

Forschungsbericht 101

Bundesanstalt für
Materialprüfung (BAM)
Berlin

Röntgen- und Gammastrahlen Computer-Tomographie

von Dr.-Ing. Peter Reimers
Dr. rer. nat. Jürgen Goebbels
Dr.-Ing. Heinrich Heidt
Dr.-Ing. Hans-Peter Weise
Dipl.-Phys. Kay Wilding

29 Seiten, 58 Abbildungen

Herausgegeben von der
Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)
Unter den Eichen 87, 1000 Berlin 45
Telefon 030/8104-1 Telex 183261 bamb d

Copyright © 1984 by Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven

Verlag und Vertrieb:
Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10, 2850 Bremerhaven 1
Telefon 0471/46093-95

Zusammenfassung

Nach einleitenden Bemerkungen über die gesetzmäßigen Zusammenhänge zwischen Radiographie, Radiometrie und Computertomographie wird über die Entwicklung und den erreichten Status dieser komplexen Prüftechnik in der BAM berichtet. Die allgemeinen Kriterien der Bildgüte werden anhand von Formeln diskutiert und durch Tomogramme belegt. Da die Empfindlichkeit der CT durch die endliche Photonenausbeute der verfügbaren Strahlenquellen begrenzt ist, wird im fünften Kapitel die für verschiedene Materialstärken erreichbare „Dichteauflösung“ angegeben.

Abstract

The physical relationships between conventional radiography, radiometric inspection methods and computer aided tomography (CT) are reviewed. CT has been successfully applied for medical diagnosis since the early 70's. The same method can also be used in nondestructive materials evaluation if some modifications concerning the radiation source and the detector system are introduced. The development of an industrial CT-scanner by BAM and its practical application for some typical nondestructive testing problems are described. General criteria for the image quality and the spatial resolution of the system are discussed on the basis of the appropriate mathematical relationships. In practice the detection sensitivity of an industrial CT-scanner for voids, flaws or cracks in the object under inspection is limited by the finite photon output of available radiation sources. Numerical relationships between the photon source strength, the scanning time, the thickness of the material and the maximum achievable density resolution are derived.

Die Autoren danken den Mitarbeitern aus den Fachgruppen 6.2 und 6.3

H. Gravenhorst
A. Kettschau
D. Lapuse
E. Nabel
H. Pittelkow

M. Preuss
P. Rose
J. Stade
A. Szameit

Inhaltsverzeichnis

Seite

1. Einleitung	1
2. Prinzip der Computer-Tomographie (CT)	2
3. Entwicklung der CT in der BAM	3
3.1 Vorversuche	3
3.2 Simulationsrechnungen	6
3.3 BAM-Scanner I	8
3.4 BAM-Scanner II	8
4. Allgemeine Kriterien der Bildgüte	10
4.1 Dichteauflösung	10
4.2 Ortsauflösung	11
4.3 Dosis	12
4.4 Artefakte	12
4.5 Volumenhafte Fehler und Risse	13
5. Physikalische und technische Grenzen der CT	15
5.1 Technische Röntgenanlagen	15
5.2 Radionuklide	18
5.3 Elektronen-Beschleuniger	19
6. Mögliche Anwendungen der CT in der zerstörungsfreien Prüfung	20
7. Literatur	28

1. Einleitung

Das übliche Durchstrahlungsverfahren in der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) ist die Radiographie auf Röntgenfilm. Bei diesem Verfahren wird ein Werkstück durch Röntgen- oder Gammastrahlung auf einen Röntgenfilm projiziert. Absorptionsschwankungen im Prüfgegenstand, die durch Dicken- oder Dichteänderungen oder auch durch Materialübergänge verursacht sein können, werden als Kontraste auf dem Film abgebildet. Der Kontrast (Schwärzungsunterschied) ΔS wird bestimmt durch [1]

$$\Delta S = - \lg e \cdot \gamma \cdot \frac{\mu}{1+k} \cdot \Delta d \quad (1.1)$$

(A) (B) (C)

mit

(A): γ = Gradient (Steilheit) der Schwärzungskurve an der Stelle S

S = Schwärzung des Röntgenfilms

(B): μ = Schwächungskoeffizient des durchstrahlten Materials bei der gegebenen Strahlungsenergie

k = Streuverhältnis I/I_0 ; I = Intensität I der Streustrahlung aus dem Werkstück; I_0 Intensität der vom Objekt geschwächten Primärstrahlung (Abb. 1.1)

$\frac{\mu}{1+k} = C_{sp}$ = Spezifischer Kontrast, wie er durch Material und Geometrie des Werkstückes vorgegeben ist (Abb. 1.2)

(C): Δd = Abgebildete Werkstückstufe, die den Kontrast ΔS verursacht

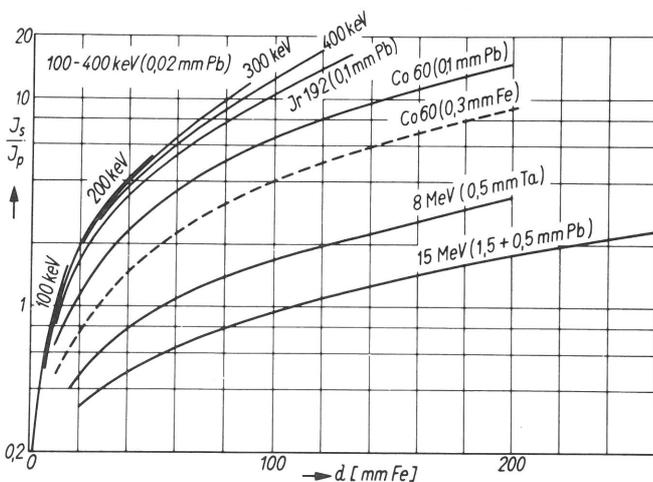


Abb. 1.1 Streuverhältnis als Funktion der Stahldicke für verschiedene Strahlenqualitäten

Der kleinste mit dem Auge oder ggf. meßtechnisch noch erkennbare Kontrast ΔS_{min} führt zu einer kleinsten nachweisbaren Stufe Δd_{min} . Bezogen auf die Werkstückdicke d beträgt Δd_{min} etwa 1 - 2 % bei üblichen radiographischen Aufnahmen. Eine Verbesserung der Durchstrahlungsprüfung ist erreichbar mit einer Verbesserung der Dicken- oder Dichteaufösung. Wenn in Gl. (1.1) der registrierende Film durch einen messenden Strahlungsdetektor, z. B. Ionisationskammer oder Szintillationszähler, ersetzt wird, verändern sich die einzelnen Terme:

- (A) enthält die Effizienz des Detektors bei der am Meßort vorliegenden Intensität bzw. Quantenzahl
- (B) enthält nur noch den Schwächungskoeffizienten μ , da das Streuverhältnis k wegen der Messung im kollimierten, ausgeblendeten Strahlengang bei 0 liegt.

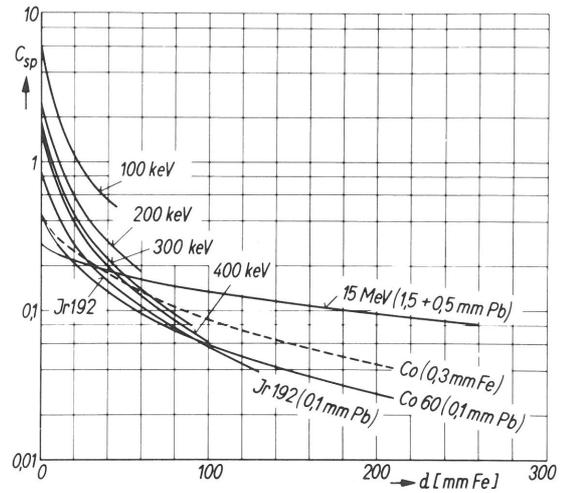


Abb. 1.2 Spezifischer Kontrast als Funktion der Stahldicke für verschiedene Strahlenqualitäten

Eine Meßanordnung für die sog. radiometrische Durchstrahlungsprüfung ist in Abb. 1.3 angegeben.

Der Prüfgegenstand wird dabei durch den kollimierten Primärstrahl abgetastet; die Dicken- bzw. Dichteaufösung ist nicht mehr durch das Auge begrenzt, sondern kann durch Anhebung der gemessenen Quantenzahl weiter verbessert werden.

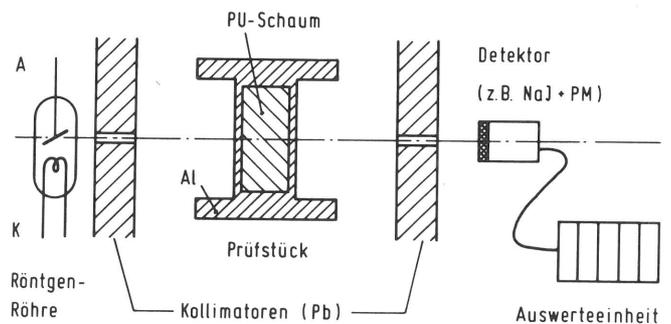


Abb. 1.3 Radiometrische Durchstrahlungsprüfung, Prinzipskizze

Eine weitere Verbesserung der Durchstrahlungsprüfung kann mit der Abkehr von dem Projektionsprinzip erreicht werden, indem die räumliche Lage von Fehlstellen im Prüfgegenstand angezeigt wird. Ältere Verfahren benutzen stereometrische oder tomographische Methoden für die Lagebestimmung; neuere Weiterentwicklungen nutzen die Fähigkeiten von EDV und digitaler Bildverarbeitung [2,3,4]. Den allgemeinsten Ansatz zur Bestimmung der Fehlerlage bietet die Computer-Tomographie (CT), bei der jedes Volumenelement auf einer Schnittebene durch den Prüfgegenstand einen Schwächungswert zugewiesen bekommt; durch Zusammenfügen von Schnittebenen können räumliche Abbildungen gewonnen werden.

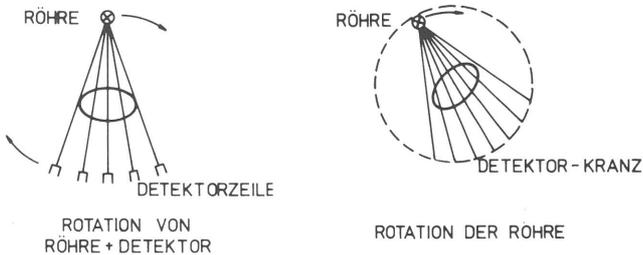
2. Prinzip der CT

Die Schwächung monoenergetischer Röntgenstrahlen in einem Objekt erfolgt nach einem Exponentialgesetz

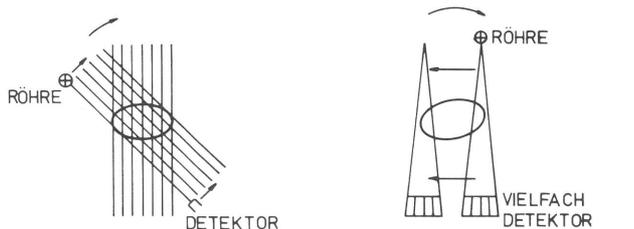
$$I = I_0 \cdot \exp(-\int \mu \, ds) \quad (2.1)$$

mit I_0 = ungeschwächte Strahlenintensität, I = geschwächte Strahlenintensität, μ = materialspezifischer, linearer Schwächungskoeffizient, ds = Weginkrement in Strahlrichtung. Die in der konventionellen Radiographie ermittelte zweidimensionale Intensitätsverteilung läßt im allgemeinen keine eindeutigen Schlüsse auf μ und damit auf die Oberflächenbeschaffenheit zu, da nur das Produkt $\mu \cdot ds$ bekannt ist. Diesen Nachteil beseitigt die Computertomographie. Mit ihr ist es möglich, den linearen Schwächungskoeffizienten in Abhängigkeit vom Ort $\mu = \mu(x, y, z)$ zu bestimmen. Aus meßtechnischen Gründen wird dabei die dreidimensionale Verteilung von $\mu(x, y, z)$ durch eine Folge zweidimensionaler Schnitte $\mu(x, y)$ gewonnen.

Die möglichen Meßprinzipien der Computertomographie sind in einer Reihe von Übersichtsartikeln z. B. [5-10] bereits ausführlich beschrieben. Gegenüber den Fächerstrahlmaschinen (Abb. 2.1a), die in der medizinischen Technik heute fast ausschließlich angewandt werden, bietet der Linear Scanner (Abb. 2.1b) für Materialprüfungen den Vorteil der größeren Flexibilität z. B. gegenüber unterschiedlichen Prüfbjektmaßen.



a) Fächerstrahlscanner



ROTATION + TRANSLATION VON RÖHRE + DETEKTOR

ROTATION + TRANSLATION VON RÖHRE + VIELFACHDETEKTOR

b) Linearscanner

Abb. 2.1

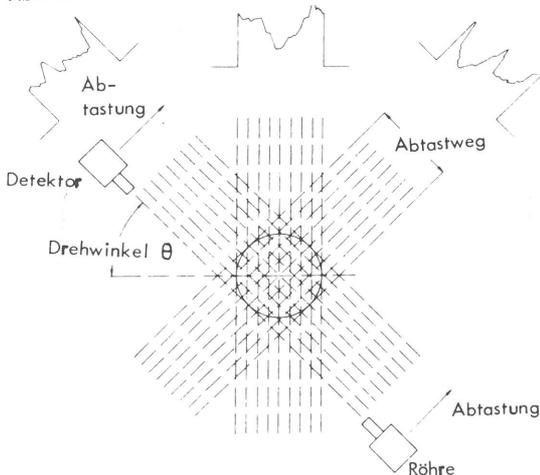


Abb. 2.2
Prinzip eines einfachen Computertomographen mit einem Strahl und einem Detektor (lineare Abtastung und Drehung)

Die Arbeitsweise für einen Tomographen mit einem Strahl und einem Detektor ist in Abb. 2.2 dargestellt. Bei jeder Winkelstellung wird das System Röhre-Detektor schrittweise verschoben und so der ganze Querschnitt des Objektes abgetastet. Hierbei ist die schon erwähnte Kollimierung des Strahls von entscheidender Bedeutung, da nur durch die weitgehende Ausschaltung der Streustrahlung eine Abtastung möglich ist, die auch feinere Strukturen wiedergibt.

Man erhält damit für jeden Winkel ein Schwächungsprofil, zusammengesetzt aus einzelnen Meßwerten (Gl. 2.1). Nach Normierung auf die ungeschwächte Intensität I_0 , Invertierung und Logarithmierung liefert Gleichung 2.1 das Linienintegral des Schwächungskoeffizienten $\mu(x, y)$ in Strahlrichtung längs eines Weges S durch das Objekt,

$$P = \ln(I_0/I) = \int_S \mu(x, y) \, ds \quad (2.2)$$

im weiteren kurz Projektionswert genannt. Die Gesamtheit aller Projektionswerte ist der Ausgangspunkt für die verschiedenen Bildrekonstruktionsverfahren, die sich grob in drei Klassen aufteilen lassen:

1. Iterativ algebraische Rekonstruktionsverfahren
2. Fourierrechenverfahren
3. Verfahren der gefilterten Rückprojektion

Die einzelnen Verfahren sind in einer Reihe von Artikeln [11-15] bereits ausführlich beschrieben, so daß im weiteren nur das Verfahren der gefilterten Rückprojektion behandelt wird, das in der Praxis am häufigsten Verwendung findet. Der Vorteil des Verfahrens liegt zum einen in der Schnelligkeit des Rekonstruktionsalgorithmus, zum anderen darin, daß jede aufgenommene Projektion von Meßwerten sofort im Rechner verarbeitet werden kann, parallel zu der Aufnahme weiterer Projektionen.

In Abb. 2.3 ist die Geometrie für einen Linearscanner nochmals genauer abgebildet. Entsprechend der Aufnahme der Meßwerte werden die Projektionswerte P in Abhängigkeit des Winkels φ und des Abstands r vom Drehmittelpunkt dargestellt,

$$P(r, \varphi) = \ln(I_0/I) = \int \mu(x, y) \, ds \quad (2.3)$$

Für jede Projektion werden diese Werte mit einem Faltungskern $h(r)$ gefaltet

$$P(r, \varphi) * h(r) = f(r, \varphi) = \int P(r', \varphi) h(r-r') \, dr' \quad (2.4)$$

und in die Bildmatrix rückprojiziert

$$\mu(x, y) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \int_0^\infty f(r, \varphi) \cdot d\varphi \quad (2.5)$$

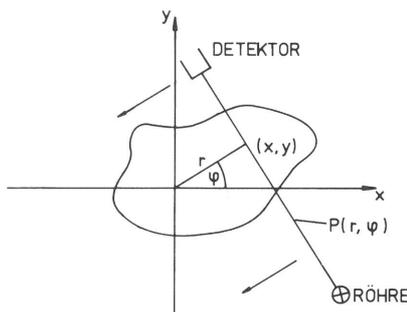


Abb. 2.3
Koordinatensystem für lineare Abtastung und Drehung

Das Argument $x \cos \varphi + y \sin \varphi$ wählt dabei alle die Projektionswerte aus, die einen Beitrag zum Schwächungswert im Punkt (x, y) liefern. Die Notwendigkeit, die einzelnen Projektionen zu falten, läßt sich folgendermaßen anschaulich machen: Jeden Bildpunkt kann man sich als Überlagerung einer Anzahl

von geraden Linien denken, wobei das Ergebnis eine Glockenkurve darstellt, deren Flanken mit $1/r$ abfallen. Die Rückprojektion ohne Faltung würde daher eine Verteilung des Schwächungskoeffizienten in der Schnittebene wiedergeben, die mit $1/r$ gefaltet wäre

$$\mu(x, y) * 1/r$$

Ein weiterer Vorteil des Rekonstruktionsverfahrens der gefalteten Rückprojektion liegt nun darin, daß die Entfaltung schon für jede einzelne Projektion durchgeführt werden kann und nicht erst am fertigen Bild zu erfolgen hat. Die Bildentstehung aus den Meßdaten nach diesem Verfahren ist schematisch in *Abb. 2.4* dargestellt.

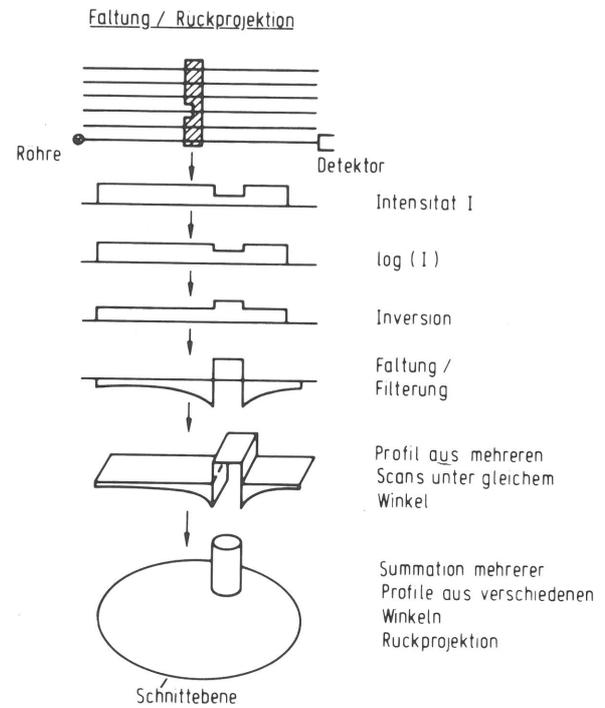


Abb. 2.4
Computertomographie:
Wirkung von Faltung und Rückprojektion

3. Entwicklung der CT in der BAM

Nach der stürmischen Entwicklung der medizinischen Röntgencomputertomographie in den 70er Jahren begannen fast gleichzeitig an vielen Instituten die Forscher nach industriellen Anwendungsmöglichkeiten dieser neuen bildgebenden zerstörungsfreien Prüfmethode zu suchen [16-30].

3.1 Vorversuche mit einem medizinischen Kopfscanner

Wir haben im Jahre 1978 einige Vorversuche durchgeführt, um die Anwendbarkeit der CT in der zerstörungsfreien Materialprüfung zu demonstrieren. Dazu wurde ein kommerzielles medizinisches Gerät (EMI CT 5005) benutzt, das in Berlin in mehreren Kliniken vorhanden ist.

Ein medizinischer Scanner bedingt folgende Einschränkungen, die bei der Auswahl der Beispiele die entscheidende Rolle gespielt haben:

- Die Röhrenspannung beträgt maximal 140 kV; es können deshalb nur Werkstoffe mit kleiner Ordnungszahl tomographiert werden (Holz, Keramik, Aluminium, jedoch kein Eisen),
- die Geräte sind für zylindrische Prüfkörper mit relativ niedriger, aber fast konstanter Gesamtabsorption konzipiert; es können deshalb nur Objekte mit einem maximalen Durchmesser von 30 cm untersucht werden.

Die folgenden Beispiele aus verschiedenen Abteilungen der BAM sollen einen ersten Eindruck von den besonderen Prüfmöglichkeiten der CT vermitteln.

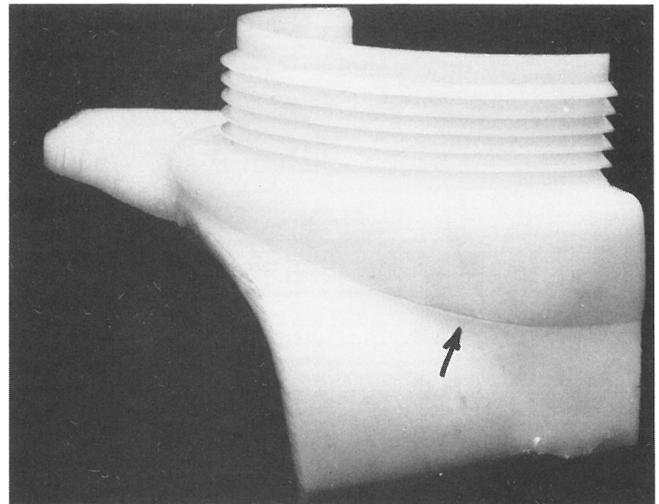


Abb. 3.1
Füllstützen eines Heizöltanks, flächenhafte Fehler in der Bindefläche

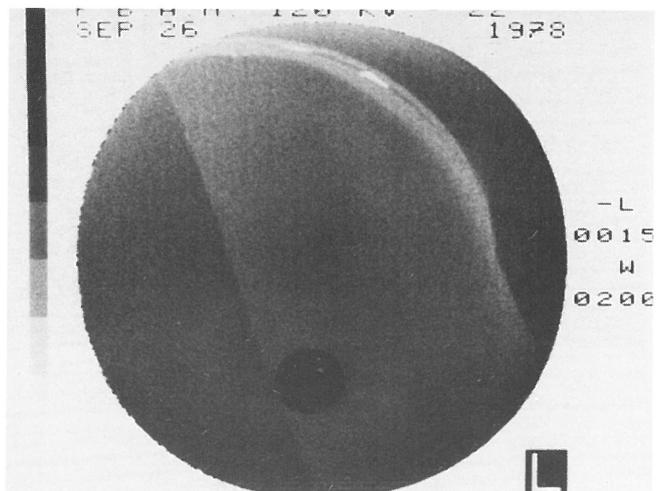


Abb. 3.2
Tomogramm zu *Abb. 3.1*
(120 kV, Bildmatrix 320 x 320)

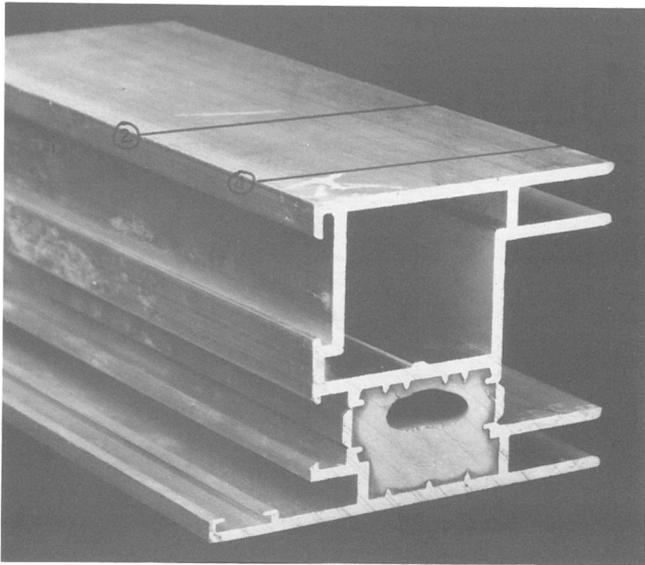


Abb. 3.3
Ausgeschäumtes Aluminiumprofil mit Hohlraum im Schaumkörper

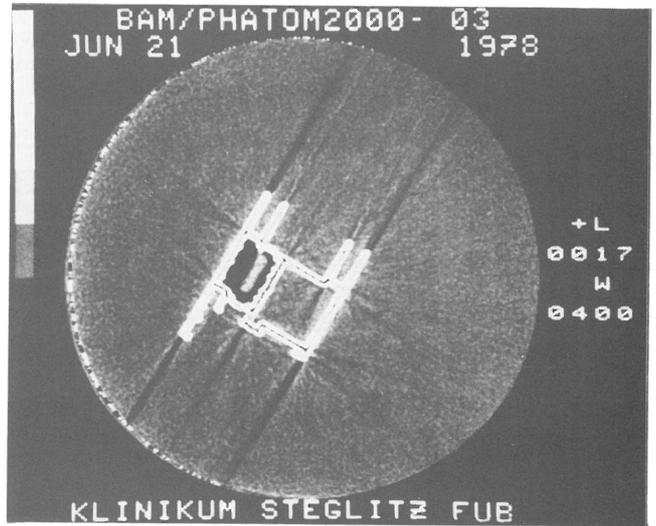


Abb. 3.4
Tomogramm zu Abb. 3.3 in der Schnittebene 1 (120 kV, Bildmatrix 320 x 320)

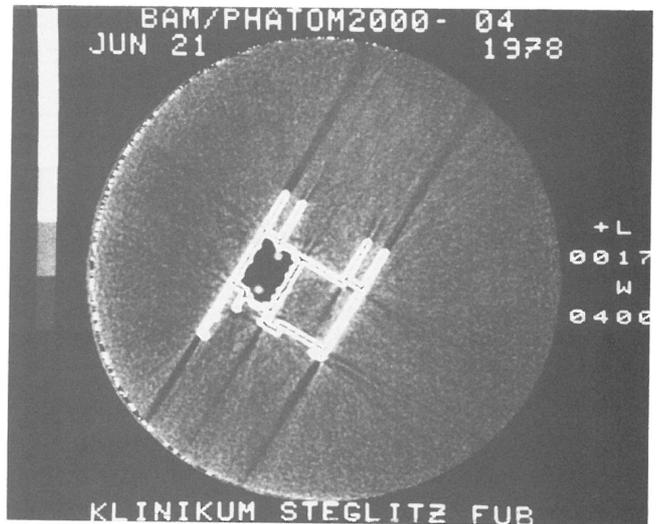


Abb. 3.5
Tomogramm zu Abb. 3.3 in der Schnittebene 2, Aufnahmedaten wie bei 3.4

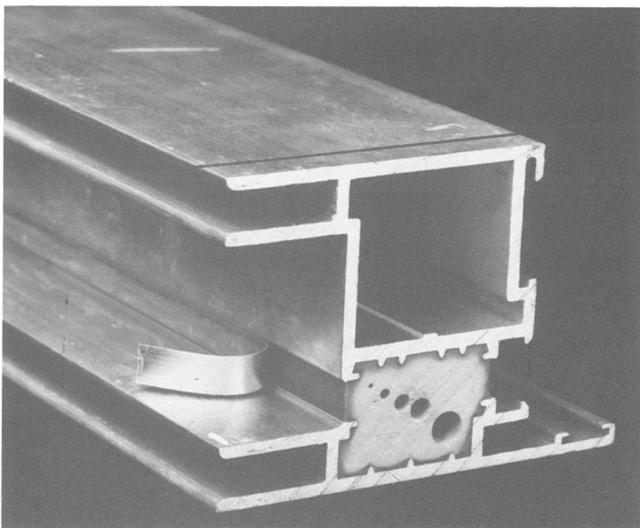


Abb. 3.6
Verbundprofil (Al + Polyurethan) mit Testbohrungen (1 - 5 mm)

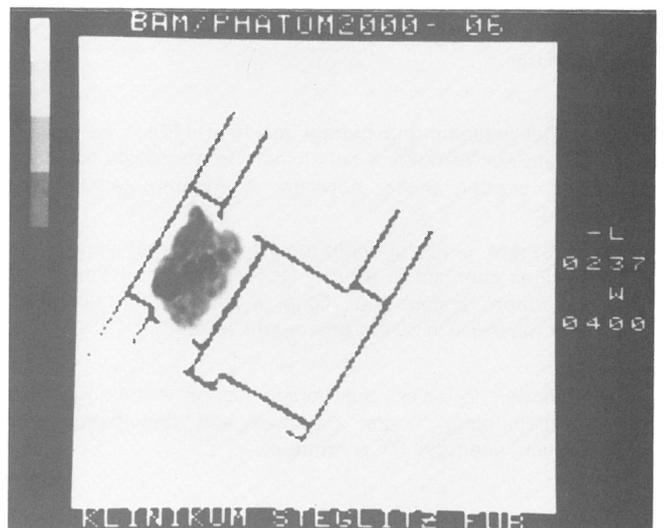


Abb. 3.7
Tomogramm zu Abb. 3.6, Aufnahmedaten wie bei 3.4

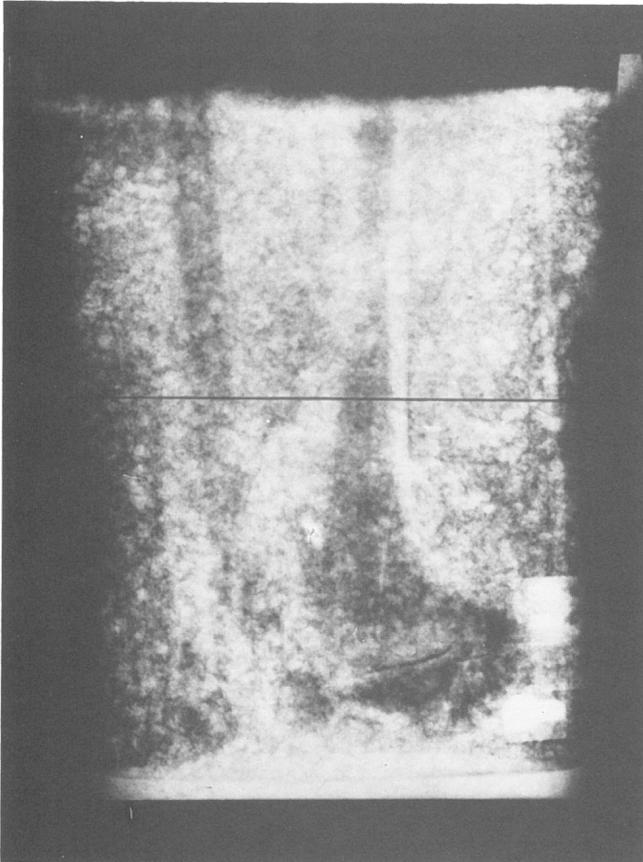


Abb. 3.8
 Modell eines archäologischen Fundstücks.
 Tontopf mit Sand und Knochen gefüllt.
 Radiographische Aufnahme (80 kV)



Abb. 3.9
 Tomogramm zu 3.8
 Aufnahmedaten wie bei 3.4



Abb. 3.10
 Tomogramm einer Acetylenflasche mit Testfehlern:
 2 Schlitze (1 mm und 2 mm breit)
 7 Bohrungen (kleinster Durchmesser 1 mm)

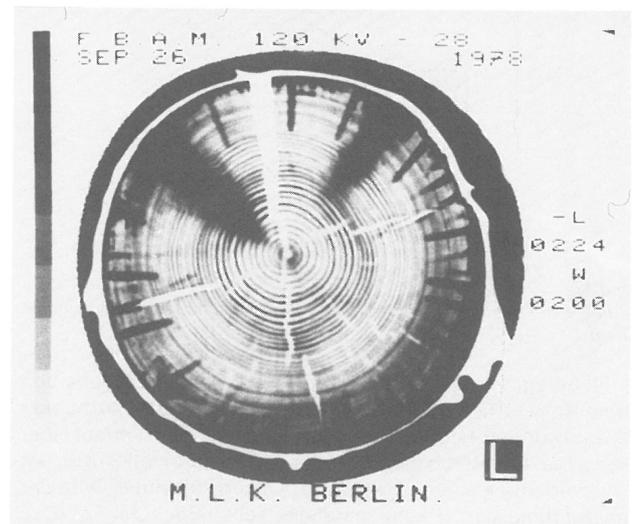


Abb. 3.11
 Tomogramm eines imprägnierten Baumstammes

3.2 Simulationsrechnungen

Einer Realisierung der CT in der Materialprüfung steht eine Reihe von Schwierigkeiten im Wege, die sich am leichtesten durch numerische Simulation der Meßwerte untersuchen lassen. Dabei stehen folgende Probleme im Vordergrund:

1. Technische Prüfgegenstände haben häufig unregelmäßige und sehr unterschiedliche Gestalt.
2. Die durchstrahlte Wandstärke kann in den verschiedenen Einstrahlrichtungen sehr unterschiedlich sein, d. h. es treten hohe Kontraste auf.
3. Die Abtastzeit wird durch die Forderungen an Ortsauflösung und Dichteauflösung bestimmt, die beide durch die Statistik der Detektorimpulse begrenzt werden.

Für die Simulation wurden vorwiegend Beispiele mit mäßiger Ortsauflösung und hoher Dichteauflösung gewählt, da die Mehrzahl der Prüfaufgaben für die CT die Dichteauflösung betont. Für die Analyse kleiner flächenhafter Fehler ist die CT in absehbarer Zukunft sicher nicht das empfindlichste Verfahren, da die Ortsauflösung wegen mangelnder Quellstärke der heute verfügbaren Röntgenstrahlenquellen begrenzt ist (vgl. Kap. 5).

Ziel der Simulationen war es, die Grenzen der Dichte- und Ortsauflösung mit dem heute üblichen Rekonstruktionsverfahren der gefilterten Rückprojektion an vorgegebenen Objektgeometrien kennenzulernen. Zunächst mußten also Detektorsignale erzeugt werden, die sich bei einer realen Abtastung ergeben würden. Diese Werte wurden dann dem Rekonstruktionsprogramm eingegeben.

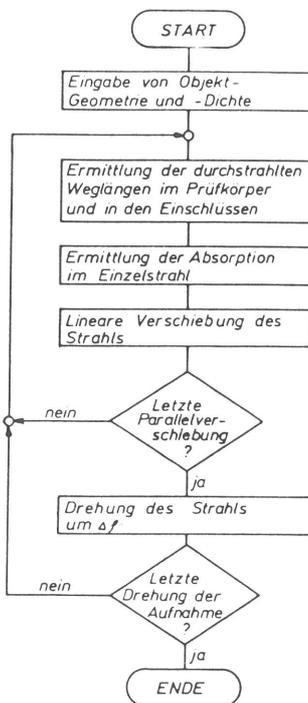


Abb. 3.12 Flußdiagramm des Rechenprogrammes zur Simulation von Absorptionsprofilen

Das Flußdiagramm (Abb. 3.12) zeigt, wie aus der Eingabe von Geometrie und Dichteverteilung des Objekts die Absorptionsprofile gewonnen werden. Das Programm folgt dem Verlauf einer realen Abtastung nach dem Rotations-Translations-Prinzip; um die Auswirkung kleiner Details untersuchen zu können, wird der Strahldurchmesser in zehn parallele Teilstrahlen zerlegt. (Das Abtastprogramm wurde von Herrn Amthor [BAM 7.23] erstellt.) Das Rekonstruktionsprogramm erzeugt aus den Profilen bei verschiedenen Winkelstellungen das Abbild des Objekts in Form einer zweidimensionalen Verteilung des Schwächungskoeffizienten. Für die Filterung der Profile wurde zunächst der Algorithmus von Bracewell benutzt [13,31]. Die Bilddarstellung

erfolgt unter Verwendung von Methoden und Geräten der digitalen Bildverarbeitung, wie Kontrastanhebung, Kantenanhebung und Falschfarbendarstellung. Damit können auch sehr kleine Dichteunterschiede sichtbar gemacht sowie Artefakte unterdrückt werden.

Bei der Simulation der Detektorsignale wurde der Rauschanteil so klein gehalten, daß er keine Fehler erzeugt, die über die Amplitude der Artefakte des Rekonstruktionsalgorithmus hinausgehen.

Um die durch Aufhärtung der Röntgenstrahlung entstehenden Artefakte zu eliminieren, wurde sowohl bei den Simulationen als auch bei den praktischen Versuchen monoenergetische Strahlung (^{137}Cs ; $E = 662 \text{ keV}$) verwendet. Die wesentlichen Parameter unseres Versuchsscanners I sind in Tab. 3.1 im Vergleich zu einem medizinischen Gerät aufgelistet.

Gerät	Strahlung	Strahlbreite	max. Objektdurchmesser	Zahl der Scanpunkte
EMI 5005	80 - 140 kV	0,7 oder 1,4 mm	25 cm	320
BAM-Scanner I	^{60}Co -1,25 MeV ^{192}Ir -390 keV	0,3 - 5 mm	50 cm	bis zu 201
BAM-Scanner II (im Bau)	wie Scanner I	0,1 - 5 mm	100 cm	bis zu 512

Tabelle 3.1 Geräteparameter der BAM-Versuchsscanner

Beispiele:

1. Geringer Dichteunterschied großer Objektbereiche

Als erstes Beispiel wurde eine normale V-Schweißnaht ausgewählt. Auf der mit einem medizinischen Scanner gemessenen Tomographie (Abb. 3.13) erkennt man die unregelmäßige Form des Schweißgutes. Es handelt sich bei dem Basismaterial um Aluminium, da die Schwächung von (40 mm) Eisen für die Maximalenergie von 140 keV zu stark gewesen wäre. Der gravimetrisch gemessene Dichteunterschied des

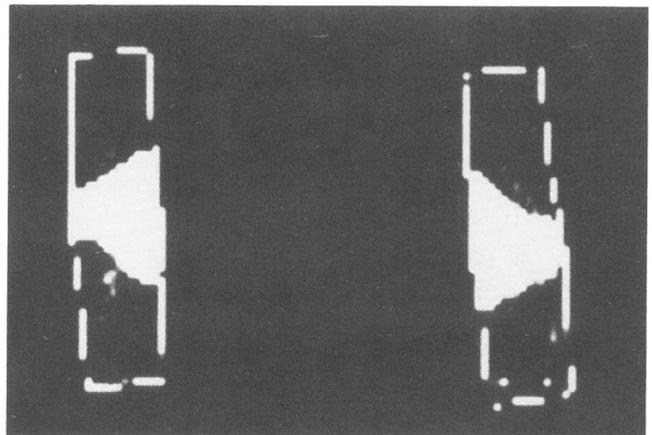


Abb. 3.13 Tomogramm einer Al-Schweißnaht, Aufnahmeparameter wie 3.4

Schweißgutes zum Basismaterial betrug 6,7 %. Das ist ein relativ hoher Wert, der bei Schweißgut auf Fe-Basis sicher niedriger liegt (vgl. Abb. 6.6). Um die Empfindlichkeit der CT zu demonstrieren, wurde die Abtastung einer Schweißnaht mit variablem Dichteunterschied zum Basismaterial mit dem oben beschriebenen Programm simuliert. Abb. 3.14 zeigt die tomographische Rekonstruktion dieses Modells mit dem Dichteunterschied $\Delta\rho = 2 \%$. Dabei wurde das Mittel der Kontrastverstärkung angewendet, um die Zone geringerer Dichte in der Abbildung deutlich sichtbar zu machen. In der Abb. 3.15 ist die Grauwertverteilung der markierten Abbildungszeile dargestellt, um einen Eindruck von dem tatsächlich sehr geringen

Grauwertunterschied des Schweißgutes zum Basismaterial zu vermitteln.

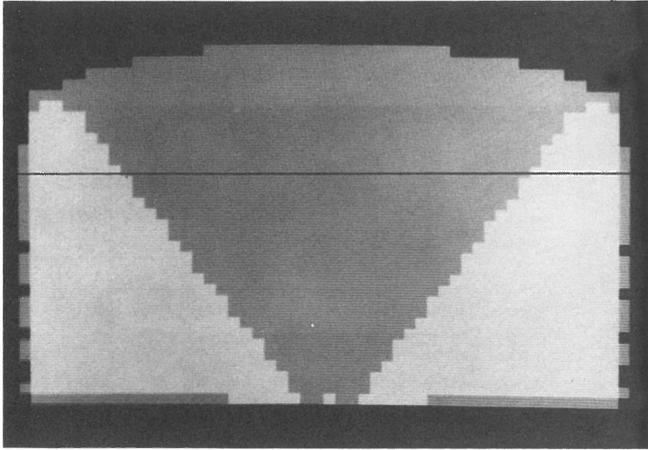


Abb. 3.14
Tomogramm einer V-Schweißnaht aus simulierten Daten ohne Rauschanteil; $\Delta\rho = 2\%$

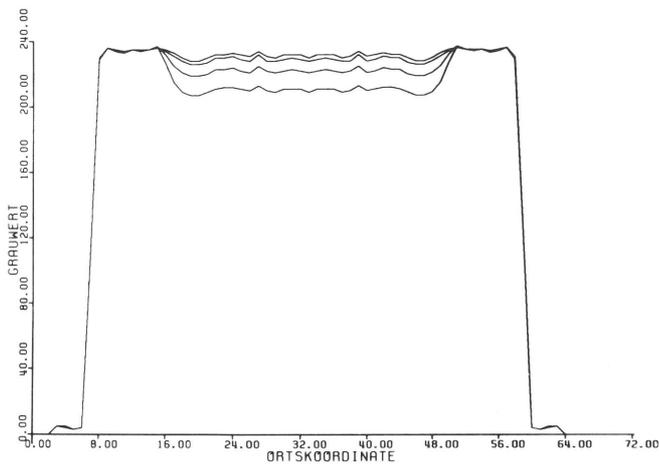


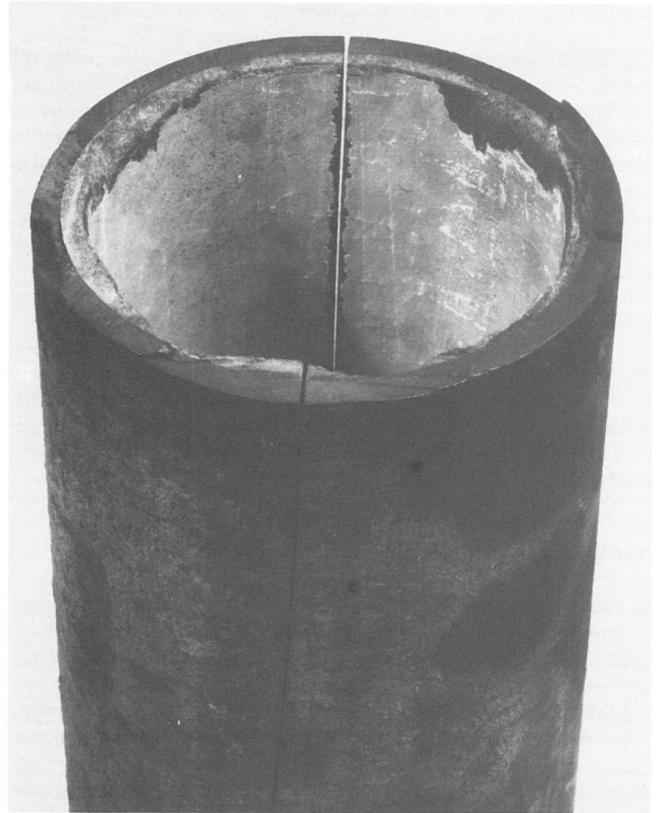
Abb. 3.15
Grauwertverteilung der in Abb. 3.14 markierten Zeile für Dichteunterschiede von 1, 2, 5 und 10% (von oben nach unten)

2. Schwach absorbierendes Material in einer stark absorbierenden Hülle

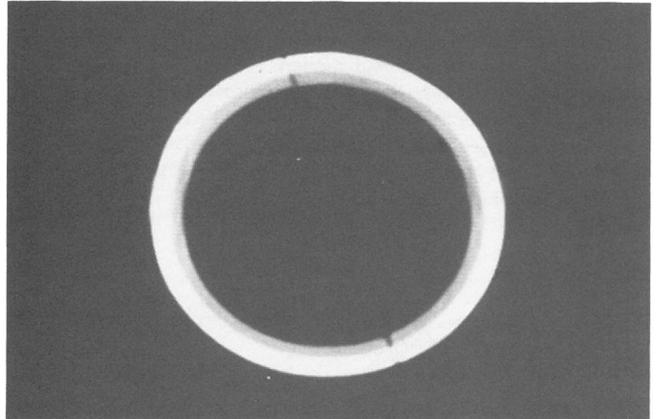
Dieser Fall entspricht genau der klassischen Kopftomographie in der medizinischen Diagnostik. Er unterscheidet sich von der ersten Gruppe nur dadurch, daß der interessierende Teil des Prüfobjektes sich innerhalb einer Hülle aus stark absorbierendem Material befindet.

Es soll hierzu nur eine gemessene Tomographie gezeigt werden, an der sich die Vorteile der digitalen Bildverarbeitung besonders deutlich sichtbar machen lassen.

In der Abb. 3.16 ist ein Schnitt durch ein Stahlrohr (8 mm Wandstärke) mit einer Asbestzementauskleidung (5 mm Belag auf der Innenwand) dargestellt. Durch Kontrastanhebung in einem bestimmten Grauwertbereich und Falschfarbendarstellung kann das schwach absorbierende Material innerhalb des stark absorbierenden Strahlenmantels für das menschliche Auge gut sichtbar gemacht werden.



a) Dickwandiges Stahlrohr mit Asbestzementauskleidung



b) Tomographie zu 3.16a. Quelle ^{60}Co , 50 Ci
Scan: 180 Winkel; 1,2 mm Abtastschrittweite;
Meßzeit: 0,4 sec pro Projektionspunkt;
Bildmatrix: 201 x 201

Abb. 3.16

3. Volumenhafte Fehler in homogenem Material

Die Auffindung und Lokalisierung volumenhafter Fehler ist eine der wichtigsten Aufgaben der ZfP. Besonders interessant ist dabei natürlich die Nachweisgrenze.

Als Modell für die Simulation wurde ein dickwandiges Rohr mit 6 unterschiedlich großen Fehlern gewählt, deren kleinster einen Durchmesser von $1/3$ Strahldurchmesser hatte. In der Tomographie ist der kleinste Fehler mit Hilfe der Kontrastanhebung gerade noch nachweisbar, so daß man als Nachweisgrenze für die Fehlergröße in diesem Fall etwa $1/3$ Strahldurchmesser angeben kann.

Schlußfolgerung aus den Simulationen und Vorversuchen:

Die CT ist ein zerstörungsfreies Prüfverfahren, das es gestattet, durch kompliziert geformte Bauteile aus beliebigen Materialkombinationen Schnitte zu legen und deren Dichte- bzw. Schwächungskoeffizientenverteilung als Grauwertbild darzustellen. Dabei ist die Formtreue der Konturen sehr gut, ebenso die Dichteauflösung großer Objektbereiche und die Lokalisierung volumenhafter Fehler. Die Ortsauflösung kleiner volumenhafter Fehler ist selbstverständlich durch die Breite des Abtaststrahls begrenzt; diese wiederum findet ihre untere Grenze in der Quellstärke der heute verfügbaren Röntgenstrahlungsquellen (sowohl Röntgenröhren wie Radionuklidquellen). Da man mit sehr gut kollimierten Röntgenstrahlen arbeitet (narrow beam-Geometrie), ist die Simulation eines speziellen Prüfproblems relativ einfach. Man kann also mit großer Zuverlässigkeit die Lösbarkeit einer Prüfaufgabe vorhersagen bzw. die Experimentparameter (Quellstärke, Strahldurchmesser, Abtastzeit etc.) festlegen.

3.3 Der BAM-Scanner I

In den Jahren 1979/80 wurde aus einer ausrangierten Fräsmaschine ein erster Versuchsscanner gebaut (Abb. 3.17, 3.18), mit dem die im folgenden gezeigten Tomographien gemessen wurden. Als Strahlenquelle können die normalen Prüfstrahler der ZfP (^{137}Cs , ^{192}Ir , ^{60}Co) verwendet werden. Gemessen wird die Gammastrahlung mit einem NaJ-Detektor. Durch die Benutzung von Gammastrahlern erspart man sich gegenüber einer Röntgenröhre den Referenzdetektor. Quelle und Detektor sind stationär aufgebaut, während das Prüfstück bewegt wird. Der maximale Durchmesser der Prüfstücke beträgt bei diesem ersten Gerät 50 cm. Die Steuerung des Abtastsystems und die Datenerfassung werden von einem eigenen Minirechner (HP 1000) durchgeführt. Auf diesem Rechner laufen auch die Simulationen und die Bildrekonstruktion. Außerdem ist ein Bildspeicher angeschlossen, mit dessen Hilfe es möglich ist, ein im Rechner erzeugtes Bild mit einer Matrix von 256 x 256 Bildpunkten mit jeweils 256 Grauwerten auf einem kommerziellen Fernsehmonitor darzustellen.



Abb. 3.18
Gesamtansicht des Versuchsscanners I

3.4 Der BAM-Scanner II

Ein zweites größeres Gerät für Objekte mit einem Gewicht bis zu 1000 kg befindet sich seit 1980 in der Planung und im Bau. In der Tabelle 3.1 sind die Geräteparameter im Vergleich zu einem medizinischen Schädelscanner aufgelistet.

Der neue Scanner wird mit einem Mehrdetektorsystem (31 Szintillationsdetektoren) ausgestattet, um die Meßzeit um diesen Faktor zu verkürzen. Der eigentliche Scanner (x-, z- und φ -Bewegung des Objekts) ist bereits geliefert (Abb. 3.19).

Im Gegensatz zum BAM-Scanner I wird die gesamte Datenerfassung und Maschinensteuerung von einem autonomen Mikroprozessorsystem übernommen (Abb. 3.20). Dieses System hat genügend Speicherplatz, um alle Meßdaten aller Detektoren während einer Translation zu speichern. Das Rekonstruktions-

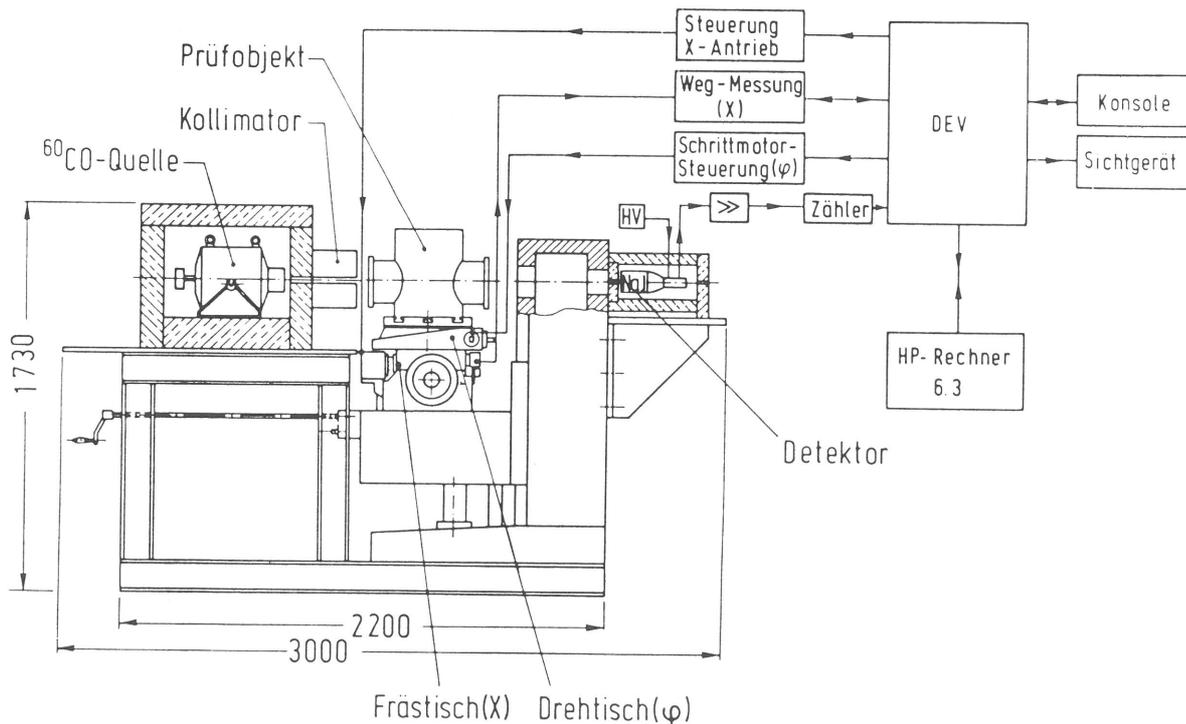
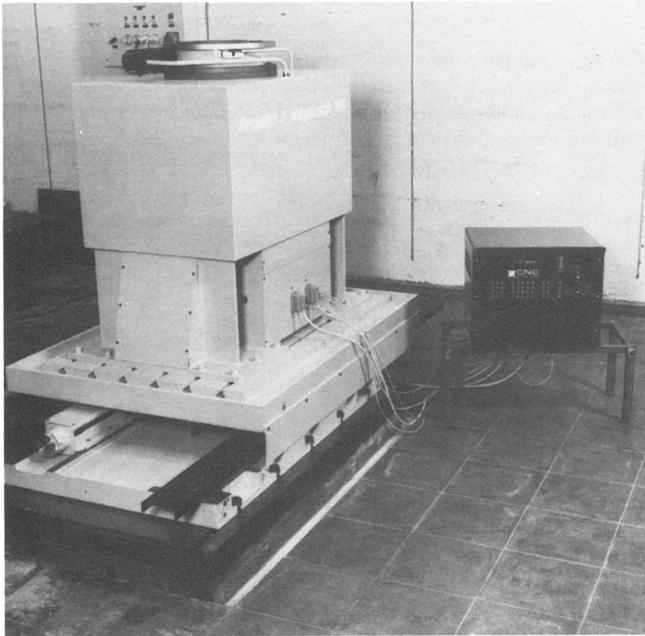


Abb. 3.17
Schematischer Versuchsaufbau des Scanners I



Technische Daten des Manipulators:

Horizontaler Hub	1000 mm
Vertikaler Hub	400 mm
Drehbewegung	360 Grad
Maximale Last zentrisch	10000 N
Antrieb durch Schrittmotore	
Arbeitsgeschwindigkeit	3 mm/s
Eilgang	>10 mm/s
Absolutgenauigkeit zwischen minimaler und maximaler Last	0,2+/-0,1 mm
Wiederholgenauigkeit bei konstanter Last	0,03 mm

Abb. 3.19
Technische Daten und Ansicht des Manipulators für Scanner II

programm soll so aufgebaut werden, daß nach jeder Translation die Meßwerte vom Prozeßrechner übernommen werden und dort parallel zur nächsten Messung gefiltert und zum Bild überlagert werden, so daß am Ende der Messung das Bild fertig ist (vgl. Kap. 2).

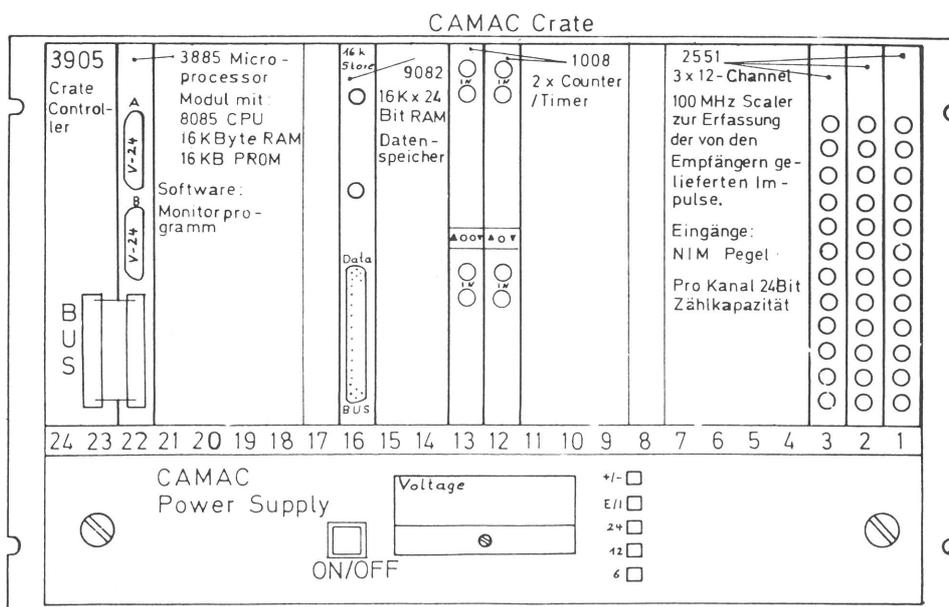
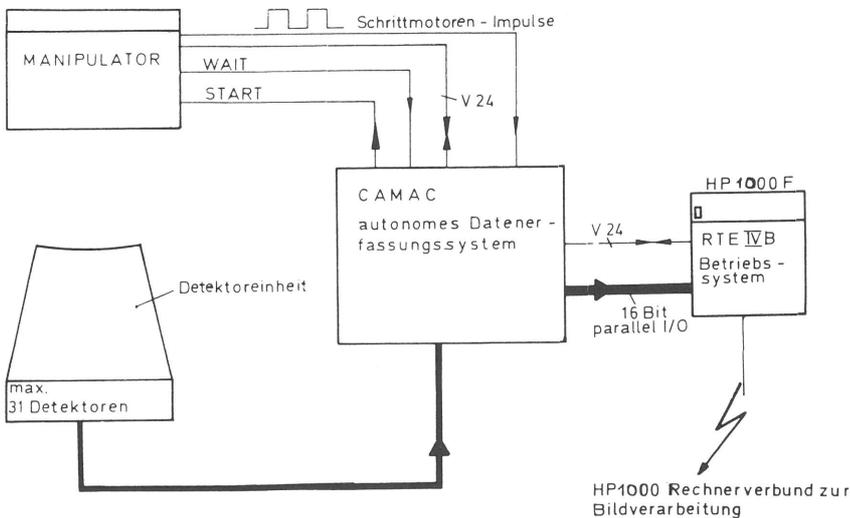


Abb. 3.20
Versuchsaufbau und Datenerfassung für Scanner II

4. Allgemeine Kriterien der Bildgüte

Das entscheidende Kriterium für die Güte eines CT-Systems ist die Qualität des erzeugten Schnittbildes. Es ist jedoch schwierig, die Güte eines Bildes objektiv und eindeutig zu definieren, da die verschiedenen Kriterien der Bildgüte wie Ortsauflösung, Konturenwiedergabe und Dichteauflösung je nach der vorliegenden Prüfaufgabe unterschiedlich bewertet werden. Selbst für die globale Beschreibung des Unterschiedes zweier Bilder werden in der Literatur [12] mehrere verschiedene Formeln benutzt.

In diesem Kapitel sollen die vier Parameter diskutiert werden, welche die Qualität eines Tomogramms primär bestimmen. Es handelt sich hierbei um die Dichteauflösung, die Ortsauflösung, das Rauschen (bzw. die Dosis) und die Artefakte. Die ersten zwei Größen sind direkt voneinander abhängig, d. h. bei vorgegebener Dosis kann jede von ihnen nur auf Kosten der anderen optimiert werden. Nur durch Erhöhung der Dosis läßt sich dann eine Verbesserung erzielen. Die Artefakte sind zum Teil spezifisch für die Rekonstruktionsmethode, zum Teil aber auch abhängig von der Geometrie des Objektes und der Justierung des Meßaufbaus.

4.1 Dichteauflösung

Die bei der Radiographie auf dem Film miterfaßte Streustrahlung läßt nur begrenzt eine quantitative Auswertung der Verteilung des Schwächungskoeffizienten im Objekt zu. Die Kollimierung der Nutzstrahlen auf der Quellen- wie auch auf der Detektorseite verhindert diesen störenden Einfluß. Dadurch läßt sich eine Steigerung des Auflösungsvermögens hinsichtlich unterschiedlicher Schwächungskoeffizienten erzielen. Diese Eigenschaft hat dem Verfahren mit zum revolutionären Durchbruch in der Medizin verholfen, von wo sich der Begriff Dichteauflösung eingebürgert hat. *Abb. 4.1* verdeutlicht die Grenze der Dichteauflösung anhand von vier Tomogrammen.

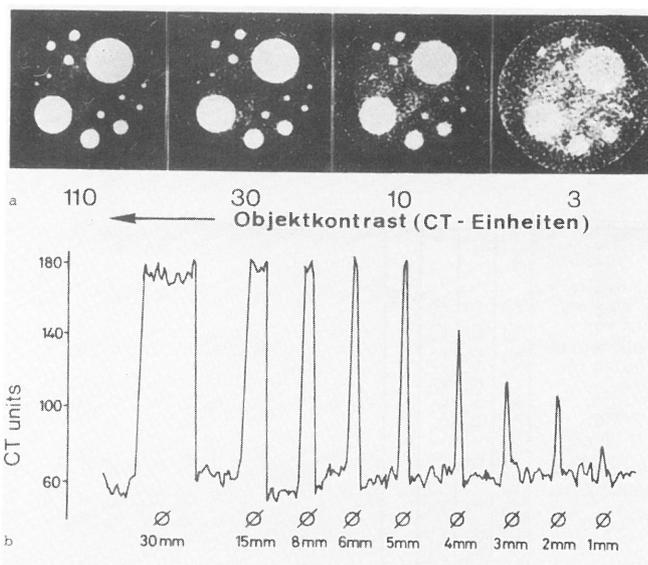


Abb. 4.1
Tomographie von Zylindern mit unterschiedlichen Durchmessern (1 bis 30 mm). (Nach Lange u. Golde [47])
a) Verringerung des Objektcontrastes (Dichteunterschied zwischen Zylinder und Umgebung) begrenzt die Auflösung kleiner Details
b) Ein Dichteprofil zeigt eine Abnahme des Bildcontrastes der kleinen Zylinder, obwohl die Dichte aller Zylinder dieser Abb. gleich war

Die Reduktion des Objektcontrastes von 110 auf 3 CT Einheiten verhindert die Auflösung kleiner Details ($CT\text{-Wert} = (\mu - \mu_{H_2O}) / \mu_{H_2O} \times 10^3$).

Die Abhängigkeit der drei Parameter Ortsauflösung, Dichteauflösung und Dosis läßt sich für einen homogenen zylindrischen Körper darstellen als folgende mathematische Beziehung für die mittlere Varianz des Absorptionskoeffizienten [32]:

$$\Delta \mu = \pi \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \frac{f_N^3 \cdot L}{N_{Tot}}} \quad (4.1)$$

wobei

$$f_N : \text{Nyquistfrequenz} \left(= \frac{L}{2w} \right)$$

w : Abtastschrittweite

L : Objektdurchmesser

N_{Tot} : Summe aller gemessenen Photonen, die durch das Objekt gingen

Dies gilt speziell für die Winkelanzahl

$$M = N \cdot \frac{\pi}{4} \quad (N = \text{Anzahl der Scanpunkte})$$

Die Gleichung (4.1) gibt die Abhängigkeit der Dichte bzw. der Kontrastauflösung von den anderen beiden Größen, der Ortsauflösung (die durch die Nyquistfrequenz begrenzt ist) und der Dosis (bzw. der Photonenzahl N_{Tot}) wieder. Die Dichteauflösung läßt sich sowohl durch Dosiserhöhung als auch durch eine höhere Abtastrate verbessern, jedoch vergrößert sich dadurch die Meßzeit. Es ist also durch die Forderung nach einer bestimmten Auflösung eine untere Grenze der Meßzeit festgelegt.

Die Gleichung 4.1 gilt nur für den Fall eines homogenen zylindrischen Körpers. Anhand einer Messung eines Bleizylinders mit einem Durchmesser von 10 cm läßt sich die Beziehung verifizieren.

Aus Gleichung 4.1 ergibt sich mit den Meßbedingungen

$$L = 10 \text{ cm}$$

$$w = 1,2 \text{ mm}$$

$$N_{Tot} = 1,3 \cdot 10^6$$

$$\mu = 0,7 \text{ cm}^{-1} \text{ (Blei bei Co-60-Strahlung)}$$

der Wert

$$\frac{\Delta \mu}{\mu} = 8,6 \%$$

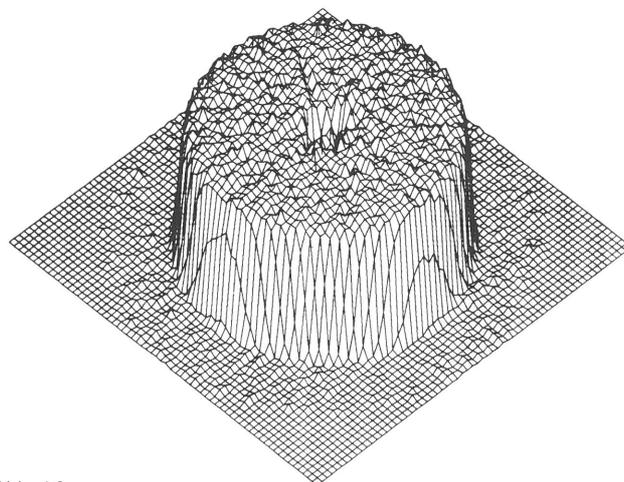


Abb. 4.2
Tomogramm eines Blei-Zylinders (\varnothing 10 cm) in dreidimensionaler Darstellung
Quelle: ^{60}Co , 50 Ci; Scan: 120 Winkel, 1,2 mm Abtastschrittweite; Meßzeit: 0,7 sec pro Projektionspunkt; Bildmatrix 129 x 129

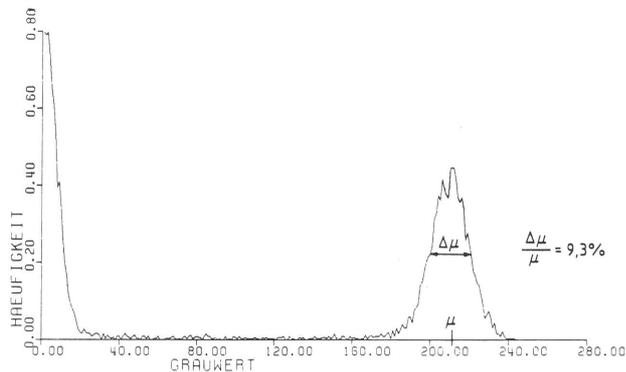


Abb. 4.3
Histogramm von Abb. 4.2

Das Histogramm (Abb. 4.3) des Tomogramms (Abb. 4.2) ergibt als Halbwertsbreite ein

$$\frac{\Delta \mu}{\mu} = 9,3 \%$$

Bei unregelmäßigen Objektstrukturen und Dichteverteilungen läßt sich der Fehler der Dichteauflösung nur noch anhand des Histogramms ermitteln. Weitere Beispiele für die Bedeutung der Dichteauflösung bei der ZfP sind in den folgenden Abbildungen dargestellt.

4.2 Ortsauflösung

Neben der Dichteauflösung ist die Ortsauflösung ein wichtiges Kriterium der Bildgüte. Der Materialprüfer ist vor allem daran interessiert, zu wissen, wie klein ein Objekt sein darf, um es mit dem benutzten Abbildungssystem noch zu erkennen. Hierbei gilt es zu unterscheiden zwischen der reinen Erkennbarkeit eines Fehlers und dem Trennungsvermögen zweier eng benachbarter Fehler, dem Auflösungsvermögen. Zum Erkennen des Fehlers ist neben seiner Größe auch seine Dichte relativ zur Umgebung von Bedeutung. Je größer der Dichteunterschied, um so kleiner kann der Fehler sein, um noch erkannt zu werden.

Das Auflösungsvermögen dagegen besitzt eine feste Grenze, die durch das Sampling-Theorem festgelegt ist: Die höchste Ortsfrequenz, die eindeutig übertragen werden kann, ist die Nyquistfrequenz f_N (die Hälfte der reziproken Abtastschrittweite w)

$$f_N = \frac{1}{2w}$$

Ein häufig benutztes Mittel zur quantitativen Darstellung des örtlichen Auflösungsvermögens eines Abbildungssystems ist die Modulationsübertragungsfunktion MTF (Modulation Transfer Function). Sie beschreibt das Verhältnis des Kontrastes im Bild zum Kontrast im Objekt in Abhängigkeit von der Ortsfrequenz und hat für die Frequenz 0 den Wert 1. Streng genommen ist sie nur für sinusförmige Objektgitterstrukturen definiert. Es lassen sich aber alle realen Strukturen nach dem Fouriertheorem aus Sinusgittern aufbauen, so daß die MTF auch für beliebige Objektstrukturen als Qualitätskriterium herangezogen werden kann. Voraussetzung ist nur, daß es sich um ein lineares Abbildungssystem handelt. Als Auflösungsvermögen bezeichnet man die Ortsfrequenz, bei der die MTF unter einem bestimmten Schwellwert der Modulation abfällt. Oft wird als Schwellwert der Wert 0 benutzt. Dann fällt das Auflösungsvermögen mit der Grenzfrequenz zusammen. Die MTF ist der Betrag der fouriertransformierten Punktbildfunktion. Für nicht zu ausgefallene Punktbildfunktionen ist das Auflösungsvermögen gleich der reziproken Halbwertsbreite dieser Funktion [8].

Im ganzen ist die MTF eines Computer-Tomographie-Systems von folgenden Parametern geprägt:

1. Strahlungsquellenapertur (Fokusbildmesser)
2. Größe des Detektorkollimators
3. Scangeschwindigkeit und Meßdauer
4. Nyquistfrequenz
5. Bildelementgröße
6. Form der Faltungsfunktion

zu 1 und 2:

Der wesentliche Teil der MTF ist durch die geometrische oder Aperturübertragungsfunktion (ATF) festgelegt [33]. Sie beschreibt den Einfluß der endlichen Kollimatorengröße sowie der Geometrie des Aufbaus. Mit ihr läßt sich direkt die Verwaschungsfunktion des Schwächungsprofils beschreiben.

$$ATF(f) = \frac{\sin \frac{\pi f d}{V}}{\frac{\pi f d}{V}} \cdot \frac{\sin \frac{\pi f a (V-1)}{V}}{\frac{\pi f a (V-1)}{V}}$$

d = Detektorapertur

a = Fokusbildmesser

$V = D/d_1 =$ Vergrößerungsfaktor

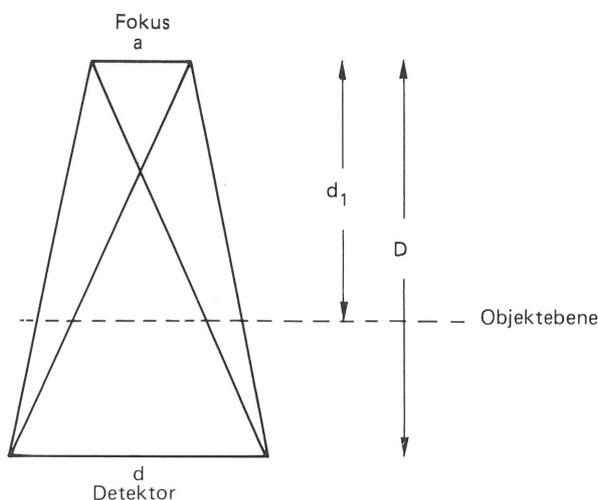


Abb. 4.4
Abbildungssystem eines Computertomographen

zu 3:

Die Scangeschwindigkeit und die Meßdauer sollten so eingestellt werden, daß der Integrationsbereich kleiner bleibt als der Abtastbereich, der durch die ATF festgelegt ist.

zu 4:

Die Nyquistfrequenz wird sinnvollerweise nicht viel höher gewählt als die Grenzfrequenz, um die Meßzeit möglichst niedrig zu halten.

zu 5:

Bei gleicher Bildelementgröße und Abtastschrittweite ist eine Interpolation zur Bildgrößenanpassung nicht notwendig und die Bildrekonstruktionszeit kürzer. Höhere Pixelfrequenz bringt kaum zusätzliche Information

zu 6:

Die für die rechnerische Bildrekonstruktion in Frage kommenden Faltungsfunktionen haben unterschiedliche Auswirkungen auf das Bildrauschen.

Die gesamte MTF des Systems läßt sich aus den Tomogrammen eines Bleiquaders bestimmen. Neben der Punktbildfunktion ermöglicht auch die Kantenbildfunktion die Berechnung der

MTF. Abb. 4.5 zeigt den Verlauf der MTF unseres CT-Systems im Vergleich zum CT/T 8800 Scanner von General Electric [34] und dem eines Röntgenfilmes [35].

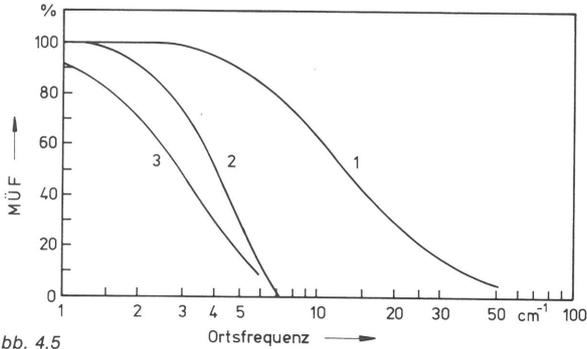


Abb. 4.5
Modulationsübertragungsfunktion
1) für ^{60}Co -Strahlung und Röntgenfilm D2
2) für den Computertomograph CT/T 8800 (General Electric)
3) BAM-Versuchsscanner I

Durch Verkleinern der Kollimatoren ließe sich eine Steigerung der Auflösung erreichen, es würde sich dann aber aus Intensitätsgründen die Meßzeit zu sehr erhöhen, so daß dies nur für kleinere Objekte sinnvoll wäre (vgl. Kap. 5).

4.3 Dosis

In der medizinischen Diagnostik ist die applizierte Dosis ein wichtiger einschränkender Faktor, der in der zerstörungsfreien Materialprüfung im allgemeinen keine Rolle spielen dürfte.

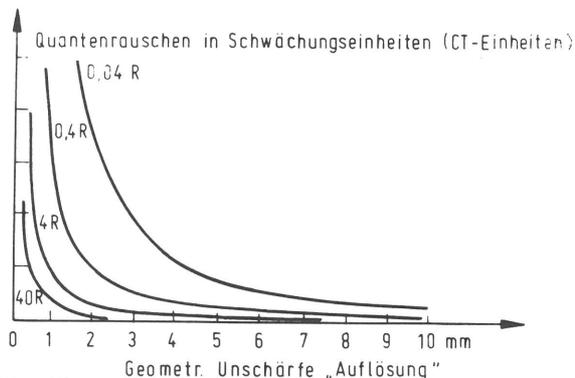


Abb. 4.6
Graphische Darstellung von Gl. 4.1

Durch eine höhere Dosis kann die Ortsauflösung bis in den Bereich von $100\ \mu\text{m}$ gesteigert werden. Dies beinhaltet natürlich auch eine Verkleinerung der Kollimatoren. Abb. 4.6 zeigt graphisch den Zusammenhang zwischen Rauschen, Dosis und Ortsauflösung (Gl. 4.1).

Den begrenzenden Faktor hierbei bildet die radioaktive Quelle. Es läßt sich die spezifische Flächenaktivität nicht beliebig erhöhen, so daß nur eine Meßzeiterhöhung die Dosis steigern kann.

4.4 Artefakte

In realen CT-Scannern können die einzelnen Schwächungsintegrale

$$\int \mu(x) \cdot dx = \ln \frac{I_0}{I} = P(x_k, \theta_m) \quad (4.2)$$

nur an bestimmten diskreten Positionen $x_k (k = 1 \dots N)$ und für eine begrenzte Anzahl von Projektionswinkeln $\theta_m (m = 1 \dots M)$ gemessen werden. Für eine vollständige Bildrekonstruktion werden jedoch auch Daten von nicht vermessenen Punkten der Abtastebene benötigt. Diese müssen durch Interpolation aus den gemessenen Stützstellen berechnet werden. Durch diese Interpolation und durch den Rekonstruktionsalgorithmus selbst können Artefakte, d.h. nicht existente Strukturen in der Bildebene erzeugt werden.

Bei der Verwendung von diskreten Daten ist es wichtig, die Sampling-Rate der Translation und der Rotation aufeinander abzustimmen. Das bedeutet, daß auf dem Rand des Bildkreises die gleiche Abtastfrequenz vorliegen sollte wie beim Abscannen einer Projektion. Dies führt zu einer Bedingung für die Anzahl der Winkel M in Abhängigkeit von der Anzahl der Scanpunkte N [36]:

$$M = \frac{\pi}{2} \cdot N$$

Dadurch ist die maximal benötigte Anzahl der Winkel festgelegt. Innerhalb des Bildkreises erhöht sich aber die Abtastfrequenz der Rotation, so daß hier das Bild überbestimmt ist.

Das Vorhandensein von $\pi \cdot r^2 = \pi \cdot (N/2)^2$ Bildpunkten, die mit $N \cdot M$ Meßpunkten (Variablen) beschrieben werden, führt zu einer anderen Bedingung für die Winkelanzahl.

$$M = \frac{\pi}{4} \cdot N$$

Hierbei ist das Bild in der Mitte weiter überbestimmt, auf dem Rand des Bildkreises aber etwas unterbestimmt. Die Ergebnisse zeigen, daß diese Anzahl der Winkel ausreicht, um qualitativ gute Bilder zu erhalten. Abb. 4.7 zeigt den Einfluß der verringerten Winkelanzahl auf die Bildqualität.

Die eben erwähnte Art der Artefakte ist von den Aufnahmebedingungen bestimmt. Daneben können noch Artefakte auftreten, die von der Objektstruktur abhängen. Sie entstehen bei der rechnerischen Bildrekonstruktion und beruhen auf dem Faltungsalgorithmus. Durch die Anhebung der höheren Ortsfrequenzen treten sie speziell bei Kanten mit hohem Kontrast auf. Die Wahl der Filterfunktion kann diese Artefakte etwas dämpfen, vermindert aber auch etwas die Ortsauflösung. Die Abbildungen 4.8 und 4.9 zeigen zwei Faltungskerne und ihr Ortsfrequenzspektrum. Erwähnt sei noch, daß Artefakte ebenfalls durch Fehljustierungen des Aufbaus auftreten können.

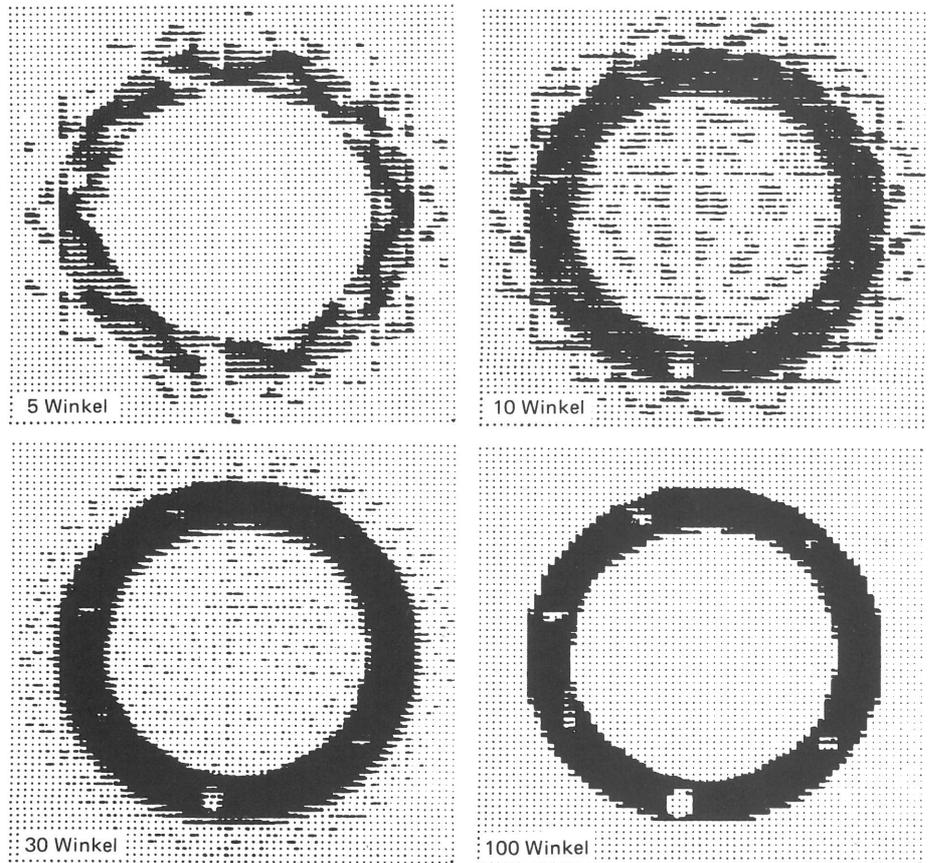
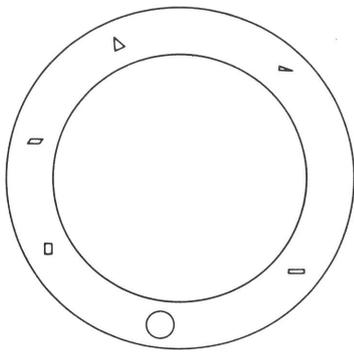


Abb. 4.7
Tomographien aus simulierten Durchstrahlungen eines Rohrmodells mit 5 Fehlern

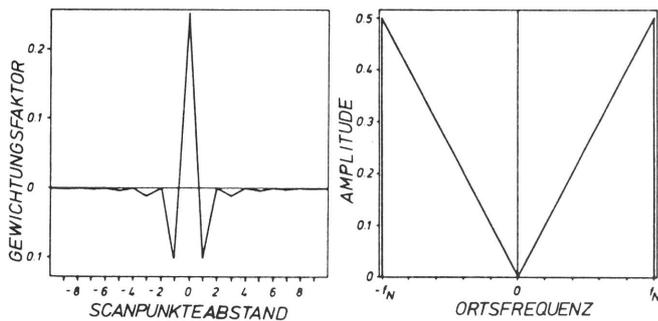


Abb. 4.8
Filterung nach Bracewell
Faltungskern und Ortsfrequenzspektrum

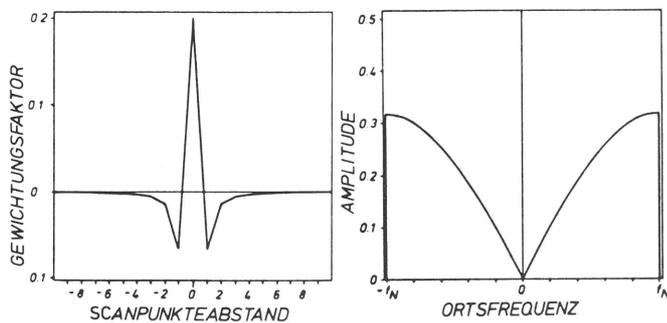


Abb. 4.9
Filterung nach Shepp-Logan
Faltungskern und Ortsfrequenzspektrum

4.5 Kleine volumenhafte Fehler und Risse

Trotz der begrenzten Ortsauflösung besitzt die CT eine gute bzw. sehr gute Nachweisempfindlichkeit für kleine volumenhafte Fehler und Risse.

Man kann das tomographische Bild $\hat{\mu}(x,y,z)$ als lineare Transformation oder Abbildung der realen Verteilung des Schwächungskoeffizienten $\mu(\xi,\eta,\zeta)$ betrachten [23]:

$$\hat{\mu}(x, y, z) = \iiint_{-\infty}^{\infty} \mu(\xi, \eta, \zeta) \cdot h(x-\xi, y-\eta, z-\zeta) d\xi d\eta d\zeta \quad (4.3)$$

Ein Defekt im Prüfkörper (μ) mit dem Schwächungskoeffizienten μ_d wird ebenso in die Bildebene transformiert ($\hat{\mu}_d$). Die Eigenschaften des Fehlers in der Abbildung ergeben sich aus der Differenz

$$\Delta \hat{\mu}_d = \hat{\mu}_d - \mu = \iiint \Delta \mu_d \cdot h \cdot d \xi d\eta d\varphi \quad (4.4)$$

Wie in allen linearen Systemen nimmt mit abnehmender Größe das Bild $\Delta \hat{\mu}_d$ die Form der Übertragungsfunktion (manchmal auch Streufunktion genannt) an; d. h. kleine Fehler können nicht mehr auf Grund ihrer Gestalt unterschieden werden. Wenn jedoch die Amplitude des Fehlerbildes $\hat{\mu}_d$ groß genug ist, kann dieser Fehler noch nachgewiesen werden. Dazu muß die Differenz des Fehlerbildes zur Umgebung größer sein als die Meßunsicherheit des Schwächungskoeffizienten μ des fehlerlosen Bildes:

$$|\Delta \hat{\mu}_d| \geq p \cdot \delta(\hat{\mu}) \quad (4.5)$$

Hier ist $\delta(\hat{\mu})$ die Standardabweichung des gemessenen Schwächungskoeffizienten bei vielen Messungen; p ist ein Faktor, der die statistische Sicherheit angibt, mit der $\hat{\mu}$ gemessen

wird; er wird zwischen 2 und 6 angegeben. Es soll $p = 4$ gelten. Die relative Standardabweichung sei $\delta = \delta(\hat{\mu}) / \hat{\mu}$. Dann gilt

$$|\Delta \hat{\mu}_d| \geq 4 \cdot \delta \cdot \hat{\mu} \quad (4.6)$$

Der Fehler soll sich im Koordinatenursprung $\xi = \eta = \zeta = 0$ befinden

$$|\iiint \Delta \mu_d \cdot h \cdot dx dy dz| \geq 4 \cdot \delta \cdot \iiint \mu \cdot h \cdot dx dy dz \quad (4.7)$$

und das Prüfobjekt aus homogenem Material ($\mu = \mu_0$) bestehen

$$|\iiint k_d h \cdot dx dy dz| \geq 4 \delta V_0 \quad (4.8)$$

Hier ist $k_d = \Delta \mu / \mu_0$ der Kontrast des Feldes und

$$V_0 = \iiint h(x, y, z) dx dy dz$$

das Volumen eines Bildelementes (= pixel oder voxel). Die Übertragungsfunktion h hat die Form einer Besselfunktion erster Ordnung. Für einen kleinen Fehler (< pixel-Größe) ist mit hinreichender Genauigkeit $h = 1$. Dann folgt aus Gl. (4.8):

$$|k_d| \cdot V_d \geq 4 \delta V_0 \quad (4.9)$$

Für eine Pore in homogenem Material gilt

$$V_d = 4/3 \cdot \pi \cdot r^3 = \text{Volumen der Pore}$$

$$V_0 = (L/N)^3 = \text{Bildelementgröße}$$

Aus Gl. (4.9) folgt damit

$$r \geq \sqrt[3]{\frac{3}{\pi} \frac{\delta}{|k_d|} \cdot \frac{L}{N}} \quad (4.10)$$

Mit den folgenden Daten, die dem medizinischen Scanner EMI 5005 entsprechen

$$L = 250 \text{ mm}$$

$$N = 320 \text{ Bildpunkte}$$

$$\delta = 0,05 (= 5\%)$$

$$k_d = -1$$

ergibt sich der Durchmesser der noch nachweisbaren Pore zu $2r \geq 0,56 \text{ mm}$.

Besonderes Interesse in der zerstörungsfreien Materialprüfung finden immer die flächenhaften Fehler oder Risse. Die

konventionelle Radiographie hat i.a. Schwierigkeiten beim Auffinden von Rissen, wenn deren räumliche Lage nicht bekannt ist. Bei der CT dagegen ist die Amplitude des Abbildes eines Risses praktisch unabhängig von dessen Verlauf innerhalb der abgetasteten Schicht, wenn die Riß-Normale in der Schicht liegt. Der Grund liegt einfach darin, daß das Objekt unter allen Winkeln durchstrahlt wird.

Als Bedingung für die Nachweisbarkeit eines Risses mit der Öffnung d_R erhält man mit den oben eingeführten Größen

$$d_R \geq \frac{4 \delta}{|k_d|} \cdot \frac{L}{N} \quad (4.11)$$

und mit den angegebenen Daten einen Wert für d_R von $d_R \geq 0,156 \text{ mm}$.

Wir haben diesen Effekt mit einem Rißmodell (3 Spalten unterschiedlicher Länge, aber jeweils gleicher Breite in einem Aluminium-Block) demonstriert.

Zum Vergleich sind in Tabelle 4.1 die radiographischen Kontraste dieses Modells dargestellt.

$\Delta d[\text{mm}]$	$\Delta d/d [\%]$	ΔS
5,0	6,6	0,18±0,02
2,0	2,6	0,09±0,02
1,0	1,3	0,05±0,02
0,69	0,9	0,05±0,03
0,38	0,5	0,04±0,03
0,16	0,2	—

Dicke des Prüfkörpers $d = 76,4 \text{ mm Al}$
 Grundschwärzung $S = 2,5$
 Be-Fensterröhre, Gleichstrombetrieb
 Röhrenspannung 100 kV

Tabelle 4.1

Kontrast von Spalten im Testkörper mit unterschiedlicher Ausdehnung Δd in Durchstrahlungsrichtung

Aus der Tabelle 4.1 folgt, daß ein Spalt mit einer relativen Breite von $< 0,9\%$ bei der normalen Durchstrahlungsprüfung nicht mehr auffindbar ist, da der Fehler der photometrisch gemessenen Filmschwärzung dieselbe Größe wie der Meßeffect hat (vgl. Tabelle 4.1, Spalte 3); dieses Ergebnis stimmt mit der visuellen Filmauswertung überein. Auf den Tomographien sind jedoch noch Spalte mit einer relativen Breite von $0,2\%$ zu erkennen. Außerdem geben sie die räumliche Anordnung in der Schnittebene wieder (Abb. 4.10).

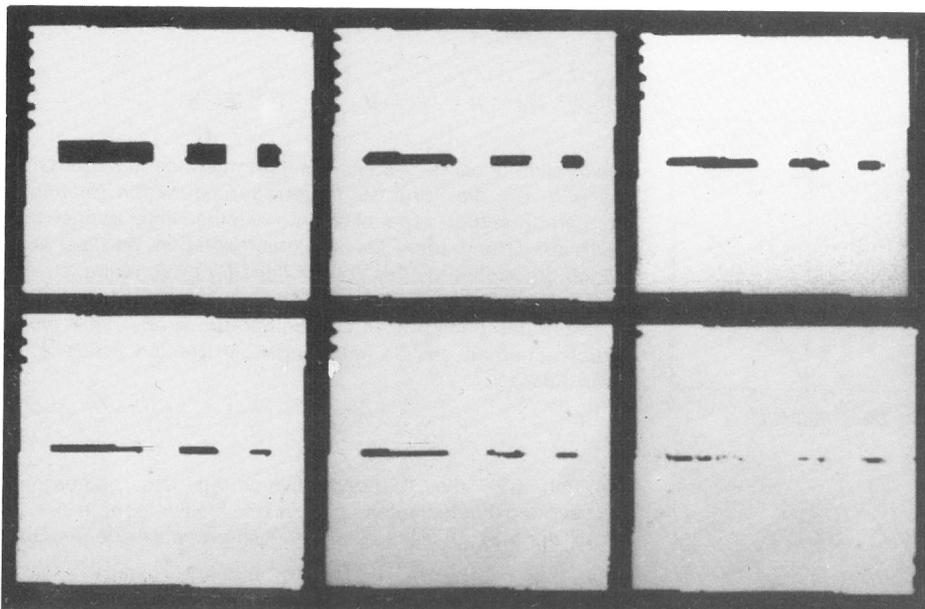


Abb. 4.10
 Tomographien des Testkörpers
 von Tabelle 4.1

5. Physikalische bzw. technische Grenzen der CT

Der wichtigste einschränkende Parameter der technischen CT ist die endliche Photonenabsorption der verfügbaren Strahlenquellen, seien es Radionuklide, Röntgen-Röhren oder Elektronen-Beschleuniger. Da die Röntgen-CT ein radiometrisches Durchstrahlungsverfahren ist, sind die meisten der folgenden Überlegungen bereits aus der Radiometrie oder Radiographie bekannt [1-3]. Im folgenden wird in tabellarischer Form für die drei genannten Strahlenquellen — Röntgengerät, Radionuklid, Elektronenbeschleuniger — aufgelistet, welche „Dichteauflösung“ bei unterschiedlichen Abtastzeiten erreichbar ist. Speziell bei der hochenergetischen Bremsstrahlung sind Detektorprobleme (Empfindlichkeit, Abschirmung, Comptonstreuung) nicht berücksichtigt. Die real erreichbare Auflösung wird also in jedem Falle schlechter sein als hier angegeben. Der Prüfkörper sei ein zylindrisches Stück Stahl mit dem Durchmesser d , der identisch mit dem Durchmesser des Abtastkreises sein soll. Dann beträgt nach Gl. 4.1 die relative „Dichteauflösung“ in der Mitte des Prüfstücks

$$\frac{\Delta \mu}{\mu} = \frac{\pi}{\mu} \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \frac{d \cdot f_N^3}{N_{\text{Tot}}}} \quad (5.1)$$

$$N_{\text{Tot}} = N \cdot M \cdot N_0 \cdot \exp(-\mu \cdot d)$$

$$M = \pi/4 \cdot N$$

$$N = d/\Delta x$$

N_0 = Anzahl der pro Meßintervall zur Verfügung stehenden Photonen

$$f_N = 1/(2 \cdot \Delta x)$$

Für die meisten der im nächsten Kapitel abgebildeten Tomographien gelten die folgenden Parameterwerte:

$$\Delta x = 1 \text{ mm}$$

$$f_N = 1/(2 \cdot \Delta x) = 5 \text{ cm}^{-1}$$

$$A = \text{Abstand Quelle-Detektor} = 2,0 \text{ m}$$

Die Meßdauer läßt sich folgendermaßen berechnen:

Bei einem Objektdurchmesser von $d = 40 \text{ cm}$ und einer Abtastlänge $\Delta x = 0,1 \text{ cm}$ ist $N = 400$ und $M = \pi/4 \cdot N = 314$; daraus ergeben sich $M \cdot N = 1,26 \cdot 10^5$ Meßintervalle mit einem Detektor. Die Gesamtmeßdauer beträgt dann

$$T_{\text{ges}} = 35 \text{ h bei } \Delta t = 1 \text{ sec bzw.}$$

$$T_{\text{ges}} = 3,5 \text{ h bei } \Delta t = 0,1 \text{ sec.}$$

Bei einem Mehrdetektorsystem mit 31 Detektoren, wie es für den BAM-Scanner II vorgesehen ist, verkleinert sich die Gesamtmeßzeit um den Faktor 31, d. h.

$$T_{\text{ges}} = 1,13 \text{ h bei } \Delta t = 1 \text{ sec bzw.}$$

$$T_{\text{ges}} = 7 \text{ min bei } \Delta t = 0,1 \text{ sec.}$$

Aus der Formel 5.1 läßt sich jetzt die in einer bestimmten Meßzeit erreichbare Dichteauflösung berechnen, wenn man die absoluten Photonenabsorptionen der infrage kommenden Röntgenstrahlenquellen kennt.

5.1 Technische Röntgenanlagen bis 400 kV

Die absoluten Photonenabsorptionen technischer Röntgenanlagen wurden in der BAM gemessen und mit theoretischen Spektren verglichen [37].

Zur Messung absoluter Photonenspektren muß die Ansprechwahrscheinlichkeit des Detektors für die verwendete Meßgeometrie bestimmt werden. Die absolute Detektoreffizienz kann z. B. mit Hilfe von radioaktiven Präparaten bekannter Aktivität ermittelt werden. Da die Messungen der Röntgenspektren wegen der hohen Intensität mit sehr engen Detektorkollimatoren

durchgeführt werden mußten, hätte die Absolutkalibrierung des Spektrometers Eichstrahler hoher Aktivität gefordert. Um diese Schwierigkeit zu umgehen, wurden zunächst nur relative Spektren gemessen und anschließend die Proportionalitätskonstanten der Röntgenanlagen berechnet. Über die Versuchsanordnung zur Messung relativer Röntgenspektren wurde bereits früher berichtet [38]. In Tab. 5.1 sind für eine 400 kV-Gleichspannungs-Anlage (Isovolt 400, Seifert & Co.) die gemessenen Dosisleistungskonstanten als Funktion der Röhrenspannung U angegeben.

$$\Gamma_R = \frac{J \cdot r^2}{l} \quad (5.2)$$

Γ_R = Dosisleistungskonstante

J = Ionendosisleistung

l = Röhrenstrom

r = Abstand vom Fokus

U [kV]	100	150	200	300	400
R $\left[\frac{\text{Rm}^2}{\text{hmA}} \right]$	20,3	47,0	82,0	186	330

Tabelle 5.1

Dosisleistungskonstanten für eine 400 kV-Gleichspannungsanlage (Isovolt 400, Seifert & Co., Eigenfilterung etwa 4 mm Al)

Zwischen dem absoluten Photonenspektrum, der energiedifferentiellen Photonenflußdichte und dem relativen Spektrum besteht folgender Zusammenhang:

$$\frac{1}{l} \frac{d^3 N}{dt dE d\Omega} = \frac{r^2}{l} \frac{d^3 N}{dt dE dF} = \frac{r^2}{l} \cdot \varphi_E = K \cdot S(E, E_0) \quad (5.3)$$

$$\frac{1}{l} \cdot \frac{d^3 N}{dt dE d\Omega} = \text{auf den Röhrenstrom bezogenes absolutes Spektrum}$$

$$\varphi(E) = \frac{d^3 N}{dt dE d\Omega} = \text{energiedifferentielle Photonenflußdichte}$$

$S(E, E_0)$ = relatives Spektrum

N = Photonenzahl

t = Zeit

Ω = Raumwinkel

E = Photonenenergie

E_0 = Grenzenergie (entspricht der Röhrenspannung)

K = Proportionalitätskonstante

Der Zusammenhang zwischen der Ionendosisleistung des Bremsspektrums und der energiedifferentiellen Photonenflußdichte ist gegeben durch:

$$\zeta = \int_0^{E_0} \varphi_E \cdot C_p(E) \cdot dE = K \cdot \frac{l}{r^2} \int_0^{E_0} S(E, E_0) \cdot C_p(E) \cdot dE \quad (5.4)$$

$C_p(E)$ = energieabhängiger Umrechnungsfaktor zwischen Photonenflußdichte und Ionendosisleistung

Aus Gleichung (5.2), (5.3) und (5.4) folgt der Zusammenhang zwischen relativem und absolutem Bremsspektrum:

$$\frac{1}{l} \cdot \frac{d^3 N}{dt dE d\Omega} = K \cdot S(E, E_0) = \frac{\Gamma_R(E_0)}{E_0 \int_0^{E_0} S(E, E_0) \cdot C_p(E) dE} \cdot S(E, E_0) \quad (5.5)$$

Die zur Berechnung des Integrals benötigten Werte für $C_p(E)$ wurden dem ICRP-Report 21 entnommen [39]. In den *Abbildungen 5.1 bis 5.5* sind die so ermittelten absoluten Bremsstrahlungsspektren einer 400 kV-Gleichspannungs-Röntgenanlage dargestellt. Die Absolutkalibrierung der Spektren erlaubt nun einen Vergleich mit verschiedenen theoretischen Ansätzen.

Vergleich mit der Theorie

Das Bremsstrahlungsspektrum für ein dickes Target (Anode) läßt sich folgendermaßen beschreiben:

$$\frac{1}{I} \frac{d^3 N}{dt dE d\Omega} = Q(E, E_0, Z) R(E, E_0) \cdot f(E, E_0, Z) \quad (5.6)$$

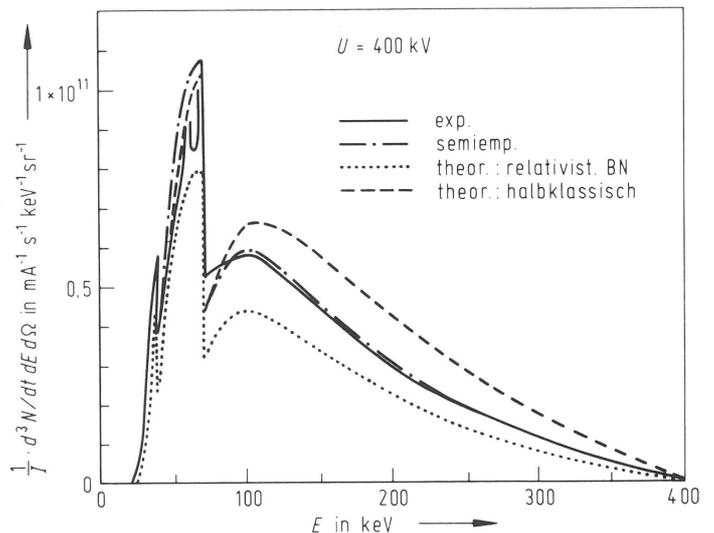
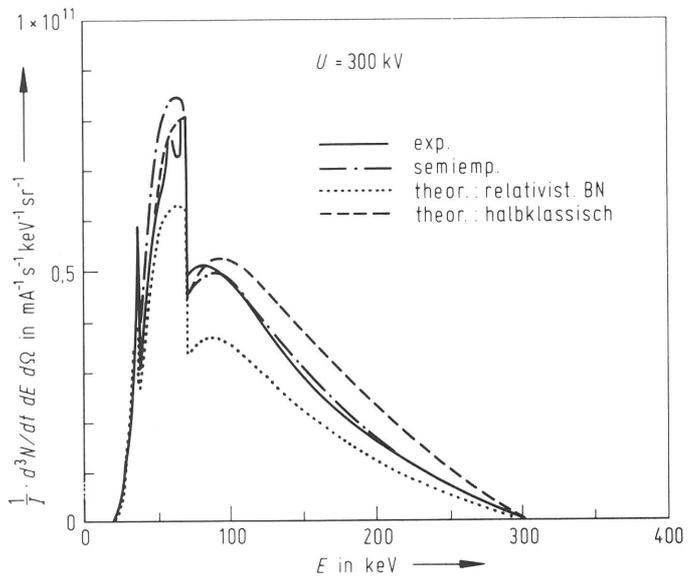
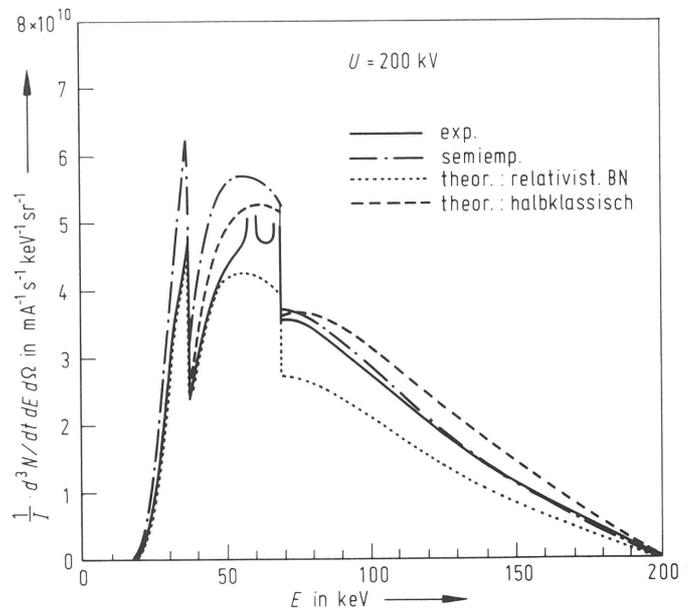
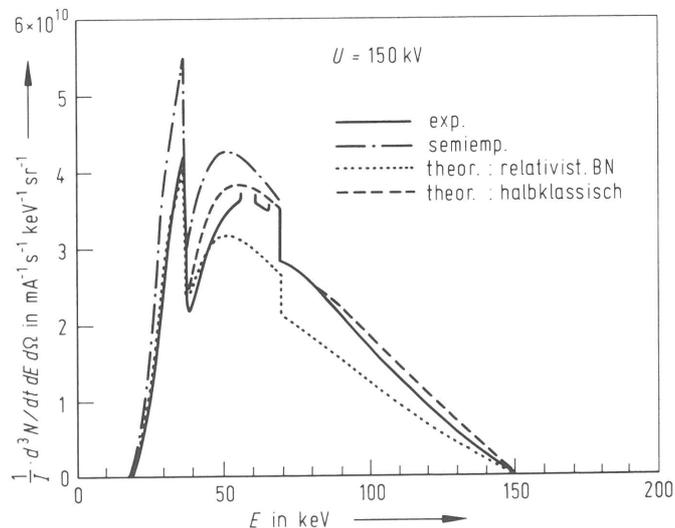
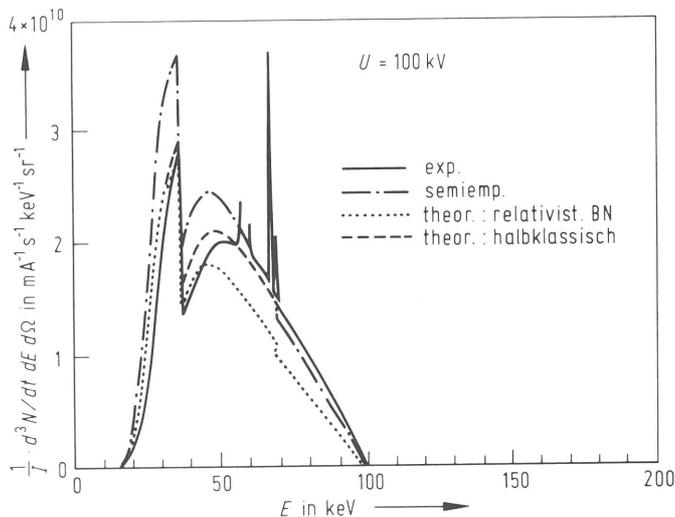
$Q(E, E_0, Z)$ = Photonspektrum unter Berücksichtigung der Abbremsung der Elektronen im Target (Anode)

$R(E, E_0)$ = Korrekturfaktor, der die Rückstreuung der Elektronen an der Targetoberfläche berücksichtigt

$f(E, E_0, Z)$ = Korrekturfaktor, der die Selbstabsorption der Bremsstrahlungs-Photonen innerhalb des Targets beschreibt

Zur Berechnung der Spektren von Röntgenstrahlern muß Gleichung (5.6) noch mit den Schwächungsfaktoren der Eigenfilterung und der Luft multipliziert werden. Diese lassen sich aus der Zusammensetzung des absorbierenden Materials

Abb. 5.1 - 5.5
Absolute Bremsstrahlungsspektren einer 400 V Gleichspannungs-Röntgenanlage (Isovolt 400, R. Seifert & Co) Vergleich zwischen Theorie und Messung



und den Massenschwächungskoeffizienten der darin enthaltenen chemischen Elemente als Funktion der Photonenenergie berechnen. Für den hier verwendeten Röntgenstrahler (Isovolt 400) wurde entsprechend den Herstellerangaben folgende Zusammensetzung der Eigenfilterung angenommen:

- 3,5 mm Schott-Röntgenglas (Nr. 2877),
- 11 mm Trafoöl,
- 7 mm Araldit als Austrittsfenster.

Die Luftabsorption wurde entsprechend dem Luftweg zwischen Röntgenstrahler und Detektor berücksichtigt. In Anlehnung an einen Vorschlag von Storm [40] wurden folgende Ansätze für die Rückstreukorrektur und die Photonschwächung im Target benutzt:

$$R(E, E_0) \approx 1 - 0,43 \left(1 - \frac{E}{E_0}\right)^{0,356} \quad (5.7)$$

$$f(E, E_0, Z) \approx \exp\left\{-0,2[r(E_0, Z) \cdot \rho] \cdot \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{Z, E} \cdot \frac{1}{\tan \alpha}\right\} \quad (5.8)$$

$r(E_0, Z)$ = maximale Reichweite von Elektronen der Energie E_0 im Target der Ordnungszahl Z

ρ = Dichte des Targetmaterials

$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{Z, E}$ = Massenschwächungskoeffizient des Targetmaterials für Photonen der Energie E

α = Neigungswinkel der Anode

Für den verwendeten Strahler gilt:

- Target (Anoden)-Material: Wolfram, $Z = 74$
- $\alpha = 22,50^\circ$

Werte für den Massenschwächungskoeffizienten und die Elektronenreichweite können Tabellenwerken entnommen werden [41 - 43].

Zum Vergleich mit den gemessenen Spektren wurden die folgenden theoretischen Ansätze für das unkorrigierte Bremsstrahlungsspektrum des dicken Targets benutzt:

- halbklassische Näherung von Kramers [44], Kulenkampff [45], Dyson [46]:

$$Q(E, E_0, Z) = 1,37 \cdot 10^9 \cdot Z \cdot \left[\frac{E_0}{E} - 1\right] \quad (5.9)$$

$$[Q] = \text{mA}^{-1} \text{s}^{-1} \text{keV}^{-1} \text{sr}^{-1}$$

- analytische Beschreibung von relativistischen Rechnungen in Born'scher Näherung (Vorschlag von Storm [40]):

$$Q(E, E_0, Z) = 1,04 \cdot 10^9 \cdot Z \left[\frac{E_0}{E}\right] / \left(\frac{E}{E_K}\right)^{1/3} \quad (5.10)$$

E_K = Energie der K-Absorptionskante des Targetmaterials ($E_K = 69,53 \text{ keV}$ für Wolfram, $Z = 74$)

- semiempirische Formel:

$$Q(E, E_0, Z) = C \cdot Z \cdot \left[\frac{E_0}{E} - 1\right] / \left(\frac{E}{E_K}\right)^{1/3} \quad (5.11)$$

Die freie Konstante C wurde durch Anpassung der berechneten Spektren an die Messung bestimmt.

Die Abbildungen 5.1 bis 5.5 zeigen, daß die halbklassische Näherung die gemessenen Bremspektren bei kleinen Röhrensparnungen sehr gut beschreibt. Oberhalb von $U = 200 \text{ kV}$ liefert sie jedoch systematisch zu hohe Werte. Die relativistische Formel gibt zwar die Form der Spektren gut wieder, aber die Absolutwerte sind im gesamten Bereich zwischen 100 kV und 400 kV zu klein. Eine befriedigende Übereinstimmung mit den Messungen liefert Formel (5.11), wenn die Konstante zu

$$C = 1,41 \cdot 10^9 \text{ mA}^{-1} \text{s}^{-1} \text{keV}^{-1} \text{sr}^{-1}$$

gewählt wird. Mit diesem Ansatz werden die Spektren bei Photonenenergien oberhalb von 70 keV für alle Spannungen zwischen 100 kV und 400 kV gut beschrieben. Größere Abweichungen treten nur bei kleinen Spannungen und unterhalb von 70 keV auf.

Für die Berechnung der „Dichteauflösung“ nach (5.1) ist nicht nur die absolute Photonenausbeute der Strahlenquelle, sondern auch der effektive Schwächungskoeffizient erforderlich.

Dazu wurden die durch Stahl transmittierten Photonenspektren in Abhängigkeit von der Röhrensparnung und der Stahldicke s aus den Primärspektren berechnet. Abb. 5.6 zeigt ein Beispiel für $U = 400 \text{ kV}$. Die Integration der aufgehärteten Spektren über die Photonenenergie liefert die Zahl der transmittierten Photonen, bezogen auf den Röhrenstrom, die Zeit und den Raumwinkel. Die so berechneten absoluten Schwächungskurven für Stahl sind in Abb. 5.7 dargestellt. Aus den Steigungen der Schwächungskurven wurden die effektiven Schwächungskoeffizienten μ_{eff} als Funktion der Stahldicke für die verschiedenen Röhrensparnungen berechnet. Sie sind in Abb. 5.8 zusammen mit den Werten für ^{192}Ir , ^{137}Cs und ^{60}Co aufgetragen.

Wegen der Aufhärtung der Strahlung und der damit verbundenen Probleme bei der Korrektur des „cupping“-Artefakts sollte man bei 400 kV Röhrensparnung auf jeden Fall eine Vorfilterung mit $30 - 50 \text{ mm}$ Stahl vornehmen (Abb. 5.6 - 5.8). Für 40 mm Stahl ergibt sich aus Abb. 5.7 eine absolute Photonenausbeute von $1 \cdot 10^{11} \text{ Photonen sec}^{-1} \text{ mA}^{-1} \text{ sr}^{-1}$. Das zugehörige Spektrum ist in Abb. 5.6 dargestellt. Aus Abb. 5.8 ist zu entnehmen, daß der effektive Schwächungskoeffizient nach einer Vorfilterung mit 40 mm Stahl konstant $\mu = 1 \text{ cm}^{-1}$ beträgt. Für die Parameterwerte des BAM-Scanners II beträgt der Raumwinkel des Detektors

$$\Delta\Omega = \Delta x \cdot h / L^2$$

$$\begin{aligned} \text{mit } \Delta x &= 1 \text{ mm} \\ h &= 3 \text{ mm} \\ L &= 1,8 \text{ m} \end{aligned}$$

ergibt sich

$$\Delta\Omega = 9,3 \cdot 10^{-7} \text{ sr}$$

Für eine Stromstärke von 10 mA beträgt also die Photonenzahl pro Meßintervall $N_0 / \Delta t = 1 \cdot 10^{11} \text{ Photonen} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{mA}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot 9,3 \cdot 10^{-7} \text{ sr} \cdot 10 \text{ mA} \approx 10^6 \text{ Photonen/sec}$.

Mit den o.g. Parametern des BAM-Scanners II und für Stahl ($\mu_{400\text{kV}} = 1,0 \text{ cm}^{-1}$, vgl. Abb. 5.8) ergeben sich die folgenden „Dichteaufösungen“ $\Delta\mu / \mu$ für verschiedene Meßzeiten Δt .

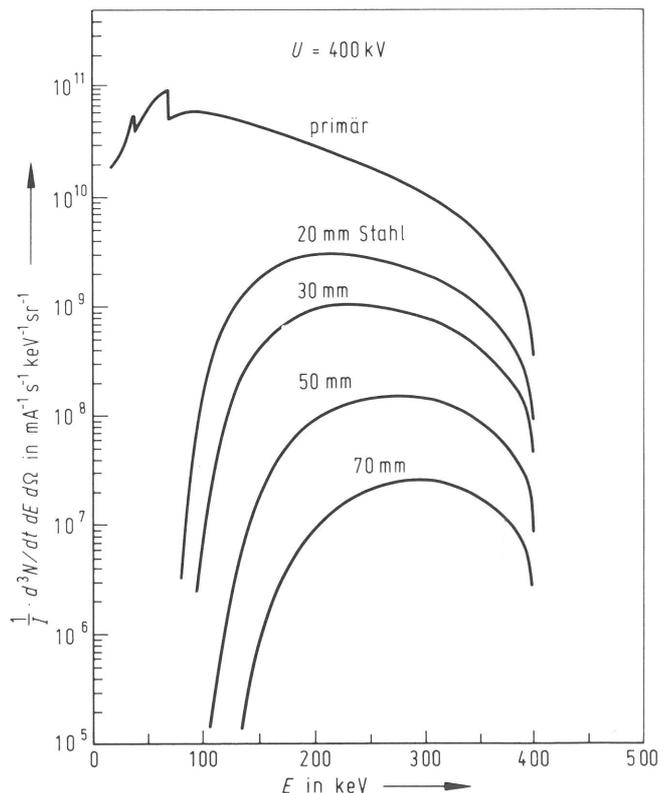


Abb. 5.6 Primäres Bremsstrahlungsspektrum und absolute Spektren der durch Stahl transmittierten Strahlung für 400 kV Röhrensparnung

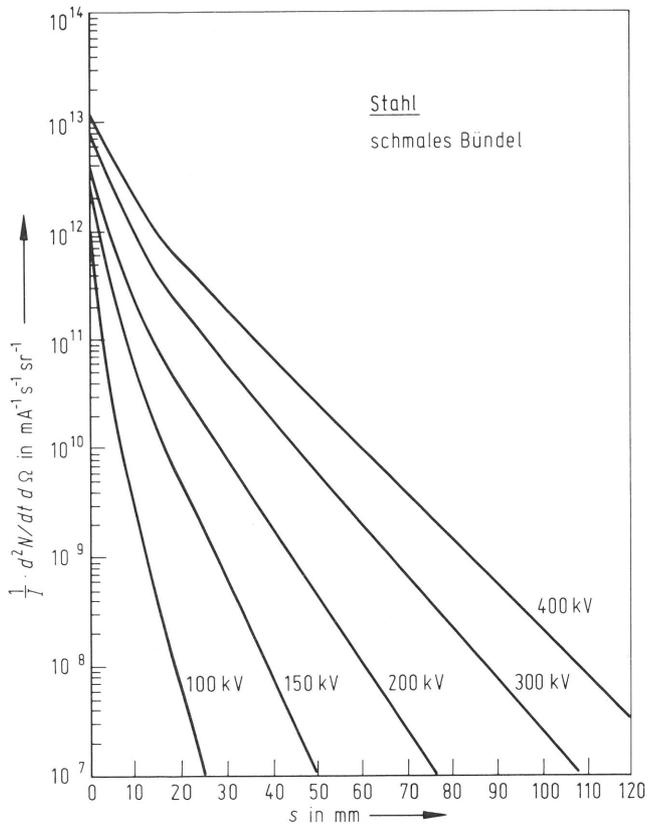


Abb. 5.7 Absolute Schwächungskurven für Stahl als Funktion der Röhrenspannung

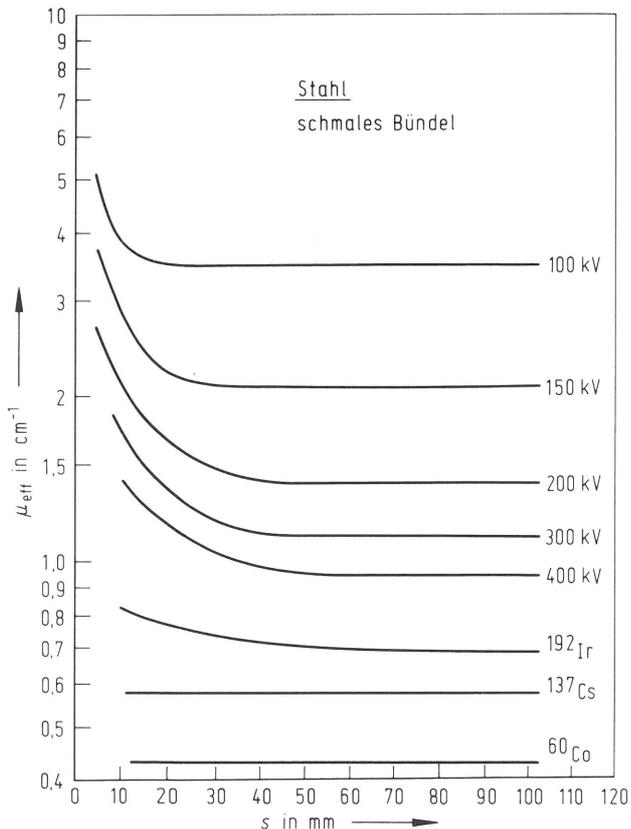


Abb. 5.8 Effektiver Schwächungskoeffizient für Stahl als Funktion der durchstrahlten Schichtdicke. Geometrie: schmales Strahlenbündel

	$N_0 = 10^5$ ($\Delta t = 0,1 \text{ sec}$)	$N_0 = 10^6$ ($\Delta t = 1 \text{ sec}$)	$N_0 = 10^7$ ($\Delta t = 10 \text{ sec}$)
d (cm)	$\Delta\mu/\mu$ (%)	$\Delta\mu/\mu$ (%)	$\Delta\mu/\mu$ (%)
1	1,9	0,6	0,2
3	3,0	0,9	0,3
5	6,2	2,0	0,6
10	54	9,0	5,4
15	535	160	54

Tabelle 5.2 „Dichteauflösung“ in Stahl bei verschiedenen Photonenzahlen für eine Röntgenanlage 400 kV, 10 mA, Vorfiltration mit 4 cm Stahl

5.2 Radionuklide

Die in der Radiographie am häufigsten benutzten Radionuklide sind in der Tabelle 5.3 zusammengestellt:

Nuklid	Gamma-energien (keV)	Halbwertszeit (a)	Abmessungen des Strahlers Ø (mm) x Länge (mm)
^{60}Co	1173	5,27	4 x 4 bei 100-500 Ci
	1332		
^{137}Cs	662	30,1	Kugel Ø 6 mm bei 3 Ci
^{192}Ir	316	0,2	4 x 4 bei 200 Ci
	468		

Tabelle 5.3 Radionuklide in der Radiographie

Radionuklide haben den Vorteil einer stabilen Emission, auch wenn die Meßzeit einige Stunden beträgt. Man braucht deshalb keinen Referenzdetektor, wie bei Röntgenanlagen oder Elektronenbeschleunigern. Zudem emittieren die meisten Strahler (außer ^{192}Ir) monoenergetische oder quasimonoenergetische Strahlung, so daß keine Aufhärtung beim Durchstrahlen dicker Materialschichten auftritt und somit keine Korrekturen vor der Bildrekonstruktion erforderlich sind. Der Hauptnachteil ist die begrenzte spezifische Aktivität, die bei zunehmender Quellstärke zu immer größeren Quelldurchmessern führt und somit die Ortsauflösung (vgl. Kap. 4) verschlechtert. Außerdem ist die Strahlung nicht abschaltbar, d. h. es ist ein hoher Aufwand für den Strahlenschutz erforderlich.

Im Gegensatz zu den Röntgenanlagen ist die Photonenflußdichte sehr einfach und exakt aus der Quellstärke Q berechenbar. Für eine ^{60}Co -Quelle von $Q = 500 \text{ Ci}$ und die geometrischen Parameter des BAM-Scanners II ergibt sich die verfügbare Photonenzahl/Meßintervall $N_0/\Delta t = 2 \cdot Q \cdot F / (4\pi L^2) = 2 \cdot 500 \cdot 3 \cdot 1 \cdot 3,7 \cdot 10^{10} / (4 \cdot (1,8)^2 \cdot 10^6) = 2,72 \cdot 10^6$ Photonen/sec.

Der Einfachheit wegen wird für die Tabelle 5.4 mit $2 \cdot 10^6$ Photonen/sec gerechnet; $\mu(^{60}\text{Co}, \text{Fe}) = 0,43 \text{ cm}^{-1}$ (vgl. Abb. 5.8).

	$N_0 = 2 \cdot 10^5$ ($\Delta t = 0,1 \text{ sec}$)	$N_0 = 10^6$ ($\Delta t = 0,5 \text{ sec}$)	$N_0 = 2 \cdot 10^6$ ($\Delta t = 1 \text{ sec}$)	$N_0 = 2 \cdot 10^7$ ($\Delta t = 10 \text{ sec}$)
d(cm)	$\Delta\mu/\mu$ (%)	$\Delta\mu/\mu$ (%)	$\Delta\mu/\mu$ (%)	$\Delta\mu/\mu$ (%)
1	2,1	0,94	0,66	0,21
5	2,2	0,98	0,69	0,22
10	4,6	2,06	1,45	0,46
15	10,9	4,87	3,45	1,09
20	27,7	12,4	8,76	2,77
30	194	87	61	19,4

Tabelle 5.4 „Dichteauflösung“ in Stahl bei verschiedenen Photonenzahlen für ^{60}Co

5.3 Elektronenbeschleuniger

Noch höhere Quantenenergien als ^{60}Co ($E = 1,25 \text{ MeV}$) liefern mit hinreichender Ausbeute nur Elektronenbeschleuniger in der Form von Bremsstrahlung. Von den möglichen Beschleunigerarten — Van de Graaff, Betatron, Dynamitron, Microtron, Linearbeschleuniger (Linac), CW-Linac — soll hier ein typischer Radiographie-Linac mit einer Elektronenenergie von 10 MeV betrachtet werden. Die für die weitere Rechnung erforderliche Photonenflußdichte kann aus der Dosisleistung des Beschleunigers abgeschätzt werden. Bei 10 MeV entspricht $1 \text{ mrem/h} = 200 \text{ Photonen/cm}^2\text{sec}$. Einer Dosisleistung der Maschine in 1 m Abstand vom Target von $j = 10^3 = \text{rem/min} = 6 \cdot 10^4 \text{ rem/h}$ entspricht also eine Photonenflußdichte von $\varphi = 1,2 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$.

Mit einer Dosisleistungskonstante von $3,8 \cdot 10^4 \text{ R} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{mA}^{-1}$ in 1 m Abstand ergibt sich für die Dosisleistung von 10^3 R/min eine Stromstärke von $I = 0,026 \text{ mA}$. Damit erhält man als absolute Photonenflußdichte $1/I \cdot d^2N/dt \cdot d\Omega = 4,6 \cdot 10^{15} \text{ mA}^{-1} \cdot \text{sec}^{-1} \text{ sr}^{-1}$. Dieser Wert stimmt gut mit den von Berger und Seltzer [41] berechneten absoluten Spektren überein. In Abb. 5.9 sind die absoluten Photonspektren hinter Stahl unterschiedlicher Dicke dargestellt. Daraus ergibt sich die absolute Schwächungskurve (Abb. 5.10) und der Verlauf des effektiven Schwächungskoeffizienten für Stahl (Abb. 5.11). Um große Korrekturen für die Aufhärtung der Strahlung zu vermeiden, sollte die Bremsstrahlung wenigstens mit 10 cm Stahl vorgefiltert werden. Dann ergibt sich aus Abb. 5.9 als Photonenflußdichte

$$\frac{1}{I} \cdot \frac{d^2N}{dt d\Omega} = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ mA}^{-1} \text{ sec}^{-1} \text{ sr}^{-1}$$

Mit einer Stromstärke von $50 \mu\text{A}$ und dem Raumwinkel des BAM-Scanners $\Delta\Omega = 9,3 \cdot 10^{-7} \text{ sr}$ beträgt die Zahl der Photonen pro Meßintervall $N_0/\Delta t = 1 \cdot 10^7 \text{ Photonen/sec}$. Mit dem Schwächungskoeffizienten $\mu = 0,26 \text{ cm}^{-1}$ (Abb. 5.11) ergibt sich folgende Tabelle 5.5.

d (cm)	$N_0 = 10^6$	$N_0 = 10^7$	$N_0 = 10^8$
	($\Delta t = 0,1 \text{ sec}$)	($\Delta t = 1 \text{ sec}$)	($\Delta t = 10 \text{ sec}$)
5	1,1	0,35	0,11
10	1,4	0,46	0,14
20	3,7	1,2	0,37
30	11	3,5	1,1
40	36	11,2	3,6
50	-----	37	11,7
60	-----	-----	39

Tabelle 5.5
„Dichteauflösung“ in Stahl bei verschiedenen Photonenzahlen für Linac 10 MeV, $40 \mu\text{A}$

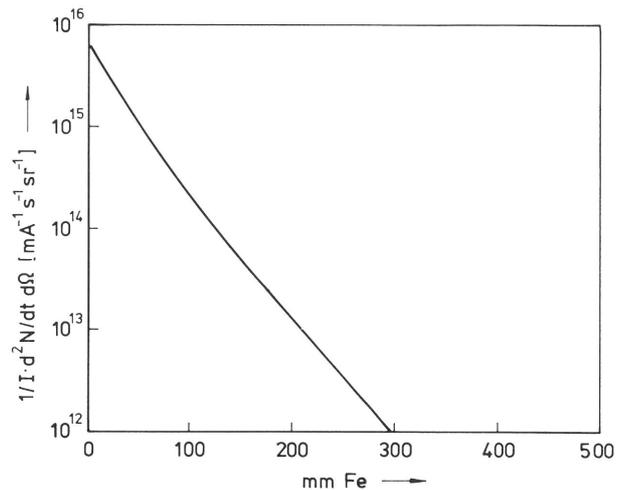


Abb. 5.10
Absolute Schwächungskurve für Stahl für einen 10 MeV Elektronen-Linearbeschleuniger

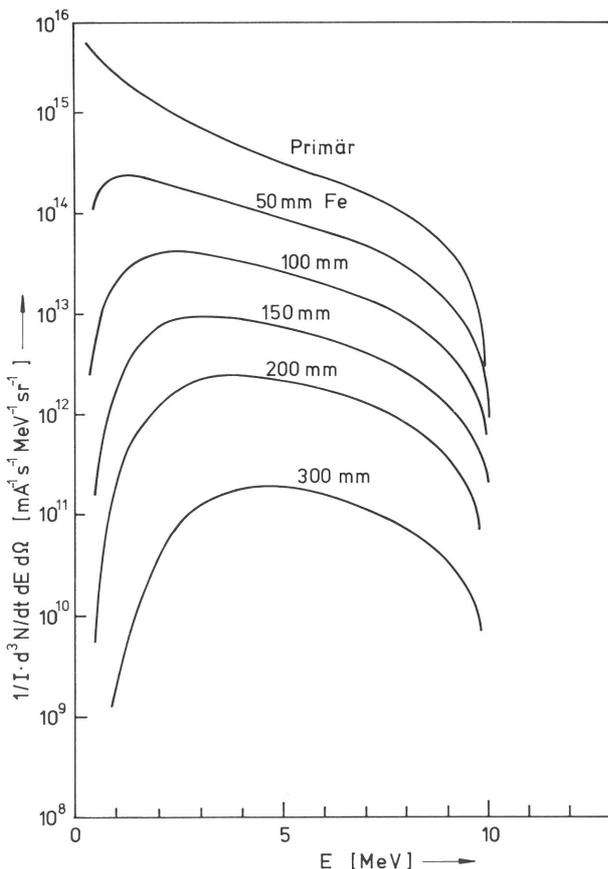


Abb. 5.9
Absolute Photonspektren für einen 10 MeV Elektronen-Linearbeschleuniger nach Schwächung durch Stahl verschiedener Dicke

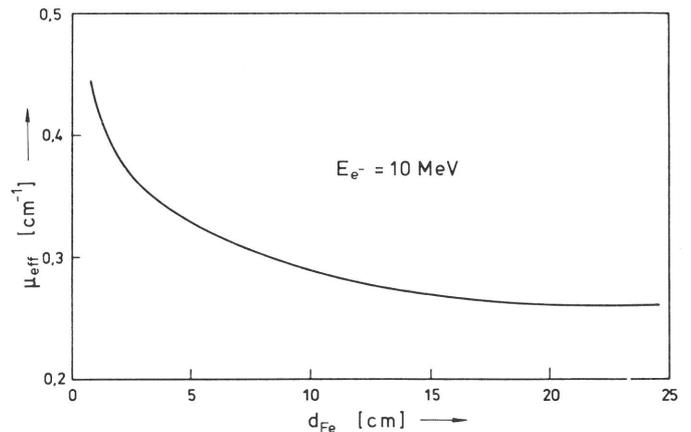


Abb. 5.11
Effektiver Schwächungskoeffizient für Stahl als Funktion der durchstrahlten Schichtdicke für einen 10 MeV Elektronen-Linearbeschleuniger

6. Mögliche Anwendungen der Röntgen- und Gammastrahlen-Computer-Tomographie in der ZfP

Auf Grund unserer bisherigen Erfahrung und in der Erwartung, daß der hohe Entwicklungsstand der medizinischen CT erfolgreich die industrielle CT beeinflusst, sehen wir in den folgenden Fällen ausgezeichnete oder sogar einzigartige Anwendungsmöglichkeiten für diese neue zerstörungsfreie Prüfmethode:

- 6.1 Objekte, die aus einem schwach absorbierenden Material bestehen, das von einer stark absorbierenden Hülle umgeben ist, z. B. Polyurethanschaum im Inneren von metallischen Profilen [26], Azethylenflaschen (Abb. 6.1), mit Kunststoff oder Asbestzement ausgekleidete Behälter oder Rohre (Abb. 3.16) und explosive Stoffe in allen denkbaren Formen bzw. „Verpackungen“ (Abb. 6.2)
- 6.2 Objekte mit kleinen Dichteschwankungen in den zu untersuchenden Bereichen, z. B. imprägniertes Holz [26], lebende Bäume [18], Baustoffe aller Art, insbesondere Beton (Bohrkerne, bewehrter und Spann-Beton) (Abb. 6.3, 6.4), Defekte in Gußteilen (Abb. 6.5), Unterscheidung von Schweißgut und Grundmaterial [26] und (Abb. 6.6), archäologische Objekte (Abb. 6.7, 6.8, 6.9)
- 6.3 Kontrolle der Form von komplizierten Konstruktionen (Abb. 6.10) oder verborgenen Mustern (Abb. 6.8) Verbundkonstruktionen, Turbinenschaufeln (Abb. 6.11) in der Luftfahrtindustrie und Rohrbündel, wie sie in Brennelementen oder Wärmetauschern vorkommen.
- 6.4 Nachweis und Lokalisierung von volumenhaften Fehlern und Rissen in beliebigen Materialien und geometrischen Anordnungen (Abb. 6.12, 6.13, 6.14).
- 6.5 Kalibrierung anderer, nicht bildgebender Prüfverfahren wie Ultraschall oder Wirbelstromverfahren (Abb. 6.15 = Sacklöcher in einem austenitischen dickwandigen Rohr).

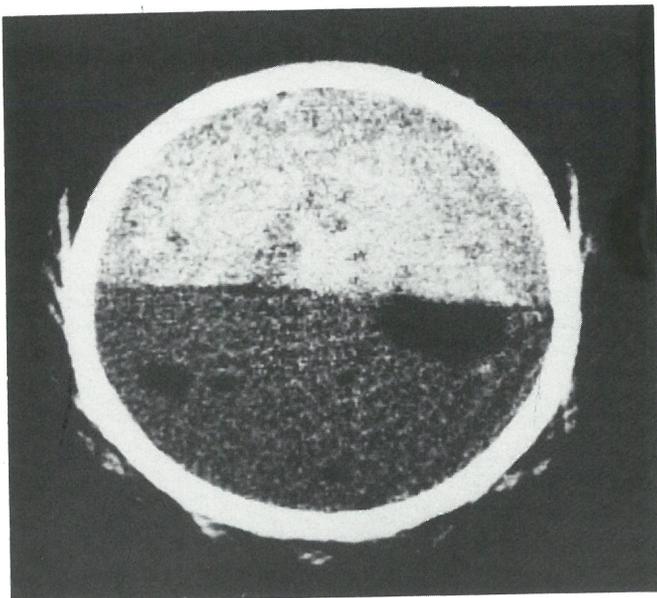
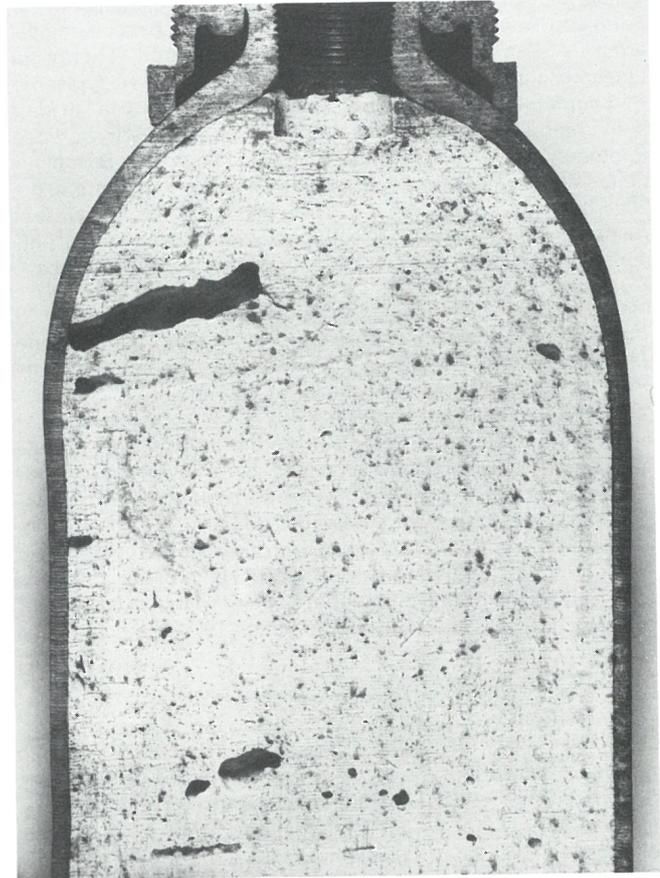


Abb. 6.1 a
Tomographie von zwei halben Azethylenflaschen mit unterschiedlichen porösen Füllmassen

Quelle: ^{60}Co , 50 Ci; Scan: 180 Winkel, 0,8 mm Abtastschrittweite; Meßzeit: 0,3 s pro Projektionspunkt; Bildmatrix: 201 x 201

Abb. 6.1 b
Lage der Schnittebene der Tomographie in 6.1 a



Abb. 6.2 a
Modell einer Sprengkapsel; Sprengstoff durch Araldit nachgebildet;
äußerer Mantel: Cu-Sn Legierung; Testfehler (Bohrungen), Breite des
Risses = 0,5 mm

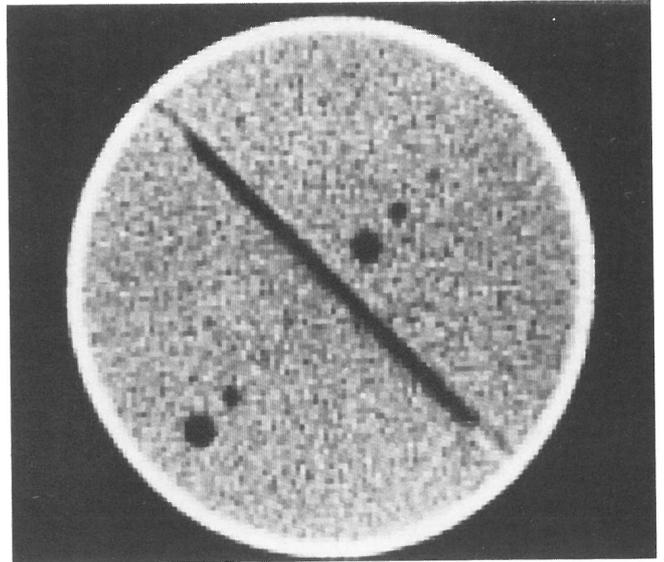


Abb. 6.2 b
Tomographie zu a)
Quelle: ^{60}Co , 50 Ci; Scan: 120 Winkel, 0,48 mm
Abtastschrittweite; Meßzeit: 0,5 s pro Projektionspunkt; Bildmatrix:
129 x 129
Bohrungen mit einem Durchmesser $\leq 0,8$ mm nachweisbar

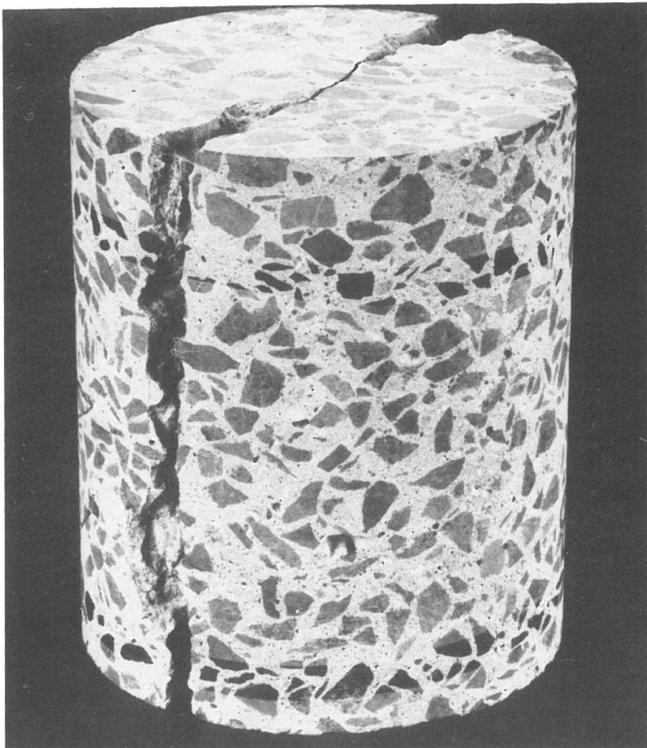


Abb. 6.3 a
Betonbohrkern mit Riß und mehreren Hohlräumen
Durchmesser = 15 cm

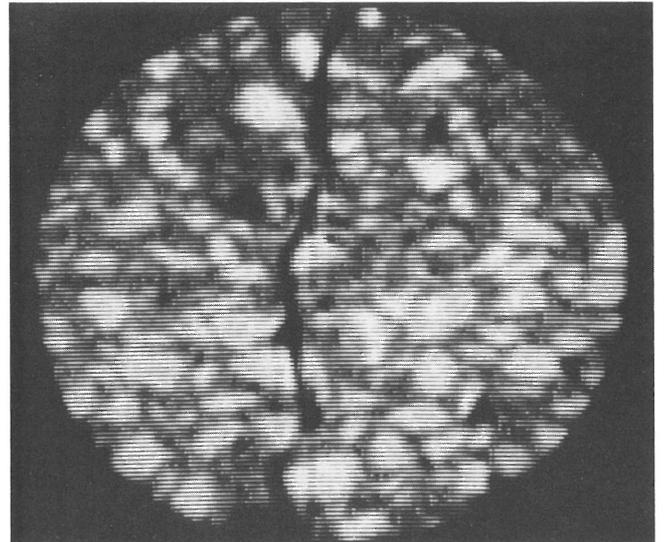


Abb. 6.3 b
Tomographie zu 6.3a
Quelle: ^{60}Co , 50 Ci; Scan: 130 Winkel, 1,2 mm Abtastschrittweite; Meßzeit:
1,1 s pro Projektionspunkt; Bildmatrix: 141 x 141
4 große Hohlräume, Riß und Zuschläge deutlich sichtbar

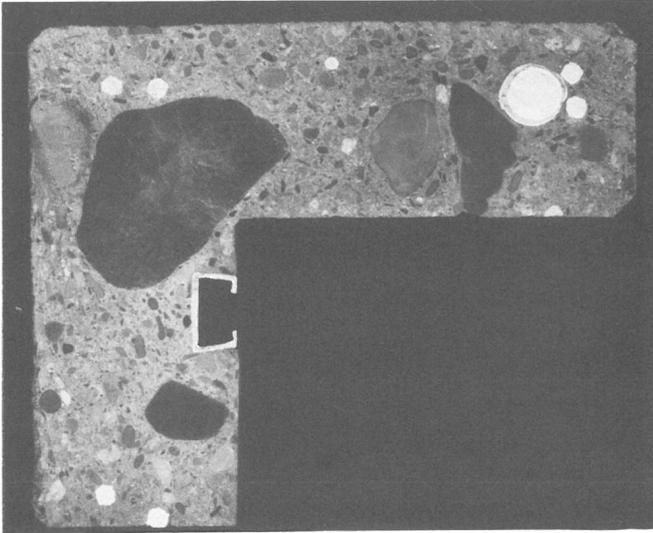


Abb. 6.4 a
Teil der BAB-Schilderbrücke (Nachträglich in der Schnittebene aufgesägt)

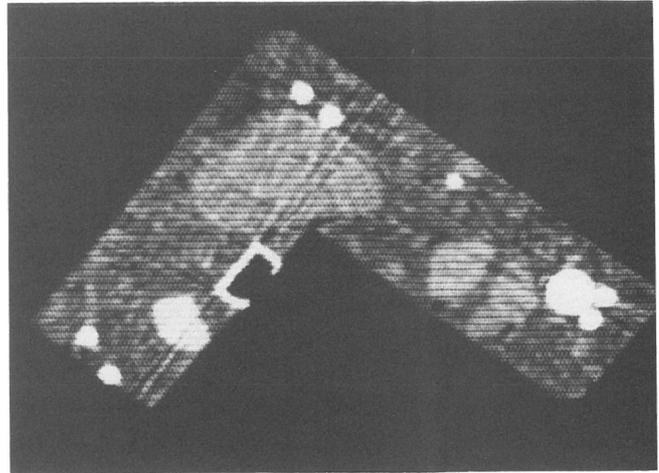
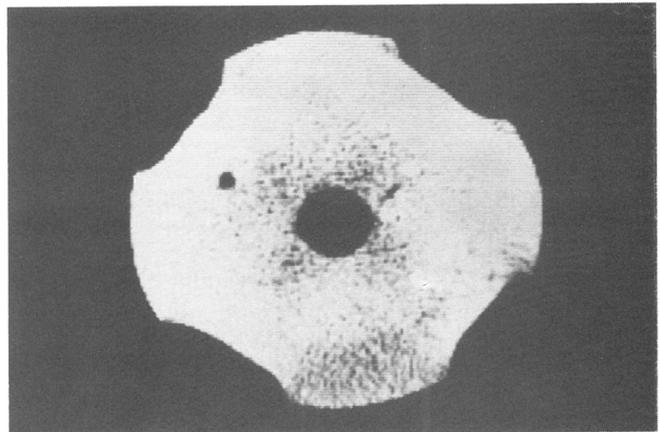


Abb. 6.4 b
Tomographie eine Teils einer BAB-Schilderbrücke
Quelle: ^{60}Co , 50 Ci; Scan: 180 Winkel, 2,8 mm Abtastschrittweite; Meßzeit: 1 s pro Projektionspunkt; Bildmatrix: 181 x 181
Unzulässig große Zuschläge, Lage der Bewehrungen und des Spannstahls



Abb. 6.5 a
Gußkronen mit zentraler Bohrung (Durchmesser 15 cm)



Ab. 6.5 b
Tomographie zu a)
Quelle: ^{60}Co , 50 Ci; Scan: 160 Winkel, 1,2 m Abtastschrittweite; Meßzeit: 0,4 sec pro Projektionspunkt; Bildmatrix 201 x 201
2 Hohlräume sowie poröse Zonen erkennbar

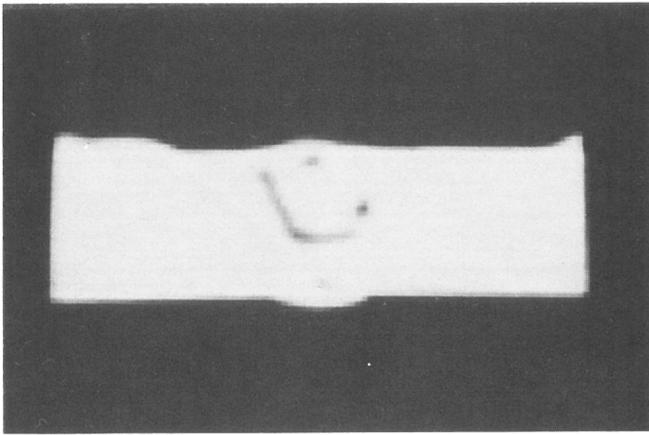


Abb. 6.6
 Tomographie einer Eisenschweißnaht mit Hohlräumen
 Quelle: ^{60}Co , 50 Ci; Scan: 180 Winkel, 0,68 mm Abtastschrittweite;
 Meßzeit: 2 s pro Projektionspunkt; Bildmatrix: 201 x 201
 Die Auswertung der Histogramme von Teilbereichen der Abbildung ergibt
 für das Schweißgut (mittlerer Abbildungsteil) eine etwa 1% geringere
 Dichte als für das Grundmaterial



Abb. 6.7 a
 Mumenschädel, in zinnobergetränkte Tücher eingewickelt

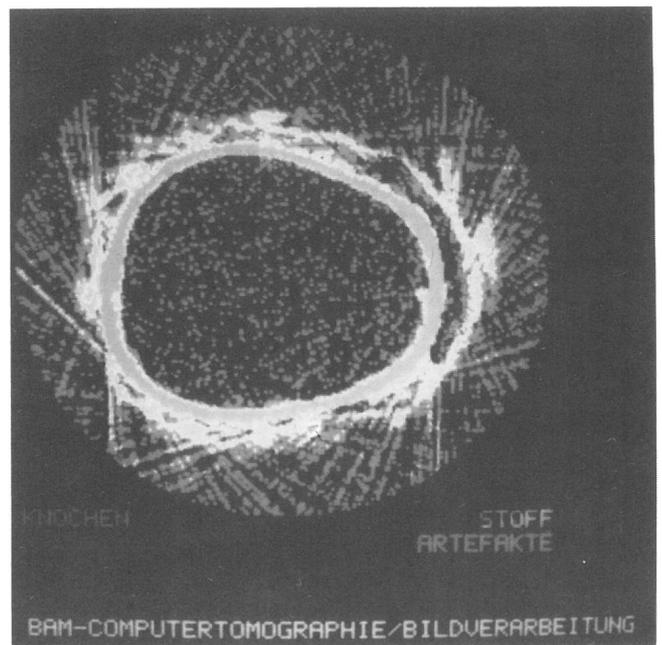


Abb. 6.7 b
 Tomographie zu 6.7a
 Quelle: ^{60}Co , 50 Ci; Scan: 180 Winkel, 1,28 mm Abtastschrittweite; Meßzeit:
 0,8 s pro Projektionswert; Bildmatrix: 201 x 201
 Stoff, Knochen sowie eine Metallfolie auf der Stirn



Abb. 6.8 a
Reiterstatue

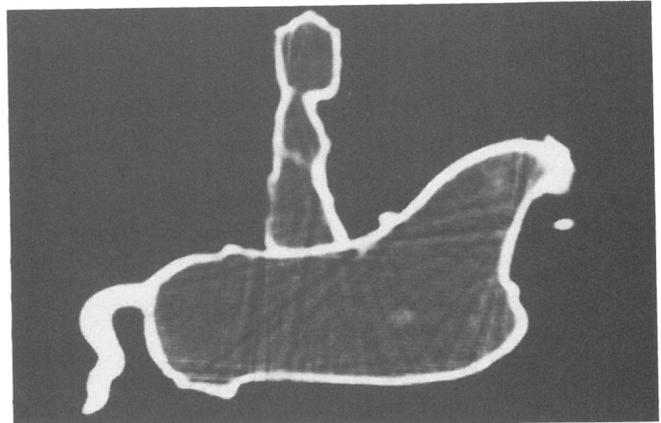
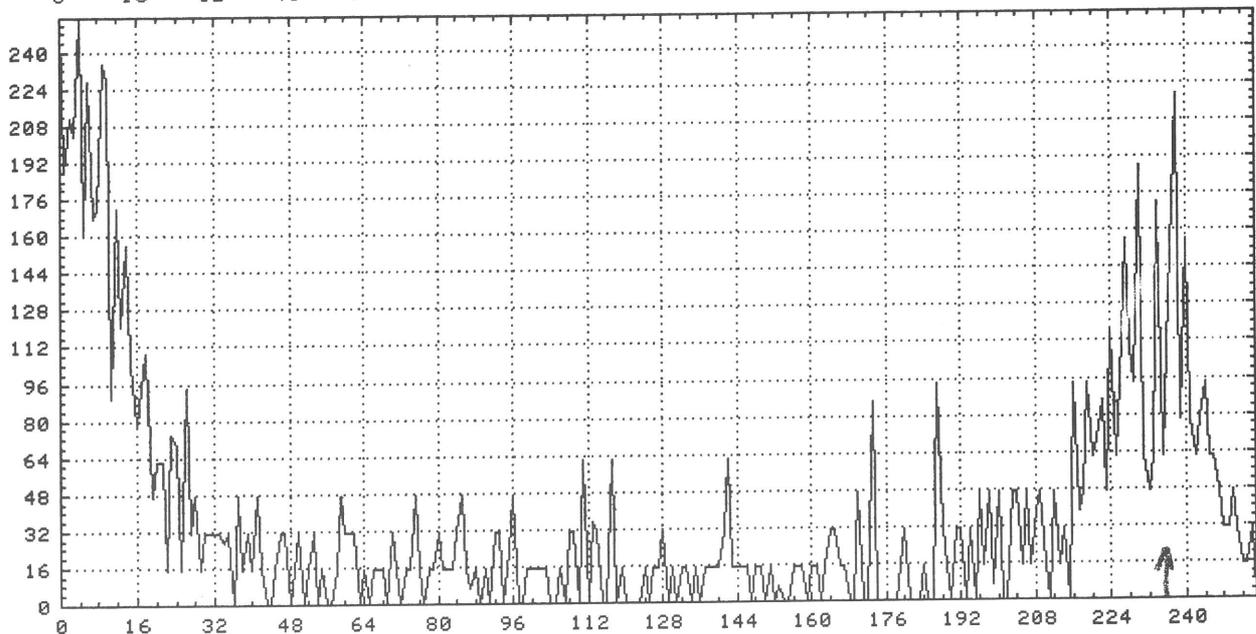
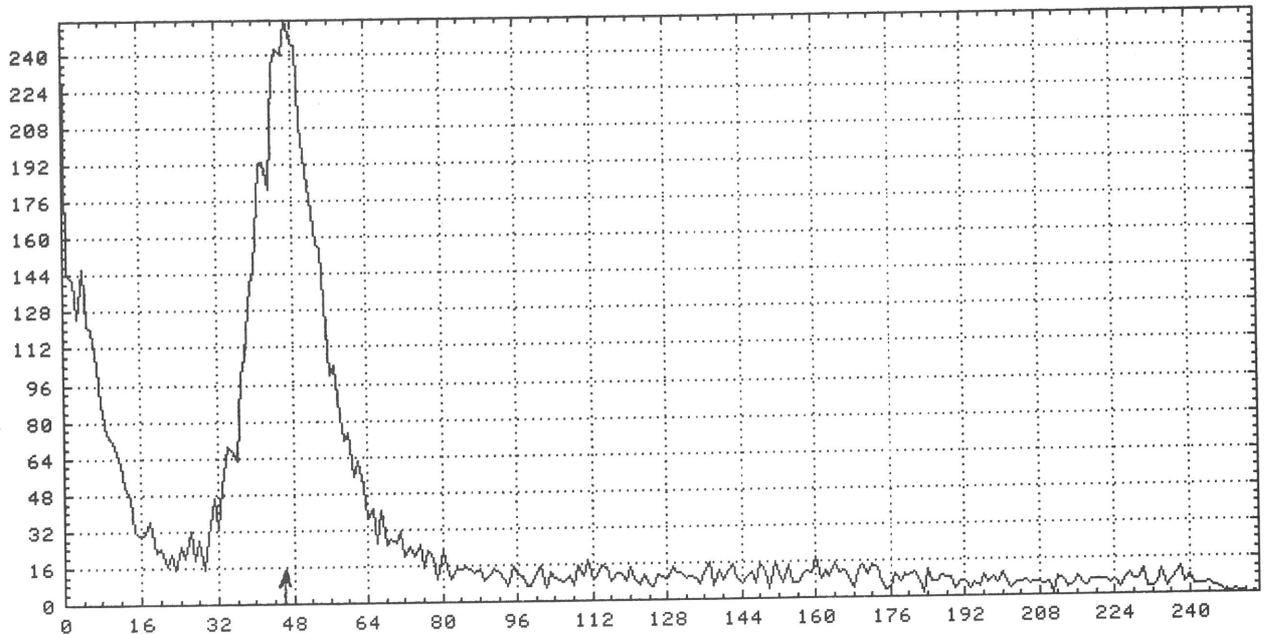


Abb. 6.8 b
Tomographie (Längsschnitt) zu 6.8a
Quelle: ^{60}Co , 50 Ci, Scan: 180 Winkel, 1,48 mm Abtastschrittweite;
Meßzeit: 0,7 s pro Projektionspunkt; Bildmatrix 201 x 201

Abb. 6.8 c
Histogramm der gesamten Abbildung 6.8b (oben) und nur des massiven
Schwanzbereiches (unten). Aus dem bekannten Schwächungswert
 $\mu = 0,51 \text{ cm}^{-1}$ für Bronze ergibt sich aus dem Verhältnis der Grauwerte der
beiden Peaks der Schwächungswert der Reiterfüllung $\mu_x = \mu_{\text{BZ}} \cdot 46 / 236 =$
 $0,1 \text{ cm}^{-1}$. Dieser Wert entspricht dem Schwächungskoeffizienten von SiO_2
oder anderen leichten Füllmaterialien wie z. B. Gips oder Kalk



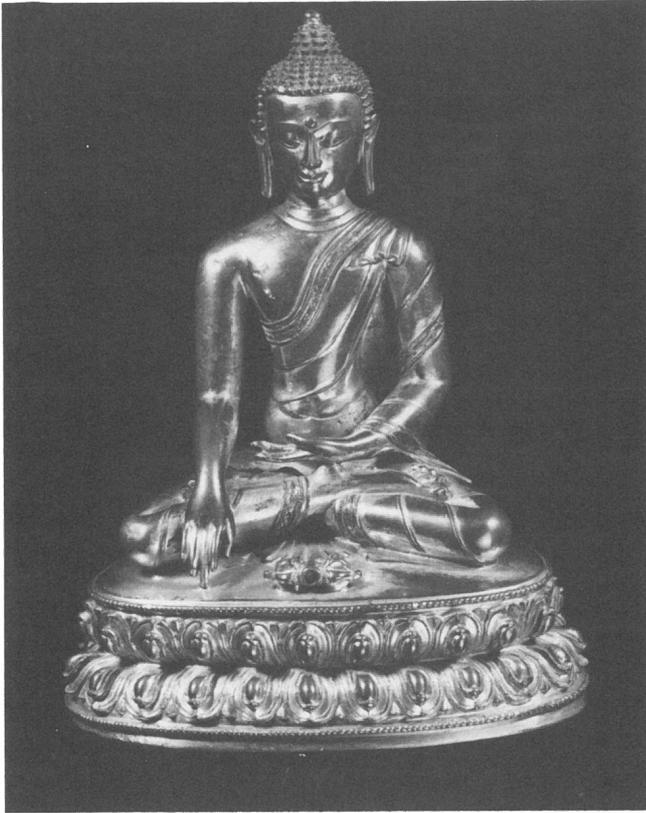


Abb. 6.9 a Shakyamuni — chinesische Bronzestatue mit Papierrolle im Sockel

Abb. 6.9 c
Tomographie zu a mit BAM-Scanner I
Quelle: ^{60}Co , 50 Ci; Scan: 180 Winkel, 0,8 mm Abtastschrittweite; Meßzeit: 3 s pro Projektionspunkt; Bildmatrix: 201 x 201

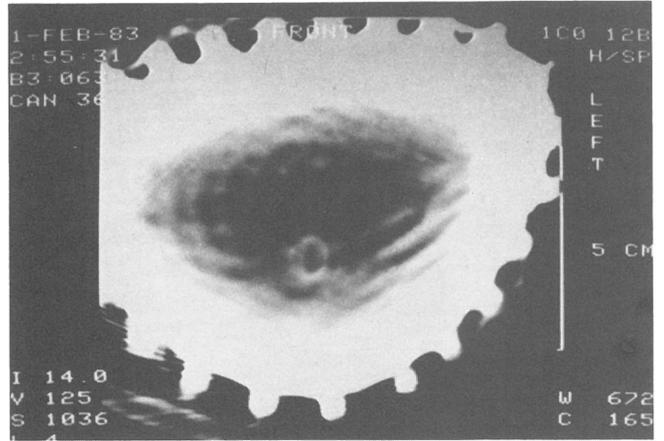


Abb. 6.9 b
Tomographie zu a mit einem medizinischen Scanner (Siemens Somatom DR 3) aufgenommen (120 kV, Bildmatrix: 256 x 256)

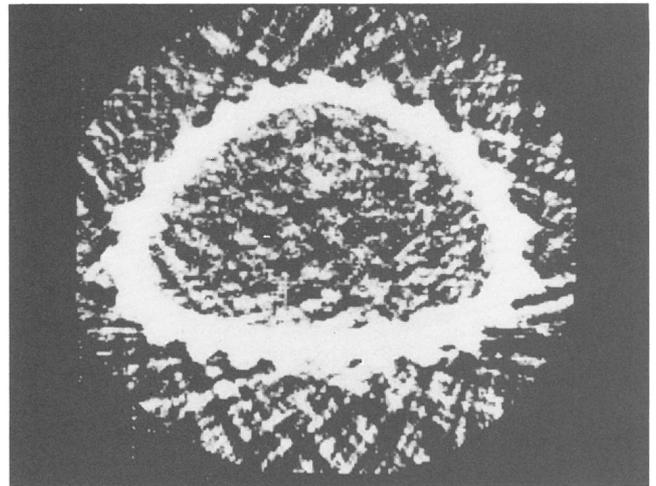


Abb. 6.10 a
Kurbelgehäuse

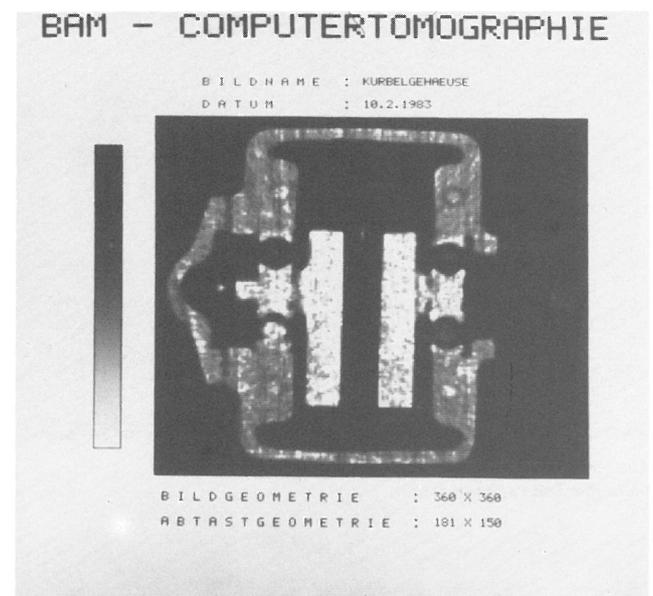


Abb. 6.10 b
Tomographie zu a
Quelle: ^{60}Co , 50 Ci; Scan: 150 Winkel, 1 mm Abtastschrittweite; Meßzeit: 0,6 s pro Projektionspunkt; Bildmatrix: 181 x 181

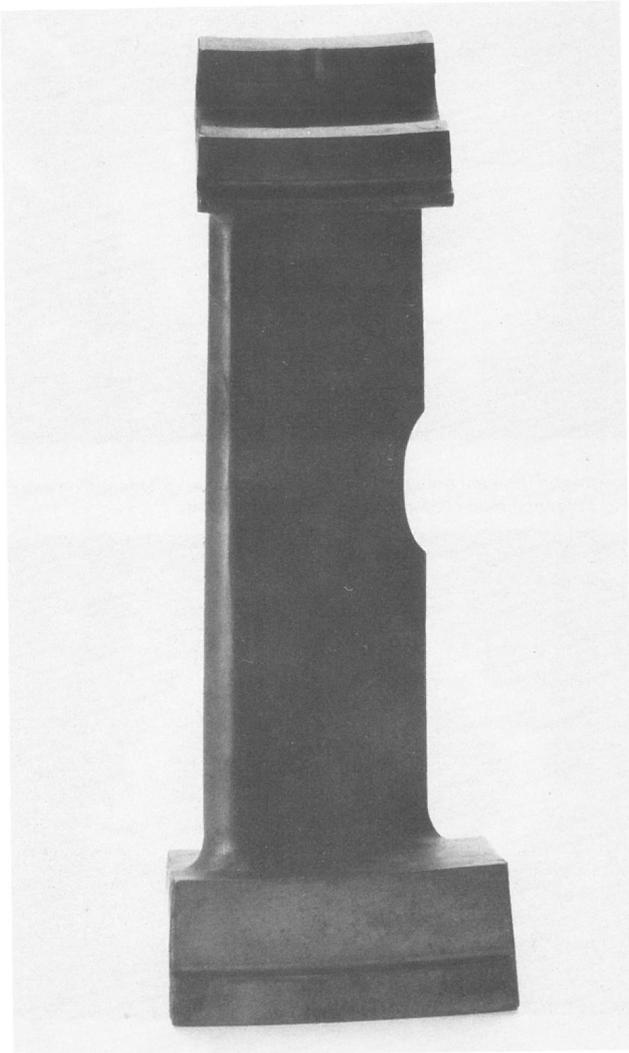


Abb. 6.11 a
Turbinenschaufel

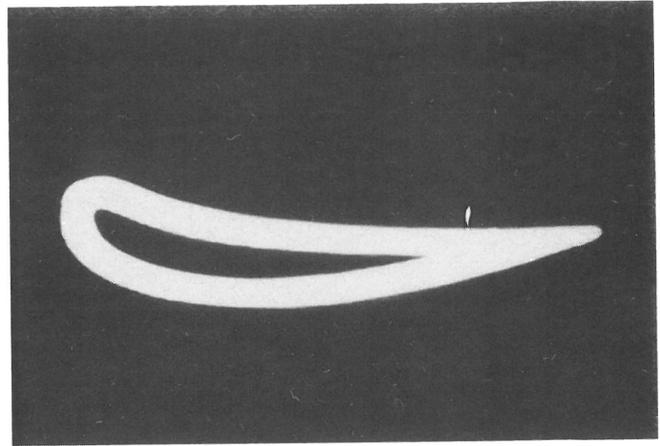


Abb. 6.11 b
Tomographie zu a
Quelle: ^{60}Co , 50 Ci; Scan: 150 Winkel, 1 mm Abtastschrittweite; Meßzeit:
0,8 s pro Projektionspunkt; Bildmatrix: 161 x 161



Abb. 6.12 a
Stahl mit Schlackeneinschluß

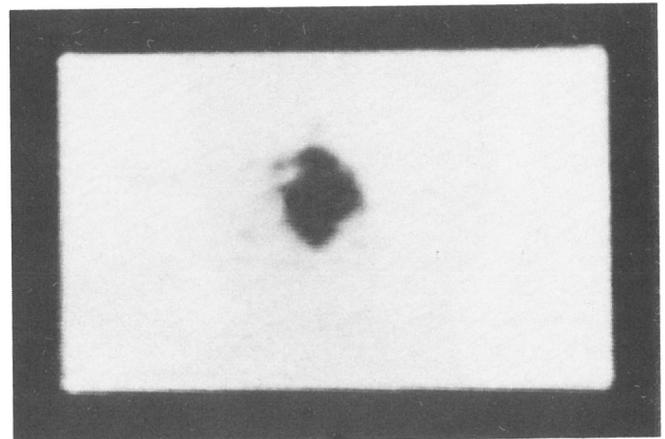


Abb. 6.12 b
Tomographie zu a
Quelle: ^{60}Co , 50 Ci; Scan: 120 Winkel, 0,8 mm Abtastschrittweite; Meßzeit:
0,4 sec pro Projektionspunkt; Bildmatrix: 161 x 161

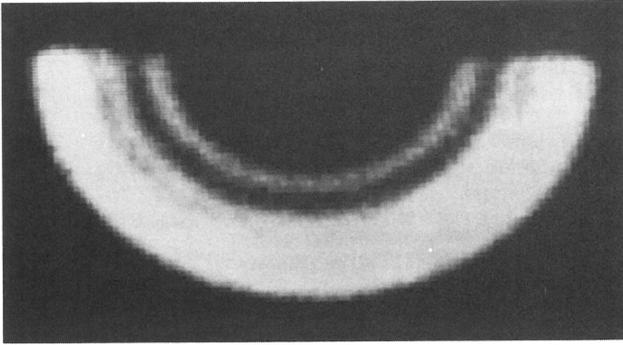


Abb. 6.13
 Lötprobe für ein Space-Lab Experiment
 Quelle: ^{60}Co , 50 Ci; Scan: 120 Winkel, 0,32 mm Abtastschrittweite;
 Meßzeit: 0,8 s pro Projektionspunkt; Bildmatrix: 111 x 111

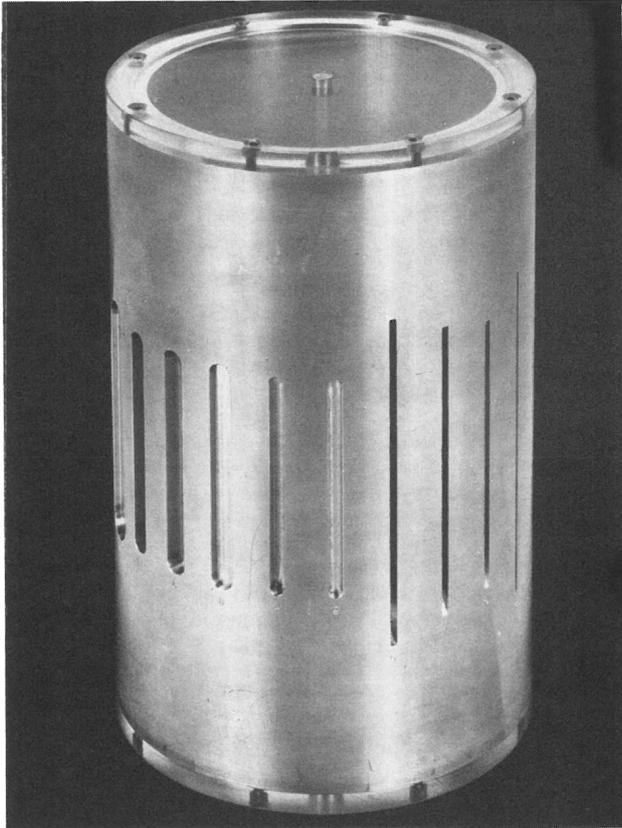


Abb. 6.14 a
 Testkörper (aus Aluminium) für dickwandige Rohre, speziell im Reaktorbau

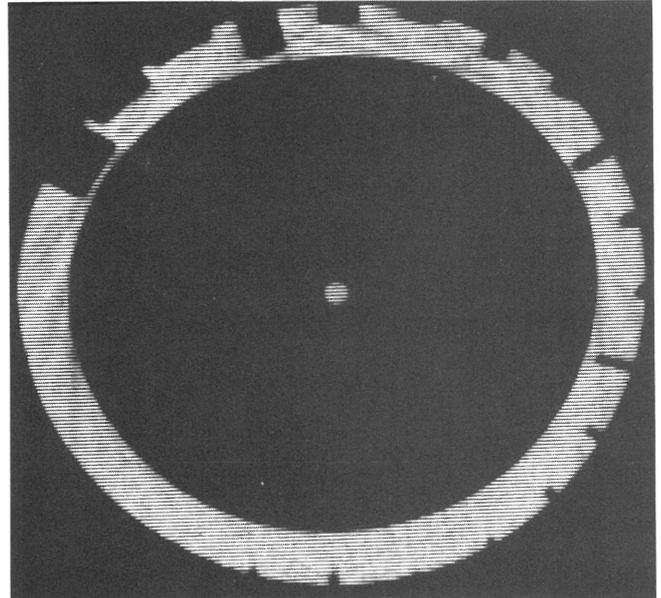


Abb. 6.14 b
 Tomographie zu a
 Quelle: ^{60}Co , 50 Ci; Scan: 180 Winkel, 1,2 mm Abtastschrittweite; Meßzeit:
 0,4 s pro Projektionspunkt; Bildmatrix: 201 x 201

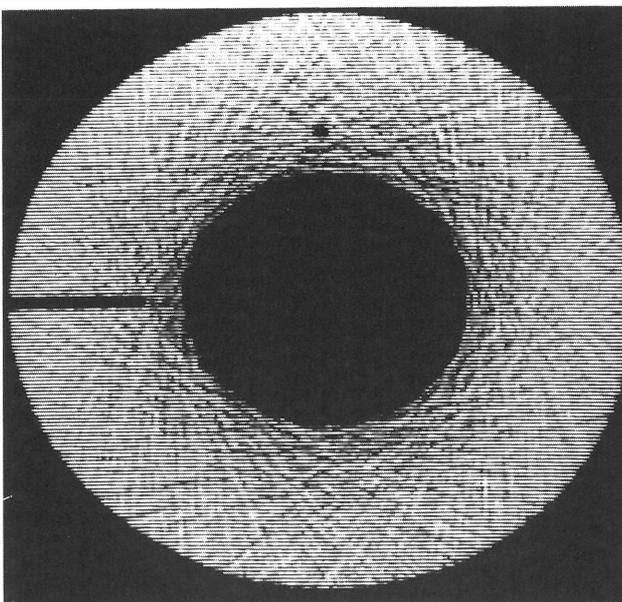


Abb. 6.15:
 Tomographie eines dickwandigen Austenit-Rohres
 Quelle: ^{60}Co , 50 Ci; Scan: 180 Winkel, 1,6 mm Abtastschrittweite; Meßzeit:
 1 s pro Projektionspunkt; Bildmatrix: 181 x 181
 Lage und Größe der Sacklöcher (\varnothing 4 mm)

7. Literatur

- [1] Möller, H. und H. Weeber
Die Bildgüte bei der Durchstrahlung von Werkstoffen mit Röntgen- oder Gammastrahlen von 0,1 bis 31 MeV
Forschungsbericht des Landes Nordrhein-Westfalen Nr. 1305
Westdeut. Verl. Köln u. Opladen (1963)
- [2] Heidt, H., R. Oelmeyer und D. Filbert
Lagebestimmung von Innenfehlern durch Bildverarbeitung radiographischer Aufnahmen
4. Intern. Konferenz ZfP in der Kerntechnik, Lindau 1981
- [3] Heidt, H. und D. Schnitger
Radiometrische Durchstrahlungsprüfung von Serienteilen mit Röntgenstrahlen und mit automatischer Fehlererkennung
Materialprüfung 21 (1979), S. 413-416
- [4] Heidt, H.
Automatische Bestimmung der Tiefenlage von Fehlern mittels Radiometrie
2. Europäische Tagung ZfP, Wien 1981
- [5] Brooks, R. A. and G. DiChiro
Principles of Computer Assisted Tomography (CAT) in Radiographic and Radioisotopic Imaging
Phys. Med. Biol. 21 (1976), S. 689-732
- [6] Kowalski, G. and W. Wagner
Generation of Pictures by X-ray Scanners
Optica Acta 24 (1977), S. 327-348
- [7] Schwierz, G., W. Härer und E. P. Rührnschopf
Principles of Image Reconstruction in X-ray Computer Tomography
Siemens Forsch.- u. Entwickl.-Ber. 7 (1978) H. 4, S. 196-203
- [8] Keil, P.
Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgen-Computer-Tomographie
Phys. Bl. 39 (1983), S. 2-8
- [9] Hounsfield, G. N.
Computed Medical Imaging
J. Comp. Ass. Tom. 4 (1980), S. 665-674
- [10] Snyder, D. L. and J. R. Cox, jr.
On overview of reconstructive tomography and limitations imposed by a finite number of projections in "Reconstruction Tomography in Diagnostic Radiology and Nuclear Medicine"; University Park Press, Baltimore (1977), S. 3-32
- [11] Ramachandran, G. N. and L. V. Lakshminarayanan
Three-dimensional reconstruction from radiographs and electron micrographs: application of convolution instead of Fourier transforms
Proc. Nat. Acad. Sci. USA 68 (1971), S. 2236-2240
- [12] Herman, G. T. and S. W. Rowland
Three methods for reconstructing objects from X-rays: a comparative study
Comp. Graph. Image Processing 2 (1973), S. 151-178
- [13] Bracewell, R. N. and A. C. Riddle
Inversion of fan-beam scans in radio astronomy
Astrophys. J. 150 (1967), S. 427-434
- [14] Shepp, L. A. and B. F. Logan
The Fourier reconstruction of a head section
IEEE Trans. Nucl. Sci. NS 21 (1974), S. 21-43
- [15] Herman, G. T., Ed.
Image Reconstruction from Projections
Topics in Applied Physics Vol. 32
Springer-Verlag, Berlin (1979)
- [16] Sweeney, D. W.
Radiation gage imaging for nondestructive testing applications
LLL, Univ. Calif., Report No. UCRL-51641, Sept. 1974
- [17] Falconer, G. D. and D. C. Gates
Reactor-component inspection with computerized tomography
Report No. EPRI NP-213. Jul. 1976
- [18] Habermehl, A. und H.-W. Ridder
Mobile Tomographie mit Radionukliden
Medizin. Physik (1978), S. 245-250
- [19] Kruger, R. P., A. R. Morris and G. W. Wecksung
Applications of industrial computed tomography at Los Alamos Scientific Laboratory
Signal Processing: Theories and Applications, S. 459-466
Kunt, M and de Coulon, F. editors, North-Holland Publ. Comp., Eurasip 1980
- [20] Kruger, R. P. and T. M. Cannon
The application of computed tomography, boundary detection and shaded graphics reconstruction to industrial inspection
Mat. Eval. 36, (1978), S. 75-80
- [21] Morgan, I. L., H. Ellinger, R. Klinksiek and J. N. Thompson
Examination of concrete by computerized tomography
Am. Concrete Institute Journal, Proceedings 77 (1980), S. 23-27
- [22] Hopkins, F. F., I. L. Morgan, H. D. Ellinger, R. V. Klinksiek, G. A. Meyer and J. N. Thompson
Industrial Tomography Applications
IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-28 (1981), S. 1717-1720
- [23] Vainberg, E. I., V. I. Goncharov, I. A. Kazak and V. P. Kurozaev
Sensitivity of Computerized X-ray tomography in inspection of industrial products with local flaws
Defectoscopiya 10 (1980), S. 14-20
- [24] Huet, J. et M. Panton
La tomographie à rayons X industrielle, réalisation et essais d'un prototype 400 kVolts
Journées Nationales du Cofrend, Paris 1982, S. 106-110
- [25] Gilboy, W. B., J. Foster and M. Folkard
A tomographic gamma-ray scanner for industrial applications
Nucl. Instr. Meth. 193 (1982), S. 209-214
- [26] Reimers, P., H. Heidt, J. Stade und H.-P. Weise
Beispiele für die Anwendung der Computer-Tomographie (CAT) in der zerstörungsfreien Materialprüfung
Materialprüfung 2 (1980), S. 214-217
- [27] Reimers, P., H. Heidt und P. Rose
Simulation der Computertomographie (CAT) von technischen Prüfobjekten
2. Europäische Tagung für zerstörungsfreie Prüfung Wien (1981)
- [28] Reimers, P. and J. Goebbels
New Possibilities of Nondestructive Evaluation by X-ray Computed Tomography
Mat. Eval. 41 (1983), S. 732-737

- [29] Goncharev, V. I. V., I. A. Kazak and V. P. Kurozaev
Sensitivity of Computerized X-ray Tomography in
Inspection of Industrial Products with Local Flaws
Sov. J. of NDT 16 (1981), S. 699-703
- [30] Vasil'eva, E. Yu. et al.
Nondestructive testing of fuel elements using computed
tomography
Proc. 10th world conf. on nondestructive testing, Moskau
1982, 6-16, S. 153-162
- [31] Brooks, R. A. and G. DiChiro
Theory of Image Reconstruction in Computed Tomo-
graphy
Radiology 117 (1975), S. 561-572
- [32] Brooks, R. A. and G. DiChiro
Statistical limitations in X-ray reconstructive tomography
Med. Phys. 3 (1976), S. 237-240
- [33] Yester, M. V. and G. T. Barnes
Geometrical limitations of CT scanner resolution
SPIE 127 - 49 (1978)
- [34] CT/T technology continuum
General Electric Comp., Medical Syst. Div.
Milwaukee, Wisc., 53201 USA
- [35] Halmshaw, R.
Image Quality in Neutron Radiography
RARDE Tech. Rep. 4/75
Ministry of Defense, Fort Halstead, UK (1975)
- [36] Klug, A. and R. A. Crowther
Three-dimensioned Image Reconstruction from the View-
point of Information Theory
Nature 238 (1972), S. 435-440
- [37] Weise, H.-P., P. Jost und W. Freundt
Absolute Photonenausbeute technischer Röntgenanla-
gen — Vergleich zwischen Theorie und Messung
1. Europäische Tagung für zerstörungsfreie Materialprü-
fung 24. - 26. April 1978, Mainz (1978), S. 553 - 564
- [38] Jost, P., H.-P. Weise, W. Freundt, E. Mundry und D.
Schnitger
Messung, Interpretation und Vergleich der Energievertei-
lungen von Röntgenstrahlen verschiedener industrieller
Röntgenanlagen
Materialprüf. 19 (1977), S. 426 - 430
- [39] ICRP Publication 21
Data for Protection against Ionizing Radiation from
External Sources; Supplement to ICRP Publication 15
(1973)
- [40] Storm, E.
Phys. Rev. A5 (1972) 2328
- [41] Berger, M. J. and S. M. Seltzer
NASA Report No. SP-3012 (1964)
- [42] Storm, E. and H. I. Israel
Photon Cross Sections from 0.001 to 100 MeV for
Elements 1 through 100
Nuclear Data Tables, Sec. A, 7 (1970), S. 565 -
- [43] Hubbell, J. H.
Photon Cross sections, Attenuation Coefficients and
Energy Absorption Coefficients from 10 KeV to 100 GeV
Nat. Stand. Ref. Data Ser., Nat. Bureau Stand. (U.S.),
NSRDS — NBS 29 (1969)
- [44] Kramer, H. A.
Phil. Mag. 46 (1923) 836
- [45] Kulenkampff, H.
Ann. Phys. 69 (1922) 548
- [46] Dyson, N. A.
Proc. Phys. Soc. (London) 73 (1959) 924
- [47] Lange, S. und G. Golde
Resolution Characteristics of CT and their Impact on
Quantitative Brain Diagnosis in Cronical Computerized
Tomography
Lauksch u. Kutzner Ed., pp 52-59
Springer-Verlag, Berlin (1976)

Bisher erschienene Forschungsberichte der BAM

Nr. 1/September 1968

Forschung und Entwicklung in der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)
Rechenschaftsbericht für den Bundesminister für Bildung und Wissenschaft

Nr. 2/Juli 1970 (vergriffen)

Zum Problem des Feuchtigkeitschutzes von Dehnungsmeßstreifen und Halbleitergebern
von Dr.-Ing. Götz Andreae

Nr. 3/September 1970 (vergriffen)

Über das mechanische Verhalten von Aluminium-Stahl-Freileitungsseilen als Beispiel für Verbundbauteile
von Dr.-Ing. Josef Ziebs

Nr. 4/Dezember 1970 (vergriffen)

Formbeständigkeit von Holz gegenüber Feuchtigkeit — Grundlagen und Vergütungsverfahren
von Dr. rer. nat. Arno Burmester

Nr. 5/März 1971

Die Bedeutung der Netzstellenart und der Netzwerkkettendichte für die Beschreibung der elastischen Eigenschaften und des Abbaus von elastomeren Netzwerken
von Dr. rer. nat. Norbert Steiner

Nr. 6/April 1971

Zur Problematik der Prüfung und Beurteilung des Luftschallschutzes von Bauelementen bei unterschiedlichen Einbaubedingungen
von Prof. Dr.-Ing. Paul Schneider

Nr. 7/Juli 1971

Chromatographie und chemische Konstitution — Untersuchungen über den Einfluß der Struktur organischer Verbindungen auf das Verhalten bei der Dünnschicht-Chromatographie
von Dr.-Ing. Hans-Joachim Petrowitz

Nr. 8/November 1971

Zum Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Baustählen bei Wechselbeanspruchung
von Dr.-Ing. Helmut Veith

Nr. 9/November 1971

Untersuchung über die sichernde Wirkung poröser Massen in Acetylenflaschen
von Dr.-Ing. Karl-Heinz Möller

Nr. 10/Januar 1972

Untersuchungen über die Korngrößenbestimmung mit Ultraschall zur Entwicklung einer für die Praxis geeigneten zerstörungsfreien Meßmethode
von Dr.-Ing. Dietmar Aurich und Prof. Dr. phil. Erich Martin

Nr. 11/Februar 1972

Beitrag zur Kenntnis der Schnittriefenbildung und Schnittgütwerte beim Brennschneiden
von Dr.-Ing. Hans-Joachim Krause

Nr. 12/Mai 1972

Über Veränderungen von Nylon-6-Fasern beim Texturieren
von Dir. u. Prof. Dr. rer. nat. Hubert Feuerberg

Nr. 13/Juni 1972

Festkörpergleitreibung und Verschleiß von Eisen, Kobalt, Kupfer, Silber, Magnesium und Aluminium in einem Sauerstoff-Stickstoff-Gemisch zwischen 760 und $2 \cdot 10^{-7}$ Torr
von Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig (Berichter), Prof. Dr.-Ing. Kurt Kirschke, Dr.-Ing. Wolfgang-Werner Maennig und Dipl.-Phys. Harald Tischer

Nr. 14/Juli 1972

Untersuchungen zur Amplitudenabhängigkeit der Ultraschalldämpfung in Metallen bei 20 kHz
von Eberhard Fischer

Nr. 15/August 1972

Studie und Probleme der chemischen Edelmetall-Analyse
von Dir. u. Prof. Dr.-Ing. Heinz Pohl

Nr. 16/August 1972

Über Ausführung und Aussagefähigkeit des Normbrandversuches nach DIN 4102, Blatt 2, im Hinblick auf die Nachbildung natürlicher Schadensfeuer
von Dr.-Ing. Erwin Knublauch

Nr. 17/August 1972

Aktivierungsanalyse mit schnellen Neutronen, Photonen und geladenen Teilchen
von Dr.-Ing. Peter Reimers

Nr. 18/Januar 1973

Das Spröbruchverhalten des Baustahles R St 37-2 N in geschweißten

Konstruktionen, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches

von Dr.-Ing. Werner Struck

Nr. 19/Januar 1973

Die Bestimmung von Grenzflächentemperaturen bei tribologischen Vorgängen
Literaturrecherche von Dipl.-Phys. K. Kaffanke und Dr.-Ing. H. Czichos

Nr. 20/April 1973

Brandrisiko elektrischer Leitungen und Installationen in Wänden
von Dipl.-Ing. R. Rudolphi

Nr. 21/Juli 1973

Die kontinuumsmechanische Erfassung des zeitlichen Ablaufs der elastisch-plastischen Dehnungen bei der Zerrüttung
Literaturrecherche von Dipl.-Phys. D. Klaffke und Dr.-Ing. W. Maennig

Nr. 22/Juli 1973

Untersuchungen für ein Prüfverfahren zur Bemessung der Brandschutzbekleidung von Stahlstützen
von Dipl.-Ing. R. Rudolphi und Dr.-Ing. E. Knublauch

Nr. 23/November 1973

Reichs- und preußische Landesanstalten in Berlin Ihre Entstehung und Entwicklung als außeruniversitäre Forschungsanstalten und Beratungsorgane der politischen Instanzen
von Prof. Dr. rer. nat. habil. Walter Ruske

Nr. 24/November 1973

Das Brandverhalten von Holzstützen unter Druckbeanspruchung
von Dipl.-Ing. J. Stanke, Ing. grad. E. Klement und Dipl.-Ing. R. Rudolphi

Nr. 25/Dezember 1973

Über das Brandgeschehen vor der Fassade eines brennenden Gebäudes unter besonderer Berücksichtigung der Feuerbeanspruchung von Außenstützen
von Dr.-Ing. E. Knublauch

Nr. 26/August 1974

Der Elektronen-Linearbeschleuniger der BAM — Eigenschaften und erste Anwendungen —
von Dipl.-Ing. P. Jost, Dr.-Ing. P. Reimers und Dr.-Ing. P. Weise

Nr. 27/August 1974

Untersuchungen zum Schallfeld von Winkelprüfköpfen für die Materialprüfung mit Ultraschall
von Dr.-Ing. Hermann Wüstenberg

Nr. 28/August 1974

Zum Ablauf von Gasexplosionen in mit Rohrleitungen verbundenen Behältern
von Prof. Dr. rer. nat. Hans-Jürgen Heinrich

Nr. 29/August 1974

Theorie der dissipativen Luftschalldämmung bei einem idealisotropen porösen Material mit starrem Skelett für senkrechten, schrägen und allseitigen Schalleinfall
von Prof. Dr.-Ing. P. Schneider

Nr. 30/September 1974 (vergriffen)

The Application of Systems Thinking and Systems Analysis to Tribology
von Dr. Horst Czichos und Dr. Geert Salomon

Nr. 31/August 1975

Untersuchungen zur Klärung des Verhaltens thermoplastischer Kunststoffe bei Wechseldehnungsbeanspruchung
von Dr.-Ing. Gerhard Fuhrmann

Nr. 32/September 1975

Ein thermo-elektrisches Netzwerkverfahren zur Berechnung stationärer Temperatur- und Wärmestromverteilungen mit Anwendungsbeispielen
von Dipl.-Ing. Reinald Rudolphi und Dr.-Ing. Bernhard Böttcher

Nr. 33/November 1975

Die Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit von Baustoffen mit Hilfe eines nichtstationären Meßverfahrens
von Dipl.-Ing. Armin Wagner, Dipl.-Phys. Gerhard Kieper und Dipl.-Ing. Reinald Rudolphi

Nr. 34/Januar 1976 (vergriffen)

Untersuchungen zur Vergütung von Holzwerkstoffen
von Dipl.-Forsting. Dr. rer. sylv. Hans-Joachim Deppe

Nr. 35/Januar 1976

Der Widerstand von Platten, die als Beplankungsmaterial leichter Wände verwendet werden, gegenüber dem Aufprall harter Körper — Vorschlag für ein Prüfverfahren —
von Dipl.-Ing. Ernst Limberger

Nr. 36/Januar 1976 (vergriffen)

Wärme- und Feuchtigkeitsleitung in Beton unter Einwirkung eines Temperaturgefälles
von Dipl.-Ing. Jürgen Hundt

Nr. 37/Februar 1976

Die stoßartige Beanspruchung leichter, nichttragender Bauteile durch einen mit der Schulter gegenprallenden Menschen — Vorschlag für ein Prüfverfahren —
von Dr.-Ing. Werner Struck

Nr. 38/Juni 1976

Verschleißuntersuchungen an gas-, bad- und ionitriertem Stahl 42 CrMo 4
von Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig

Nr. 39/Juni 1976

Untersuchung der viskoelastischen Eigenschaften von Flüssigkeiten (mit nicht-Newton'schem Fließverhalten) insbesondere bei höherer Scherbeanspruchung
von Prof. Dr.-Ing. K. Kirschke und Dipl.-Phys. G. Kempf

Nr. 40/Juni 1976

Zum Untergrundabzug bei energiedispersiven Spektren nach verschiedenen Verfahren
von Dr. rer. nat. H. Hantsche

Nr. 41/Oktob er 1976

Optische Eigenschaften cholesterinischer Flüssigkeiten
von Dr. rer. nat. Bernhard Böttcher

Nr. 42/Oktob er 1976

Ermittlung der Mindestzündenergie brennbarer Gase in Mischung mit Luft
von Dr.-Ing. Siegmund Dietlen

Nr. 43/Oktob er 1976

Das Spröbruchverhalten geschweißter Bauteile aus Stahl mit zäh-sprödem Übergang im Bruchverhalten, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches
von Dr.-Ing. Werner Struck

Nr. 44/Novem ber 1976

Berechnung von räumlichen, linear elastischen Systemen, die aus finiten Stab- und Balkenelementen zusammengesetzt sind, unter Verwendung des Programms „Stab-Werk“
von Dipl.-Ing. W. Matthees

Nr. 45/Dezem ber 1976

Untersuchung des Elektrodenverhaltens im Vakuum aufgedampfter Metallschichten
von Dr.-Ing. W. Paatsch

Nr. 46/Mai 1977 (vergriffen)

Versuchsergebnisse zur Festigkeit und Verformung von Beton bei mehraxialer Druckbeanspruchung
Results of Test Concerning Strength and Strain of Concrete Subjected to Multiaxial Compressive Stresses
von Dipl.-Ing. Gerald Schickert und Dipl.-Ing. Helmut Winkler

Nr. 47/Juni 1977

Bautechnische Einflüsse auf die Tragfähigkeit von Kunststoffdübeln für Fassadenbekleidungen
von Dr.-Ing. Arno Plank

Nr. 48/Oktob er 1977

Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last, angewendet auf die Fundamente einer geplanten Schnellbahn
von Dr.-Ing. U. Holzöhner

Nr. 49/Dezem ber 1977

Untersuchungen zur Anwendung von Mikrowellen in der zerstörungsfreien Prüfung
von Dr.-Ing. Günther Wittig

Nr. 50/Juni 1978 (vergriffen)

Zur Meßtechnik für die Sicherheitsbeurteilung und -überwachung von Spannbeton-Reaktordruckbehältern
von Prof. Dipl.-Phys. Norbert Czaika, Dipl.-Phys. Norbert Mayer, Dipl.-Ing. Claus Amberg, Dipl.-Ing. Götz Magiera, Dr.-Ing. Götz Andree und Dipl.-Ing. Winfried Markowski

Nr. 51/Juni 1978

Auswirkung von chemischen und physikalisch-technologischen Einflußfaktoren auf das Beständigkeitsverhalten von Oberflächenbeschichtungen auf der Basis von Reaktionsbeschichtungsstoffen
von Dr. rer. nat. J. Sickfeld

Nr. 52/August 1978

Zum Einfluß der Gleitgeschwindigkeit auf das tribologische Verhalten von Werkstoffen hoher Härte bei reiner Festkörperreibung
von Dr.-Ing. Aleksandar Tomov

Nr. 53/Oktob er 1978

Bemessung und Optimierung beheizbarer Straßen- und Brückenbeläge
von Rolf Günter Rohrmann und Reinald Rudolphi

Nr. 54/Oktob er 1978

Magnetisches Verhalten dünner Eisenschichten bei mechanischer Wechselbeanspruchung
von Dr.-Ing. Harro Sander

Nr. 55/Novem ber 1978

Beobachtung und Orientierungsbestimmung der Oberflächenkristallite polykristalliner 99,999 %-Al-Proben bei Biegewechselbeanspruchung
von Dr.-Ing. Dieter Klaffke

Nr. 56/Januar 1979

Stabilität von Sandwichbauteilen
von Dipl.-Ing. W. Brünner und Prof. Dr.-Ing. C. Langlie

Nr. 57/März 1979

Untersuchungen an Prüfmitteln für die Magnetspulverprüfung
Investigations on Inspection-Media for Magnetic-Particle-Testing
von Dipl.-Ing. Meinhard Stadthaus

Nr. 58/März 1979

Ermittlung des Bauteilwiderstandes aus Versuchsergebnissen bei vereinbartem Sicherheitsniveau
von Dr.-Ing. Werner Struck

Nr. 59/Juli 1979

Ermittlung der Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken mit der Methode der Finiten Elemente unter besonderer Berücksichtigung des Verbundes zwischen Beton und Stahl
von Dr.-Ing. Günther Plauk

Nr. 60/August 1979

Untersuchungen zur Erfassung der Kaltformbarkeit von Feinblechen beim Strecken
von Dr.-Ing. H. Spreckelmeyer, Dr.-Ing. R. Helms und Dr.-Ing. J. Ziebs

Nr. 61/Dezem ber 1979

Beschreibung von Problemen der höheren Farbmimetrie mit Hilfe des Gegenfarbensystems
von Dr. Klaus Richter

Nr. 62/Dezem ber 1979

Geomagnetobiologisch bedingter Zusammenhang zwischen der Fraßaktivität von Termiten und der Zahl der Sterbefälle
von Dir. u. Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Gerisch und Prof. Dr. habil. Dr. h. c. Günther Becker

Nr. 63/Dezem ber 1979

Untersuchungen an Stopfbuchsen von Ventilen und Schiebern für Gase
von Dipl.-Ing. E. Behrend und Dipl.-Ing. J. Ludwig

Nr. 64/Februar 1980

Ermittlung der Schwingungserregung beim Betrieb schienengebundener Fahrzeuge in Tunneln sowie Untersuchung des Einflusses einzelner Parameter auf die Ausbreitung von Erschütterungen im Tunnel und dessen Umgebung
von Dr.-Ing. Werner Rucker

Nr. 65/Februar 1980

Untersuchungen über den Einfluß des Spannungszustandes auf bruchmechanische Kennwerte
von Dr.-Ing. Peter Schmidt, Dr.-Ing. Dietmar Aurich, Dr.-Ing. Rolf Helms, Dr.-Ing. Helmut Veith und Dr.-Ing. Josef Ziebs

Nr. 66/Mai 1980

Auswirkung von Druckentlastungsvorgängen auf die Umgebung
von Dr. rer. nat. Martin Hattwig

Nr. 67/Mai 1980

Beitrag zur dynamischen Analyse von vorgespannten und vorbelasteten Feder-Masse-Systemen mit veränderlicher Gliederung unter stoßartiger Beanspruchung
von Dr.-Ing. Wolfgang Matthees

Nr. 68/Mai 1980

Oberflächenmeßverfahren unter besonderer Berücksichtigung der Stereomeßtechnik.
Entwicklung eines volleuzentrischen Präzisions-Goniometers
von Dr. rer. nat. Dieter Petersohn

Nr. 69/Juni 1980

Untersuchungen zur Integrität des Liners von Reaktorsicherheitschillen (Containments) in Stahlbeton- und Spannbetonbauweise
von Dr.-Ing. Frank Buchhardt und Dipl.-Ing. Peter Brandl

Nr. 70/August 1980 (vergriffen)

Schwellenwerte beim Betondruckversuch
von Dr.-Ing. Gerald Schickert

Nr. 71/August 1980

Untersuchungen über durch den Boden gekoppelte dynamische Wechselwirkungen benachbarter Kernkraftwerksbauten großer Masse unter seismischen Einwirkungen
von Dr.-Ing. Wolfgang Matthees und Dipl.-Ing. Götz Magiera

Nr. 72/Septem ber 1980

Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen am Beispiel von Stahl- und Holzstützen
von Dr.-Ing. Reinald Rudolphi

Nr. 73/November 1980

Vergleichende Untersuchungen zum Tragverhalten von Klemmkupplungen für Stahlrohrgerüste nach bestehenden deutschen Prüfvorschriften und geplanten europäischen bzw. internationalen Prüfnormen
von Dipl.-Ing. Peter Wegener

Nr. 74/November 1980

ALGOL-Computerprogramm zur Berechnung zweidimensionaler instationärer Temperaturverteilungen mit Anwendungen aus dem Brand- und Wärmeschutz
von Dr.-Ing. Reinald Rudolphi und Dipl.-Inform. Renate Müller

Nr. 75/November 1980

Beitrag zur Kenntnis des zeitlichen und örtlichen Druckverlaufs bei der plötzlichen Entlastung unter Druck stehender Behälter und Behälterkombinationen
von Dir. u. Prof. Dr. Hans-Jürgen Heinrich

Nr. 76/November 1980

Deformationsverhalten von Rein- und Reinstaluminium sowie Cu 99,9 und St 37 bei Biegewechselbeanspruchung im Rasterelektronenmikroskop
von Dr.-Ing. Dieter Klaffke und Prof. Dr.-Ing. Wolfgang-Werner Maennig

Nr. 77/April 1981

Untersuchung des Verhaltens von Lagerzementen
von Dipl.-Ing. Michael Gierloff und Dr.-Ing. Matthias Maultzsch

Nr. 78/September 1981

Dynamische Wechselwirkung eines Schienen-Schwellensystems mit dem Untergrund
von Dr.-Ing. Werner Rücker

Nr. 79/Dezember 1981

Ein Beitrag zur Untersuchung der wasserstoffbeeinflussten Kaltrißeigung höherfester niedriglegierter Feinkornbaustähle mit dem Implantversuch
von Dr.-Ing. Volker Neumann

Nr. 80/Dezember 1981

Ursachen des Teileinsturzes der Kongreßhalle in Berlin-Tiergarten
von Dr.-Ing. Arno Plank, Dr.-Ing. Werner Struck und Dr.-Ing. Manfred Tzschätzsch

Nr. 81/Dezember 1981

Graphisch-rechnerisches Verfahren zum Erfassen der Zündhäufigkeit zündbarer Stoffe; Anwendung auf Datenmaterial aus dem Bereich der Statistik
von Dipl.-Ing. Jürgen Schmidt

Nr. 82/April 1982

Zur werkstoffmechanischen Beurteilung des Kerbschlagbiegeversuches
Assessment of the mechanical behaviour of materials in the notched bar impact test
von Rolf Helms, Hans-Joachim Kühn und Siegmund Ledworuski

Nr. 83/Juli 1982

Tribologisches Verhalten von thermoplastischen Kunststoffen — Kontaktdeformation, Reibung und Verschleiß, Oberflächenuntersuchungen —
von Prof. Dr.-Ing. Horst Czichos und Dr.-Ing. Paul Feinle

Nr. 84/Juli 1982

Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen im Kleinprüfstand (Vergleichsversuche)
von Dipl.-Inform. Renate Müller und Dr.-Ing. Reinald Rudolphi

Nr. 85/ISBN 3-88314-231-X/Oktober 1982

Technische Materialforschung und -prüfung — Entwicklungstendenzen und Rahmenvorschläge für ein EG-Programm „Basic Technological Research“ — Materials Research and Testing — Development Trends and Outline Proposals for a Community Programme „Basic Technological Research“ —
von Prof. Dr. Horst Czichos

Nr. 86/ISBN 3-88314-232-8/November 1982

Zur quantitativen Kennzeichnung des Verwitterungsverhaltens von Naturwerksteinen anhand ihrer Gefügemerkmale
von Dr.-Ing. Konrad Niesel und Dr. rer. nat. Peter Schimmelwitz

Nr. 87/ISBN 3-88314-240-9/Dezember 1982

Einfluß baupraktischer Umgebungsbedingungen auf das Korrosionsverhalten von Spannstählen vor dem Injizieren
von Dr.-Ing. Bernd Isecke und Dr.-Ing. Wolfgang Stichel

Nr. 88/ISBN 3-88314-254-9/Februar 1983

Untersuchungen zur Ausbreitung von Longitudinalwellen an Oberflächen bei der Materialprüfung mit Ultraschall
von Dr.-Ing. Anton Erhard

Nr. 89/ISBN 3-88314-263-8/April 1983

Untersuchungen zur Zerfallsfähigkeit von Distickstoffoxid
von Dr. rer. nat. Dietrich Conrad und Dr.-Ing. Siegmund Dietlen

Nr. 90/ISBN 3-88314-264-6/April 1983

Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
von Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Ernst Limberger und Dipl.-Ing. Jürgen Herter

Nr. 91/ISBN 3-88314-265-4/April 1983

Dreidimensionale Analyse von unbewehrtem Beton mit nichtlinear-elastischem Materialgesetz
von Dr.-Ing. Michael Weber

Nr. 92/ISBN 3-88314-266-2/August 1983

Ausbreitung von Erschütterungen durch den Boden
von Dipl.-Ing. Lutz Auersch

Nr. 93/ISBN 3-88314-283-2/August 1983

Unterdrückung stick-slip-induzierter Kurvengeräusche schienengebundener Fahrzeuge durch eine physikalisch-chemische Oberflächenbehandlung der Schienen
von Dr. rer. nat. Peter Studt

Nr. 94/ISBN 3-88314-284-0/August 1983

Untersuchungen der Störsschwingungen beim Kerbschlagbiegeversuch und deren Abschwächungen
von Dr.-Ing. Xian-Quan Dong

Nr. 95/ISBN 3-88314-289-1/August 1983

Über die Fokussierung des Schallfeldes von Ultraschall-Prüfköpfen mit Fresnelschen Zonenplatten
von Dr.-Ing. Manfred Römer

Nr. 96/ISBN 3-88314-296-4/Oktober 1983

Verbundverhalten zwischen Beton und geripptem Betonstahl sowie sein Einfluß auf inelastische Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken
von Dr.-Ing. Heinz Eifler

Nr. 97/ISBN 3-88314-297-2/November 1983

Typische Bruchflächenbildung thermoplastischer Kunststoffe nach wechselnder mechanischer Beanspruchung
von Dipl.-Ing. Gerhard Fuhrmann und Prof. Dr. rer. nat. Wolfram Schwarz

Nr. 98/ISBN 3-88314-312-X/Dezember 1983

Bestimmung des elastischen Verhaltens von Maschenwaren — Stretch- und Erholungsvermögen —
von Dr. rer. nat. Edmund Schnabel

Nr. 99/ISBN 3-88314-317-0/Dezember 1983

Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
von Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Ernst Limberger und Dipl.-Ing. Jürgen Herter

Nr. 100/ISBN 3-88314-298-0/Januar 1984

Untersuchungen zur Prüfung von Beton auf Frostwiderstand
von Günter Klamrowski und Paul Neustupny

Nr. 101/ISBN 3-88314-327-8/Februar 1984

Röntgen- und Gammastrahlen Computer-Tomographie
von Dr.-Ing. Peter Reimers, Dr. rer. nat. Jürgen Goebbels, Dr.-Ing. Heinrich Heidt, Dr.-Ing. Hans-Peter Weise und Dipl.-Phys. Kay Wilding

Nr. 102/ISBN 3-88314-335-9/März 1984

Weiterentwicklung des hydraulischen Kompensationsverfahrens zur Druckspannungsmessung in Beton
von Dr.-Ing. Götz Magiera