^{-15} \text{ m}$ |
| R | Rückstrefaktor; R-Koordinate als Index: Rayleighstreuung |
| RS | Rückstreuung |
| s | Feststoffanteil |
| S_i | Empfindlichkeit des Signals gegen Änderung der Größe i (%/%) |
| S_{A^d} | Ascheempfindlichkeit des Meßverfahrens (%/%) ^d |
| $\mu_{A^d}^S$ | relative Änderung des Massenschwächungskoeffizienten infolge von Aschegehaltsänderung |
| $\rho_{A^d}^S$ | relative Änderung der Dichte infolge von Aschegehalts- änderung |
| Str | als Index: Streu- |

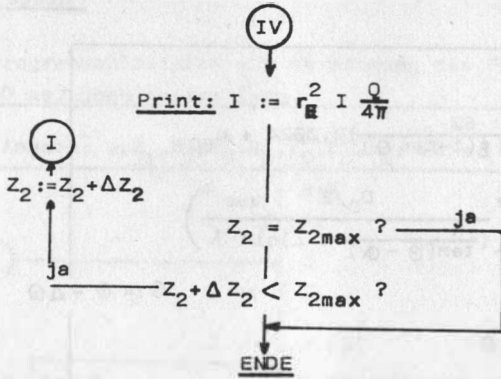
| | |
|------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| TM | Transmission 2 TM Zweifachtransmission |
| U | als Index: Untergrundstrahlung |
| V | Volumen |
| VS | Vorwärtsstreuung |
| VSS | am Sondengehäuse rückgestreute VS-Komponente |
| W | Wasser |
| Z | Kernladungszahl; Z-Koordinate |
| α | Winkel zwischen Symmetrieachse und Richtung der betrachteten Primärstrahlung |
| β | Betastrahlung |
| γ | Gammastrahlung; Koeffizient zur Berechnung von $\mu(\theta)$ |
| η | Füllungskoeffizient bei Schüttgütern |
| \mathcal{N} | Winkelkoordinate |
| θ | Streuwinkel |
| μ | Massenschwächungskoeffizient |
| ρ | Dichte |
| σ | Wirkungsquerschnitt; mittlerer quadratischer Fehler |
| ϑ | Winkelkoordinate |
| ω, Ω | Raumwinkel |

Programmablaufplan zur Berechnung des Flusses vorwärtsgestreuter
60 keV-Quantenstrahlung

Eingabe: $Q, Z_1, Z_2, Z_B, D_B, Z_D, D_D, n_E, \Delta Z (= \Delta R), \rho, m, \mu_{60}, P, \Delta Z_2, Z_{2max}, A, B$

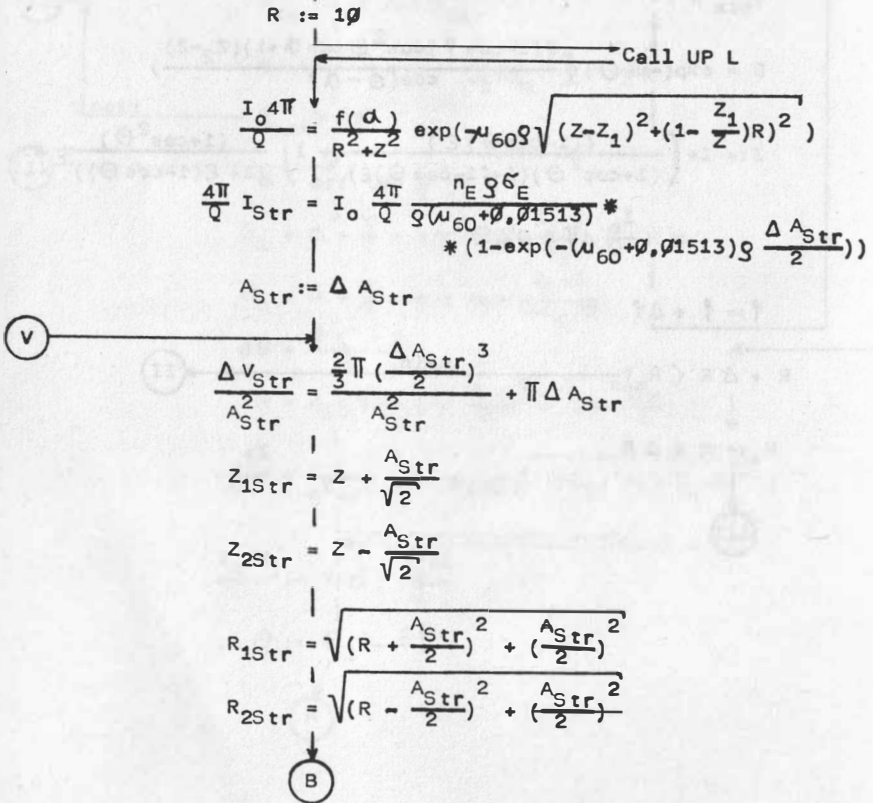


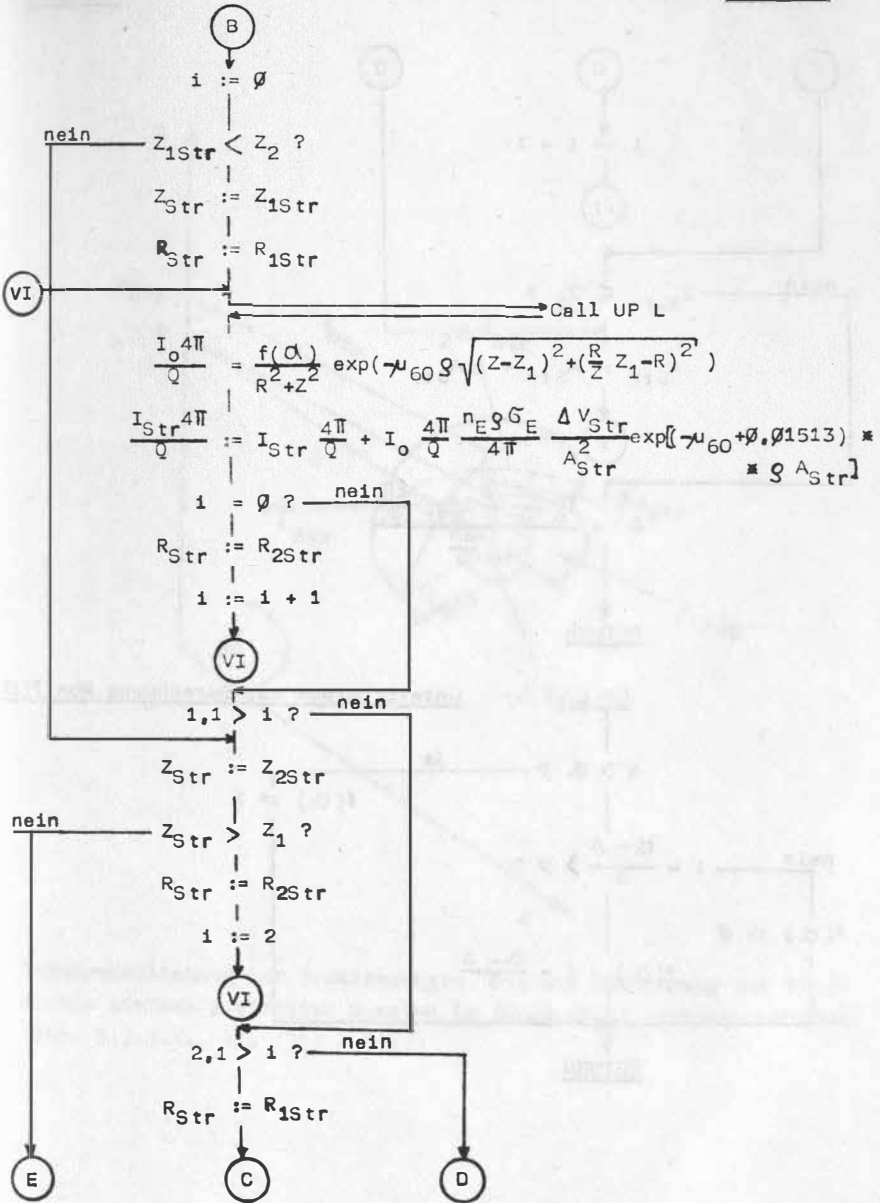


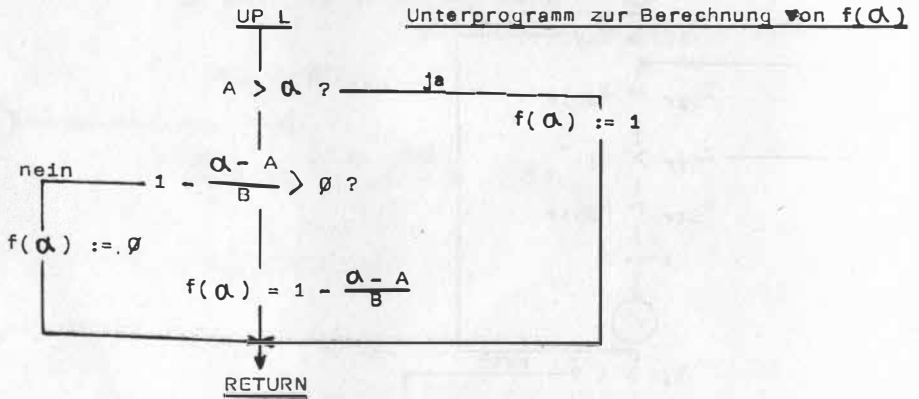
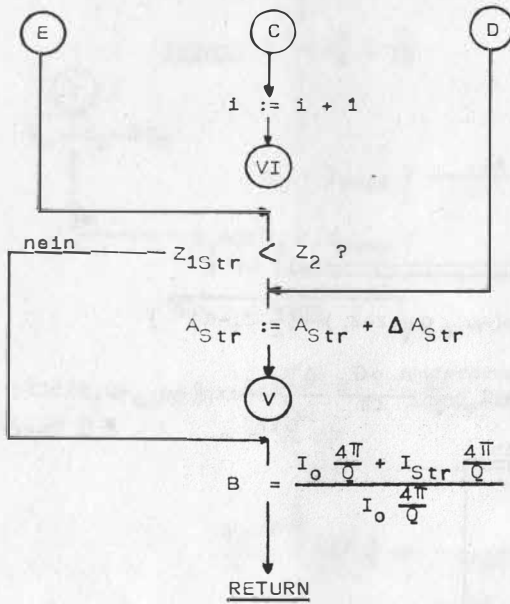


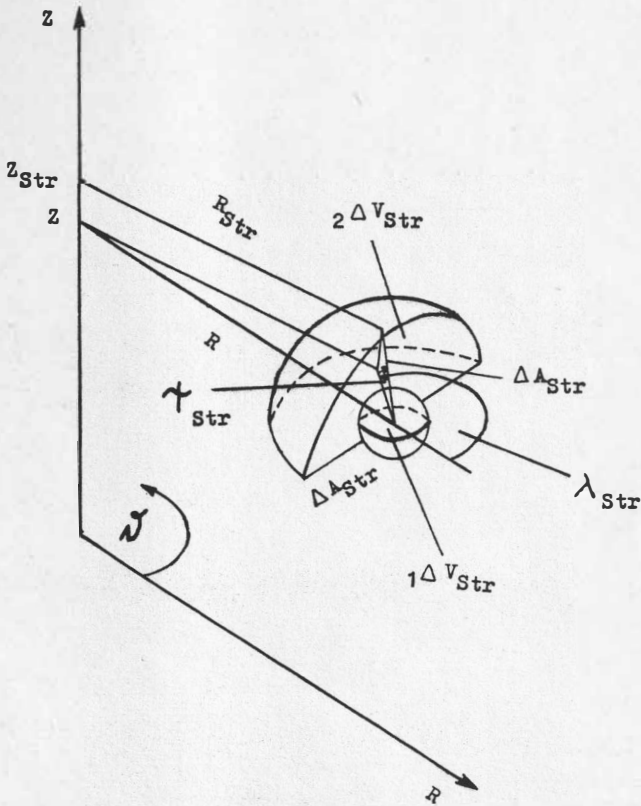
UP 1

Unterprogramm zur Berechnung des build up Faktors B

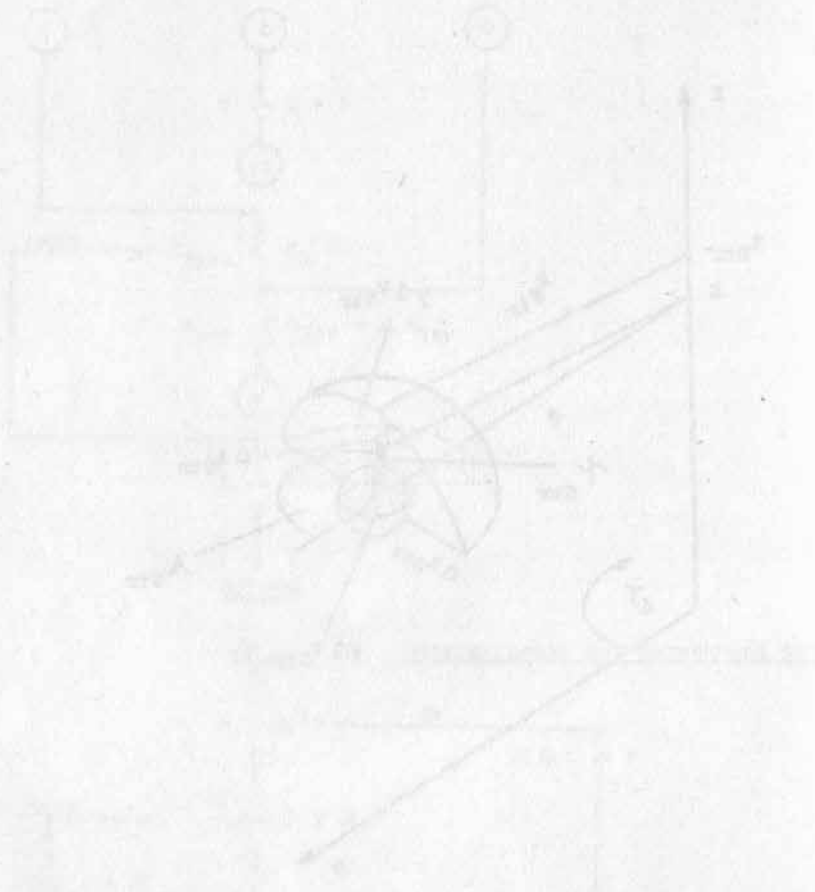








Veranschaulichung der Bezeichnungen, die zur Berechnung der Fluß-
dichte einfach gestreuter Quanten im Punkt (R, Z) verwendet wurden
(Kap. 5.3.3.1., Gl. (31) - (34))



...
...
...

NOTIZEN

NOTIZEN

