

ANWENDUNG DER

ATOM ENERGIE

FÜR FRIEDLICHE ZWECKE

ANWENDUNG DER ATOMENERGIE FÜR FRIEDLICHE ZWECKE

ANWENDUNG
DER ATOMENERGIE
FÜR FRIEDLICHE ZWECKE

Übersetzt von Victor Bredel



URANIA-VERLAG · LEIPZIG / JENA · 1956

VERLAG FÜR POPULÄRWISSENSCHAFTLICHE LITERATUR

**Originaltitel: ПРИМЕНЕНИЕ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ В МИРНЫХ ЦЕЛЯХ
МОСКВА 1956**

Kapitel 9 wurde übersetzt von Hans-Joachim Thier

Einband und Schutzumschlag von Helmut Heyne, Leipzig

Erschienen im Urania-Verlag · Verlag für populärwissenschaftliche Literatur · Leipzig/Jena · 1956

Alle Rechte vorbehalten · Lizenz-Nummer 212 475/129/56

Gesamtherstellung: Leipziger Volkszeitung, Leipzig, III/18/138 · Printed in Germany

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	6
J. Aladjew Atomenergie und ihre Anwendung für friedliche Zwecke .	7
S. Feinberg Forschungsreaktoren	12
S. Skworzow, W. Sidorenko Atomkraftwerke .	31
W. Dushenkov Anwendung der Strahlenchemie in der chemischen Industrie . .	41
A. Kusin, M. Meissel Anwendung der Strahlungen in der Lebensmittelindustrie und Pflanzenforschung .	53
G. Jordan Anwendung von Radioisotopen in der Meßtechnik .	66
S. Nasarow Prüfung industrieller Erzeugnisse mit Hilfe von Gammastrahlen .	88
W. Dachnow Radioaktive Isotope bei der Aufsuchung nutzbarer Mineralien . .	102
M. Rosanow Die Anwendung radioaktiver Isotope in der Medizin .	112
W. Sesjulinskie Anwendung des Verfahrens markierter Atome in der Biologie und Landwirtschaft . .	127
P. Grusin Strahlen und Isotope in der Metallurgie und im Maschinenbau . .	137
W. Rudnew Anwendung von radioaktiven Isotopen in der chemischen Analyse	150

Vorwort

Die Anwendungsmöglichkeiten der Atomenergie sind vielseitig und verschiedenartig. Wir können uns alle Möglichkeiten, die sich in dieser Hinsicht bieten, noch gar nicht vorstellen. Die Entwicklung vieler aussichtsreicher Anwendungsgebiete der Atomenergie befindet sich im Anfangsstadium; in vielen anderen Fällen hat sie noch nicht einmal begonnen. Die Menschheit hat lediglich die ersten Schritte zur Ausnützung der Atomenergie für friedliche Zwecke gemacht. Aber schon die bereits erzielten Erfolge zeugen davon, daß die Atomenergie einen gewaltigen Einfluß auf die Zukunft haben wird.

Dieses Buch soll dem Leser eine Vorstellung von einigen wichtigen, heute bereits reellen Anwendungsmöglichkeiten der Atomenergie in der Volkswirtschaft und Wissenschaft vermitteln und ihn mit den Methoden ihrer Ausnützung vertraut machen. Fragen, die mit der Herstellung von „Kernbrennstoffen“ und Konstruktionsmaterialien für die Atomindustrie in Verbindung stehen, wurden in diesem Buch nicht berücksichtigt, da diese eine selbständige Bedeutung haben.

Die Autoren

Atomenergie und ihre Anwendung für friedliche Zwecke

Alle Stoffe bestehen aus Atomen. Nach modernen Vorstellungen besteht das Atom eines beliebigen Elements aus einem positiv geladenen Kern und negativ geladenen Elektronen, die sich um diesen Kern bewegen. Der zentrale Teil des Atoms — der Kern — besteht aus Protonen und Neutronen. Die Abmessungen des Kerns sind einige zehntausendmal kleiner als die des Atoms, in ihm ist aber über 99,95% der gesamten Atommasse konzentriert. Die Dichte der Kernsubstanz ist außerordentlich groß: Ein Kubikzentimeter der Kernsubstanz würde etwa 100 Millionen Tonnen wiegen.

Unter Atomenergie versteht man die Energie, die bei den Umwandlungen der Atomkerne frei wird. Es sind verschiedene Kernumwandlungen bekannt. Einige von ihnen sind durch die Emission eines oder mehrerer Teilchen (Neutronen, Protonen, Deuteronen, α -Teilchen) oder γ -Quanten begleitet, und die neugebildeten Kerne unterscheiden sich (in ihrer Masse und Ladung) daher von den Ausgangskernen nur um einige Einheiten. Spontane Kernumwandlungen dieser Art wurden am Ende des vorigen Jahrhunderts entdeckt. Die Energie, die bei derartigen Umwandlungen frei wird, übertrifft um das Millionenfache die Energie, die bei chemischen Umwandlungen frei wird. Der Nutzeffekt dieser Reaktion ist aber, soweit sie künstlich eingeleitet wird, verschwindend klein; sie hat daher keinerlei praktische Bedeutung für die Energiegewinnung.

Für die Energetik ist eine andere Art von Kernumwandlung von Interesse, die Ende der dreißiger Jahre entdeckt wurde: die Spaltung der Uran- und Thoriumkerne bei Beschuß mit Neutronen.

Bei dieser Umwandlung zerfällt der Kern des Urans (oder Thoriums) in zwei gleichnamig geladene Spaltprodukte von fast gleicher Masse, die sich gegenseitig abstoßen und mit sehr großen Geschwindigkeiten auseinanderfliegen. Bei Zusammenstößen der Spaltprodukte mit Atomen des Mediums, in dem sich die Spaltung vollzieht, geht die kinetische Energie der Spaltprodukte in Wärmeenergie der Atome des Mediums über. Eine solche Umwandlung der Atomenergie in Wärme vollzieht sich in den sogenannten Kernreaktoren oder Uranmeilern. Die in diesem Prozeß frei werdende Energiemenge ist bedeutend größer (um mehr als das Zehnfache) als die Energiemenge, die beim Zerfall der Atomkerne frei wird. Bei vollständiger Spaltung von 1 kg Uran wird eine Energiemenge frei, die der Verbrennungswärme von etwa 3000 Tonnen guter Steinkohle äquivalent ist. Das Wichtigste besteht aber darin, daß bei jedem Spaltakt pro absorbiertes Neutron zwei oder drei neue Neutronen frei werden. Dadurch kann die Reaktion zu einer sich selbst entwickelnden Kettenreaktion gestaltet werden, wodurch eine wesentliche Erhöhung des Nutzeffektes erreicht wird. Zwar gelingt es unter realen Verhältnissen, nur einen gewissen Teil der an der Reaktion beteiligten Stoffe auszunutzen, aber die Energie, die so gewonnen werden kann, ist doch sehr groß. Etwa 80% dieser Energie wird in Wärme umgesetzt. Die übrigen 20% werden als sogenannte Kern- (oder radioaktive) Strahlung frei. Die in Reaktoren entstehende Kernstrahlung kann entweder direkt ausgenutzt werden oder zur Gewinnung verschiedener radioaktiver Isotope dienen. Die radioaktiven Isotope können auch in großer Menge aus den Produkten der Uran-spaltung gewonnen werden.

Es ist auch eine Art von Kernumwandlung bekannt, der eine Synthese komplizierterer Kerne aus den einfachsten Atomen leichter Elemente zugrunde liegt. Die Menge der dabei frei werdenden Energie übertrifft um das Mehrfache die Energiemenge, die bei der Kernspaltung einer gleichen Gewichtsmenge von Uran oder Thorium frei wird. Bis jetzt ist es aber lediglich gelungen, solche Reaktionen künstlich unter unkontrollierbaren Bedingungen hervorzurufen; sie können daher noch nicht für friedliche Zwecke verwendet werden.

Als Ergebnis einer gelenkten und in großem Maßstab durchgeführten Spaltungsreaktion der Uran- (oder Thorium-) Kerne wird somit eine kolossale Energiemenge frei, entstehen mächtige Flüsse durchdringender Strahlungen und werden radioaktive Isotope gewonnen.

Auch mit speziellen physikalischen Geräten, den sogenannten Beschleunigern von Elementarteilchen, können Kernstrahlungen erzeugt und viele radioaktive Isotope hergestellt werden. Durch die Anstrengungen der Wissenschaftler, Ingenieure und anderer Spezialisten wurden in jüngster Zeit Wege zur Ausnutzung dieser Energie, der Strahlung und der Isotope in der Industrie, Landwirtschaft, Medizin und Wissenschaft gefunden.

Die Bedeutung der Atomenergie als neue kolossale Energiequelle ist überwältigend. Der Bedarf an Energie im Weltmaßstab ist groß. Nach Angaben, die auf der Genfer wissenschaftlich-technischen Konferenz gemacht wurden, beträgt der Jahresverbrauch an Energie pro Kopf der Bevölkerung gegenwärtig in entwickelten, industriellen Ländern etwa 23 bis 45 kWh, wobei 80% der Energie aus Kohle, Erdöl oder Erdgasen produziert werden (bereits jetzt werden jährlich etwa 1,7 Milliarden Tonnen Steinkohle verbrannt). Der Bedarf an Energie wächst schnell. Nach denselben Angaben verdoppelt sich die Produktion von Elektroenergie in 10 Jahren und verzehnfacht sich in 33 Jahren. Es wird angenommen, daß bis zum Jahre 2000 der Energiebedarf etwa um das Dreifache ansteigt.

Die Produktion von Elektroenergie in Wasserkraftanlagen, die gegenwärtig nur 1,5% des gesamten Energiebedarfes deckt, wird bis dahin bedeutend zunehmen, aber doch nicht mehr als 15% des gesamten Bedarfes ausmachen. Will man den wachsenden Energiebedarf auf Kosten organischer Brennstoffe decken, so müssen jährlich 7 bis 8 Milliarden Tonnen Steinkohle verbrannt werden. Die Brennstoffvorräte sind heute in einigen Ländern aber bereits ziemlich erschöpft, die Kohleförderung wird immer komplizierter, und die Kosten der Kohle steigen.

Im Gegensatz hierzu werden die Kosten für die Atomenergie mit der Entwicklung der Technik ständig geringer; die Vorräte an Uran und Thorium sind außerdem groß. Die Energiemenge, die in den erforschten

Vorräten dieser Elemente enthalten ist, übertrifft um ein Vielfaches die Energiemengen, die in allen anderen Energiequellen vorhanden sind.

Ein bedeutender Vorteil des „Kernbrennstoffes“ gegenüber allen anderen Brennstoffarten ist seine hohe Energiekapazität. Das gibt die Möglichkeit, Atomenergie an Orten zu verwenden, die weit von Gebieten der Uran- und Thoriumförderung entfernt sind, da die Transportkosten des „Kernbrennstoffes“ gering sind.

Das im Juni 1954 in Betrieb genommene Atomkraftwerk der Akademie der Wissenschaften der UdSSR — das erste Atomkraftwerk der Welt — ist der erste Schritt der Sowjetunion zur Ausnutzung der Atomenergie für die Energieproduktion. Die gesammelten Erfahrungen ermöglichten es, zur Schaffung größerer Atomkraftwerke überzugehen. Im 6. Fünfjahrplan der UdSSR ist der Bau einer Reihe von Atomkraftwerken mit einer Gesamtleistung von 2 bis 2,5 Millionen kW vorgesehen. Sie sollen in erster Linie in Gebieten gebaut werden, die keine eigene Brennstoffbasis besitzen.

Mit dem Bau von Atomkraftwerken wurde auch in anderen Ländern begonnen. In England, dessen Energiequellen nicht groß sind, wird der Bau des ersten Atomkraftwerkes mit einer Leistung von 50 000 kW in Calder Hall beendet. Dieses Kraftwerk soll in diesem Jahr in Betrieb genommen werden. Im Laufe der nächsten zehn Jahre ist in England der Bau weiterer 12 Atomkraftwerke mit einer Gesamtleistung von 1,5 bis 2 Millionen kW vorgesehen; es wird angenommen, daß 1975 in England 25% der gesamten Elektroenergie in Atomkraftwerken produziert wird. Die USA wollen das erste Atomkraftwerk mit einer Leistung von 60 000 kW 1957 in Betrieb nehmen.

Große Möglichkeiten eröffnet auch die Ausnutzung der Kernstrahlung und radioaktiver Isotope.

Als Ergebnis der in den letzten Jahren durchgeführten Untersuchungen wurden die Gebiete gefunden, in denen die Ausnutzung der Strahlungen und Isotope zweifellos wichtig und aussichtsreich ist. Man verwendet sie, um die mechanischen, thermischen und chemischen Eigenschaften verschiedener Stoffe zu ändern, um verschiedene chemi-

sche Reaktionen und Prozesse einzuleiten und zu beschleunigen, um die Zuchtwahl neuer Sorten nützlicher Pflanzen und Mikroorganismen zu ermöglichen, um die Lagerungsfähigkeit landwirtschaftlicher Produkte und Medikamente zu erhöhen.

Weitere Anwendungen finden Kernstrahlungen und Isotope in der Medizin zur Diagnose und Therapie, in verschiedenen Industriezweigen zur Kontrolle und Automatisierung verschiedenartiger technologischer Prozesse, bei der Auffindung von Bodenschätzen, zur Untersuchung komplizierter Erscheinungen in der Natur und Technik. Die letztgenannte Anwendung der Isotope eröffnete der Wissenschaft neue große Möglichkeiten. Als Forschungsmittel finden radioaktive Isotope breite Anwendung in verschiedenen Gebieten der Chemie, Technik, Physik und besonders der Biologie. Die bereits mit ihnen erzielten Ergebnisse haben in einer Reihe von Fällen grundlegende Bedeutung für die Wissenschaft.

Aus diesen Ausführungen ergibt sich die hervorragende Bedeutung der Atomenergie für den technischen und kulturellen Fortschritt. Weitere Wege ihrer friedlichen Ausnutzung erfordern die Heranziehung breiter Kreise von Spezialisten verschiedener Gebiete der Wissenschaft und Volkswirtschaft.

Forschungsreaktoren

Gleich nach der Entdeckung des Neutrons — eines neutralen Elementarteilchens der Atomkerne — rückte es in den Mittelpunkt der gesamten Kernphysik. Einerseits ist gerade den Neutronen zu verdanken, daß nukleare Kettenreaktionen, auf deren Grundlage die Entwicklung von Kernreaktoren beruht, verwirklicht werden konnten, andererseits aber sind Reaktoren selbst die stärksten Neutronenquellen.

Forschungsreaktoren, d. h. Quellen einer intensiven Neutronenstrahlung, geben die Möglichkeit, viele Probleme der Kernphysik, der Festkörperphysik, der künstlichen Herstellung radioaktiver Stoffe, der Strahlenchemie, des Reaktorbaues und der biologischen Strahlenwirkung experimentell zu untersuchen.

Es soll an dieser Stelle nicht der Versuch unternommen werden, einen mehr oder weniger ausführlichen Überblick aller dieser Probleme zu geben, es sollen vielmehr an einer Reihe von Beispielen einige typische Forschungsprobleme aufgezeigt werden, die mit Hilfe von Forschungsreaktoren gelöst werden.

Kurz nach der Entdeckung des Neutrons wurde festgestellt, daß seine Wechselwirkung mit Atomkernen, die zum Einfang des Neutrons führen kann, je nach der Neutronenenergie einen scharf ausgeprägten Resonanzcharakter trägt, d. h. die Wahrscheinlichkeit eines bestimmten Wechselwirkungsprozesses zwischen dem Neutron und dem Atomkern wächst für einige ganz bestimmte Energiewerte des Neutrons stark an. Eine typische Resonanzkurve der Wahrscheinlichkeit des Einfanges von Neutronen durch Atomkerne zeigt Abb. 1. Längs der

$\nu \sigma_f$
barn. cm/sec.

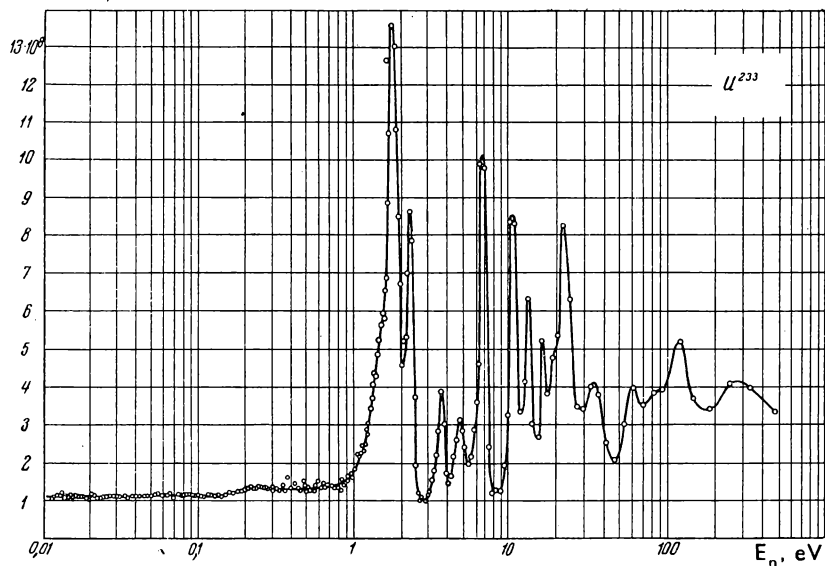


Abb. 1

Abszissenachse ist die kinetische Energie des Neutrons aufgetragen, längs der Ordinatenachse eine Größe, die der Empfangswahrscheinlichkeit proportional ist. Aus Abb. 1 ist zu erkennen, daß für gewisse Werte der Neutronenenergie (E) die Wahrscheinlichkeit des Wechselwirkungsprozesses zwischen dem Neutron und dem Atomkern ein, wie man sagt, scharfes Resonanzmaximum aufweist. In Reaktoren entstehen Neutronen mit verschiedener kinetischer Energie.

Um Kernresonanzen zu untersuchen, muß eine Möglichkeit gefunden werden, um die Neutronen entsprechend ihrer Energie zu sortieren. Dies ist ein Problem der Kernspektrometrie, das mit Hilfe besonderer Geräte — sogenannter Neutronenselektoren — gelöst wird.

Auf Abb. 2 ist der mechanische Selektor der Akademie der Wissenschaften der UdSSR gezeigt. Der Rotor des Selektors dreht sich mit großer Geschwindigkeit und sortiert die aus dem Reaktor heraus-

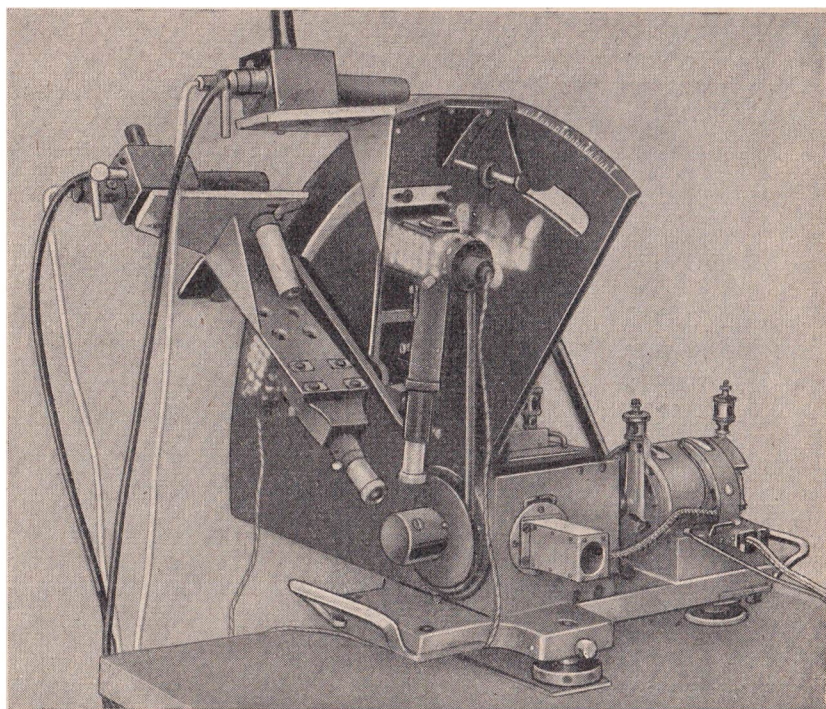


Abb.2

fliegenden Neutronen entsprechend ihrer kinetischen Energie, indem er sie je nach seiner Stellung entweder durchläßt oder zurückhält.

Die bei der Wechselwirkung zwischen Neutronen und Substanzen auftretenden Resonanzerscheinungen sind von größtem Interesse sowohl für die Untersuchung des Aufbaues der Atomkerne wie auch für die Entwicklung von Reaktoren. Die Abmessungen, die Konstruktion und die Eigenschaften eines Reaktors hängen wesentlich von der Form und Lage der Resonanzniveaus der Stoffe ab, aus denen der Reaktor aufgebaut ist.

In Forschungsreaktoren werden gegenwärtig durch Neutroneneinfang bedeutende Mengen verschiedener radioaktiver Isotope hergestellt.

Sehr interessant ist die Anwendung von Reaktoren für Forschungszwecke auf dem Gebiet der Festkörperphysik. Unter Neutroneneinwirkung werden die physikalischen Eigenschaften der Körper stark verändert. So wird z. B. Stahl gehärtet und verfestigt, gleichzeitig aber wird er auch wesentlich spröder. Graphit „schwillt an“, d. h. sein Volumen wird größer. Die Wärmeleitfähigkeit des Graphits sinkt um ein Zehnfaches. Besonders stark verändern sich die Eigenschaften des Brennstoffes, des Urans. Alle diese Fragen sind engstens mit der Technik des Reaktorbaues verknüpft. Die Hauptbestandteile eines Atomreaktors — die Brennstoffelemente und der Moderator — erleiden im Laufe eines dauerhaften Reaktorbetriebes sehr starke Veränderungen durch Einwirkung der Neutronenstrahlung. Die Brennstoffelemente bestehen aus spaltbaren Stoffen, z. B. aus Uran, aus seinen Legierungen oder aus Mischungen des Urans mit anderen Stoffen (Magnesium, Aluminium usw.). Die uranhaltige Substanz wird mit einem Konstruktionsmaterial — Aluminium, Zirkon oder Stahl — überzogen. Unter Einwirkung der Neutronen verändern sich die physikalischen Eigenschaften aller dieser Materialien.

Die Entwicklung der Reaktortechnik wird gegenwärtig ohne Zweifel hauptsächlich dadurch gebremst, daß das Verhalten verschiedener Stoffe in Neutronenfeldern ungenügend untersucht ist und daß die Entwicklung von Werkstoffen und Konstruktionselementen, die über lange Zeiten der zerstörenden Wirkung der Neutronenstrahlung widerstehen können, noch nicht in genügendem Maße vorangeschritten ist.

Auf Abb. 3 ist an einem typischen Beispiel die Zerstörung von Brennstoffelementen eines Reaktors gezeigt. Von Technologen werden neue Materialien und neue Typen von Brennstoffelementen entwickelt, die der Neutroneneinwirkung gegenüber beständig sind. Die neuen Brennstoffelemente werden in Forschungsreaktoren untersucht, da nur im Reaktor Bedingungen geschaffen werden können, die den realen Verhältnissen bei der Verwendung der neuen Materialien und Konstruktionselemente ähnlich sind.

Die Werkstoffe für die Brennstoffelemente des Atomkraftwerkes der Akademie der Wissenschaften der UdSSR wurden z. B. im Reaktor RFT

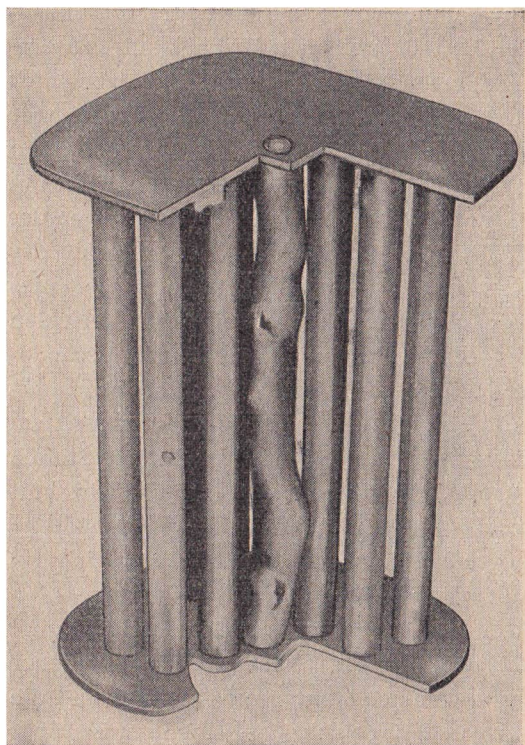


Abb.3

(Reaktor für physikalische und technische Untersuchungen) untersucht. Mit Hilfe von Forschungsreaktoren — diesen „alchemistischen Öfen des XX. Jahrhunderts“ — werden gegenwärtig auch viele andere wissenschaftliche und technische Probleme gelöst.

Wie ist nun ein Forschungsreaktor aufgebaut?

Die aktive Zone 1 (Abb. 4) des Reaktors, in der die kontrollierbare Kettenreaktion stattfindet, setzt sich zusammen aus Brennstoffelementen 2, die Uran enthalten, das meist stark mit dem spaltbaren Uranisotop mit dem Atomgewicht 235 (U^{235}) angereichert ist, und einem Neutronenmoderator 3. Die Brennstoffelemente befinden sich in Arbeitskanälen 4. Durch sie zirkuliert ein Wärmeträger, der mit Hilfe von

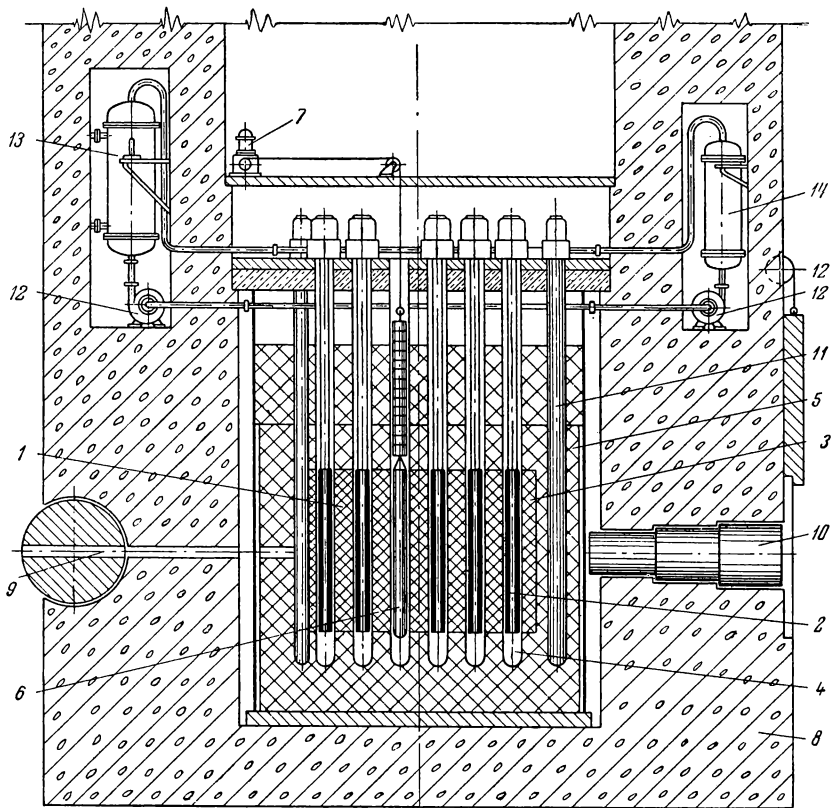


Abb.4

Umlaufpumpen 12 aus dem Wärmeaustauscher 13 in die Brennstoffelemente geleitet wird. Zur Kühlung des Wärmeträgers wird Wasser aus einem Fluß durch den Wärmeaustauscher geschleust. Als Moderator verwendet man gewöhnliches Wasser, schweres Wasser, Graphit oder Beryllium. Oft benutzt man auch zugleich mehrere dieser Stoffe, z. B. Graphit und Wasser. Schnelle Neutronen, die bei der Spaltung der Urankerne entstehen, verlieren im Moderator einen Teil ihrer Energie und verwandeln sich in thermische Neutronen, die mit großer Wahr-

scheinlichkeit vom Isotop U^{235} absorbiert werden und ihre Spaltung hervorrufen. Auf diese Weise entsteht in der Kette der Kernreaktion ein geschlossenes Glied. Die entstandene Wärme wird durch den Wärmeträger abgeführt.

Um das Ausweichen der Neutronen aus der aktiven Zone zu vermindern, wird diese mit einem Neutronenreflektor 5 umgeben, der aus einem Stoff mit geringer Neutronenabsorption, z. B. aus Wasser, Graphit oder Beryllium, besteht. Die Regelung des Reaktors, d. h. die Aufrechterhaltung der Kettenreaktion auf einem bestimmten Intensitätsniveau, wird mit den Stäben 6 vollzogen. Diese Stäbe besitzen die Eigenschaft, Neutronen zu absorbieren. Sie werden mit Hilfe automatischer Antriebe 7 mehr oder weniger tief in die aktive Zone versenkt. Die automatischen Antriebe werden durch Impulse von Ionisationskammern gesteuert, die ständig den Neutronenfluß im Reaktor messen und im Falle eines Anstieges oder Absinkens des Flusses gegenüber dem eingestellten Niveau mittels eines Systems elektronischer Verstärker entsprechende Signale an die Antriebsvorrichtungen der Absorptionsstäbe schicken. Rund um den Reaktor wird eine dicke Schutzwand aus Beton und Metall aufgebaut.

Das beschriebene Schema hat für jeden Reaktor mit thermischen Neutronen Gültigkeit.

In einem Forschungsreaktor sind auch immer solche Einrichtungen vorhanden wie Neutronenbündel-Kanäle 9, thermische Kolonne 10, Bestrahlungskanäle 11 und experimentelle „Schleifen“ (Wärmeaustauscher einer solchen „Schleife“ 14).

Diese spezifischen Einrichtungen eines Forschungsreaktors sollen etwas ausführlicher behandelt werden.

Die **Neutronenbündel** werden durch zylindrische Kanäle aus dem Reaktor herausgeführt. Die Kanäle durchziehen die Schutzwand und den Reflektor des Reaktors und reichen mitunter bis in die Mitte der aktiven Zone. Die intensiven Neutronenbündel, die durch die Kanäle aus dem Reaktor herausgeführt werden, benutzt man für physikalische Untersuchungen mit speziellen Geräten, so z. B. mit den bereits beschriebenen Neutronenselektoren. Besondere Verschlüsse (Abb. 5)

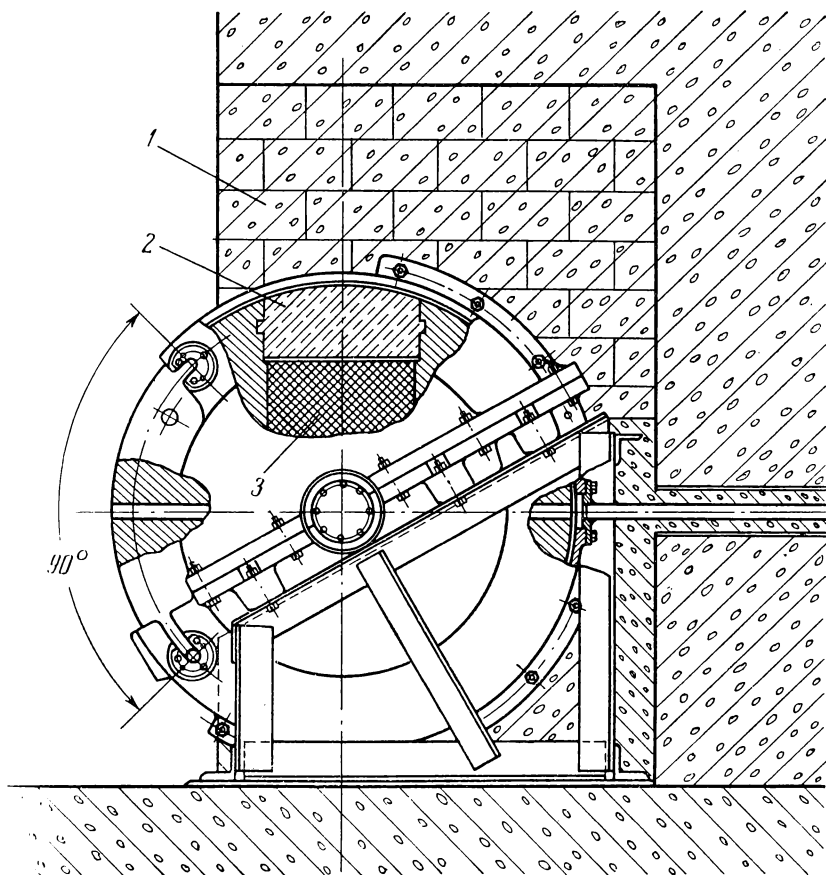


Abb. 5. Verschuß eines physikalischen Kanals
1 — zerlegbare Mauerung; 2 — Blei; 3 — Paraffin

geben die Möglichkeit, den Kanal entweder zu öffnen, um die Neutronen auf das zu untersuchende Objekt zu schicken, oder ihn zu schließen, um das Betreten der Reaktorhalle gefahrlos zu machen.

Die **thermische Kolonne** hat die Form eines Zylinders. Die Kolonne ist in die Schutzwand eingelassen und wird durch eine Metallplatte ab-

geschirmt. Der Neutronenfluß, der durch die Oberfläche des Reflektors austritt, enthält noch eine ziemlich große Anzahl schneller Neutronen. In der thermischen Kolonne werden diese schnellen Neutronen abgebremst, so daß man am Austritt aus ihr einen Fluß langsamer Neutronen vorfindet, in dem die Beimischung schneller Neutronen verschwindend klein ist.

Die **Bestrahlungskanäle** sind zylindrische Öffnungen im Reflektor oder in der aktiven Zone. Sie werden mit Materialproben beschickt und dienen zur Untersuchung der Veränderungen, die in den physikalischen Eigenschaften der Proben durch Neutronenbestrahlung hervorgerufen werden. Da sich bei der Neutronenabsorption Wärme entwickelt, sind diese Kanäle mit einem Kühlungssystem ausgerüstet. In den Kanälen können radioaktive Isotope hergestellt werden. Zu diesem Zweck werden sie mit speziellen Ampullen beschickt, in denen sich die nichtradioaktiven Ausgangsisotope befinden.

Von Interesse sind auch Kanäle für kurzzeitige Bestrahlung, die zur Untersuchung sehr kurzlebiger radioaktiver Isotope verwendet werden. Das Prinzip eines solchen Kanals besteht darin, daß die Ampulle mit dem Ausgangsisotop pneumatisch durch den Kanal „geschossen“ wird. Während die Ampulle durch die aktive Zone fliegt, wird sie kurzzeitig, im Laufe von Bruchteilen einer Sekunde, mit Neutronen bestrahlt, und es entstehen in ihr radioaktive Isotope. Die Ampulle fliegt weiter und wird dann von einem Empfänger aufgefangen, in dem physikalische Messungen der Probe vorgenommen werden. Die Zeit, die zwischen der Bildung radioaktiver Isotope und Ausführung der Messungen vergeht, kann auf diese Weise bis auf einige Hundertstel Sekunden herabgesetzt werden.

Die **experimentellen „Schleifen“** sind für die Entwicklung des Reaktorbaues von besonderem Interesse. Es handelt sich hier um besondere Bestrahlungskanäle, die sich durch das Vorhandensein eines autonomen Kühlungssystems, das von dem Kühlungssystem der aktiven Zone unabhängig ist, auszeichnen. Man hat daher die Möglichkeit, in derartigen Kanälen das Verhalten von Brennstoffelementen für Energiereaktoren zu untersuchen, und zwar bei langfristiger Bestrahlung und unter Ver-

hältnissen, die hinsichtlich des Druckes, der Temperatur und des Wärmeträgers den Betriebsbedingungen in Energiereaktoren entsprechen. Im Forschungsreaktor wird ein bestimmtes Kühlmittel, z. B. Wasser, verwendet. Der Druck und die Temperatur des Wassers sind nicht groß bzw. geringer als 20 at und 100° C. In einer „Schleife“ mit autonomem Kühlungssystem kann die Wassertemperatur bis zu 350° C und der Druck 200 at erreichen. Es kann auch ein ganz anderer Wärmeträger, z. B. ein Gas oder Metall, bei noch höheren Temperaturen verwendet werden. Derartige „Schleifen“ sind z. B. im Reaktor RFT vorhanden.

Da für die Untersuchung von Brennstoffelementen unter Betriebsverhältnissen nur in experimentellen Schleifen über lange Zeiten Verhältnisse geschaffen werden können, die den realen ähnlich sind, ist die Bedeutung der experimentellen Schleifen für die Zukunft der Kernenergetik außerordentlich groß.

Ein wichtiges Merkmal eines Forschungsreaktors ist die Intensität des Neutronenflusses, d. h. die Zahl der Neutronen, die pro Zeiteinheit durch eine Einheitsfläche durchtreten (φ = Neutr./cm² sec). Je größer φ ist, desto größer sind auch die Veränderungen, die durch Bestrahlung während eines gegebenen Zeitintervalls hervorgerufen werden können. Die Strahlungswirkung hängt von dem integralen Fluß ab, d. h. von dem Produkt Neutronenfluß mal Dauer seiner Einwirkung, also $\varphi \cdot t$. Der maximale φ -Wert, der in modernen Forschungsreaktoren erreicht wird, beträgt $\varphi = 4 \cdot 10^{14}$ Neutr./cm² sec. Im Bau befinden sich Forschungsreaktoren mit einem Fluß von $\varphi \sim 10^{15}$ Neutr./cm² sec.

Der Neutronenfluß verteilt sich über das Volumen des Reaktors ungleichmäßig. Ein typisches Beispiel für die Raumverteilung des Flusses thermischer Neutronen ist auf Abb. 6 dargestellt. Auf derselben Abbildung ist auch die Raumverteilung der überthermischen Neutronen dargestellt. Es ist sehr klar zu erkennen, daß Neutronen verschiedener Energie verschieden über das Volumen des Reaktors verteilt sind. An den Orten, wo der Fluß φ größer ist, ist auch der integrale Fluß $\varphi \cdot t$ größer (für gleiche Zeitabschnitte), d. h. an diesen Orten verändern sich die Eigenschaften bestrahlter Körper schneller. Aus den Bedürfnissen

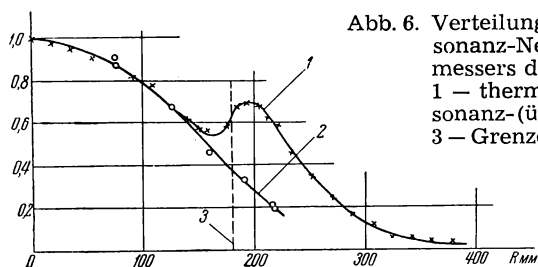


Abb. 6. Verteilung der thermischen und Resonanz-Neutronen längs des Halbmessers der aktiven Zone
 1 — thermische Neutronen; 2 — Resonanz-(überthermische) Neutronen;
 3 — Grenze der aktiven Zone

der Kernphysik, Strahlenchemie, Kerntechnik und auch der Radioisotopenherstellung ergibt sich die Forderung nach immer stärkeren Neutronenflüssen in Forschungsreaktoren. Es ist anzunehmen, daß in dieser Hinsicht im Laufe der weiteren Entwicklung noch große Fortschritte bevorstehen, obwohl zu berücksichtigen ist, daß zur Steigerung von φ um ein Mehrfaches der Bau neuer mächtiger Reaktoren notwendig ist.

Wir sprachen bis jetzt von Reaktoren, die hauptsächlich mit thermischen Neutronen arbeiten. Ein nicht geringes Interesse stellen aber auch Forschungsreaktoren mit schnellen oder mittleren Neutronen dar. Das allgemeine Schema solcher Reaktoren weicht nicht stark von dem bereits beschriebenen ab. Der Hauptunterschied besteht darin, daß die Menge des Moderators in der aktiven Zone des Reaktors bedeutend vermindert ist. In Reaktoren mit schnellen Neutronen spielt die Neutronenabbremmung daher nur eine unwesentliche Rolle.

Reaktoren mit dem Spektrum mittlerer Neutronen liegen, vom Standpunkt der Neutronenbremsung aus, zwischen den besprochenen extremen Typen.

In Reaktoren mit schnellen Neutronen kann man viel leichter bedeutend größere Werte des Neutronenflusses φ erreichen als in Reaktoren mit thermischen Neutronen (etwa von der Größenordnung 10^{16} Neutr./ $\text{cm}^2 \text{ sec}$). Man muß jedoch berücksichtigen, daß die Wirkung schneller und thermischer Neutronen verschieden ist. Die integrale Intensität der Wechselwirkung zwischen Neutronen und Substanzen ist durch das Produkt aus der Wahrscheinlichkeit der Wechselwirkung und der

Größe $\varphi \cdot t$, d. h. durch den Wert $\sigma \cdot \varphi \cdot t$, gegeben. Die Wahrscheinlichkeit der Wechselwirkung eines thermischen Neutrons mit Substanzen beträgt oft das Hundertfache von der für die Wechselwirkung schneller Neutronen. Daher kann in vielen Fällen die Strahlenwirkung auf Stoffe in Reaktoren mit thermischen Neutronen größer sein als in Reaktoren mit schnellen Neutronen. Für einige andere Zwecke können aber Reaktoren mit schnellen Neutronen von bedeutendem Interesse sein. Bis zum heutigen Tage arbeiten die meisten Forschungsreaktoren mit thermischen Neutronen, dabei ist zu bemerken, daß das Interesse an Reaktoren mit schnellen Neutronen ständig wächst.

In den weiteren Abschnitten sind in sehr gedrängter Form einige typische Forschungsreaktoren charakterisiert, die in der Sowjetunion in Betrieb genommen wurden.

Der Reaktor für physikalische und technische Untersuchungen (RFT)

Der Reaktor RFT dient als Neutronenquelle für physikalische Experimente und ermöglicht die Untersuchung neuer Brennstoffelemente zukünftiger Reaktoren.

Die Wärmeleistung des Reaktors beträgt 10 000 kW, die maximale Intensität des Flusses thermischer Neutronen in der Mitte der aktiven Zone $8 \cdot 10^{13}$ Neutr./cm² sec.

Die aktive Zone des Reaktors hat die Form eines Zylinders; Durchmesser und Höhe betragen 1 m. Sie ist aus Graphitziegeln zusammengesetzt und von einem Reflektor umgeben. Der Reflektor hat ebenfalls die Form eines Zylinders, der Durchmesser beträgt 260 cm, die Höhe 240 cm. Die aktive Zone ist von 37 Arbeitskanälen durchzogen. In den Arbeitskanälen befinden sich Brennstoffelemente, deren Uran mit Isotop U^{235} angereichert ist. Der äußere Durchmesser der Arbeitskanäle beträgt 54 mm, der Abstand zwischen ihnen 140 mm. Die Brennstoffelemente haben die Form eines Rohres; das destillierte Kühlwasser läuft zuerst durch den Kanal nach unten, umspült dabei die

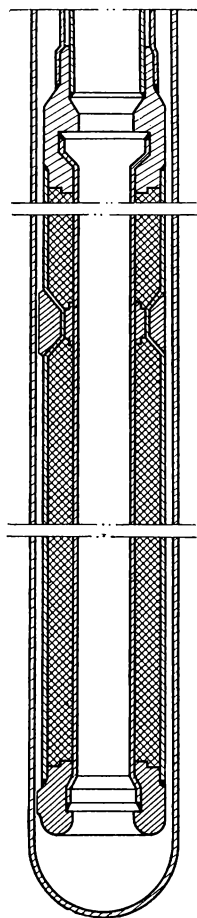


Abb. 7. Arbeitskanal des Reaktors RFT

Brennstoffelemente von außen und läuft dann durch eine innere Höhlung nach oben.

Auf Abb. 7 ist ein Arbeitskanal des Reaktors RFT dargestellt. Die aktive Zone des Reaktors und der Reflektor sind in einen Stahlmantel hermetisch eingeschlossen. Der Reaktor ist von einer 320 cm starken Betonwand umgeben, die das Bedienungspersonal vor der radioaktiven Strahlung des Reaktors schützt. Das Kühlwasser wird beim Durchgang durch die Arbeitskanäle auf 35° erhitzt und muß daher ständig mit Flußwasser in speziellen Wärmeaustauschern gekühlt werden. Die Brennstoffelemente arbeiten unter schweren Bedingungen: von ihrer Oberfläche wird ein Wärmefluß abgeführt, der bis zu $2 \cdot 10^6$ kcal pro m^2 und pro Std. beträgt. Die Arbeitskanäle werden daher ständig beaufsichtigt. Der Wasserdurchlauf und die Temperatur des Wassers werden in jedem einzelnen Kanal gemessen und geregelt.

Auch der Reflektor des Reaktors wird gekühlt. Hierfür sind in ihm spezielle Kanäle vorgesehen, durch die Wasser zirkuliert. Zur besseren Kühlung und Verhinderung der Graphitoxydation wird die Graphitmauerung des Reaktors außerdem mit Helium gefüllt. Trotz aller dieser Maßnahmen beträgt die Temperatur des Graphits bis zu 470° .

Da sich auch im Betonschutz des Reaktors Wärme entwickelt, wird auch dieser mit Wasser gekühlt.

Damit sich die radioaktiven Gase nicht in den Bedienungsräumen ansammeln, werden die Räume gut gelüftet. Über einen hohen Schornstein wird die Luft abgeführt. Das gesamte technologische Schema des Reaktors ist auf Abb. 8 dargestellt.

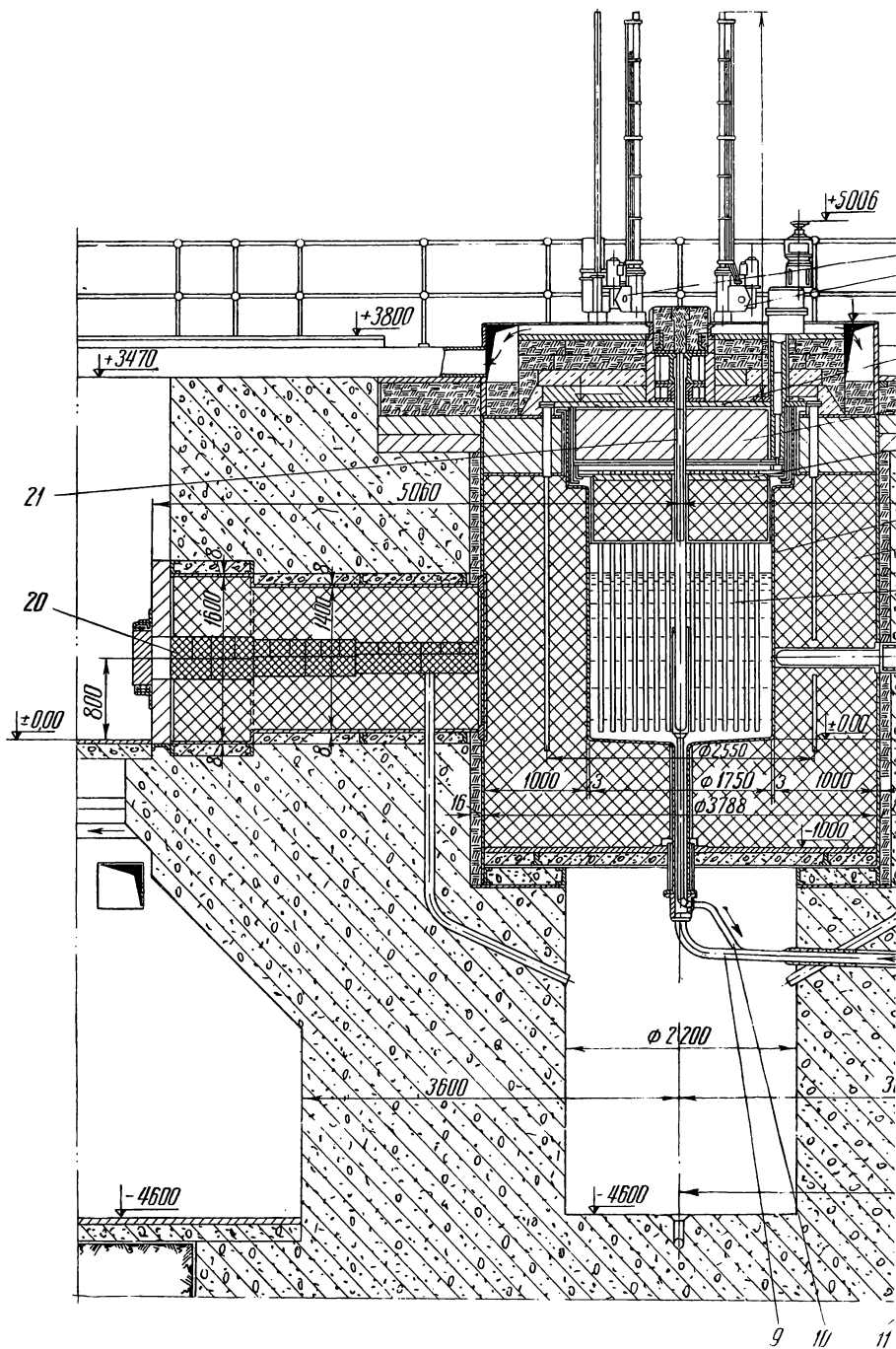
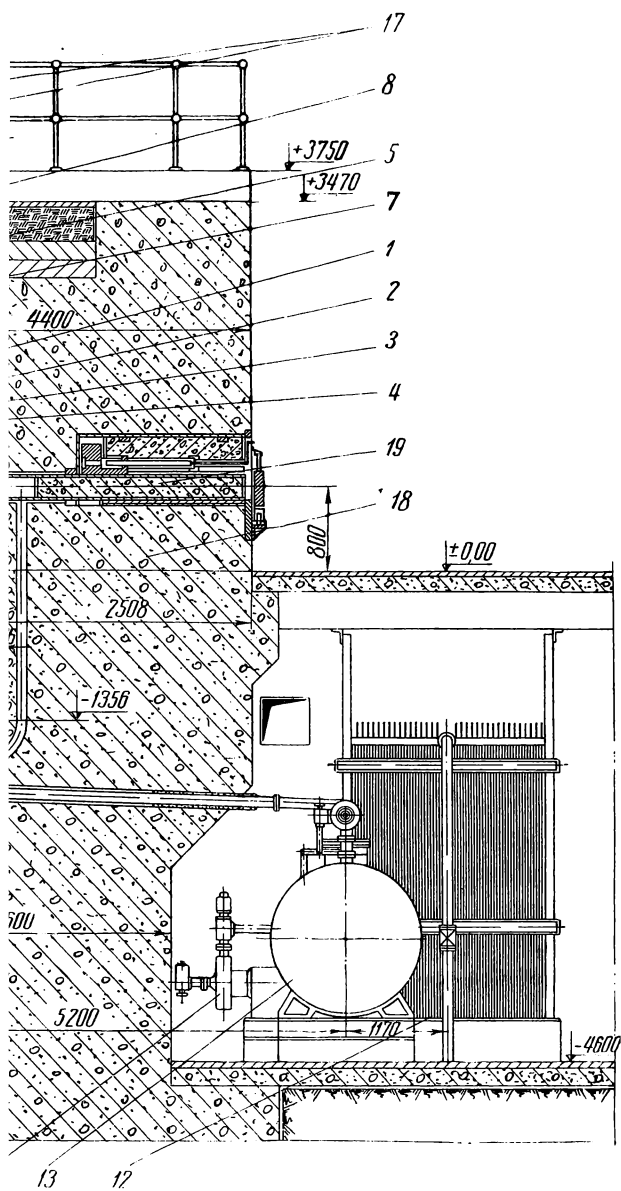


Abb. 9. Querschnitt des Reakt



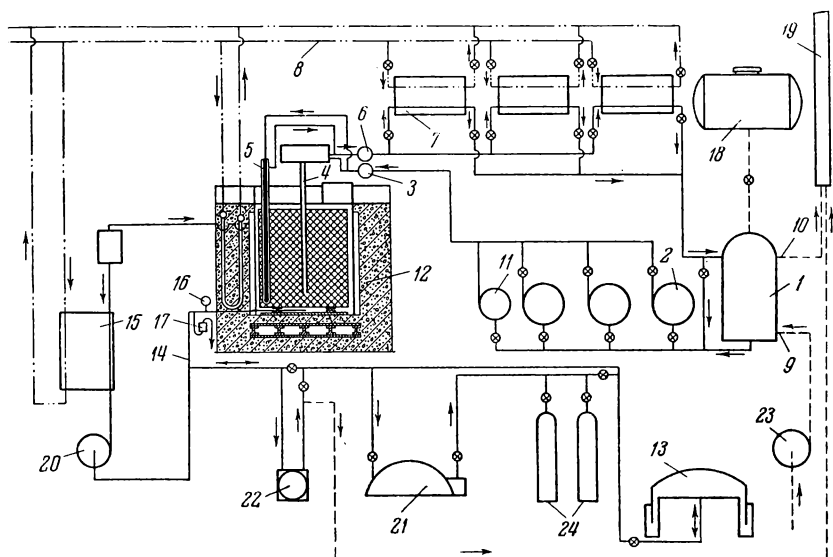


Abb. 8. Technologisches Schema des Reaktors RFT

1 – Behälter des Entgasers; 2 – Umwälzpumpen; 3 – Verteiler;
 4 – Arbeitskanal; 5 – Kühlungskanäle des Reflektors; 6 – Sammler;
 7 – Wärmeaustauscher; 8 – Rohrleitung für technisches Wasser;
 9 – Rohrleitung für Luft; 10 – Rohrleitung zum Schornstein; 11 – Reservepumpe; 12 – Reaktorblock; 13 – Gasspeicher; 14 – Rohrleitung des Heliumkreislaufes; 15 – Wärmeaustauscher des Heliumkreislaufes; 16 – Wasseranzeiger; 17 – hydraulischer Verschluss; 18 – Reservebehälter für destilliertes Wasser; 19 – Schornstein; 20 – Gasgebläse; 21 – Kompressor; 22 – Vakuumpumpe; 23 – Ventilator; 24 – Druckgasflaschen

Die Steuerung des Reaktors geschieht mit Hilfe von Absorptionsstäben, die durch spezielle Antriebe (Servomotoren) in Bewegung gesetzt werden. Die Servomotoren werden entsprechend der Veränderung des Neutronenflusses im Reaktor von Ionisationskammern gesteuert. Zwei Stäbe der automatischen Regelung befinden sich im Reflektor, drei handbediente und drei langsame automatische Stäbe aus Borkarbid sind zwischen den Arbeitskanälen in der aktiven Zone angeordnet. Zur schnellen Stilllegung des Reaktors in Havariefällen dienen zwei Sicherheitsstäbe. Mit Hilfe dieser Stäbe kann der Reaktor in 0,4 sec außer Betrieb gesetzt werden.

Zur Durchführung experimenteller Untersuchungen ist der Reaktor mit einer thermischen Kolonne (Querschnitt $1\text{ m} \times 1\text{ m}$), zwei Kanälen für Neutronenbündel aus der aktiven Zone (Durchmesser 100 mm) und einem Kanal für Neutronenbündel aus der Mitte des Seitenreflektors (Durchmesser 60 mm) ausgerüstet.

Außerdem sind autonome „Schleifen“ mit Wasser-, Metall- und Gaskühlung vorhanden.

Physikalischer Versuchsreaktor mit schwerem Wasser

In diesem Reaktor dient als Moderator schweres Wasser in einem dünnwandigen Aluminiumbehälter (Durchmesser 175 cm [1 in Abb. 9 und 10]). Ein 100-cm-Graphitreflektor 2 umgibt den Behälter von unten und von den Seiten. Die Graphitmauerung ist in einen Stahlmantel 3 hermetisch eingeschlossen. Die Uranstäbe 4 hängen an der oberen drehbaren Platte 7, über der ein Bleischutzdeckel 5 mit vier Spaltverschlüssen und ein Stahldeckel 8 mit Spaltdichtungen angeordnet sind. Die Spaltverschlüsse und die drehbare Platte ermöglichen die Aus-

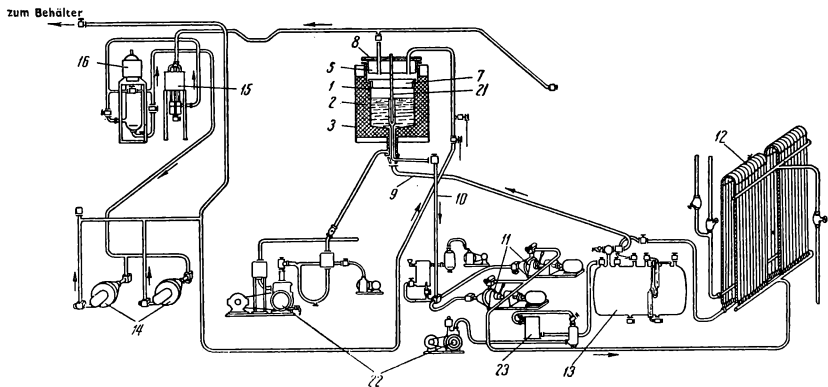


Abb. 10. Schema der Anlage zum Behälter

wechslung eines jeden Uranstabes ohne Demontage des oberen Schutzes.

Die Wärme wird von den Brennstoffelementen durch das schwere Wasser abgeführt, das auf Grund der natürlichen Konvektion im Behälter zirkuliert. Hieraus ergibt sich das Leistungsniveau des Reaktors 500 kW. Bei dieser Leistung wird in der Mitte des Reaktors ein thermischer Neutronenfluß von $2 \cdot 10^{12}$ Neutr./cm² sec erreicht. Zur Kühlung wird das schwere Wasser mit Umwälzpumpen 11 durch den Wärmeaustauscher 12 gepumpt. Es sind zwei Pumpen mit einer Leistung von je 25 m³/Std. vorgesehen. Normalerweise ist nur eine Pumpe in Betrieb. Das schwere Wasser wird durch die Druckrohrleitung 9 in den Reaktor eingeführt und durch die fallende Rohrleitung 10 aus dem Behälter abgeführt. Ist der Reaktor außer Betrieb, so wird das schwere Wasser im Reservebehälter 13 aufgespeichert.

Unter Einwirkung der Strahlen wird das schwere Wasser in Sauerstoff und schweren Wasserstoff zerlegt, und es bildet sich eine Knallgas-mischung. Dieser Prozeß ist unerwünscht, und zwar einerseits wegen der Gefahr einer Explosion und andererseits wegen des Verlustes an schwerem Wasser. Das Knallgas wird daher mit Helium verdünnt und dann durch den Kontaktapparat 16 geblasen. In diesem Apparat verwandeln sich die Komponenten des Knallgases wieder zu Wasserdampf. Nach der Kondensation dieses Dampfes im Kondensor 15 fließt das schwere Wasser zurück in die Kreislaufleitung. Der Gasumlauf wird mit Hilfe von Gasgebläsen 14 aufrechterhalten. Die Steuerung des Reaktors wird mit Hilfe von vier Kadmiumstäben ausgeführt. Diese Stäbe werden entsprechend der von Ionisationskammern angezeigten Stärke des Neutronenflusses verschieden tief in die aktive Zone eingeführt (sie sind zu diesem Zweck mit Motorantrieben ausgerüstet). Mit Hilfe spezieller Geräte, mit denen die Stäbe verbunden sind, kann die Lage eines jeden von ihnen auf dem Schaltpult mit einer Genauigkeit bis zu 1 mm festgelegt werden. Der Betonschutz 18 des Reaktors ist 2,5 m stark.

Zur Durchführung von Experimenten sind in der Schutzwand Kanäle 19 vorgesehen. Drei von ihnen reichen bis an die aktive Zone.

Durch den oberen Deckel des Reaktors führt in die Mitte der aktiven Zone ein geschlossener Aluminiumkanal 21, dessen Durchmesser 90 mm beträgt. Außerdem ist in die Seitenschutzwand eine thermische Kolonne 20 eingebaut, deren Abmessung $1,4 \text{ m} \times 1,4 \text{ m}$ beträgt.

Ein experimenteller Reaktor mit gewöhnlichem Wasser und angereichertem Uran

Die aktive Zone dieses Reaktors ist aus zylindrischen Brennstoffelementen zusammengesetzt. Die Brennstoffelemente enthalten Uran, das bis zu 10% mit Isotop U^{235} angereichert ist. Von außen sind die Brennstoffelemente (Abb. 11) mit Aluminium überzogen. Der Durch-

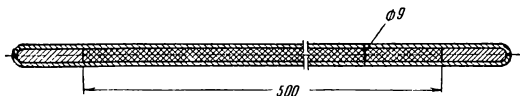


Abb. 11. Brennstoffelement

messer der Brennstoffelemente beträgt 9 mm, die Höhe des mit Uran geladenen Teiles 500 mm, der Abstand zwischen den Brennstoffelementen $\sim 18 \text{ mm}$. Zur bequemerer Auswechslung der Brennstoffelemente sind sie in Kassetten zu je 16 Stück vereint. Die Kassetten werden in einem Richtgitter befestigt. Die aktive Zone befindet sich in einem Rohr ($\phi 500 \text{ mm}$), das an den Boden eines mit Wasser gefüllten Behälters geschweißt ist. Das Wasser im Behälter dient als Reflektor. Der Reaktorschutz setzt sich aus Wasser und Gußeisen zusammen. Das Wasser im Behälter bildet eine etwa 3,5 m starke Schicht über der aktiven Zone und dient als Schutz gegenüber der Reststrahlung bei Auswechslung der Brennstoffelemente.

Das im Reaktor enthaltene Wasser wird ständig mit Hilfe von Umwälzpumpen durch den Wärmeaustauscher gepumpt und dort mit Wasser des sekundären Kreislaufes gekühlt.

Genauso wie im Schwerwasser-Reaktor bildet sich auch im Wasser dieses Reaktors das gefährliche Knallgas. Mit speziellen Apparaten

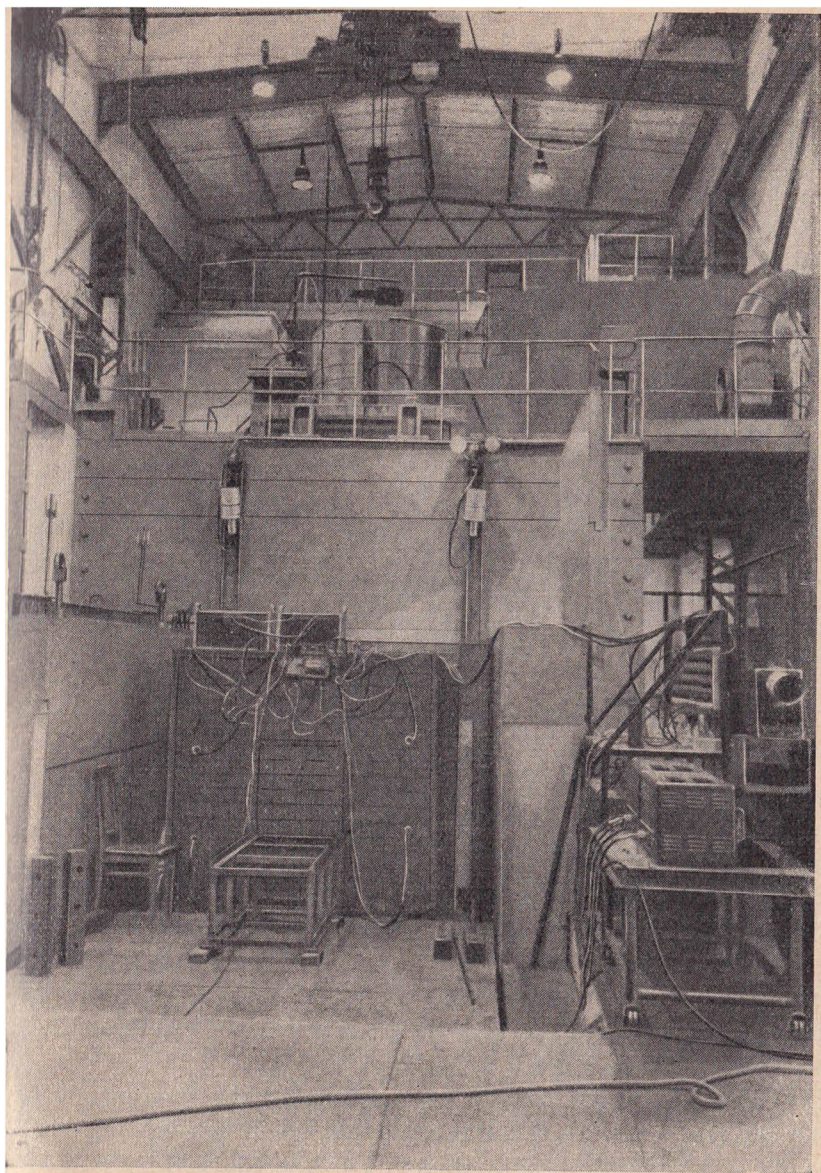


Abb. 12. Ansicht des Reaktors

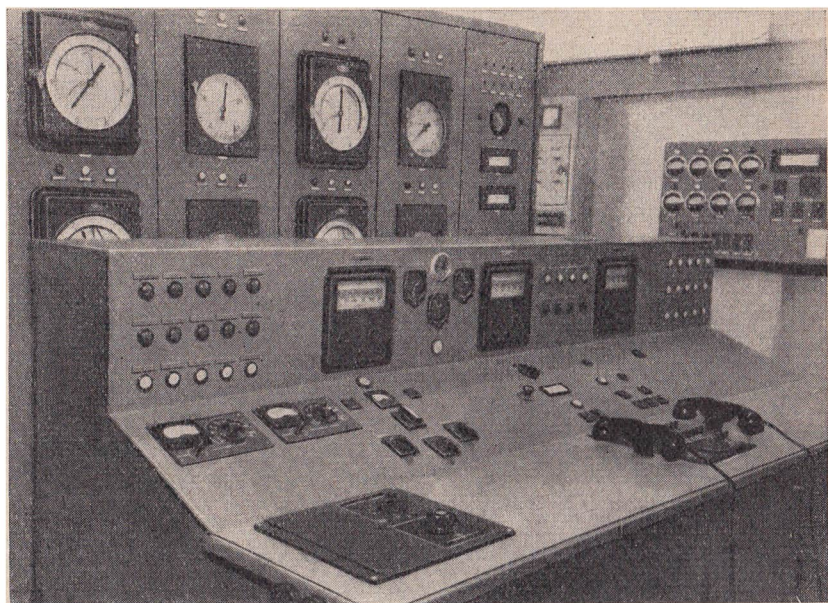


Abb. 13. Das Schalt-pult

wird das Gas aus dem Wasser entfernt und durch einen Schornstein abgeführt. Der Reaktor wird mit Hilfe von vier Absorptionsstäben geregelt. Drei weitere Stäbe dienen als Havarieschutz; mit ihnen kann die Kernreaktion im Laufe von etwa 0,5 sec abgebrochen werden.

Die Antriebsmechanismen der Regel- und Sicherheitsstäbe, die über spezielle Verstärker Steuersignale von Ionisationskammern bekommen, sind auf dem Deckel des Reaktors aufgebaut. Die experimentellen Kanäle befinden sich im Reflektor und in der Schutzwand des Reaktors.

Bei einer Leistung von 500 kW beträgt der mittlere Neutronenfluß in der aktiven Zone des Reaktors etwa $3 \cdot 10^{12}$ Neutr./cm² sec. In Abb. 12 ist die Gesamtansicht des Reaktors und in Abb. 13 das Schalt-pult dargestellt.

Atomkraftwerke

In einem Atomkraftwerk wird elektrische Energie auf Kosten der Wärme produziert, die bei der Spaltung von Atomkernen entsteht. Die wichtigste Rolle spielt in einem Atomkraftwerk der Reaktor, in dem sich der Spaltprozeß vollzieht.

Das physikalische Schema eines Energiereaktors ist dem Schema der bereits beschriebenen Forschungsreaktoren gleich. Ein Unterschied besteht lediglich in wärmetechnischen Fragen. In Forschungsreaktoren wird die in Wärme umgesetzte Spaltungsenergie nicht ausgenützt. Im Falle von Energiereaktoren dagegen ist alles einer möglichst wirtschaftlich günstigen Umwandlung der Wärmeenergie in mechanische Energie untergeordnet. Als „Brennstoff“ verwendet man in Energiereaktoren natürliches Uran, in dem nur 0,7% U^{235} enthalten ist, oder künstlich mit Isotop U^{235} angereichertes Uran.

Auch in Energieanlagen können Reaktoren sowohl mit schnellen wie auch mit langsamen Neutronen Anwendung finden. Es ist jedoch zu erwarten, daß sich die Entwicklung in erster Linie auf Reaktoren mit thermischen Neutronen konzentrieren wird, da beim Bau und Betrieb solcher Reaktoren die größten Erfahrungen gesammelt wurden.

Eine Kettenreaktion mit thermischen Neutronen kann sich nur dann entwickeln, wenn im Reaktor eine spezielle Substanz — ein sogenannter Moderator (Graphit, Beryllium, schweres oder gewöhnliches Wasser) — vorhanden ist.

Beim Zusammenstoß mit Kernen dieser Substanz verlieren die Neutronen einen Teil ihrer Energie und werden abgebremst.

Das Uran kann in Form einzelner Stäbe in den Moderator des Reaktors

eingebettet sein. Man spricht in diesem Falle von heterogenen Reaktoren. Im Gegensatz hierzu verwendet man in „homogenen“ Reaktoren eine gleichmäßige Mischung aus Uran und Moderator, die je nach den Betriebsbedingungen und dem verwendeten Moderator in Form einer Legierung, Lösung, Suspension usw. vorliegen kann.

In großen Wärmekraftwerken erzeugt man elektrische Energie mit Hilfe von Elektrogeneratoren, die durch Dampfturbinen in Bewegung gesetzt werden. Die mechanische Energie, die die Turbinen auf Kosten des verbrannten Brennstoffes erlangen, wird in den Generatoren in elektrische Energie umgesetzt.

Die sich bei der Verbrennung des Brennstoffes entwickelnde Wärme wird dahingehend ausgenützt, um hochkomprimierten Wasserdampf zu erzeugen. Der Wasserdampf wird einer Turbine zugeleitet, expandiert dort und strömt zwischen die Rotorscheufeln, wobei der Turbinenrotor und damit auch der Rotor des Elektrogenerators in Bewegung gesetzt werden.

Auch in Atomkraftwerken kann die Wärme nach diesem Schema in Elektroenergie umgesetzt werden. Die bei der Kernspaltung entstehende Wärme muß zur Erzeugung von Dampf dienen.

Bekanntlich kann ein desto größerer Anteil der Wärme des Brennstoffes in mechanische Arbeit und daher auch in elektrische Energie umgesetzt werden, je höher die Temperatur und der Druck des Dampfes sind. In modernen Energieanlagen verwendet man Dampf, dessen Druck etwa 30 bis 170 at und dessen Temperatur 400 bis 550° beträgt. Es ist vollkommen klar, daß die im Reaktor entstandene Wärme nur dann zur Erzeugung von Dampf mit hohen Betriebsparametern dienen kann, wenn die Temperatur in der aktiven Zone des Reaktors noch höher ist.

Ein kennzeichnendes Merkmal aller Energiereaktoren besteht daher darin, daß die Stoffe in der aktiven Zone einer hohen Temperatur ausgesetzt sind.

Die Wärmeabführung von dem Reaktor wird mittels einer Kühlschubstanz — dem Wärmeträger — vorgenommen. Der Wärmeträger fließt durch den Reaktor, wird dort erhitzt und gibt dann in einem speziellen

Apparat — dem Dampfgenerator — die Wärme an Wasser ab. Das Wasser verwandelt sich in Dampf, der der Turbine zugeführt wird. Als Wärmeträger können gewöhnliches oder schweres Wasser, verschiedene Gase und einige flüssige Metalle und Legierungen (Wismut, Blei, Natrium, Natrium-Kalium-Legierung) dienen.

Jeder Wärmeträger hat gewisse Vor- und Nachteile. Wasser ist der billigste und zugänglichste Wärmeträger. Bei normalem Luftdruck kann das Wasser aber nicht über 100° erhitzt werden; eine weitere Erhöhung der Temperatur kann nur bei Steigerung des Druckes erfolgen.

Bei einer Temperatur im Reaktor von etwa 250 bis 350° muß in ihm bereits ein Druck von 100 bis 200 at herrschen.

Ein Reaktor mit Wasserkühlung ist somit notwendigerweise eine Hochdruckanlage.

Durch Anwendung flüssiger Metalle und Legierungen können beimäßigem Druck im Reaktor Temperaturen erreicht werden, die zur Erzeugung von Dampf mit einer Temperatur von 400 bis 500° notwendig sind. Gleichzeitig aber besteht ein Nachteil der Metallkühlung darin, daß der Reaktor mit Wärmeapparaten (elektrischen oder anderen) ausgerüstet werden muß, um nach Stilllegung des Reaktors das Erstarren des Metalls in den Rohrleitungen zu verhindern.

Der Betrieb eines Reaktors ist bei Metallkühlung zweifellos komplizierter als bei Wasserkühlung.

Bei der Verwendung von Gasen (z. B. Helium oder CO_2) sind die Beschränkungen hinsichtlich der Dampftemperatur aufgehoben, und auch die Schwierigkeiten, die den Betrieb eines Reaktors mit Metallkühlung kennzeichnen, fallen hier weg, dafür aber treten andere Nachteile in Erscheinung. Bei gleichen Temperaturbedingungen im Reaktor ist der Energieaufwand zum Durchpumpen des Gases durch den Reaktor bedeutend größer als für einen beliebigen anderen Wärmeträger. Um eine bessere Kühlung und größere Wirtschaftlichkeit des Reaktorbetriebes bei Anwendung von Gasen zu erreichen, ist man gezwungen, den Gasdruck zu erhöhen. Ein weiterer Nachteil der Gaskühlung besteht darin, daß die technischen Anlagen, die für dieses Kühlsystem benötigt werden, sehr umfangreich sind.

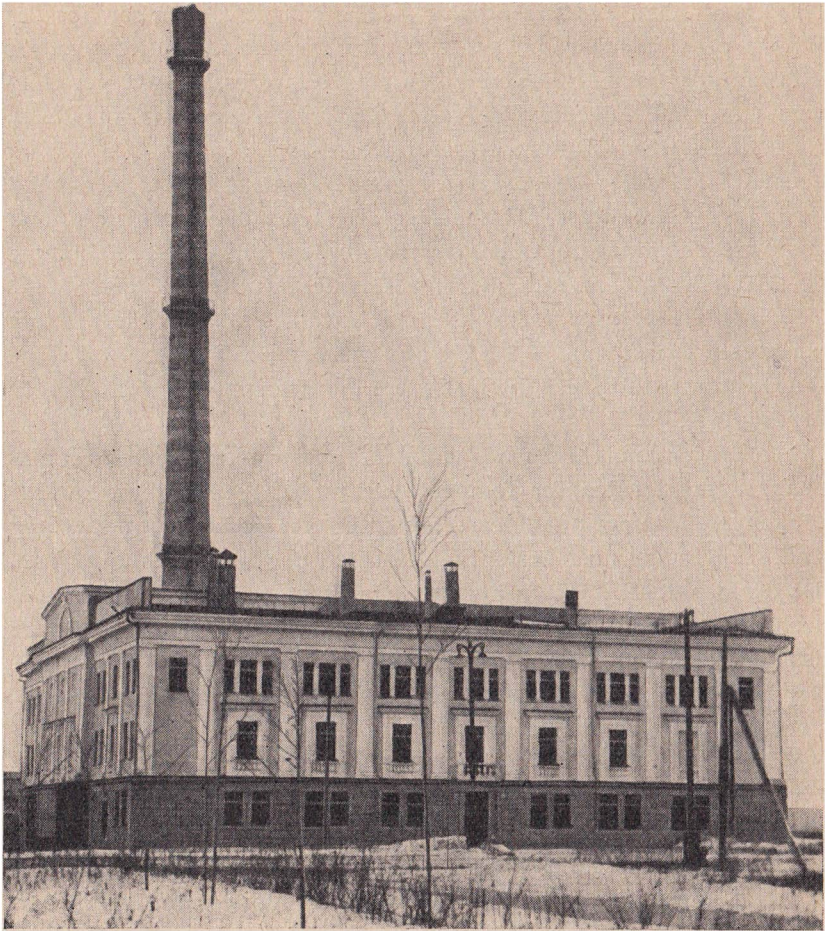


Abb. 14. Das Atomkraftwerk der Akademie der Wissenschaften der UdSSR
Die Wahl des Wärmeträgers für einen Energiereaktor muß auf Grund wirtschaftlicher Überlegungen entsprechend den konkreten Betriebsbedingungen im Atomkraftwerk getroffen werden.
Das Atomkraftwerk der Akademie der Wissenschaften der UdSSR (Abb. 14) wurde am 27. Juni 1954 in Betrieb genommen.

Es handelt sich hier um einen heterogenen Reaktor mit thermischen Neutronen, in dem Graphit als Moderator dient und gewöhnliches Wasser unter hohem Druck zur Kühlung benutzt wird. Das spaltbare Material — eine spezielle Legierung des mit Isotop²³⁵ angereicherten Urans — ist in Form einzelner Blöcke in den Graphitmoderator eingebettet. Jeder Block stellt einen hohlen Zylinder dar, der ein Stahlrohr umfaßt; durch das Stahlrohr fließt Kühlwasser. Auch von außen ist jeder Block mit einer Stahlhülle versehen. Einzelne Uranblöcke bilden zusammen mit ihren Kühlungssystemen Arbeitskanäle, die die Graphitmauerung des Moderators durchziehen. Insgesamt sind in der Mauerung 128 vertikale Kanäle vorhanden. Sie sind so angeordnet, daß sich eine zylindrische aktive Zone ausbildet, deren Durchmesser und Höhe entsprechend 150 und 170 cm betragen. Eine Vorstellung von der Anordnung der Kanäle vermittelt Abb. 15, in der der obere Teil des Reaktors bei abgehobenem Deckel dargestellt ist. Der Reaktor ist in

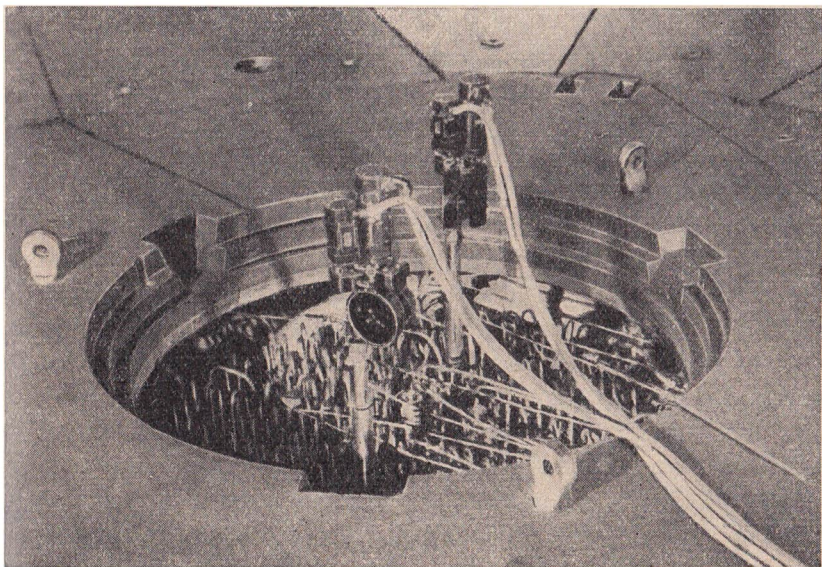


Abb. 15. Der obere Teil des Reaktors ohne Deckel

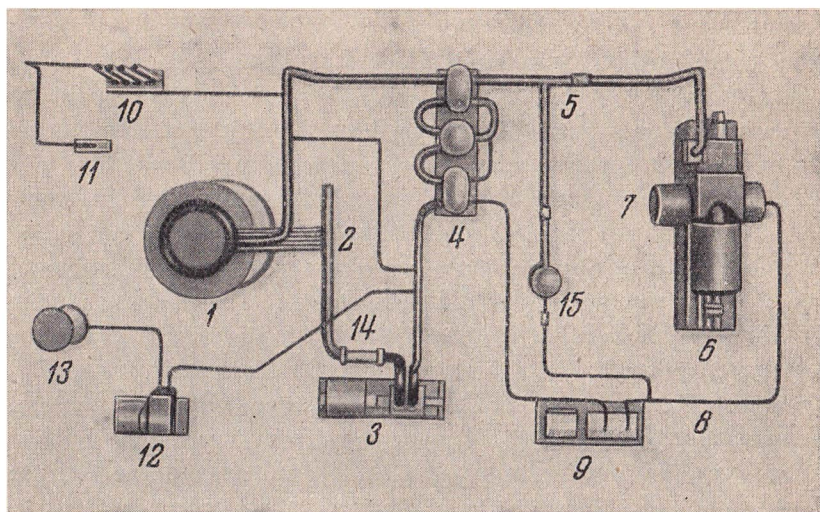


Abb. 16. Arbeitsschema des Atomkraftwerkes
 1 – Reaktor; 2 – Rohrleitung für den Wärmeträger; 3 – Pumpe;
 4 – Dampfgenerator; 5 – Dampfleitung; 6 – Dampfturbine 7 – Kon-
 densator; 8 – Rohrleitung für das Kondensat; 9 – Speisepumpe;
 10 – Volumenkompensatoren; 11 – Druckgasflaschen; 12 – Speise-
 pumpen zur Auffüllung der Wasserverluste; 13 – Reservebehälter
 mit Wasser; 14 – Filter

einen zylindrischen Stahlmantel hermetisch eingeschlossen und ruht auf einem Betonunterbau.

Der Moderatorgraphit wird während des Betriebes auf hohe Temperaturen erhitzt; damit er nicht ausbrennt, werden alle Ritzen in der Graphitmauerung mit Helium oder Stickstoff ausgefüllt. Wie jeder Reaktor, so ist auch dieser von starken Betonwänden und Wasserschichten umgeben, die das Bedienungspersonal vor der gesundheitsschädlichen Strahlung schützen. Von oben dienen diesem Zweck Gußeisenplatten.

Das Schema des Atomkraftwerkes ist auf Abb. 16 dargestellt. Der Druck und die Temperatur des Kühlwassers, das in den Reaktor geleitet und auf die einzelnen Arbeitskanäle verteilt wird, beträgt entsprechend 100 at und 190°. Die in der aktiven Zone stattfindenden Spaltungsprozesse führen zu einer Erhitzung des Wassers in den Ar-

beitskanälen, so daß es den Reaktor bei einer Temperatur von 260 bis 270° verläßt. Die aus dem Reaktor abgeführte Wärme wird in Dampfgeneratoren dem Wasser des Dampfturbinen-Kreislaufes übertragen. Die Wärme wird zur Erzeugung von Dampf benutzt; dieser aber setzt den Turbogenerator in Bewegung.

Der Druck des Dampfes vor der Turbine beträgt 12,5 at, seine Temperatur 255 bis 260°.

Nach dem Austritt aus den Dampfgeneratoren wird das Wasser wieder in den Reaktor geleitet. Der Wassenumlauf wird mit Pumpen bewältigt, die zwischen den Dampfgeneratoren und dem Reaktor aufgestellt sind. Das Kreislaufsystem des Wärmeträgers ist mit einer Reihe Hilfseinrichtungen versehen. So sind diesem System z. B. spezielle Volumenkompensatoren angeschlossen. Der obere Teil eines solchen Kompensators stellt ein Luftkissen dar, das mit Druckgasbehälter in Verbindung steht. Mit Hilfe dieser Kompensatoren werden nötigenfalls (bei Veränderung der Wassertemperatur oder im Falle eines Lecks) Veränderungen des Wasservolumens im Kreislaufsystem ausgeglichen. Ein System von Speisepumpen dient zur Auffüllung der Wasserverluste im Wärmeträger-Kreislauf.

Die Wärmeleistung des Atomkraftwerk-Reaktors (d. h. die pro sec im Reaktor entstehende Wärmeenergie) beträgt 30 000 kW. Die elektrische Leistung des Kraftwerkes beläuft sich aber auf 5000 kW. Es ergibt sich somit ein Wirkungsgrad von etwa 17⁰/. Eine Verbesserung dieses Wertes kann durch Erhöhung der Dampfparameter (der Temperatur und des Druckes des Dampfes) erreicht werden.

Der Reaktor und der Turbogenerator des Kraftwerkes werden von einem gemeinsamen Schaltpult aus gesteuert. Hier befinden sich die wichtigsten Geräte, die notwendig sind, um den Betrieb des Werkes zu überwachen.

Das Atomkraftwerk der Akademie der Wissenschaften der UdSSR arbeitet ohne Betriebsstörungen; mit ihm konnten bedeutende Betriebserfahrungen gesammelt werden, die für die Entwicklung und den Bau neuer leistungsfähiger Kraftwerke außerordentlich wichtig sind.

In einigen Entwürfen leistungsfähiger Atomkraftwerke ist die Anwendung heterogener Reaktoren mit thermischen Neutronen und gewöhnlichem Wasser vorgesehen, wobei das Wasser gleichzeitig als Moderator und Wärmeträger dienen soll. Hierdurch kann der Aufbau der aktiven Zone des Reaktors wesentlich vereinfacht werden.

Uranstäbe, die mit Schutzhüllen überzogen sind, werden von einem durch die aktive Zone geschleusten Wasserstrom umspült. Da sich das Wasser unter hohem Druck befindet (100 bis 150 at), muß die gesamte aktive Zone in einen dickwandigen Behälter eingeschlossen werden, der diesen Druck aufnimmt. Der Behälter hat einen Durchmesser von über 3 m und eine Höhe von etwa 10 m.

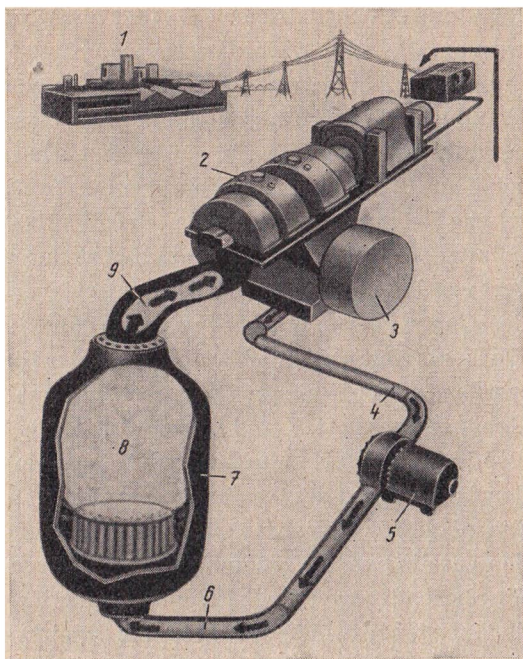
Die Uranstäbe sind in Gruppen — Kassetten — zusammengefaßt. Sie werden kassettenweise durch den oberen Behälterdeckel ein- bzw. ausgeladen. Die im Reaktor nebeneinander angeordneten Kassetten bilden die aktive Zone; ihre Höhe ergibt sich aus der Länge der Kassetten.

Das allgemeine Betriebsschema des Kraftwerkes entspricht der Abb. 16. Das den Reaktor verlassende Kühlwasser hat eine Temperatur von 270 bis 280°. Es wird in Dampfgeneratoren geleitet, wo Dampf mit einem Druck von 30 bis 40 at erzeugt wird. Der Dampf setzt die Turbine in Bewegung. Die elektrische Leistung eines Kraftwerkes mit nur einem Reaktor des beschriebenen Typs kann etwa 150 000 bis 200 000 kW betragen. Der Wirkungsgrad — ca. 27 bis 28% — entspricht den gewöhnlichen Werten, die in Kraftwerken mit mittlerem Dampfdruck (30 bis 40 at) erreicht werden.

Eine Weiterentwicklung der Energiereaktoren vom Wasser-Wasser-Typ (in denen Wasser gleichzeitig als Moderator und Wärmeträger dient) ist der Siedewasser-Reaktor. Im Unterschied zu dem bereits beschriebenen Reaktor wird hier das Wasser in der aktiven Zone zum Kochen gebracht und die im Reaktor entstandene Wärme durch den Dampf abgeführt. Der Wasserdurchlauf durch den Reaktor ist in diesem Falle wesentlich geringer, und man braucht nur Pumpen mit geringer Leistung. Auch der Druck im Reaktor kann reduziert werden.

Abb. 17. Arbeitsschema eines Atomkraftwerkes mit Siedewasser-Reaktor

1 — Energieverbraucher; 2 — Turbogenerator; 3 — Kondensator; 4 — Wasserrückfluß in den Reaktor; 5 — Pumpe; 6 — Wasser; 7 — Reaktor; 8 — Dampf; 9 — Dampf



Der Dampf wird direkt in die Turbinen geleitet, so daß sich die Aufstellung von Dampfgeneratoren vollständig erübrigt. Der Aufbau eines solchen Werkes vereinfacht sich somit wesentlich (Abb. 17).

Durch das Kochen in der aktiven Zone wird der Reaktor im Grunde genommen in einen Dampfkessel verwandelt, und ein Atomkraftwerk wird dadurch einem gewöhnlichen Wärmekraftwerk noch ähnlicher. Die Möglichkeit einer direkten Übertragung des Dampfes aus dem Reaktor auf die Turbine muß aber noch unter Betriebsverhältnissen überprüft werden. Es handelt sich hier darum, daß das Wasser in der aktiven Zone des Reaktors zur Quelle gesundheitsschädlicher radioaktiver Strahlen wird. Da die Turbinen also mit radioaktivem Dampf betrieben werden, können bei ihrer Bedienung oder bei der Ausführung notwendiger Instandsetzungsarbeiten Schwierigkeiten auftreten. In England baut man gegenwärtig ein Atomkraftwerk, für dessen

Reaktor als Wärmeträger CO_2 und als Moderator Graphit verwendet werden. Die zylindrische Graphitmauerung ($\phi \sim 11 \text{ m}$) ist von Kanälen durchzogen, in denen die Uranstäbe angeordnet werden; durch die Kanäle wird das Kühlgas geleitet. Der Gasdruck beträgt ca. 7 at. Die gesamte aktive Zone ist in ein hermetisches Stahlgehäuse (Durchmesser über 12 m) eingeschlossen, das diesen Druck aufnimmt. Die elektrische Leistung des Kraftwerkes soll 50 000 kW betragen. Durch Erhöhung des Gasdruckes im Reaktor (wodurch der Gasdurchfluß gesteigert werden könnte, ohne daß der Energieverbrauch zum Durchpumpen des Gases übermäßig erhöht wird) kann eine größere Leistung des Werkes erzielt werden. Dabei müßten aber die Gehäusewände verstärkt werden, was bei einem Durchmesser von 12 m die Anfertigung des Gehäuses wesentlich erschweren würde. Die Wahl des Gasdruckes muß also in enger Verbindung mit den technologischen Möglichkeiten bei der Anfertigung des Gehäuses getroffen werden.

Die möglichen Varianten verschiedenartiger Atomkraftwerke sind mit den bereits beschriebenen Typen nicht erschöpft.

Eine besonders wertvolle Eigenschaft der Kernreaktoren besteht darin, daß meistens die Möglichkeit besteht, gleichzeitig mit der Spaltung von Kernen spaltbarer Stoffe neue spaltbare Stoffe zu erzeugen, und zwar durch Bestrahlung einiger Substanzen im Reaktor, die vor der Bestrahlung nicht spaltbar waren. Zu solchen Substanzen zählt z. B. das in der Natur am weitesten verbreitete Uranisotop (es hat das Atomgewicht 238 und ist zu 99,3% im natürlichen Uran vertreten). Die Bestrahlung dieses Uranisotops mit Neutronen führt zur Bildung des neuen spaltbaren Stoffes Plutonium.

Die Reproduktion spaltbarer Stoffe kann in einigen Reaktoren so groß sein, daß die durch den Spaltprozeß bedingte Abnahme dieser Stoffe vollständig gedeckt wird. Hieraus ist zu erkennen, daß in der Weiterentwicklung der Atomenergetik Möglichkeiten zur gewaltigen Erweiterung der Energievorräte gegeben sind.

Anwendung der Strahlenchemie in der chemischen Industrie

Die Verwirklichung von Kettenreaktionen bei der Uranspaltung in Kernreaktoren, die Schaffung mächtiger Röntgengeräte, Elektronen-„Kanonen“ und Elementarteilchen-Beschleunigern führten zur Entstehung und stürmischen Entwicklung eines neuen Zweiges der Chemie — der Strahlenchemie.

In der Strahlenchemie wird die Wirkung energiereicher Strahlungen auf Substanzen untersucht. Vor ihr stehen Probleme der Ausnutzung der Atomenergie für die industrielle Chemie und der Schutz von Substanzen vor der schädlichen Strahlenwirkung.

Die Strahlenchemie ist noch eine sehr junge Wissenschaft. Zwar wurden die ersten Untersuchungen bereits am Anfang unseres Jahrhunderts durchgeführt, der Beginn ihrer praktischen Anwendung liegt aber erst etwa 10 Jahre zurück. Trotz dieser kurzen Zeit haben die Wissenschaftler bereits bedeutende Ergebnisse aufzuweisen.

Wenn in den ersten Entwicklungsjahren nur Laboruntersuchungen durchgeführt wurden, so verfügen wir jetzt über die ersten Ergebnisse der Anwendung von Strahlen in der Industrie.

Als Strahlungsquellen werden Kernreaktoren, Röntgen- und γ -Apparate, die energiereiche Strahlung liefern, und radioaktive Isotope, besonders radioaktives Kobalt (Abb. 18 und 19) verwendet.

Gegenstand der Untersuchung sind anorganische Systeme, hauptsächlich wäßrige Lösungen, und eine große Anzahl organischer Substanzen.

Die Verwendung von Wasser als Neutronenmoderator und Kühlmittel für Reaktoren führte zur Notwendigkeit einer speziellen Untersuchung der Prozesse, die bei der Bestrahlung von Wasser auftreten.

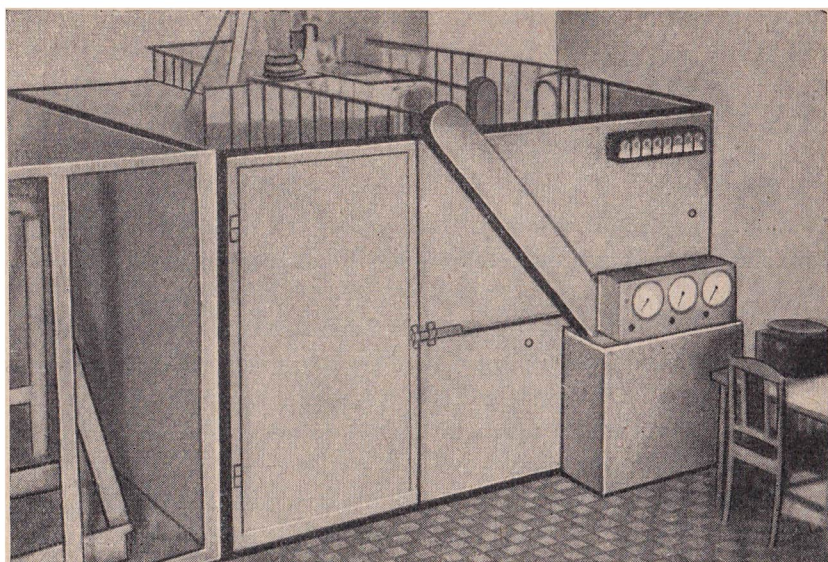


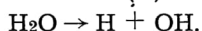
Abb. 18. Anlage für strahlenchemische Untersuchungen mit radioaktivem Kobalt. Schalt-pult

Es wurde festgestellt, daß die Bestrahlung von reinem Wasser, das keinerlei gelöste Stoffe enthält, mit Röntgen- oder γ -Strahlen keine merklichen Veränderungen hervorruft. Sind dagegen im Wasser irgendwelche Stoffe gelöst oder ist es mit Luft gesättigt, so beobachtet man eine Radiolyse des Wassers, d. h. den Zerfall der Wassermoleküle durch Einwirkung der Strahlung. Im Ergebnis bildet sich Wasserstoff-Peroxyd und Knallgas (Mischung aus Wasserstoff und Sauerstoff), dessen Vorhandensein im Reaktor sehr unerwünscht ist.

Die Untersuchungen, die von Allen, Weiss, Dolin, Erschler u. a. durchgeführt wurden, ermöglichten es, eine Theorie der Radiolyse von Wasser und Wasserlösungen zu entwickeln und Wege anzudeuten, die zu einer geringeren Bildung dieser unerwünschten Produkte der Radiolyse führen.

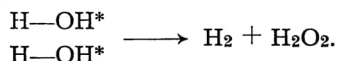
Man weiß gegenwärtig, daß bei der Bestrahlung von Wasser die Mole-

küle ionisiert und angeregt werden. Im Ergebnis zerfallen die Moleküle in freie Radikale: Wasserstoffatome (H) und Hydroxyl-Radikale (OH)



Bei der Rekombination der freien Radikale H und OH bilden sich entsprechend Wasserstoff (H_2) und Wasserstoff-Peroxyd (H_2O_2).

Einige Wissenschaftler sind der Meinung, daß sich diese Produkte auch beim Zerfall zweier angeregter Wassermoleküle bilden können:



In Wasser gelöste Stoffe können oxydativ oder reduktiv verändert werden. Sie unterliegen der entsprechenden Reaktion nur bei Wechselwirkung mit den Produkten der Radiolyse (H, OH, H_2O_2) und nicht durch direkte Einwirkung der Strahlung.

So wird z. B. bei der Bestrahlung von aufgelöstem Eisen-II-Sulfat

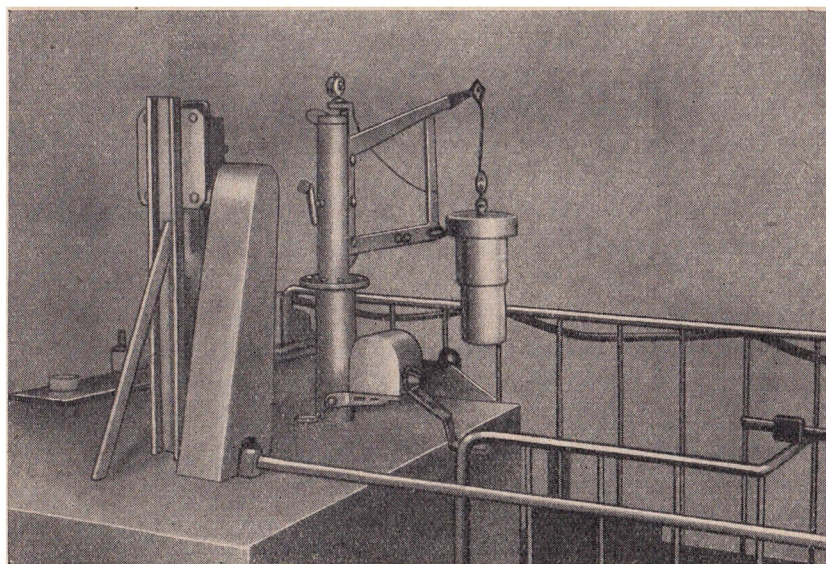
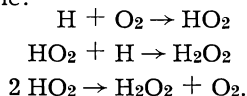


Abb. 19. Anlage für strahlenchemische Untersuchungen mit radioaktivem Kobalt. Schutzbehälter für radioaktives Kobalt

FeSO₄ in Wasser die Verbindung zu Eisen-III-Sulfat Fe₂(SO₄)₃ oxydiert. Diese Reaktion hat für die Strahlenchemie eine große Bedeutung. Sie wird vielfach in der Dosimetrie verwendet, um die Energiemengen zu bestimmen, die von einem bestrahlten Objekt absorbiert werden. Zu diesem Zweck benutzt man auch die Reduktionswirkung der Cerionen ($\text{Ce}^{4+} \xrightarrow{\text{Bestrahlung}} \text{Ce}^{3+}$) und andere Reaktionen.

Sättigt man das zu bestrahlende Wasser mit Sauerstoff, so bilden sich bedeutend größere Mengen von Wasserstoff-Peroxyd. In diesem Fall entsteht das Wasserstoff-Peroxyd nicht nur auf Kosten der Radiolyse des Wassers, sondern auch im Ergebnis der Reduktion von Sauerstoff durch Wasserstoffatome:



Diese Reaktionen sind die einfachsten Beispiele für die Synthese von Substanzen unter Einwirkung energiereicher Strahlung.

Ein anderes Beispiel ist die Synthese von Formaldehyd und Ameisensäure, wenn eine mit Kohlendioxyd gesättigte Wasserlösung der Einwirkung von Strahlung ausgesetzt wird. In der Industrie haben ähnliche Reaktionen Anwendung gefunden, wie z. B. die Oxydation von Benzol zu Phenol in wäßriger Lösung u. a. m.

Es muß jedoch bemerkt werden, daß alle diese Reaktionen nur eine geringe Ausbeute an Substanz pro Einheit der absorbierten Energie aufweisen und daß ihre Anwendung im industriellen Ausmaße bis jetzt noch unrentabel ist. Die Aufgabe der Wissenschaftler besteht darin, den Wirkungsgrad dieser und einer Reihe anderer ähnlicher Prozesse zu erhöhen. Dies kann geschehen entweder durch Erhöhung der prozentualen Ausnützung der einfallenden Strahlung oder durch Unterdrückung der rückläufigen Reaktionen, d. h. der Reaktion der Primärprodukte der Radiolyse mit sich selbst, die zur Bildung der Ausgangssubstanzen führt.

Wenden wir uns unserem ersten Beispiel zu, der Bildung von Wasserstoff-Peroxyd, einem wichtigen Produkt der chemischen Industrie, das zum Bleichen von Stoffen, Holz- und Papiermassen, in der Medizin

usw. verwendet wird. Untersuchungen des sowjetischen Wissenschaftlers Weselowsky und seiner Mitarbeiter zeigten, daß der Halbleiter Zinkoxyd (ZnO) Strahlungsenergie sehr wirksam in Energie der Elektronen umsetzt, die den chemischen Prozeß anregen können. In Anwesenheit von ZnO erhöht sich die Ausbeute an Wasserstoff-Peroxyd bei der Radiolyse von Alkalilösungen im Vergleich zur Lösung ohne Sensibilisator (ZnO) um das 3- bis 5fache.

Am Anfang der Bestrahlung ist die Ausbeute an H_2O_2 von der Menge der absorbierten Energie unabhängig. Bei Erreichung einer bestimmten Dosis macht sich aber eine Senkung der Ausbeute bemerkbar, deren Ursache in der Zerlegung des Wasserstoff-Peroxydes zugunsten der rückläufigen Reaktionen liegt.

Bestrahlt man eine gesättigte Bariumhydroxydlösung $\text{Ba}(\text{OH})_2$, so bildet das Wasserstoff-Peroxyd, das bei der Radiolyse des Wassers entsteht, mit dem Bariumhydroxyd unlösliches Bariumperoxyd, welches ausfällt. In diesem Falle bildet sich H_2O_2 mit konstanter Ausbeute, die nicht mit Erhöhung der Dosis abnimmt.

Proskurin und Barelko erhielten bei Anwesenheit von Eisenionen eine Verbesserung der Ausbeute bei der Oxydation von Benzol zu Phenol durch die Produkte der Radiolyse von Wasser. Die Ausbeute an Phenol erhöht sich in diesem Falle um ein Mehrfaches.

Die Beispiele zeigen, daß man im industriellen Umfang wichtige chemische Produkte unter Anwendung energiereicher Strahlung erhalten kann, wenn es gelingt, günstige Bedingungen für die Durchführung dieser Prozesse zu finden.

Die Untersuchungen sowjetischer und ausländischer Wissenschaftler haben erwiesen, daß auch der für die chemische Industrie sehr wichtige Prozeß der Oxydierung des Luft-Stickstoffes realisiert werden kann, wenn eine große Anzahl mächtiger Strahlungsquellen zur Verfügung steht.

Die Lösung dieses Problems wird bedeutsam für die Zweige der Volkswirtschaft, die Stickstoffverbindungen benutzen, also für die Landwirtschaft, für die Kunstfaserindustrie, für die Strahlgetriebetechnik usw.

Mit der Untersuchung der Wirkung von Strahlung auf wäßrige Lösun-

gen ist eng das Problem der Umwandlung von Atomenergie in elektrische Energie verknüpft. Die ersten Ergebnisse, die von unseren Wissenschaftlern auf der Internationalen Konferenz zur friedlichen Verwendung der Atomenergie in Genf vorgetragen wurden, zeigten, daß eine Umwandlungsmethode in der Ausnutzung von elektrochemischen Systemen bestehen kann. Eine rationelle Auswahl des Elektrolyten und der Elektroden wird es ermöglichen, unter Nutzung der Oxydations- und Reduktionskomponenten der Radiolyse eine konstante Potentialdifferenz von etwa 1 V zu schaffen. Die Stromstärke in solchen Systemen wird von der Konzentration und Diffusion der entstehenden Oxydations- und Reduktionsprodukte abhängen. Der gesamte maximale Wirkungsgrad in bezug auf die absorbierte Strahlungsenergie wird in einem solchen Element durch den Radiolyse-Effekt begrenzt sein. Die Aufgabe besteht darin, die wirksamsten Elektrodenpaare und Lösungen zu finden, die unter der Einwirkung von Strahlung genügend beständige und konzentrierte elektrochemisch-aktive Komponenten liefern.

Eine große praktische Bedeutung hat die Untersuchung der Wirkung energiereicher Strahlung auf organische Substanzen. Die Prüfung der strahlenchemischen Beständigkeit organischer Substanzen ist wichtig für die Lösung einer Reihe von Problemen, die mit technologischen Prozessen unter Strahleneinwirkung zusammenhängen und mit der Strahlenbiologie — einer Wissenschaft, die die Wirkung von Strahlungen auf Pflanzen und Lebewesen untersucht — verknüpft sind.

Bei der Uranspaltung in Kernreaktoren bildet sich eine große Anzahl von Spaltprodukten, d. h. von Isotopen verschiedener chemischer Elemente. Diese Spaltprodukte erschweren das Zustandekommen der nuklearen Kettenreaktion. Zur Schaffung normaler Betriebsverhältnisse für den Reaktor ist es daher notwendig, von Zeit zu Zeit die Spaltprodukte vom Uran zu trennen. Die meisten dieser Isotope können als Strahlungsquellen und als „markierte“ Atome verwendet werden. Gewöhnlich wird die Trennung durch Extraktion der Isotope mit organischen Lösungsmitteln vorgenommen. Es ist wichtig, daß die Produkte der Radiolyse des Lösungsmittels keine Komplexverbindungen mit den zu

extrahierenden Substanzen eingehen, da sonst das gewünschte Element in bedeutendem Maße verlorengehen kann oder nicht in reiner Form zu gewinnen ist. Dieses Problem wird mit Hilfe der Strahlenchemie gelöst.

Die Untersuchung der Wirkung von Strahlungen auf organische Verbindungen eröffnet große Möglichkeiten für die Herstellung wichtiger Produkte der chemischen Industrie. Bereits jetzt kann man von Vorteilen sprechen, die die Strahlenchemie in Vergleich zu den gegenwärtig üblichen Methoden bei der Einleitung einer Reihe von Kettenreaktionen bietet, wie z. B. bei der Halogenierung, der Oxydation, des Krackprozesses, der Polymerisation u. a. So kann die Halogenierung (vorzugsweise die Chlorierung) organischer Substanzen aus der Reihe aromatischer Verbindungen, wie Benzol, Toluol, Xylol u. a., recht leicht durch Bestrahlung der Mischung dieser Aromaten mit Chlor erreicht werden. Die Chlorierung auf anderen Wegen ist sonst ein sehr mühsamer Prozeß.

An Hand von Laboratoriumsuntersuchungen konnte ein kontinuierliches Verfahren für die zukünftige Anwendung in der Industrie ausgearbeitet werden. Besondere Aufmerksamkeit wird der Chlorierung von Benzol geschenkt, da diese Reaktion ständig im industriellen Umfange zur Gewinnung von Hexa-Chlor-Cyclohexan durchgeführt wird. Hexa-Chlor-Cyclohexan wird mit Erfolg im Kampf gegen Schimmelpilze, Insekten und andere Schädlinge der Landwirtschaft angewendet.

In einer anderen Gruppe chemischer Reaktionen — den Oxydationsprozessen — findet die Strahlung ebenfalls Anwendung. Die moderne chemische Theorie vieler Oxydationsreaktionen setzt voraus, daß eine Kettenreaktion mit freien Radikalen in Anwesenheit von Sauerstoff stattfindet.

Es ist möglich, daß man mit Hilfe von Strahlung den gegenwärtig nur schwer in die Wege zu leitenden Oxydationsprozeß leicht anregen und genau kontrollieren kann. Die Oxydationsreaktionen sind in der Industrie so weit verbreitet, daß die Erforschung der Möglichkeiten der Verwendung von Strahlung für diesen Zweck zu bedeutenden Erfolgen auf diesem Gebiet führen kann.

Bach, Schapiro, Berton und andere Wissenschaftler führten Untersuchungen durch, die der Erforschung der strahlenchemischen Beständigkeit von Verbindungen in Abhängigkeit von ihrer Struktur, der Oxydation organischer Substanzen unter Einwirkung von Strahlung und anderen Problemen gewidmet sind. Sie beschritten neue Wege auf der Suche nach strahlenchemisch beständigen Verbindungen und Lösungsmitteln, die bei der Realisierung von wirksamen Oxydationsprozessen unter Strahleneinwirkung Verwendung finden können. Die Produktion von Benzin aus Erdöl im Krackprozeß ist mit der Anwendung komplizierter Apparate, hoher Temperaturen u. a. verbunden. Vor kurzem wurde die Spaltung des Erdöls in Benzin durch Bestrahlung von Erdöl mit γ -Strahlen des radioaktiven Kobalts bei gewöhnlicher Temperatur verwirklicht. Wenn man Erdöl im Reaktor bestrahlt, so ist die Ausbeute an Benzin größer als bei der Verarbeitung derselben Erdölmenge im Krackprozeß.

Die Bildung von Schwefel — einem Nebenprodukt, das die Filter der Erdölanlagen verstopft — wird außerdem dabei verhindert.

Es ist zu erwarten, daß diese aussichtsreiche Methode der Benzinherstellung bald in industriellem Umfange Anwendung finden wird.

Die Gewinnung von Kunststoffen ist ein sich stürmisch entwickelnder Zweig der chemischen Industrie. Kunststoffe haben große Bedeutung für die Volkswirtschaft. Erzeugnisse aus Kunststoffen können säurebeständig wie Blei, hart wie Stein, leicht wie Holz, fest wie Stahl, durchsichtig wie Glas und biegsam wie Papier sein.

Die Kunststoffe werden durch Polymerisation verschiedener organischer Verbindungen hergestellt. Diese ist eine chemische Reaktion, bei der eine große Anzahl von Molekülen (Monomere) zu einer langen Kette vereinigt werden, wobei große Moleküle entstehen, die als Polymere bezeichnet werden. Zum Start dieser Reaktion sind hohe Temperaturen und hoher Druck sowie die Anwesenheit eines Katalysators erforderlich.

Die Strahlenchemie ermöglicht eine neue Methode zur Durchführung der Polymerisation, die eine Reihe von Vorteilen besitzt. Diese Methode benötigt keine Katalysatoren, da die Strahlung bei ihrer Einwirkung

auf die Monomeren freie Radikale erzeugt, die als Initiatoren der Kettenreaktion wirken. Hohe Temperatur und Druck sind nicht erforderlich. Das ist besonders wichtig für solche Monomere (Äthylen, Propylen usw.), deren Polymerisation schwierig ist, sowie für die Tieftemperatur — und besonders für die Suspensions- oder Emulsionspolymerisation. Dieses Verfahren macht die Steuerung des Prozesses möglich, wobei Polymere mit bestimmtem Molekulargewicht erhalten werden. Außerdem kann man unter Einwirkung der Strahlung ganz neue Polymere mit gewünschten Eigenschaften bekommen. So wurden z. B. die fluorhaltigen Kunststoffe Polyperfluorpropylen, Polyperfluorbutadien und Polyperfluoracrylnitril, die über wertvolle Eigenschaften verfügen, durch Einwirkung von Strahlung hergestellt.

Von großem Interesse ist nicht nur der Einfluß der Bestrahlung auf den Polymerisationsprozeß, sondern auch auf die Polymerisationsprodukte, d. h. auf hochpolymere Kunststoffe und Kautschukarten. Hierfür bestehen zweierlei Gründe: Erstens ist es wichtig zu wissen, wie sich unter der Einwirkung energiereicher Strahlung polymere Materialien verhalten, da sie in Reaktoren und anderen Strahlungsquellen als Isolatoren, Schirme, Halter, Dichtungen usw. verwendet werden. Zweitens besteht in Verbindung mit der Verwendung der Atomenergie die Möglichkeit, starke Strahlungsquellen zur Veränderung der Eigenschaften von Polymeren zu verwenden.

Die Ergebnisse der ersten Untersuchungen auf diesem Gebiet wurden 1951 bis 1952 veröffentlicht. Arbeiten, die unter der Leitung von Kargin und Karpow und auch von Charlsby, Dola u. a. durchgeführt wurden, zeigten, daß bei der Bestrahlung von Hochpolymeren die chemischen Bindungen in den Molekülen zerrissen werden und sich freie Radikale bilden. Je nach der Struktur des Polymers überwiegt entweder der „Vernetzungs-“ oder der Destruktionsprozeß. Beim ersteren werden durch die neuentstandenen Verbindungsmöglichkeiten die Moleküle des Polymerisats untereinander zu einem geschlossenen Raumnetz verknüpft, ähnlich dem, das bei der Vulkanisation des Kautschuks entsteht. Der andere Prozeß führt zur Zerstörung des Hochpolymeren.

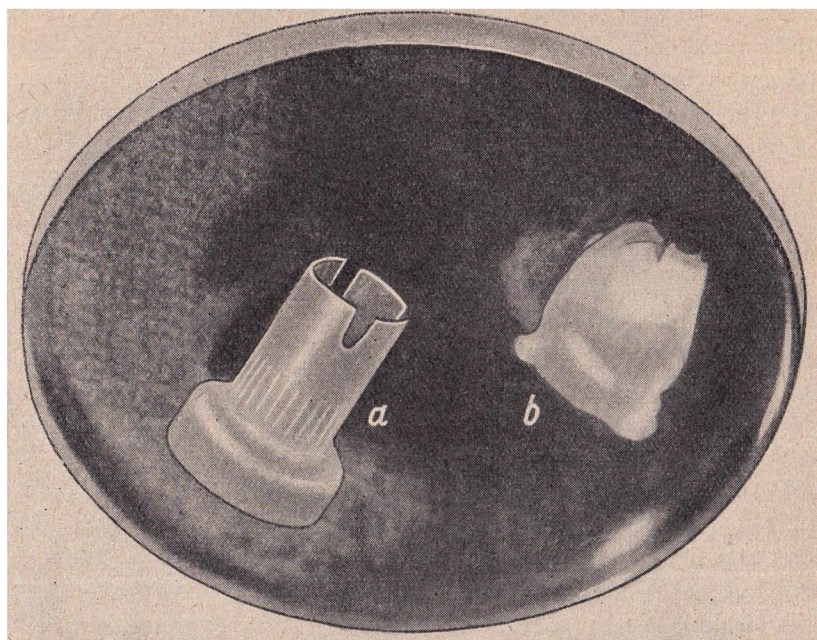


Abb. 20. Erhöhung der Wärmebeständigkeit von Polyäthylenerzeugnissen bei Bestrahlung im Kernreaktor
 a — Die Probe wurde vorher mit Neutronen bestrahlt
 b — unbestrahlte Probe

Für solche Polymere wie Polyäthylen, Polyvinylchlorid, Polystyrol, natürlichen Kautschuk u. ä. ist der Vernetzungsprozeß bestimmend; bei Polyisobutylen, Polyvinylalkohol, Polymethylmetacrylat und Teflon überwiegt der Destruktionsprozeß.

Vernetzte Polymere verfügen über eine Reihe wertvoller Eigenschaften: Ihre mechanische Festigkeit ist größer, ihr Vermögen, sich bei Temperaturen von etwa 100° in solchen Flüssigkeiten wie Benzol, Toluol usw. zu lösen, geht teilweise oder ganz verloren, die Säurebeständigkeit ist erhöht. Wirft man z. B. in kochende Schwefelsäure ein Stück unbestrahltes Polyäthylen, so verkohlt es sofort. Bestrahltes Polyäthylen wird dagegen nur etwas an der Oberfläche angegriffen.

Auf Abb. 20 wird die größere Wärmebeständigkeit von Polyäthylenerzeugnissen, die im Reaktor bestrahlt wurden, gezeigt. Die unbestrahlten Proben zerfließen bei der Erhitzung auf 150° zu einer formlosen Masse. „Vernetzte“, also bestrahlte Polyäthylenerzeugnisse werden bei dieser Temperatur nur weich, verlieren aber nicht ihre Formbeständigkeit.

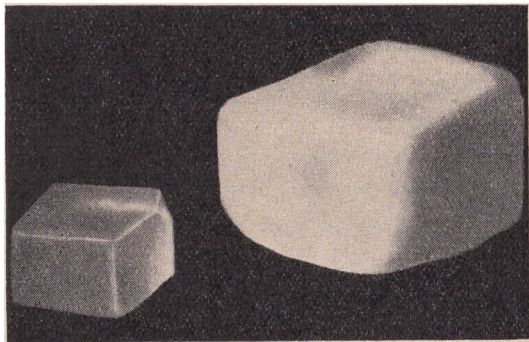
Die Bestrahlung kann auch zur Veränderung von physikalischen und chemischen Eigenschaften der Polymere führen. So wird z. B. eine Folie aus Teflon, das wegen seiner Beständigkeit gegenüber aggressiven chemischen Medien und der hohen Wärmebeständigkeit von großem praktischem Interesse ist, bei Bestrahlung mit schnellen Elektronen pulverisiert. Eine feste Polyisobutylenfolie verwandelt sich bei Bestrahlung mit γ -Strahlen in Flüssigkeit.

Es sei noch bemerkt, daß bei sehr großen Bestrahlungsdosen fast alle untersuchten Polymere zerstört werden.

Der Prozeß der Zersetzung von Polymeren durch Strahleneinwirkung kann zur Erzeugung von porösen Materialien dienen, welche vielseitige Anwendung in der Technik finden.

Die Gasentwicklung bei der Bestrahlung einiger Polymerisate bringt es mit sich, daß die bestrahlten Proben nach einfacher Erwärmung schaumig werden, d. h. in einen porösen Zustand übergehen und sogenannte Schaumkunststoffe bilden. Eine derartige Umwandlung von Polymethylmetacrylat durch Bestrahlung mit Neutronen zeigt Abb. 21.

Abb. 21. Proben von Polymethylmetacrylat vor der Neutronenbestrahlung (links) nach der Bestrahlung und Schaumbildung (rechts)



Bei der Verwendung von Strahlung kann auch der sehr wichtige Prozeß der Mischpolymerisation zweier Monomere durchgeführt werden, wobei man Polymerisate mit gewünschten Strukturen und Eigenschaften herstellen kann. Die Arbeiten über Einleitung der Polymerisation und Wirkung der Strahlen auf fertige Polymere zeigen in ihrer Gesamtheit, daß sich die Anwendung von Strahlung zu diesem Zweck als das aussichtsreichste Gebiet der industriellen Strahlenchemie herausgestellt hat.

Die kurz beschriebenen ersten Untersuchungen strahlenchemischer Methoden geben zu der Hoffnung Anlaß, daß in nächster Zukunft die Atomenergie in weitem Umfang zur erfolgreichen Lösung von Aufgaben herangezogen wird, die vor der Chemie und der chemischen Industrie stehen.

Anwendung der Strahlungen in der Lebensmittelindustrie und Pflanzenforschung

Kernstrahlungen und radioaktive Stoffe haben eine große Zukunft in der Lebensmittelindustrie und Pflanzenforschung, und zwar beim Kampf gegen schädliche Mikroorganismen, Insekten und einige Parasiten, bei der Steuerung mikrobiologischer Prozesse, bei Verbesserung der Lagerungsbedingungen landwirtschaftlicher Erzeugnisse und Lockerung des Erbgefüges zur Züchtung neuer nützlicher Pflanzen- und Mikrobenformen.

Bereits seit einigen Jahren werden in breitem Umfang Untersuchungen zur Klärung der Frage durchgeführt, wie Strahlungen verwendet werden können, um die Tätigkeit schädlicher Bakterien, Insekten und parasitischer Würmer zu unterbinden und die Lebenstätigkeit nützlicher Mikroorganismen zu steuern.

Seit langem galt Sonnenlicht mit Recht als verderblich für viele, darunter auch krankheitserregende Bakterien. Dies hängt damit zusammen, daß im Sonnenlicht unsichtbare ultraviolette Strahlen vorhanden sind, die sich von den sichtbaren Strahlen durch geringere Wellenlänge unterscheiden. Ultraviolette Strahlen mit einer Wellenlänge von $250\text{ m}\mu$ (ein Millimikron ist gleich 10^{-6} mm) haben die scharf ausgeprägte Eigenschaft, viele Mikroorganismen zu töten. Die praktische Anwendung solcher Strahlen ist aber durch ihr geringes Durchdringungsvermögen begrenzt: bereits eine Schicht Zigarettenpapier verhindert fast vollständig das Eindringen von kurzwelligen ultravioletten Strahlen in die bestrahlten Gegenstände. Daher werden ultraviolette Strahlen fast ausschließlich nur dann zur Desinfektion verwendet, wenn es sich um die Vernichtung von Bakterien auf glatten Oberflächen (Wände,

Decken) handelt oder wenn Luft in geschlossenen Räumen und Trinkwasser in verhältnismäßig kleinen Mengen von Mikroben befreit werden sollen.

Die im Inneren der Kerne entstehenden radioaktiven Strahlungen haben ein viel größeres Durchdringungsvermögen. Besonders tief dringen γ -Strahlen in Substanzen ein, etwas weniger tief Röntgenstrahlen und schnelle Elektronen.

Der bekannte russische Physiologe Prof. Tarchanow stellte vor etwa 60 Jahren fest, daß Bakterien relativ beständig gegenüber Röntgenstrahlen sind. Und tatsächlich, weitere Untersuchungen der Wirkung durchdringender Strahlungen zeigten, daß zur Vernichtung von Bakterien Strahlendosen notwendig sind, die um das Zehn- und Hundertfache größer sind als die für höhere Lebewesen (der Mensch eingeschlossen) tödlichen Dosen. So ist z. B. eine Dosis durchdringender Strahlung von 500 physikalischen Röntgen-Äquivalenten (rep) für Menschen bei Ganzkörperbestrahlung tödlich. Zur Vernichtung von Bakterien, die keine beständigen Ruheformen — Sporen — bilden (z. B. von Darmbazillen, Dysenterie- und Bauchtyphus-Bakterien u. a.), sind Dosen von einigen hunderttausend rep notwendig, und zur vollen Abtötung der Bakterien, die Sporen bilden, braucht man Dosen, die etwa anderthalb bis zwei Millionen rep betragen.

Sehr eigenartig ist das Absterben der Mikroorganismen in Abhängigkeit von der Intensität der Bestrahlung. Es zeigte sich nämlich, daß die meisten Mikroben bereits bei relativ geringen Bestrahlungsdosen zugrunde gehen. Die gewaltigen Dosen müssen aufgebraucht werden, um einer verschwindend geringen Menge beständiger Mikroben, die weniger als ein Prozent der gesamten Masse der Mikroorganismen in dem zu sterilisierenden Objekt ausmachen, „den Rest zu geben“.

In der Praxis ist bei weitem nicht immer eine vollständige Sterilisierung der Produkte notwendig. Um die Lagerungsdauer von Produkten bedeutend zu verlängern, genügt es oft, die Mehrzahl der Bakterien abzutöten und die Lebenstätigkeit der geringen Anzahl übrigbleibender Bakterien zu unterbinden. Bis jetzt wurde dies stets durch schonende Erhitzung der Produkte (sogenannte Pasteurisierung) erreicht.

Eine solche Pasteurisierung kann auch mit Hilfe von durchdringenden Strahlungen erreicht werden. Dosen von 70 000 bis 80 000 rep sind hierfür ausreichend. Die auf diese Art und Weise pasteurisierten Produkte erleiden keinerlei sichtbare Veränderungen, die Lagerfähigkeit jedoch wird (besonders in Kühlanlagen) 3- bis 5mal größer. Die praktische Anwendung der kalten Strahlungs-Pasteurisierung dürfte sehr zweckmäßig sein, da einer derartigen Bearbeitung in relativ einfachen Anlagen große Mengen verschiedenartiger Produkte, darunter auch geschlachtete Tiere, unterworfen werden können. Neben einer bedeutenden Herabsetzung der Anzahl von Mikroben in Fleischprodukten gibt die Strahlungs-Pasteurisierung gleichzeitig die Möglichkeit, Eingeweidewürmer — die Trichinen — unschädlich zu machen. Es wurde festgestellt, daß bei einer Bestrahlungsdosis von etwa 20 000 rep das mit Trichinen verseuchte Fleisch praktisch unschädlich wird. Die Strahlungs-Pasteurisierung und -Sterilisation wird gewöhnlich in speziellen Räumen vorgenommen, die entweder unter der Erde oder an der Erdoberfläche eingerichtet werden; im letzten Falle müssen diese Räume zum Schutz des Bedienungspersonals starke, für Strahlung undurchdringbare Betonwände haben. In der Mitte eines solchen Raumes wird der Strahler — radioaktives Kobalt (Co^{60}), radioaktives Zäsium (Cs^{137}) oder andere radioaktive Isotope — aufgestellt. Die zu bestrahlenden Produkte werden mit einem Fließband in den Raum gebracht und dort von allen Seiten bestrahlt. Sie werden dabei um den Strahler und oft auch um die eigene Achse bewegt. Die Geschwindigkeit des Fließbandes wird so berechnet, daß während der Bestrahlungszeit jedes zu bestrahlende Objekt die notwendige Dosis erhält. Auf Abb. 22 ist das Schema einer amerikanischen Anlage zur Behandlung geschlachteter Schweine mit γ -Strahlen gezeigt. Die Produktivität der Anlage beläuft sich auf 2000 Schweine pro Tag. Die Bearbeitung von 1 kg Schweinefleisch kostet etwa 2 Kopeken. Die Entkeimung von Lebensmitteln und sonstigen Stoffen wird gegenwärtig dadurch erzielt, daß sie für eine gewisse Zeit bis zu einer hohen Temperatur erhitzt werden (Konservierung, Sterilisierung). Die thermische Sterilisierung ist erstens mit bedeutenden Ausgaben für Brennstoff und elektrische Energie verbun-

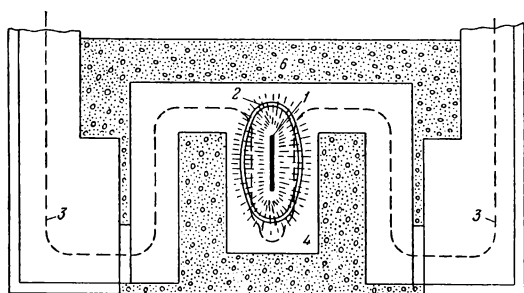
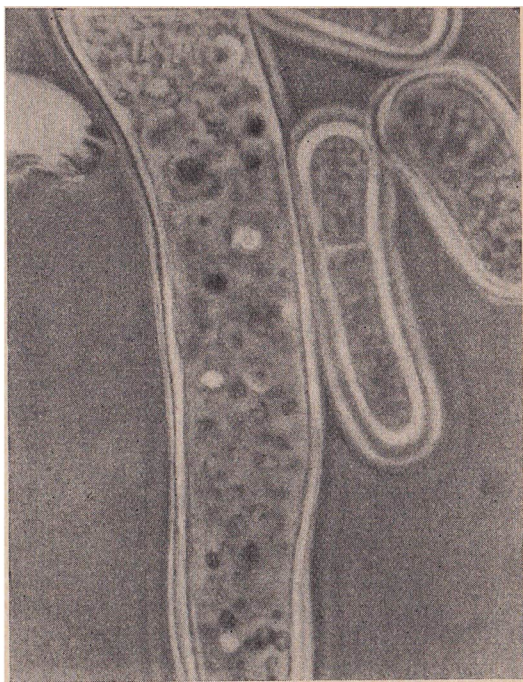


Abb. 22. Schema einer Anlage zur Bestrahlung von geschlachteten Schweinen
 1 — Strahlungsquelle;
 2 — Schacht, in den die Quelle versenkt wird, wenn die Anlage außer Betrieb ist; 3 — Bewegungslinie des Fließbandes mit den zu bestrahlenden Objekten; 4 — Betonwände

den, sie führt zweitens zu nicht mehr rückgängig zu machenden unerwünschten Veränderungen in den zu sterilisierenden Objekten, die oft wesentlich ihre Qualität beeinträchtigen. Drittens aber kann durch thermische Sterilisierung nicht die volle Vernichtung der Bakterien, besonders ihrer Sporen, erreicht werden. Das führt zum Verderben der Lebensmittel, z. B. Konserven, bei ihrer Lagerung.

Bei der Strahlen-Sterilisierung treten auch einige Veränderungen in den zu sterilisierenden Produkten auf; diese Veränderungen sind aber nicht so stark wie bei der thermischen Behandlung. Eine ganze Reihe von Stoffen, besonders Medikamenten, die nicht thermisch behandelt werden dürfen, können mit Erfolg durch Strahlen sterilisiert werden. Da bei der Strahlungs-Sterilisation Oxydationsprozesse bedeutend intensiver als normalerweise verlaufen, können einige Veränderungen in der chemischen Zusammensetzung, im Geschmack und Geruch der Produkte eintreten. Um diesen Veränderungen vorzubeugen oder sie auf ein Minimum zu reduzieren, empfiehlt es sich, die Produkte in eingefrorenem Zustande zu sterilisieren oder ihnen besondere „Schutzstoffe“ (Vitamin C u. a.) beizufügen. Es taucht natürlicherweise die Frage auf, ob die mit Hilfe von Strahlungen sterilisierten Produkte nicht gesundheitsschädlich sind. Zur Klärung dieser Frage wurden versuchsweise Tiere über lange Zeit mit solchen Produkten gefüttert. Es konnten dabei keinerlei Abweichungen in der normalen Entwicklung der Versuchstiere festgestellt werden. Um eine endgültige Entscheidung über die Zweckmäßigkeit der Strahlen-Sterilisierung von Lebens-

Abb. 23. Ausbildung anomal langer Mikroben nach Bestrahlung, da das Längenwachstum fortschreitet, die Teilung jedoch unterdrückt wird. (Rechts: zwei normale Zellen)



mitteln fällen zu können, müssen jedoch noch weitere Untersuchungen durchgeführt werden.

Während die Frage nach der Nützlichkeit einer Strahlen-Sterilisierung von Lebensmitteln noch nicht als endgültig beantwortet gelten kann, ist die Strahlen-Sterilisierung von Heilmitteln (Antibiotika, Vitamine u. a.) und besonders von Verbandstoffen (Watte, Mull, Binden) auf Grund der vorhandenen Erkenntnisse äußerst zweckmäßig.

Wir haben die wichtigsten Verfahren zur Abschwächung und Vernichtung schädlicher Mikroorganismen mit Hilfe von Strahlungen beschrieben. Zugleich kann mit Hilfe von Strahlungen die Lebensfähigkeit nützlicher Mikroorganismen gelenkt werden. So fand man, daß unter Einwirkung von Strahlungen der Stoffwechsel einiger Mikroben derartig verändert werden kann, daß sie mehr wertvolle Produkte, als dies

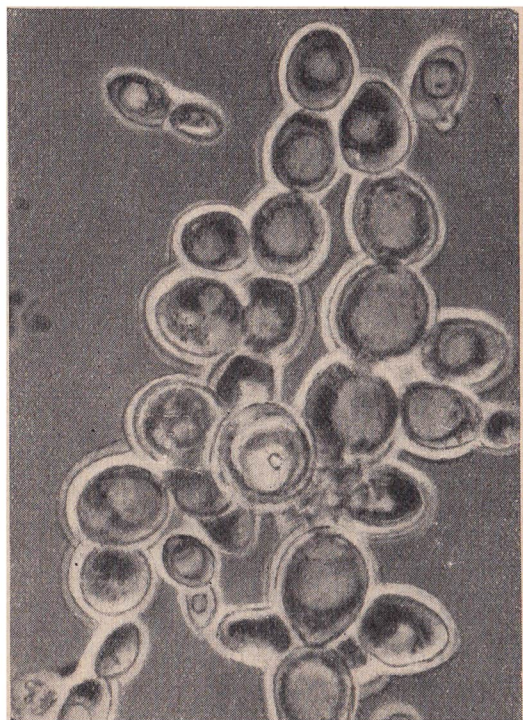


Abb. 24. Bildung großer kugelförmiger Hefezellen durch Bestrahlung. (Oben links: eine normale Hefezelle)

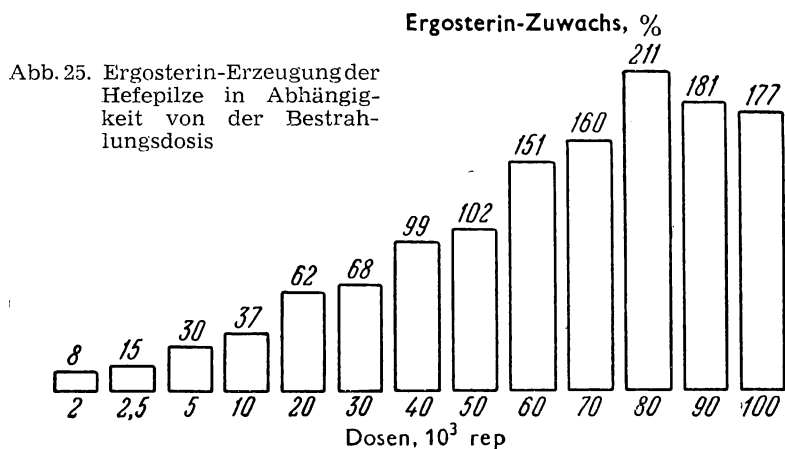
normalerweise der Fall ist, produzieren. Einen solchen Effekt kann man entweder dadurch erreichen, daß eine wirtschaftlich wertvolle Kultur von Mikroorganismen während ihrer Vermehrung bestrahlt wird und damit Veränderungen unmittelbar bei den bestrahlten Mikroben hervorgerufen werden, oder dadurch, daß man durch sehr intensive Bestrahlung stark geschädigte Mikrobenzellen erzeugt, deren Störungen im Stoffwechsel der Nachkommenschaft dieser Zellen übertragen werden (solche Störungen im Stoffwechsel erweisen sich als erblich).

In beiden Fällen verändert sich mehr oder weniger stark das Äußere der Mikrobenzellen, ihre innere Struktur sowie der Charakter ihres Wachstums und ihrer Vermehrung. Es zeigte sich, daß das Vermeh-

rungsvermögen (durch Teilung oder Sprossung) bei der Bestrahlung am stärksten unterdrückt wird. Beständiger ist das Vermögen der Mikroben, in die Länge und Breite zu wachsen. Daher können Mikrobenezellen, die das Teilungsvermögen bereits eingebüßt haben, fortfahren zu wachsen, wodurch (im Vergleich zu unbestrahlten Zellen) riesenhafte lange oder kugelartige Zellen entstehen (Abb. 23 und 24).

Wie bereits erwähnt wurde, verändert sich bei derart äußerlich veränderten Zellen meist auch der Stoffwechsel. So bilden z. B. bestrahlte Hefepilze bedeutend mehr wertvolle organische phosphorhaltige Stoffe, verstärken die Bildung von Fetten und, was besonders wichtig ist, sie bilden um ein Vielfaches mehr Ergosterin (Abb. 25) — ein Produkt, das zur Herstellung des Vitamins D und einer Reihe von Medikamenten notwendig ist.

Die erblichen Störungen des Stoffwechsels bei Mikroorganismen, die durch Bestrahlung hervorgerufen werden, zeichnen sich dadurch aus, daß entweder die Fähigkeit verlorenggeht, bestimmte Stoffe zu synthetisieren, die für das normale Wachstum und die normale Entwicklung notwendig sind, oder daß irgendeine bestimmte Funktion stark intensiviert wird. Beide Störungsarten sind von großem wissenschaftlichem und praktischem Interesse. Bestrahlte Kulturen von Mikroorganis-



men verlieren die Fähigkeit, einige für sie lebenswichtige organische Stoffe, z. B. Aminosäuren, Vitamine usw., zu synthetisieren, was sehr wichtig für die Untersuchung des Chemismus des Stoffwechsels und des Mechanismus der Strahlungswirkung ist. Derartige Kulturen sind sehr wertvolle Indikatoren zur Auffindung und quantitativen Bestimmung von Vitaminen und Aminosäuren in Lebensmitteln und anderen Stoffen. Eine viel größere praktische Bedeutung haben jedoch Stämme von Mikroorganismen, bei denen unter Einwirkung der Bestrahlung die erbliche Fähigkeit, größere Mengen nützlicher Stoffe zu bilden, auftritt. Solche Stämme treten verhältnismäßig selten auf. Obwohl viel Arbeit im Laboratorium aufgewandt werden muß, um solche Mikroorganismen zu züchten, lohnt es sich, da ein direkter Nutzeffekt erzielt werden kann.

So konnten z. B. durch Bestrahlung Industriestämme des Mikropilzes *Penicillium* hergestellt werden, die Hunderte Male mehr Penicillin erzeugen als der in der Natur auftretende Ausgangsstamm. Die gesamte Produktion von Penicillin beruht auf solchen Stämmen. In der Praxis verwendet man auch andere Stämme von Mikroorganismen, die durch Bestrahlung erblich verändert wurden, unter ihnen auch solche, die wertvolle organische Säuren erzeugen.

Bestrahlungsdosen, die die Organismen nicht töten, wohl aber ihre der Bestrahlung gegenüber sehr empfindliche Vermehrungsfähigkeit zerstören, können weitgehend im Kampf mit vielen Schädlingen in der Landwirtschaft angewendet werden. Es ist nur zu gut bekannt, was für Verluste der Wirtschaft die Schädlinge bringen, die das Korn in Lagerräumen verderben und die junge Aussaat angreifen. Die Herstellung und Anwendung von Chemikalien, die gegenwärtig in der Landwirtschaft im Kampf mit diesen Schädlingen benutzt werden, erfordert gewaltige Ausgaben und Anstrengungen. Unterdessen sind einige dieser Schädlinge, die sich im Inneren des Kornes verbergen, in den Boden gehen oder unter dem Schutz der Baumrinde leben, mit Chemikalien nicht zu erreichen. Sie vermehren sich schnell und fügen der Landwirtschaft großen Schaden zu. Durchdringende Strahlungen dagegen erreichen sie an jedem beliebigen Orte.

Ausgewachsene Insekten vertragen ziemlich große Dosen, und hieraus ergeben sich einige Schwierigkeiten bei der praktischen Anwendung dieses Verfahrens zur Schädlingsbekämpfung. Untersuchungen sowjetischer Gelehrter zeigten aber, daß bereits bei bedeutend geringeren Bestrahlungsdosen die Weibchen dieser Schädlinge unfruchtbar werden und die Larven sich nicht weiterentwickeln. Das eröffnet große Möglichkeiten der praktischen Ausnutzung ionisierender Strahlen zur Bekämpfung von Schädlingen in der Landwirtschaft. Dieses Verfahren ist in erster Linie geeignet, das Getreide in großen Speichern zu sterilisieren. Die Bestrahlung kann auch dazu verwendet werden, das Keimen von Speisekartoffeln und Gemüse bei längerer Lagerung aufzuhalten.

Es ist bekannt, welche große Verluste an wertvollen Nahrungsmitteln das Keimen von Kartoffeln und Gemüse in Gemüselagern mit sich bringt. Manchmal erleiden Stärkefabriken gewaltige Verluste wegen Selbsterhitzung und Verderbens der Kartoffeln, die vor der Verarbeitung in großen Mengen gelagert werden. Unterdessen genügt eine Bestrahlung mit relativ geringen Dosen in der Größenordnung von 10 000 rep, um das Keimen der Kartoffeln vollständig zu unterbinden. Die Intensität der Atmung solcher bestrahlter Kartoffeln ist stark herabgesetzt, wodurch die Selbsterhitzung und der Verlust an Nährstoffen verhütet werden kann.

Es ist bemerkenswert, daß der Bestrahlungseffekt bei ein und derselben Dosis nicht von der Bestrahlungszeit abhängt. Dadurch ist die Möglichkeit gegeben, zwei verschiedene Wege bei der Lösung des Problems einzuschlagen. Erstens können die Kartoffeln durch einen Tunnel geschleust werden, in dem sich eine starke Strahlungsquelle befindet. Die Kartoffelknollen werden durch den Tunnel transportiert, erhalten dort die notwendige Dosis und können dann unter gewöhnlichen Bedingungen gelagert werden. Die zweite Möglichkeit besteht darin, daß in den Lagerräumen kleine Strahlungsquellen untergebracht werden. Im Laufe der 2 bis 3 Monate Winterlagerung bekommen die Knollen bei ständiger schwacher Bestrahlung die notwendige Gesamtdosis, wodurch ihr Keimen verhindert wird.

In der Sowjetunion werden bereits beide Verfahren in industriellen Ausmaßen überprüft.

Noch geringere Bestrahlungsdosen, die die Organismen weder töten noch sterilisieren, können wesentliche Veränderungen ihrer Funktionen hervorrufen, den Eiweiß-Kohlehydrat- und Fett-Stoffwechsel stören und zur anomalen mißförmigen Entwicklung führen. Besonders empfindlich sind Eizellen, Spermatozoide, Samenkeime und Blütenstaub. Ihre Bestrahlung führt bereits bei mäßigen Dosen zur Entwicklung einer anomalen Nachkommenschaft, wobei einige Veränderungen sich als erblich erweisen.

Da derartige Veränderungen (Mutationen) das Ergebnis von Störungen des normalen Stoffwechsels durch die ionisierende Strahlung sind, führen sie in der Regel zur Entwicklung degenerierter Formen, die verschiedene mißförmige Abweichungen aufweisen. Diese Fähigkeit ionisierender Strahlen wird vielfach in der Blumenzucht dazu ausgenützt, um neue originelle Formen von Zierblumen zu bekommen.

Die Bestrahlung von Samen und Pflanzen führt zur Lockerung des Erbgefüges und liefert wertvolles Material zur weiteren Selektion bei der Zucht neuer Sorten. Es finden hier hauptsächlich zwei Verfahren Anwendung: Die Bestrahlung von Samen im Reaktor mit Neutronen unter Ausschluß von γ -Strahlen und langfristige Bestrahlung der Pflanzen auf den Feldern durch verschiedene radioaktive Stoffe. Schwedische und amerikanische Wissenschaftler, die hauptsächlich derartige Untersuchungen durchführen, berichten, daß unter gewaltigem Arbeitsaufwand bei der Prüfung einer Vielzahl neugebildeter Mutationsformen, gleichzeitig mit ungünstigen Abweichungen, manchmal auch neue Formen ausgelesen werden können, die einige wirtschaftlich wertvolle Eigenschaften besitzen. So konnte z. B. durch Bestrahlung von Hafer-samen im Reaktor und nachfolgender Selektion durch Infizierung der Saat eine Sorte gezüchtet werden, die gegenüber einigen Pilzkrankheiten beständig ist. Schwedische Wissenschaftler berichteten, daß sie nach 15jähriger Arbeit auf diese Weise eine neue Gerstensorte gezüchtet haben, die durchschnittlich einen um 5 bis 6% größeren Erntertrag ergibt als die Ausgangssorte.

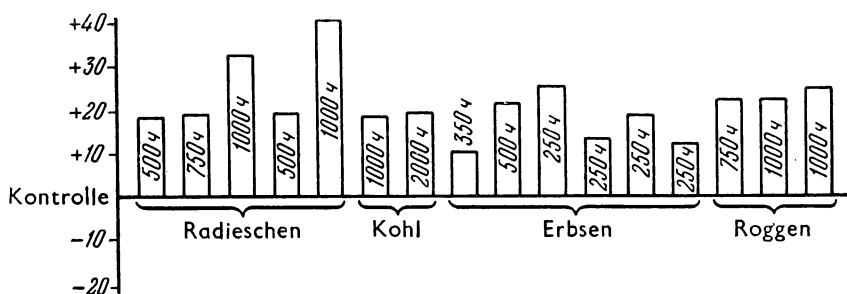


Abb. 26. Einfluß der Bestrahlung von Samen vor der Saat auf den Ernteertrag (Die Zahlen in den Rechtecken bedeuten Bestrahlungsdosen in Röntgeneinheiten, die Zahlen längs der Ordinatenachse: Abweichungen von den Kontrollversuchen in Prozenten)

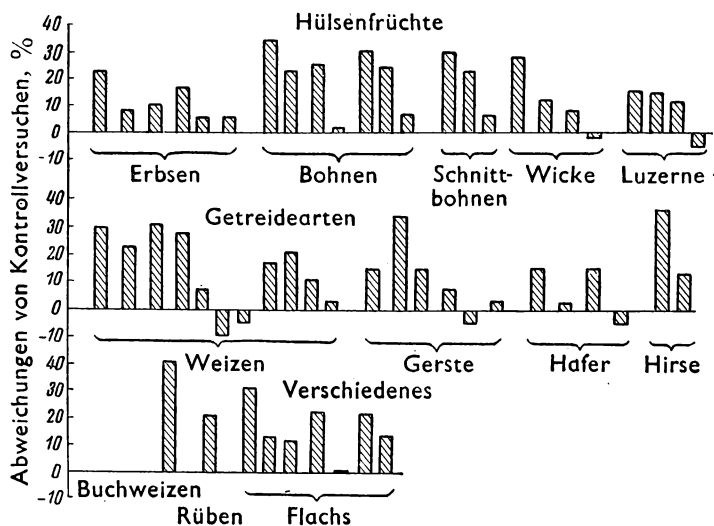


Abb. 27. Einfluß der Befeuchtung von Samen verschiedener landwirtschaftlicher Kulturen mit radioaktiven Lösungen der Spaltprodukte

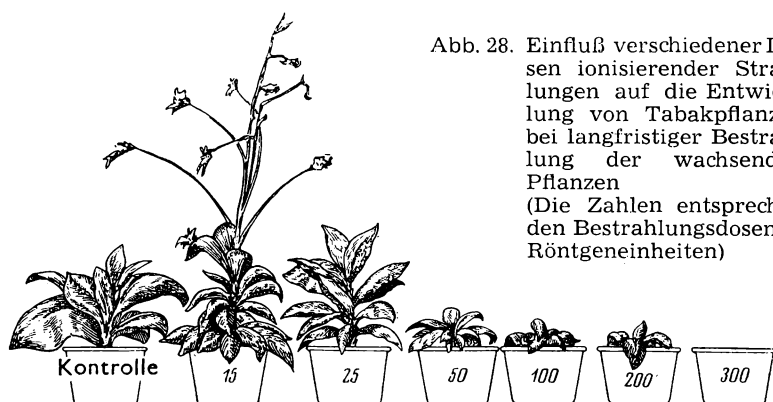


Abb. 28. Einfluß verschiedener Dosen ionisierender Strahlungen auf die Entwicklung von Tabakpflanzen bei langfristiger Bestrahlung der wachsenden Pflanzen
(Die Zahlen entsprechen den Bestrahlungsdosen in Röntgeneinheiten)

Sowjetische Wissenschaftler beschäftigen sich mit interessanten Untersuchungen über die Anwendung noch geringerer Bestrahlungsdosen, die nicht eine Unterdrückung, sondern eine Stimulierung und Beschleunigung der Pflanzenentwicklung hervorrufen. So erzielt man z. B. bei der Bestrahlung von Erbsen-, Radieschen- und Roggensamen mit Strahlen des radioaktiven Kobalts ein schnelleres und vollzähligeres Keimen der Samen, eine intensivere Entwicklung und (bei günstigen äußeren Wachstumsbedingungen) ein schnelleres Ausreifen. Einige Ergebnisse dieser Untersuchungen sind auf den Diagrammen der Abb. 26 dargestellt. Die Anfeuchtung der Samen mit radioaktiven Lösungen begünstigt ihre schnellere Entwicklung, wobei der Ernteertrag solcher Saaten in der Regel um 8 bis 10% höher ist als der der

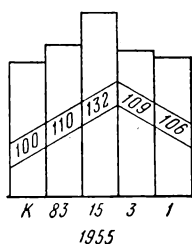
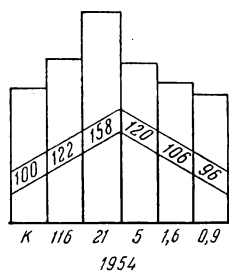


Abb. 29. Ernteertrag der Buchweizen-Vegetationsmasse in Abhängigkeit von der Bestrahlungsdosis
(Die Zahlen unter den Kolonnen entsprechen den Bestrahlungsdosen in Röntgeneinheiten, die Zahlen in den Kolonnen dem Ernteertrag in Prozenten relativ zu den Kontrollversuchen)

Kontrollsaaten. Die Ergebnisse einer Überprüfung dieser Angaben auf Versuchsfeldern zeigt Abb. 27.

Eine Stimulierung der Entwicklung landwirtschaftlicher Pflanzen ist auch dann zu verzeichnen, wenn sie auf Feldern wachsen, deren Radioaktivität etwas über dem normalen Niveau liegt. Die Ergebnisse eines solchen Versuches sind aus Abb. 28 zu erkennen.

Bei schwachen Bestrahlungsdosen zeigte sich eine bedeutende Beschleunigung in der Entwicklung der Vegetationsmasse der Pflanzen, wie dies deutlich an Hand der zweijährigen Experimente mit der Bestrahlung von Buchweizen zu sehen ist (Abb. 29). Gegenwärtig werden diese Verfahren in breitem Umfange unter Verhältnissen der Produktion überprüft.

Durch die angeführten Beispiele sind natürlich noch lange nicht alle Möglichkeiten der Anwendung ionisierender Strahlen in der Landwirtschaft und Lebensmittelindustrie erschöpft, sie weisen vielmehr nur auf die Gebiete hin, auf denen gegenwärtig erfolgreich gearbeitet wird.

Anwendung von Radioisotopen in der Meßtechnik

Radioaktive Isotope werden seit einigen Jahren in zunehmendem Maße zur Kontrolle und Regelung verschiedenartiger industrieller Prozesse verwendet. Meßgeräte, die auf den schon früher bekannten Grundsätzen beruhen, entsprechen gegenwärtig oft nicht mehr den hohen Forderungen, die an Kontroll-, Meß- und Regeleinrichtungen gestellt werden. Diese Forderungen ergeben sich aus neuen Betriebsbedingungen, wie dem schnelleren Verlauf verschiedener technologischer Prozesse, dem Arbeiten bei hoher Temperatur und hohem Druck und der umfangreichen Einführung der Vakuumtechnologie in einer Reihe von Industriezweigen.

Die Anwendung der Strahlung radioaktiver Isotope in der Meßtechnik ist nur eines der neuesten und modernsten Verfahren, das solche Forderungen der Industrie befriedigen kann wie kontaktloses Messen (Messen einer Größe ohne Berührung zwischen Meßgerät und dem zu messenden Medium und ohne Einführung des Meßfühlers in das zu messende Objekt), geringe Trägheit, hohe Genauigkeit und Stabilität des Gerätes u. a.

Eine derartige Richtung in der Meßtechnik beruht auf den spezifischen Eigenschaften der Wechselwirkung zwischen der Kernstrahlung und den bestrahlten Stoffen.

Die Kernstrahlung besitzt u. a. die Fähigkeit, dicke Schichten verschiedener Stoffe zu durchdringen, Gase zu ionisieren und gestreut zu werden. Sie kann bekanntlich in drei Gruppen eingeteilt werden, die α -, β - und γ -Strahlen. α - und β -Strahlen sind Ströme geladener Teilchen, die in starke Wechselwirkung mit den bestrahlten Substanzen treten

und beim Durchgang durch diese schnell ihre Energie verlieren. Die schwereren α -Teilchen haben eine stärkere Wirkung auf Substanzen (sie ionisieren neutrale Atome). Ihre Weglänge in festen Stoffen liegt in der Größenordnung einiger Mikron. Die ionisierende Wirkung von β -Teilchen ist dagegen geringer. Sie legen in festen Substanzen einen Weg zurück, der einige Millimeter betragen kann. Die γ -Strahlen schließlich, die ein Bündel elektromagnetischer Wellen darstellen, besitzen das größte Durchdringungsvermögen. Sie können feste Körper von mehreren Dezimeter Dicke durchdringen.

Eine andere Kernstrahlungsart — die Neutronenstrahlung — wird bei einigen einfachen Kernreaktionen (Wechselwirkung der Atomkerne verschiedener Elemente untereinander) erzeugt. Sie besteht aus schweren neutralen Teilchen hoher Energie, die ebenso wie die γ -Strahlen große Schichtdicken durchdringen können und bei Zusammenstößen mit Atomkernen abgebremst werden.

In Substanzen, die chemische Elemente mit niedrigem Atomgewicht enthalten (Wasserstoff, Kohlenstoff und einige andere Elemente), verlieren Neutronen schnell ihre Energie. Zwischen ihnen und den Molekülen der Substanz, die thermische Bewegungen ausführen, stellt sich ein dynamisches Gleichgewicht ein. Derartige Neutronen werden gewöhnlich als thermische Neutronen bezeichnet.

Der Ionisationsgrad der Substanz, die Absorption und Streuung verschiedener Strahlungsarten sowie die Abbremsung der Neutronen hängen u. a. von der Dichte, chemischen Zusammensetzung, Schichtdicke, Temperatur, Bewegungsgeschwindigkeit und der Feuchtigkeit der zu untersuchenden Substanz ab. Alle diese Eigenschaften können daher in der Meßtechnik ausgenutzt werden.

Daneben kann man bei der Entwicklung von Meßgeräten auch die Veränderung geometrischer Parameter heranziehen, z. B. die Veränderung des Abstandes zwischen der Strahlungsquelle und dem Empfänger (Ionisationskammer oder Gasentladungs- und Szintillationszähler) unter der Einwirkung irgendeines Faktors (z. B. des Gewichtes).

Mit solchen Geräten gelingt in vielen Fällen nicht nur die Messung ohne direkten Kontakt zwischen dem Meßgerät und der zu messenden

Substanz, sondern auch die Messung durch dicke Metallwände von Rohrleitungen, Behältern und anderen technischen Ausrüstungen.

Da die Entwicklung und der Bau von Geräten mit radioaktiven Isotopen erst begonnen hat, sind gegenwärtig nur wenige Geräte dieser Art vorhanden. Dennoch gibt es bereits 20 bis 30 Typen, von denen sich etwa die Hälfte bereits im Einsatz befindet.

Im folgenden sind die wichtigsten physikalischen Prinzipien und die Perspektiven der Anwendung einiger Geräte beschrieben.

I. Geräte, die auf der Messung eines geometrischen Parameters beruhen

Schwimmergeräte

zur Messung des Flüssigkeitsstandes

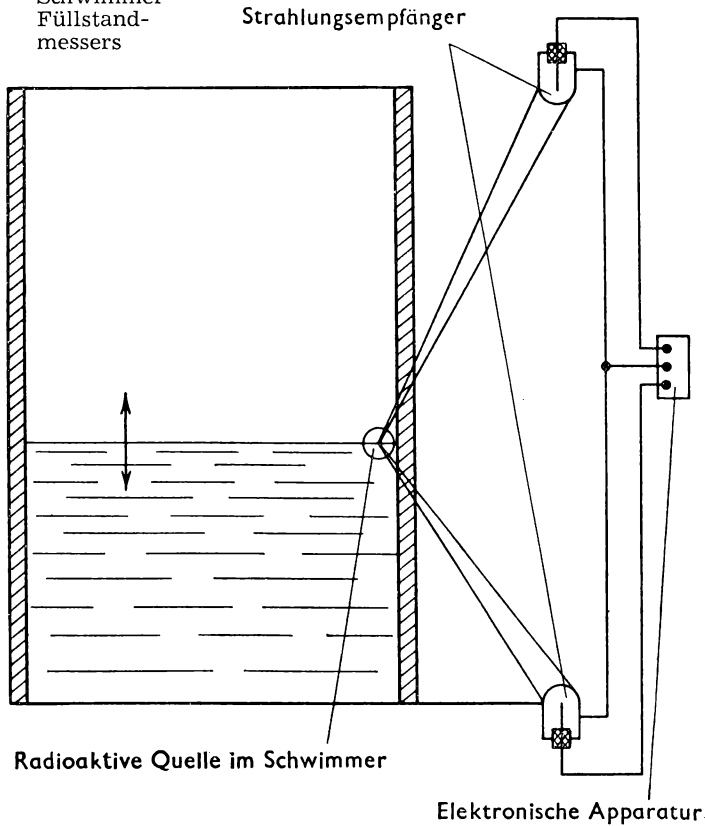
Das Prinzip der Schwimmer-Füllstandmesser beruht auf einer Veränderung des Abstandes zwischen der Strahlungsquelle und dem Strahlungsempfänger. Der radioaktive Strahler befindet sich in einem Schwimmbehälter, der Strahlungsempfänger über dem zu messenden Objekt. Da die Intensität der Strahlung im Empfänger umgekehrt proportional dem Quadrat des Abstandes ist, verändert sich die Empfindlichkeit der Meßapparatur längs der Skala. Die Eichkurve eines solchen Gerätes hat die Form einer Parabel. Es ist daher nicht möglich, die Meßwerte automatisch aufzuzeichnen, was einen wesentlichen Nachteil darstellt.

Der bedeutende Vorteil dieses Gerätes im Vergleich zu anderen Schwimmergeräten besteht jedoch darin, daß man keine elektrischen, mechanischen oder anderen Leitungen aus dem Meßobjekt herauszuführen hat.

Die Linearisierung der Eichkurve wurde durch Entwicklung differentieller Schwimmer-Füllstandmesser, deren grundsätzlichen Aufbau Abb. 30 zeigt, erreicht.

Die Veränderung der Lage des Schwimmers führt zur Abstandsände-

Abb. 30. Schema eines
Schwimmer-
Füllstand-
messers



rung zwischen Strahlungsquelle und zwei Empfängern. Die elektrischen Signale beider Empfänger werden in einem elektronischen Gerät subtrahiert; ein elektrisches Meßgerät am Ausgang der elektronischen Apparatur zeigt den Flüssigkeitsstand an. Innerhalb gewisser Meßgrenzen weicht die Eichkurve weniger als $\pm 3\%$ von einer Geraden ab.

Unter der Voraussetzung, daß die Schwimmermethode zulässig ist, kann durch Anwendung moderner industrieller Strahlungsmessgeräte mit solchen Anordnungen eine kontaktlose Kontrolle des Flüssigkeits-

standes vorgenommen werden. Als Strahlungsquelle benutzt man in solchen Geräten am zweckmäßigsten das Kobaltisotop (Co^{60}), das über eine genügend große Halbwertszeit (5,3 Jahre) und hohe Strahlungsenergie verfügt. Infolge der hohen Strahlungsenergie können Messungen bei Wandstärken bis zu 100 mm (für Stahl) durchgeführt werden.

Tourenzähler

Ein momentloser Tourenzähler (Abb. 31) ist folgendermaßen aufgebaut: Auf den rotierenden Körper, dessen Umdrehungszahl gemessen werden soll (Achse, Welle, Rad usw.), wird ein γ -Strahler aufgetragen. In einiger Entfernung vom Körper befindet sich der Strahlungsempfänger (z. B. ein Halogenzählrohr). Auf dem größten Teil ihres Weges ist die Strahlungsquelle durch einen Bleiblock vom Empfänger abgeschirmt. Das elektronische Gerät spricht daher nur auf die einzelnen Impulsgruppen an, deren Breite der Zeit entspricht, die die Strahlungsquelle in der unabgeschirmten Zone verbringt. Die Impulse jeder Gruppe werden von der elektronischen Apparatur summiert, und das Signal wird einem Relais zugeleitet, das die Umdrehungszahl anzeigt. Gleichzeitig werden von einer anderen summierenden Apparatur Signale an ein Gerät geleitet, welches die momentane Drehgeschwindigkeit zu be-

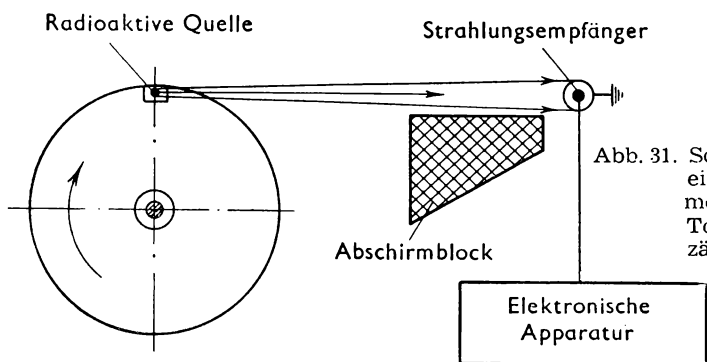


Abb. 31. Schema eines momentlosen Tourenzählers

stimmen gestattet. Damit lassen sich z. B. Drehgeschwindigkeiten von Maschinenteilen messen, die sich im Inneren verschiedener Mechanismen befinden und auf andere Art und Weise nicht bestimmt werden können. Die Messungen kann man in weiten Grenzen (von 40 bis 50 bis 10 000 Umdrehungen pro Minute) mit einer Genauigkeit von 0,5 bis 1,5% und besser durchführen.

Anzeige geringer Verschiebungen und Schwingungen

In einer der frühen Arbeiten über die Anwendung radioaktiver Isotope in der Meßtechnik findet man interessante Angaben hinsichtlich der Möglichkeit, sehr kleine Verschiebungen zu messen. In zwei Zweige einer Wheatstoneschen Brücke werden Ionisationswiderstände und in den Diagonalzweig ein empfindliches Röhrenvoltmeter geschaltet. Die Verschiebung einer Platte des Ionisationswiderstandes um $1\ \mu$ ruft eine derartige Änderung dieses Widerstandes hervor, daß der Zeiger des Voltmeters um 15 mm ausschlägt. Die mechanische Verschiebung wird also 15 000fach verstärkt. Die Empfindlichkeitsschwelle eines solchen Gerätes liegt bei 0,02 bis 0,03 μ .

Es ist fraglich oder zumindest schwer, eine derartige Empfindlichkeit mit Apparaturen zu erreichen, die nach anderen Prinzipien arbeiten. Die Anwendung dieses Verfahrens zur Lösung einer Reihe meßtechnischer Probleme, wie Schwingungsmessungen an Maschinen, Messung der Verschiebung empfindlicher Geräteteile u. a., scheint daher zweckmäßig zu sein.

Zu den Geräten, die auf dem Prinzip der Veränderung eines geometrischen Parameters beruhen, sind auch radioaktive Waagen, hochempfindliche Galvanometer u. a. zu zählen. Die α - oder β -Strahlenquelle wird auf das bewegliche Geräteteil (den Waagebalken, den Zeiger, der mit der Galvanometerspule verbunden ist usw.) aufgetragen.

Die Differential-Ionisationskammer, die die Strahlung registriert, wird zunächst so eingestellt, daß der Strom in beiden Kammerteilen gleich

ist. Geringste Verschiebungen der Quelle werden dann von einem elektronischen Differentialgerät nachgewiesen.

Durch ein solches System kann die Empfindlichkeit der Geräte wesentlich verbessert werden (z. B. erhöht sich die Empfindlichkeit von Waagen bis auf einige Tausendstel Milligramm).

II. Geräte, die auf einer Änderung der Absorption und Streuung der Strahlung beruhen

A b s o r p t i o n s - D i c k e n m e s s e r

Im Physikalischen Institut der Akademie der Wissenschaften der UdSSR und im Zentrallaboratorium für Automatik des Ministeriums für Eisenindustrie der UdSSR haben Bogatschew, Werchowskie und Makarow ein Verfahren zur kontinuierlichen automatischen Messung von Banddicken (im Fertigungsprozeß) entwickelt und eine entsprechende Apparatur hergestellt. Das Verfahren beruht auf der Absorption von β - und γ -Strahlen im Bandmaterial. Es wurde mit Erfolg bei der Fertigungskontrolle von Stahlwalzgut angewendet.

Die Wirkungsweise der Apparatur ist aus Abb. 32 ersichtlich. In einer Differential-Ionisationskammer werden die Intensitäten zweier Bündel radioaktiver Strahlung miteinander verglichen. Vor dem Eintritt in die Kammer muß ein Bündel das zu messende Material durchdringen, das andere dagegen einen Kompensationsschirm passieren.

Das Signal der Ionisationskammer wird verstärkt und einem Servomotor zugeleitet, dessen Achse mit dem Schirm verbunden ist. Auf diese Weise werden die Ionisationsströme automatisch ausgeglichen, wobei der Drehwinkel des Schirmes ein Maß für die Dicke des zu messenden Materials darstellt. Die Autoren bauten eine Reihe von Geräten für verschiedene Dickenbereiche zwischen 5μ und 10 mm, deren maximaler Meßfehler $\pm 1,5\%$ der zu messenden Größe beträgt. Die Gesamtansicht einer solcher Apparatur zeigt Abb. 33.

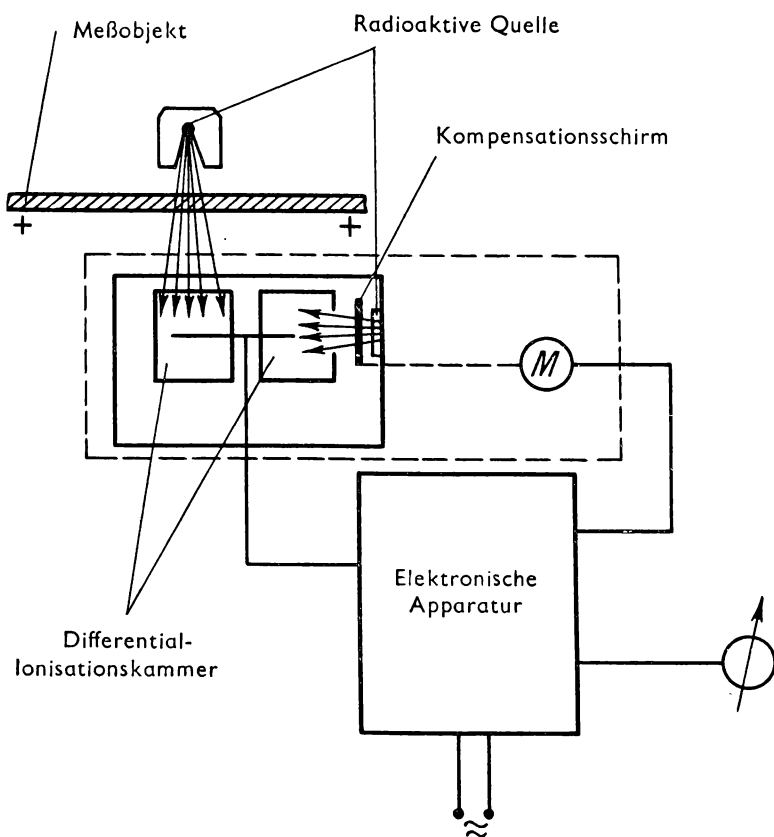


Abb. 32. Schema eines Gerätes zur Messung der Dicke von Walzgut

Wie wirksam die Anwendung dieser Geräte ist, kann an einem Beispiel deutlich gemacht werden. Beim Walzen von Stahlbändern konnte die Walzgeschwindigkeit durch die Verwendung kontaktloser Mikrometer von 5 bis 6 m/sec bis auf 15 m/sec gesteigert werden. In gleicher Weise wird die Feuchtigkeit und Imprägnierung verschiedener Stoffe, die Dicke und Güte von Papierbändern u. a. geprüft.

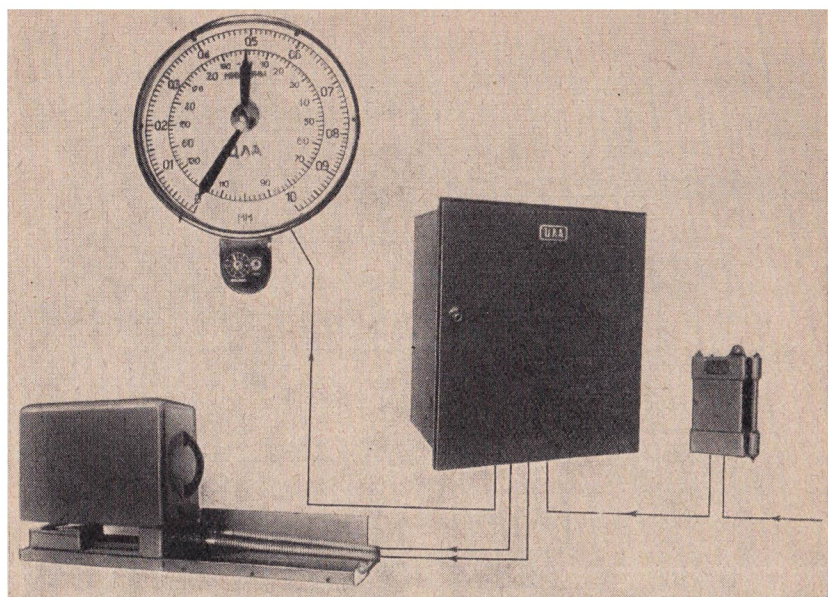


Abb. 33. Dickenmesser (Gesamtansicht)

Geräte dieser Art können in vielen Industriezweigen, wie der Metallurgie, der Glas- und Textilindustrie, der chemischen Industrie u. a., verwendet werden.

W a n d s t ä r k e n m e s s e r

Unmittelbar an die im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Geräte schließen sich weitere an, die mit Hilfe von γ -Strahlen die Wandstärke von Rohren zu messen gestatten. In der vor kurzem im Zentral-laboratorium der Staatlichen Kesselaufsicht von Kardasch und seinen Mitarbeitern entwickelten Apparatur wird eine neue, vollkommene Methode verwendet. Der γ -Strahler und der Szintillationszähler mit Sekundärelektronenvervielfacher sind auf einen Träger montiert, der

das zu messende Objekt umfaßt. Der Strom des Sekundärelektronenvervielfachers entspricht der Wandstärke des Rohres am gegebenen Ort. Wird der Träger um das zu messende Rohr gedreht, so führt eine Abweichung der Wandstärke vom Normalwert zur entsprechenden Auslenkung des Meßgerätzeigers.

Bei Rohren, deren Durchmesser 30 bis 50 mm beträgt (bei einer Wandstärke von 1 bis 10 mm), können mit diesem Gerät Abweichungen der Wandstärke im Bereich von 0,25 bis 10 mm mit einer Genauigkeit von 0,15 bis 0,25 mm gemessen werden. Ähnliche Messungen, die sich auf andere Verfahren stützen, sind außerordentlich kompliziert, zeitraubend und ungenau.

Absorptions-Dichtemesser

Im Forschungsinstitut für Wärmegeräte des Ministeriums für Gerätebau und Automatisierungsmittel der UdSSR wurde 1955 ein Verfahren zur Kompensationsmessung der Dichte strömender Flüssigkeiten (ohne Einführung einer Meßsonde in die Rohrleitung) entwickelt und die entsprechende Apparatur gebaut.

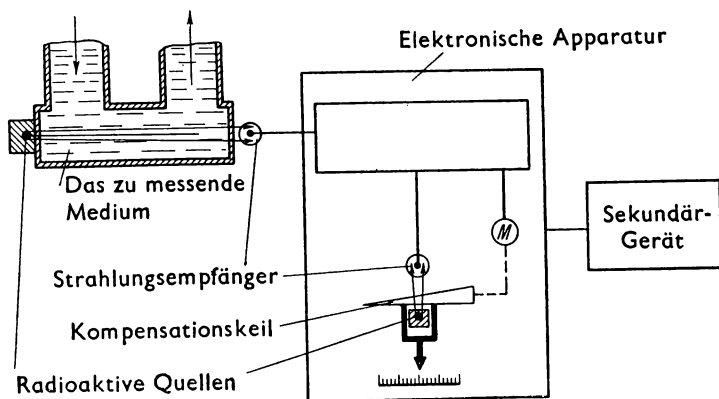


Abb. 34. Schema eines Kompensations-Dichtemessers

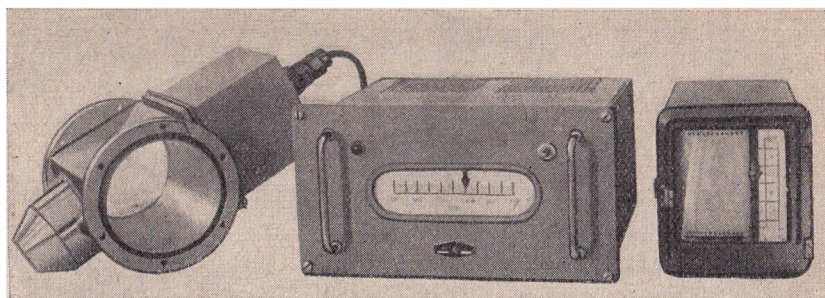


Abb. 35. Gesamtansicht des Flüssigkeitsdichtemessers mit Meßkopf und Sekundärgerät

Die Abb. 34 zeigt das Meßschema und Abb. 35 die Gesamtansicht des Gerätes. Auf dem technologischen Rohrleitungsteil sind eine mit Blei abgeschirmte γ -Strahlenquelle (Co^{60}) und eine Gruppe von Halogenzählrohren angebracht. Eine Veränderung der Flüssigkeitsdichte in der Rohrleitung hat eine Veränderung des Stromes in der Zählergruppe zur Folge.

Die vom Zählrohrstrom erzeugten Spannungen werden unter Berücksichtigung ihres Vorzeichens mit Spannungen, die von einer anderen Zählrohrgruppe herrühren, summiert. Diese Zählrohre befinden sich in einem sekundären Gerät und werden von einem γ -Strahler desselben Isotopes bestrahlt. Zwischen den Zählrohren und dem Strahler befindet sich ein Metallkeil. Das Differenzsignal wird verstärkt und einem Servomotor zugeleitet. Der Motor verschiebt den Keil so weit, bis sich die beiden Zählrohrsignale gegenseitig aufheben. Mit dem Kompensationskeil ist einmal ein Zeiger verbunden, der über eine in Dichteinheiten geeichte Skala streicht, zum anderen der bewegliche Kern einer Induktionsspule, mit deren Hilfe ein ferngesteuertes Registrierinstrument betrieben werden kann. Das in diesen und anderen Geräten verwendete Kompensationsprinzip ermöglicht es, die Wirkung äußerer Einflüsse, wie der Veränderung des Verstärkungsfaktors und des Zerfalls der Strahlungsquelle, wesentlich herabzusetzen. Das vorliegende Gerät ist für einen Meßbereich von $0,5 \text{ g/cm}^3$ berechnet, wobei in Be-

tracht zu ziehen ist, daß je nach der Neigung des Kompensationskeiles dieser Bereich zwischen $0,5 \text{ g/cm}^3$ und $2,5 \text{ g/cm}^3$ liegen kann. Somit können praktisch alle Flüssigkeiten (außer Metallen) einer Dichtebestimmung unterworfen werden. Die Meßfehler liegen unter $\pm 2\%$. Ein ähnlicher Dichtemesser wird von der Firma Ohmart Corporation (USA) hergestellt. Der Meßbereich des Gerätes ist der gleiche, die Genauigkeit ist aber etwas besser.

Nach Angaben der Firma werden diese Geräte gegenwärtig in größeren Serien aufgelegt und in mehr als 40 Industriebetrieben verwendet. Solche Dichtemesser werden am zweckmäßigsten zur Messung der Dichte angreifender oder zähflüssiger Substanzen, die einer hohen Temperatur oder einem hohen Druck ausgesetzt sind, benutzt, oder auch in den Fällen, in denen das Schwimmerv Verfahren oder andere bekannte Methoden praktisch nicht verwendet werden können.

Absorptions-Füllstandmesser

Abweichend von dem beschriebenen Schwimmer-Füllstandmesser, dessen Anwendungsgebiet und Genauigkeit beschränkt sind, wurde im Forschungsinstitut für Wärmegeräte ein Verfahren zur Fernmessung und -kontrolle der Lage einer Begrenzungsfläche zwischen zwei Medien entwickelt und eine Reihe entsprechender Geräte gebaut. Mit diesen Geräten kann die Höhe der Begrenzungsfläche zwischen solchen Medien wie Gas—Flüssigkeit, Flüssigkeit—Flüssigkeit, Gas—fester Körper oder Gas—Streustoff und das Niveau kochender oder brodelnder Flüssigkeiten gemessen werden.

Das Meßschema eines solchen Gerätes zeigt Abb. 36, die Gesamtansicht des Gerätes Abb. 37.

Die γ -Strahlenquelle (Co^{60}) und der Empfänger (Halogenzählrohr) befinden sich auf Schlitten, die entlang der Säulen bewegt werden können. Die Säulen selbst werden längs der Objektachse aufgestellt. Mit einem elektronischen Gerät wird die mittlere Impulszahlgeschwindigkeit bestimmt. Die Quelle und der Empfänger werden mit Hilfe von Schraub-

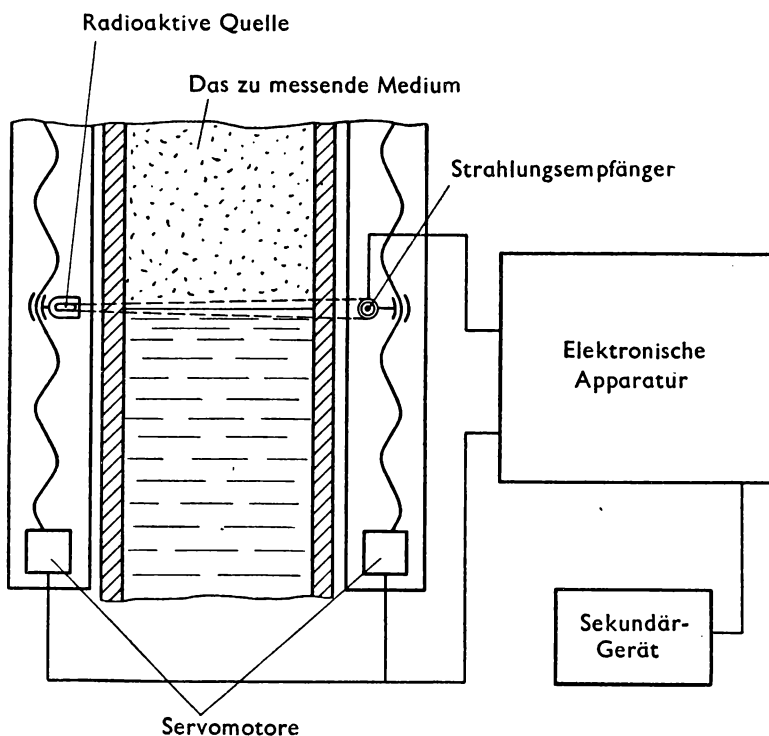


Abb. 36. Schema eines beweglichen Systems zur Füllstandmessung

spindeln in vertikaler Richtung synchron bewegt. Das System ist im Gleichgewicht, wenn sich die Mitte des Zählrohrs und die Trennfläche beider Medien auf gleicher Höhe befinden. Verschiebt sich die Trennfläche, so verändert sich die Absorption der γ -Strahlen, das Gleichgewicht wird gestört. Die entstehenden elektrischen Signale werden Servomotoren zugeleitet, die die Schraubspindeln in den Meßsäulen drehen und somit die Strahlungsquelle und den Empfänger entsprechend der Veränderung des Füllstandes verschieben. Wenn das System Strahlungsquelle—Empfänger wieder die Höhe der Trennfläche er-

reicht hat, stellt sich erneut der Gleichgewichtszustand ein, und die Drehung des Servomotors hört auf.

Der Servomotor ist mit einem Anzeigergerät und dem beweglichen Kern einer Induktionsspule (zur Fernsteuerung einer Registrier- oder Regelanordnung) gekoppelt.

Das Gerät ist für Messungen in einem Bereich bis zu 6 m bestimmt (bei einem Durchmesser des Objektes von 5—8 cm bis zu 5—7 m und einer Wandstärke bis zu 100 mm Stahl). Der absolute Meßfehler beträgt weniger als 5 mm.

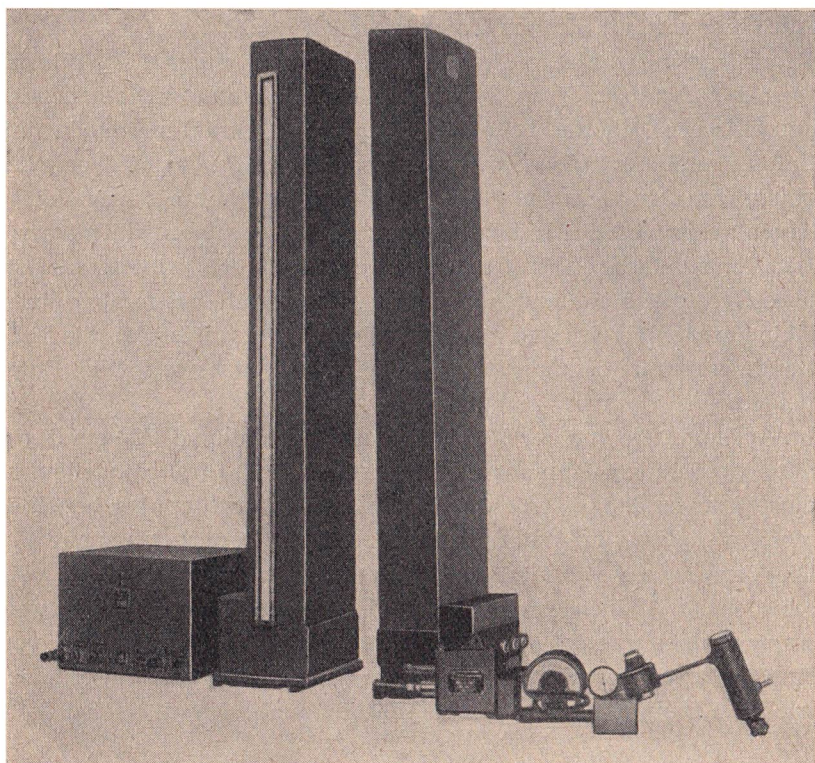


Abb. 37. Gesamtansicht des Füllstandmessers

Die Betriebserfahrungen zeigen, daß derartige Geräte zuverlässig arbeiten und mit Erfolg zur Automatisierung verschiedener technologischer Prozesse herangezogen werden können, insbesondere dann, wenn man es mit angreifenden, explosiven und giftigen Medien oder mit zähflüssigen, kochenden Substanzen und Streustoffen zu tun hat.

Eine Reihe ähnlicher Untersuchungen wurde im Forschungsinstitut für Schwarzmalle von Tatotschenko und Medwedjew durchgeführt. Sie entwickelten insbesondere einige Relaisgeräte zur Signalisierung und Positionsregelung. In diesen Geräten sind Strahlungsquelle und Zählrohr unbeweglich. Die elektronische Apparatur ist wesentlich einfacher. Auch hier wird als Strahler Co^{60} verwendet.

Tatotschenko und Medwedjew entwickelten auch einen Füllstandmesser, der auf ganz anderen Grundlagen beruht. Ein aufrecht stehender zylindrischer Behälter befindet sich zwischen Strahlungsquelle und Empfänger, deren Ausdehnung der gesamten Länge des Meßbereiches entspricht. Der vom Empfänger registrierte Strahlungsstrom hängt davon ab, inwieweit der Empfänger vom Absorber abgeschirmt wird. Der Vorteil eines solchen Gerätes besteht darin, daß keinerlei bewegliche Geräteteile vorhanden sind. Derartige Geräte haben aber einen kleineren Meßbereich und eine geringere Meßgenauigkeit als die Füllstandmesser mit beweglicher Strahlenquelle und beweglichem Empfänger.

Im Ausland wird von der Firma Ohmart Corporation (USA) ein Gerät mit ausgedehntem Empfänger und entsprechender Strahlenquelle produziert. Es ist dem hier beschriebenen ähnlich, verfügt aber bei einer Meßgenauigkeit von 1% über einen größeren Meßbereich (bis zu 1,5 m).

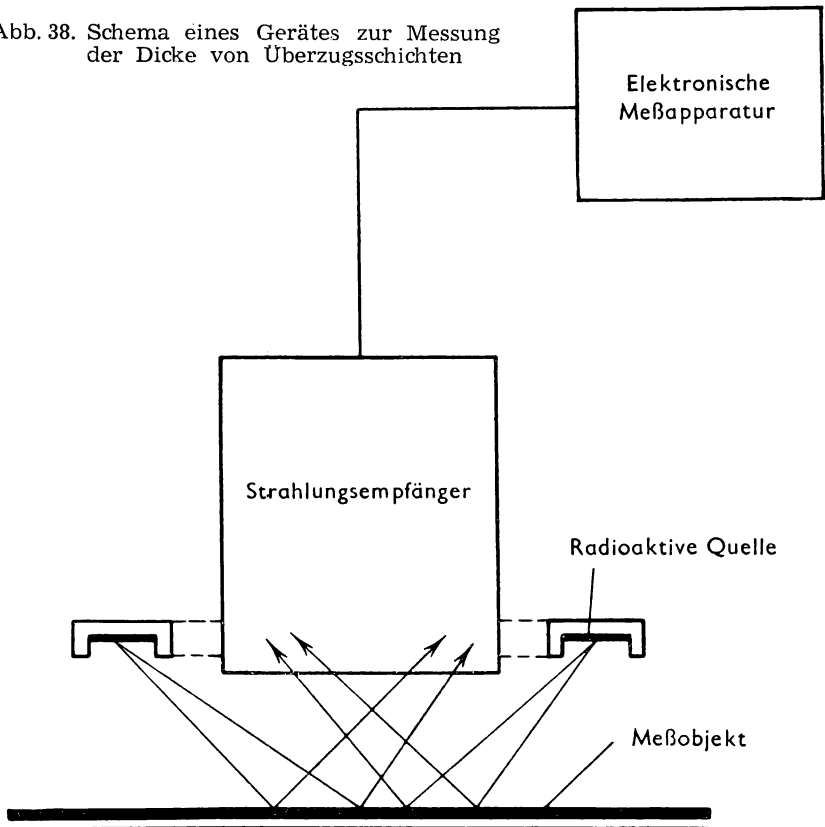
Die Verwendung von Geräten dieser Art erstreckt sich auf die verschiedensten Industriezweige, wie Metallurgie, Ammoniaksynthese, Ammonsalpeterproduktion, Kohleanreicherung, Herstellung von Kunstseide, Stapelfaser, Nylon, Trelon und anderen Kunstfasern, Betrieb von Dampfmaschinen, Lebensmittelindustrie usw.

Ein Dickenmesser, der auf der Streuung von β -Strahlen beruht

Auch die Streuung der Strahlung radioaktiver Isotope (hauptsächlich der β - und γ -Strahlen) findet vielseitige Anwendung.

Aus den in der letzten Zeit entwickelten Geräten ist besonders die Apparatur zur kontinuierlichen kontaktlosen Dickenmessung einer auf Stahlblech aufgetragenen Zinnschicht (das Meßprinzip siehe Abb. 38) hervorzuheben, die im Physikalischen Institut der Akademie der Wis-

Abb. 38. Schema eines Gerätes zur Messung der Dicke von Überzugsschichten



senschaften der UdSSR und im Zentrallaboratorium für Automatik des Ministeriums für Eisenindustrie ausgearbeitet wurde. Die Dicke der Zinnschicht wird mit Hilfe des Ionisationskammerstromes, der durch die von der Strahlenquelle ausgehenden und am Meßobjekt reflektierten β -Teilchen hervorgerufen wird, bestimmt. Es ist leicht einzusehen, daß der Strom der Ionisationskammer durch die Dicke der Abdeckungsschicht bestimmt wird, wenn die Atomzahl des Abdeckungsmaterials (z. B. Zinn) wesentlich (mindestens um 3 Einheiten) von der Atomzahl des Trägermaterials (z. B. Eisen) verschieden ist. Dieses Gerät ist seinem Aufbau nach dem Absorptions-Dickenmesser sehr ähnlich, und es hat daher auch alle die Vorteile aufzuweisen, die sich aus Kompensationsmessungen ergeben. Der Meßbereich der Apparatur entspricht Schichtdicken von 0 bis 0,005 mm. Der maximale Meßfehler liegt unter $\pm 0,0001$ mm. Die Anwendung dieses Gerätes in der Konservenindustrie zur Dickenmessung der Zinnschicht, die auf das Blech aufgetragen wird, ermöglicht es z. B., den Verbrauch dieses kostbaren Materials um das Zwei- bis Dreifache herabzusetzen.

Eine wesentliche Materialersparnis kann bei Benutzung dieses Gerätes auch beim Auftragen verschiedener anderer Verfestigungs-, Antikorrosions- und Dekorationsschichten erzielt werden. Ähnliche Geräte können erfolgreich zur Bestimmung des prozentualen Anteils oder der Konzentration von Stoffen in Lösungen und Legierungen, die nur zwei chemische Elemente enthalten, herangezogen werden.

Es dürfte zweckmäßig sein, hier noch zu erwähnen, daß weiche γ -Strahlen (z. B. des Isotops Cs^{137}) oder β -Strahlen zur Zählung verschiedener Erzeugnisse auf Fließbändern verwendet werden können. Befindet sich das Erzeugnis zwischen der Strahlungsquelle und dem Empfänger und absorbiert es dabei fast vollständig die Strahlung, so können die Unterbrechungen im Betrieb des Empfängers leicht in elektrische Impulse verwandelt werden, die zur Steuerung eines entsprechenden Relais dienen, das die Anzahl der vorbeilaufenden Erzeugnisse angibt. Derartige Geräte werden gegenwärtig im Physikalischen Institut der Akademie der Wissenschaften der Lettischen SSR entwickelt und erfolgreich in der Industrie angewendet.

III. Geräte, die auf der Messung der Ionisation und der Rekombination der entstandenen Ionen beruhen

Druckmesser zur Bestimmung des absoluten Druckes

Die Wirkungsweise eines solchen Gerätes besteht darin, daß das Gas in irgendeinem Behälter durch die α -Strahlen eines bestimmten Isotops ionisiert wird. In gewissen Grenzen ist der Ionisationsstrom, der vom Kollektor gesammelt wird, eine lineare Funktion der Dichte oder (bei konstanter Temperatur) des Gasdruckes im Behälter. Der Wert des Ionisationsstromes, der mit Hilfe eines hochempfindlichen Verstärkers gemessen wird, ist ein Maß für die Dichte oder den absoluten Druck des Gases.

Ein solches Gerät wurde im Forschungsinstitut für Wärmegeräte entwickelt. Es gestattet den Druck trockener Luft (für andere Gase müssen die Meßergebnisse mit einem Korrektionsfaktor multipliziert werden) im Meßbereich von $1\ \mu$ bis 10 mm Hg bei einem Meßfehler von 2 bis 3% zu bestimmen.

Die Gesamtansicht des Gerätes ist in Abb. 39 zu sehen.

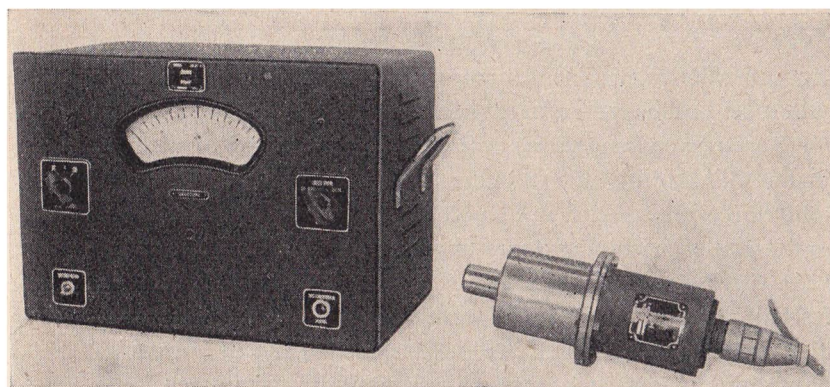


Abb. 39. Gesamtansicht des Ionisationsmanometers

Die Meßskala des Gerätes ist völlig linear. Es ist den Thermoelement- und Pyrani-Manometern, die im selben Meßbereich arbeiten, weit überlegen.

Durch Abwandlung des Registrierteiles und Veränderung der Intensität des Strahlers kann man den Meßbereich des Gerätes bis herab zu $0,1 \mu \text{ Hg}$ und bis hinauf zu 1000 mm Hg erweitern.

Die mit diesen Geräten bei der Herstellung von Hochspannungskondensatoren gemachten Betriebserfahrungen weisen darauf hin, daß der Ausschuß wesentlich geringer wird (durch Verbesserung des Trocknungsverfahren) und die Fertigungstechnologie vervollkommenet sowie die Güte der Erzeugnisse verbessert werden.

Gegenwärtig können Geräte, die den beschriebenen ähnlich sind, zur Bestimmung der Zusammensetzung von Gasen (bei bekanntem Druck) verwendet werden. Dabei macht man von der Neigungsänderung der Kennlinie in Abhängigkeit von der Zusammensetzung des Gases Gebrauch. Man kann diese Geräte auch so abändern (durch Anwendung von β - oder γ -Strahlen anstatt der α -Teilchen), daß hohe Drucke gemessen werden können.

Geräte zur Messung der Geschwindigkeit von Gasströmen

Die Ionisation von Gasen durch α - und β -Teilchen und die Rekombination der entstandenen Ionen kann zur Messung der Geschwindigkeit von Gasströmen benutzt werden. Bringt man in der Rohrleitung, durch die das Gas strömt, einen α - oder β -Strahler und darüber zwei Ionenkollektoren an, so wird in den Kollektorkreisen Strom fließen, sobald an die Kollektoren eine Spannung (relativ zum Rohrkörper) angelegt wird. Werden nun die Kollektorströme nach dem Differentialverfahren geschaltet, so kann man erreichen, daß sich bei Abwesenheit eines Gasstromes beide elektrischen Ströme das Gleichgewicht halten.

Durch einen Gasstrom, dessen Geschwindigkeit mit der Ionenbewegung im Gas vergleichbar ist, wird dieses Stromgleichgewicht gestört.

Die Störung ist dann ein Maß für die Gasgeschwindigkeit. Dieses Meßverfahren für ähnliche Messungen entwickelt und ein entsprechendes wenden. Für geringe Geschwindigkeiten kann man es etwas abändern.

Abweichend von den beschriebenen Amplitudenmessungen der Geschwindigkeit von Gasströmen wurde vor kurzem im Institut für Automatik und Telemechanik der Akademie der Wissenschaften der UdSSR von Schumilowskie und einer Gruppe seiner Mitarbeiter ein Impulsverfahren für ähnliche Messungen entwickelt und ein entsprechendes Gerät gebaut. Eine Reihe von Mängeln, die beim Amplitudenverfahren auftreten, sind bei dieser Apparatur nicht vorhanden, so daß sie wahrscheinlich eine vielseitige Anwendung finden wird.

IV. Geräte, die auf der Abbremsung von Neutronen beruhen

Feuchtigkeitsmesser für feste Körper und Streustoffe

Als einfachstes Beispiel für die Anwendung der Neutronenbremsung in der Meßtechnik dienen Geräte zur Feuchtigkeitsmessung.

Wenn man neben der zu untersuchenden Substanz, die ein schlechter Neutronenmoderator sei, eine Quelle schneller Neutronen und einen Detektor thermischer Neutronen (z. B. eine Borkammer) anordnet, so wird der Detektor fast keine thermischen Neutronen registrieren, da ihre Dichte in der Meßsubstanz sehr gering ist. Fügt man aber nun dem zu untersuchenden Stoff einen Moderator, z. B. Wasser, bei, erhöht sich die Dichte des Neutronengases wesentlich, und der Strom im Detektor steigt an. Dieser Detektorstrom ist dann also ein Maß für die Feuchtigkeit der Meßsubstanz. Derartige Geräte werden in verschiedenen Industriezweigen zur schnellen Feuchtigkeitsbestimmung (z. B. in der Baubranche zur Feuchtigkeitsmessung von Böden) vielseitige Anwendung finden.

Neutronen-Füllstandmesser

Unlängst wurde in der ausländischen Fachliteratur ein Neutronen-Füllstandmesser beschrieben, der ebenfalls auf dem Prinzip der Neutronenabbremung beruht. Das Meßschema einer solchen Anordnung ist in Abb. 40 dargestellt.

Unweit des zu untersuchenden Objektes wird eine Quelle schneller Neutronen und ein mit dieser Quelle starr verbundener Empfänger thermischer Neutronen angebracht. Eine vertikale Verschiebung des

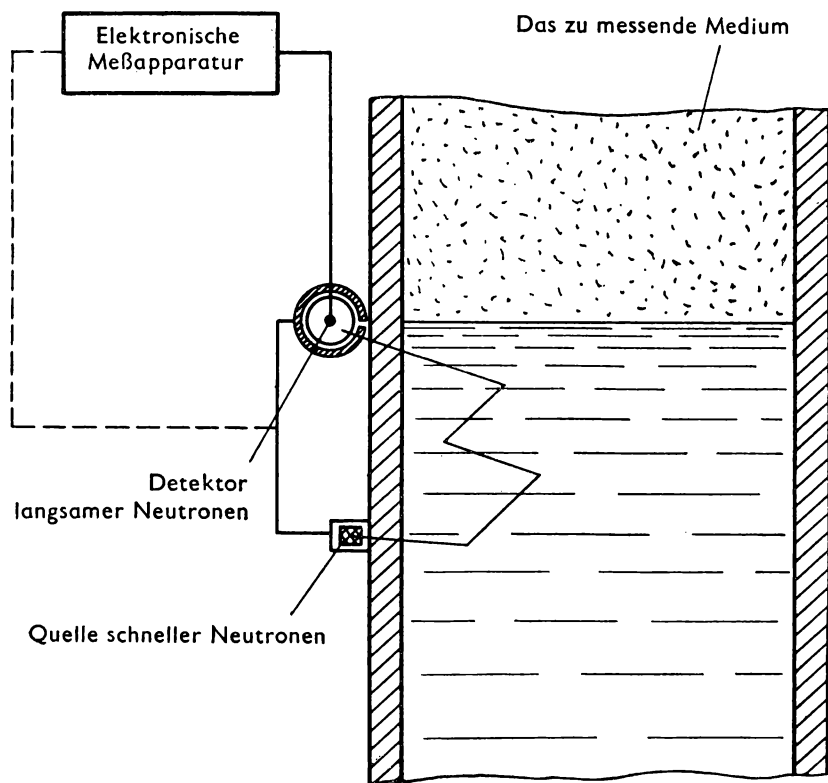


Abb. 40. Schema eines Neutronen-Füllstandmessers

Systems Quelle—Empfänger (längs der Wand des zu untersuchenden Objektes) führt an der Flüssigkeitsoberfläche zu einer scharfen Neigungsänderung der den Empfängerstrom charakterisierenden Kurve. Diese Änderung des Detektorstromes an der Flüssigkeitsoberfläche ermöglicht es, ein bewegliches Meßsystem zu entwickeln, das dem weiter oben beschriebenen ähnlich ist. Es unterscheidet sich von ihm nur dadurch, daß hier lediglich eine Meßsäule vorhanden ist, in der sich gleichzeitig Quelle und Detektor befinden. Die Genauigkeit eines solchen Füllstandmessers kann bis zu 1 mm betragen.

In dieser Übersicht haben wir bei weitem nicht alle Anwendungsmöglichkeiten der Strahlung radioaktiver Isotope in der Meßtechnik erfaßt. Viele Meßschemata, die in der in- und ausländischen Fachliteratur beschrieben sind, konnten nicht einmal erwähnt werden.

Es wurden lediglich die typischsten Geräte kurz beschrieben, deren Entwicklung so weit vorangeschritten ist, daß sie bereits serienmäßig hergestellt werden oder ihre serienmäßige Herstellung vorbereitet wird (Füllstandmesser mit beweglichem Meßsystem, Dickenmesser für Stahlblech und Baumwollstoffe, Dichtemesser für Pulpe und Flüssigkeiten, Manometer zur Messung des absoluten Druckes u. a.). Außerdem wurden einige Meßschemata beschrieben, die noch nicht zu Geräten entwickelt wurden, die aber unserer Meinung nach von der Industrie am meisten benötigt werden und einer praktischen Verwirklichung sehr nahe sind.

Prüfung industrieller Erzeugnisse mit Hilfe von Gammastrahlen

Die Zuverlässigkeit und Betriebssicherheit von Maschinen und technischen Anlagen hängt in erster Linie von der Qualität der Werkstoffe und der Herstellungsweise ab. Aber auch die beste Technologie, z. B. der Guß- oder Schweißarbeiten, kann keine Garantie dafür geben, daß nicht doch zufällig Fehler in den gegossenen oder geschweißten Maschinenteilen vorhanden sind.

Solche zufälligen, von außen nicht sichtbaren Defekte in Maschinenteilen, wie Risse, Poren, Lunker u. a. m., können die Ursache von Betriebsunfällen sein.

Zur Herstellung moderner Maschinen, wie Strahltriebwerke, Turbinen, Flugzeuge, Kraftfahrzeuge, Diesellokomotiven, Dampfkessel u. a. m., werden eine große Zahl verschiedener Werkstoffe benötigt und viele Verarbeitungsverfahren, z. B. Schweißen, Gießen, Schmieden, Pressen usw., verwendet.

Für alle technologischen Fertigungsprozesse ist eine Gütekontrolle der Oberflächenbeschaffenheit der Maschinenteile vorgesehen. Um innere Defekte der Maschinenteile feststellen zu können, sind zerstörungsfreie Prüfverfahren erforderlich.

Hierzu werden mehrere Verfahren verwendet: Durchleuchtung mit Röntgen- und Gammastrahlen, magnetische Verfahren und Ultraschallverfahren.

Die Fortschritte der physikalischen Forschungen auf dem Gebiet der Atomenergie ermöglichten es in den letzten Jahren, in weitem Umfang künstliche radioaktive Isotope als Gammastrahlungsquellen zur Durchleuchtung von Werkstoffen zu benutzen. Eine Reihe günstiger Eigen-

schaften radioaktiver Isotope als Gammastrahler, wie kleine Abmessungen, geringe Kosten, Einfachheit der Apparatur, die Möglichkeit, sie in Werkhallen und auch auf offenem Gelände zu verwenden, sowie andere Eigenschaften ließen die Radioisotope in vielen Fällen zu einem unentbehrlichen Hilfsmittel der Prüfung und Kontrolle industrieller Erzeugnisse werden.

Außerdem sind moderne Röntgenanlagen trotz ihrer technischen Vollkommenheit zu kompliziert und zu kostspielig. Sie sind einige hundertmal teurer als Gammaanlagen.

Zur Prüfung industrieller Erzeugnisse mit Hilfe von Gammastrahlen benutzt man zwei Verfahren: Die photographische Methode, d. h. die Herstellung einer Photographie der inneren Fehler des durchleuchteten Objektes, und das Ionisationsverfahren. Bei diesem werden die Defekte durch die Änderung des Ionisationsstromes in einem Nachweisgerät gefunden.

Das erste Verfahren ist wegen seiner Einfachheit und größeren Genauigkeit am weitesten verbreitet. Die Empfindlichkeit des zweiten Verfahrens in bezug auf die Feststellung von Defekten ist geringer. Es hat jedoch den Vorteil, daß die Prüfung schneller als mit dem ersten Verfahren durchgeführt werden kann.

Die physikalischen Grundlagen der photographischen Methode beruhen darauf, daß Gammastrahlen undurchsichtige Körper durchdringen können. Diese Strahlen werden auf das zu untersuchende Objekt gerichtet, dort teilweise absorbiert und fallen dann auf den hinter dem Objekt angeordneten Film.

Sind z. B. in einer zu durchleuchtenden Schweißnaht Lunker und Risse vorhanden, so werden diese Defekte wegen ihres geringeren Absorptionsvermögens im Vergleich zum umgebenden Metall die Gammastrahlen weniger absorbieren. Auf dem Film werden diese Risse und Lunker als schwarze Flecken oder Streifen auf dem helleren fehlerlosen Nahtuntergrund hervortreten.

In Abb. 41 ist das Schema der Durchleuchtung einer Schweißnaht dargestellt sowie die Intensitätsänderung der im Falle eines Fehlers auf den Film wirksam werdenden Gammastrahlung.

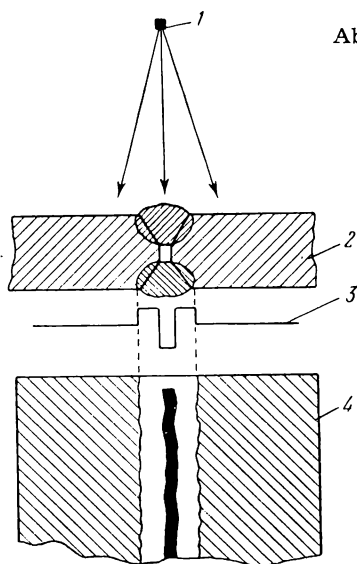


Abb. 41. Schema der Durchleuchtung einer Schweißnaht mit Gammastrahlen: 1 — Gammastrahlenquelle; 2 — Schweißnaht mit Fehler; 3 — Änderung der Strahlenintensität; 4 — Abbildung der Naht

Mit Hilfe solcher Aufnahmen werden in Metallen und anderen Materialien makroskopische Defekte aufgefunden.

Die Abmessungen des kleinsten Fehlers, der mit Hilfe von Gammaaufnahmen festgestellt werden kann (die Empfindlichkeit der Aufnahme), hängt von der Energie der Gammastrahlen, dem Abstand zwischen Quelle und untersuchtem Objekt, dem Photomaterial, der Zusammensetzung des Entwicklers, Entwicklungszeit u. a. m. ab. Die Empfindlichkeit der Aufnahmen wird wesentlich von der Energie der Gammastrahlen beeinflusst. Hierbei muß eine solche Strahlungsenergie gewählt werden, die bei gegebener Dicke und Art des zu untersuchenden Materials ermöglicht, noch die kleinsten Fehler aufzufinden.

In Abb. 42 ist die Abhängigkeit der Abmessung noch erkennbarer Defekte von der Strahlungsenergie und der Dicke des Objektes aufgezeichnet.

Bei der Durchleuchtung dünner Stahlschichten (ca. einige mm) mit Tu^{170} können Defekte noch sichtbar gemacht werden, deren Größe 1%

der Dicke beträgt. Für Eu^{154} und Co^{60} erhöht sich dieser Wert entsprechend auf 2 bzw. 10 bis 12⁰/. Zur Feststellung von Defekten in Stahlschichten geringer Dicke sind Gammastrahlen geringer Energie (weiche Strahlen) und umgekehrt bei großen Schichtdicken Gammastrahlen hoher Energie (harte Strahlen) zu verwenden.

Die Energie der Gammastrahlung eines bestimmten Isotops hängt von den Eigenschaften der strahlenden Atomkerne ab. Gegenwärtig werden in der Industrie zur Durchleuchtung verschiedener Materialien mit Gammastrahlen folgende in der Tabelle aufgezählten Isotope verwendet:

Isotop	Mittlere Energie der Gammastrahlen in eV	Halbwertszeit
Kobalt 60 (Co^{60})	1 250 000	5,3 Jahre
Caesium 137 (Cs^{137})	670 000	33 Jahre
Iridium 192 (Ir^{192})	420 000	72 Tage
Europium 154 (Eu^{154})	380 000	16 ± 4 Jahre
Thulium 170 (Tl^{170})	84 000	170 Tage

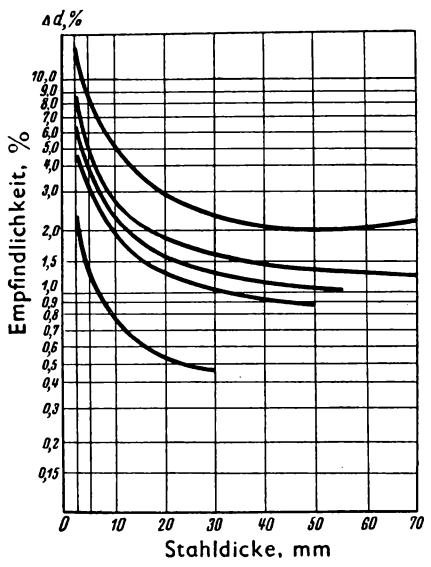


Abb. 42. Abmessung der noch erkennbaren Defekte in Stahl in Abhängigkeit von der Strahlungsenergie
 Erste Kurve (von oben): Kobalt 60; zweite: Zä-sium 137; dritte: Iridium 192; vierte: Europium 154; fünfte: Thulium 170

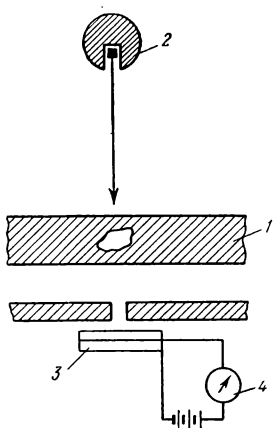


Abb. 43. Prinzipschema des Ionisationsverfahrens der Gammadefektoskopie
 1 — zu untersuchendes Objekt mit Fehler; 2 — Gammastrahlungsquelle;
 3 — Zählrohr; 4 — Meßgerät

Aus der Tabelle ist zu ersehen, daß sich diese Isotope in ihrer Energie und Halbwertszeit unterscheiden. In allen Fällen industrieller Anwendung von Gammastrahlen zur Werkstoffprüfung ist es wünschenswert, langlebige Strahlungsquellen zu verwenden.

In den letzten Jahren hat man in der Gammadefektoskopie begonnen, neben dem photographischen Verfahren auch die Ionisationsmethode anzuwenden.

Die photographische Methode (Radiographie) ist mit hohen Kosten für das Photomaterial verbunden und gewährleistet nur eine geringe Produktivität. Bei Fließfertigung und kontinuierlicher Werkstoffprüfung ist die Anwendung der Photomethode nur schwer möglich.

In diesem Falle ist es günstiger, die Ionisationsmethode zu verwenden. (Meßschema siehe Abb. 43.)

Das zu untersuchende Objekt, eine Gußplatte mit Fehlern in Form von Lunkern, wird zwischen einer Gammastrahlungsquelle und einem Zählrohr hindurchbewegt. Fällt das schmale Strahlenbündel (bis etwa 1 cm^2) auf den Gußfehler, so wird wegen der geringeren Absorption die Intensität der Gammastrahlen im Meßgerät über dem normalen Ni-

veau liegen. Diese Veränderung der Intensität der Gammastrahlen wird mit dem Zählrohr gemessen.

Das Zählrohr besteht aus einem gasgefüllten Metallzylinder (Argon, Stickstoff oder Argon-Stickstoff-Gemisch). Längs der Achse des Zylinders ist ein Metallfaden gespannt. Zwischen Faden und Zylinder (den Elektroden) wird eine Gleichspannung von einigen 100 V angelegt. Durch die ionisierende Wirkung der Gammastrahlen entsteht eine elektrische Entladung. Diese Entladung ist in den in der Metalldefektoskopie verwendeten Zählrohren meist selbstlöschend. Die Anzahl der Entladungen (Impulse), die von dem Zählrohr in der Zeiteinheit registriert werden (Zählgeschwindigkeit), ist der Änderung der Intensität der Gammastrahlung proportional.

Beim Auftreffen des Gammastrahlenbündels auf eine fehlerhafte Stelle des untersuchten Objektes steigt die Intensität an, was eine höhere Zählgeschwindigkeit zur Folge hat. Die Zählgeschwindigkeit wird mit Hilfe eines integrierenden elektronischen Gerätes gemessen, in dessen Ausgangskreis verschiedene Registriergeräte, wie z. B. registrierende oder einfache Zeigergalvanometer, geschaltet sind.

Wie bereits erwähnt, ist die Empfindlichkeit der Ionisationsmethode geringer als die der Photomethode. Außerdem ist es in der Ionisationsdefektoskopie nicht möglich, auf Grund der Angaben der Meßgeräte den Charakter der Defekte im Prüfling zu bestimmen.

Die angeführten Nachteile der Ionisationsmethode schmälern jedoch keineswegs ihre Vorteile hinsichtlich geringer Kosten und hoher Produktivität, insbesondere bei der Prüfung von Schweißstellen.

Bestrahlungsgeräte für die Gammadefektoskopie

Für die industrielle Defektoskopie mit Hilfe der Photomethode wurden in der Sowjetunion einige Typen von Bestrahlungsgeräten entwickelt. Solche Anlagen haben eine Reihe von Forderungen zu befriedigen, unter denen die Einhaltung der Vorschriften zum Schutz des Bedie-

nungspersonals gegen die schädliche Wirkung der Gammastrahlen besonders wichtig ist. Bei der Berechnung der Schutzmaßnahmen lassen sich die Konstrukteure der Geräte von den in der Sowjetunion gültigen Unfallverhütungsvorschriften leiten, in denen als zulässige Bestrahlungsdosis pro Tag 0,05 Röntgen angegeben ist.

Alle Geräte für die Gammadefektoskopie können nach der Aktivität der verwendeten Strahlenquellen in zwei Gruppen eingeteilt werden: Zur ersten Gruppe gehören Geräte, die für Co^{60} einer Aktivität von 0,2 bis 0,5 Curie oder für andere Isotope geringerer Energie der Gammastrahlen und entsprechender Aktivität berechnet sind. Diese Geräte mit Quellen geringerer Aktivität sind tragbar und haben ein Gewicht von etwa 20 bis 30 kg.

Man verwendet diese Apparate zur Prüfung von Schweißstellen bei Montagearbeiten, beim Brückenbau, bei der Verlegung von Gasleitungen, dem Bau von Zisternen, beim Schiffsbau und in anderen Industriezweigen, d. h. überall dort, wo die geschweißten Stahlteile nicht dicker als 30 mm sind und daher mit Strahlungsquellen kleiner Aktivität bei relativ geringen Belichtungszeiten durchleuchtet werden können.

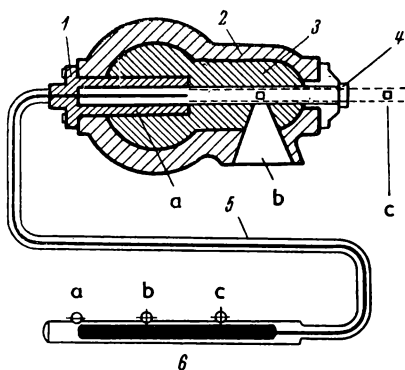
Das Aus- und Einbringen der Strahlungsquellen aus bzw. in den Bleibehälter wird entweder manuell mit Hilfe von Stangen oder ferngesteuert mit Hilfe von kurzen Drahtseilen vollzogen.

Als Beispiel eines Apparates für die industrielle Gammadefektoskopie sei die Anlage GUP-Co-0,5-1 angeführt, die serienmäßig von einem der Werke des Ministeriums für Elektroindustrie der UdSSR hergestellt wird. Diese Geräte eignen sich für Untersuchungen in Laboratorien und Werkhallen, für Werkstoffprüfungen bei der Montage verschiedener geschweißter Konstruktionen. Sie sind mit 0,5 Curie Co^{60} , 3 bis 5 Curie Ir^{192} oder anderen Isotopen entsprechender Energie ausgerüstet.

Das Schutzgehäuse des Gerätes ist auf ein Gestell montiert und kann, um das Gammastrahlenbündel auf das zu durchleuchtende Objekt zu richten, in beliebiger Richtung verschoben werden. Der Aufbau des Schutzgehäuses ist in Abb. 44 dargestellt.

Das äußere Gußeisengehäuse hat die Form einer Birne. Das Innere des

Abb. 44. Schutzgehäuse des Gerätes GUP-Co-0,5-1
 1 — transportables Gehäuse; 2 — Gußeisen; 3 — Blei; 4 — Pfropfen; 5 — Drahtseil; 6 — Griff mit Regelvorrichtung



Gehäuses ist mit Blei ausgelegt. Das Aus- und Einführen des Kobalts oder eines anderen Isotops wird in 3 m Entfernung mit Hilfe eines Drahtseils, das in einem Metallschlauch gleitet, vollzogen.

Am Ende des Schlauches befindet sich ein Griff, mit dem das Drahtseil in drei verschiedenen Lagen fixiert werden kann: a entspricht der Lage der Quelle, wenn der Apparat außer Betrieb ist, b entspricht der Quellenlage bei Durchleuchtung mit gerichtetem Strahlenbündel und c der Durchleuchtung mit offener Quelle (bei abgenommenem Pfropfen).

Zur Untersuchung schwer zugänglicher Prüfstellen kann der Bleizylinder zusammen mit der Strahlungsquelle und dem Steuerseil mit Hilfe einer 1,5 m langen Stange aus dem äußeren Gehäuse herausgenommen und abtransportiert werden. Wenn das Gerät außer Betrieb ist, beträgt der Gefahrenabstand vom Schutzgehäuse bei 6stündigem Arbeitstag 0,7 m.

Mit dem tragbaren Gerät darf nicht länger als $1\frac{1}{2}$ Stunden pro Arbeitstag gearbeitet werden (einschließlich Umbau und Transport des Apparates).

Die Geräte der zweiten Gruppe haben Strahlungsquellen höherer Aktivität. Mit ihrer Hilfe werden in Laboratorien oder Werkhallen Schweißnähte dickwandiger Kesselanlagen, Gußteile von Maschinen u. a. m. durchleuchtet.

Als Beispiel für ein Gerät dieser Gruppe sei die Anlage GUP-Co-50-1

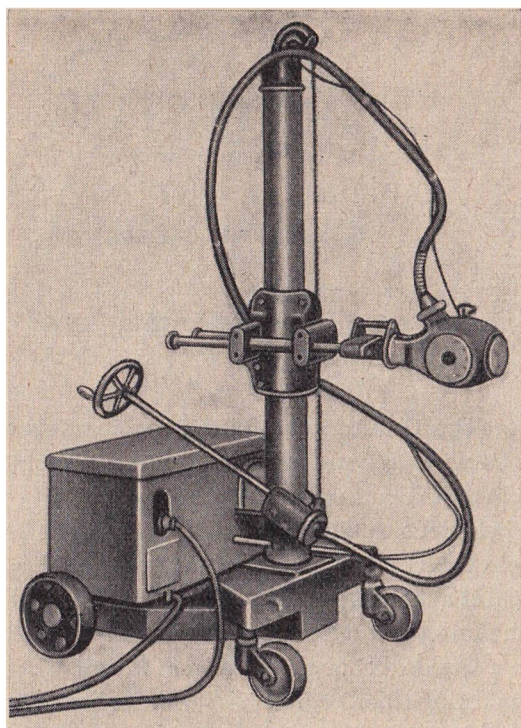


Abb. 45. Gesamtansicht
des Apparates
GUP-Co-0,5-1

angeführt, die bei Verwendung von Co^{60} mit einer Strahlungsquelle von 50 Curie ausgerüstet ist. Bei Benutzung anderer Isotope ist die Aktivität entsprechend zu wählen.

Abb. 45 zeigt die Gesamtansicht dieses Gerätes. Es ist auf ein Fahrgestell montiert und kann mit der Hand oder durch einen Elektrokarren transportiert werden. Der Apparat hat ein Schutz- und ein Arbeitsgehäuse. Ist das Gerät außer Betrieb, so befindet sich das radioaktive Präparat im Schutzgehäuse. Für den Betrieb wird es mit Hilfe einer ferngesteuerten elektromechanischen Anlage durch einen biegsamen Schlauch in das Arbeitsgehäuse befördert. Die Steuerung erfolgt von einem leicht transportablen Schaltpult aus, das mit dem Apparat durch ein 15 m (oder mehr) langes Kabel verbunden ist.

Mit Hilfe eines Motors wird das Präparat im Laufe von 4 bis 5 sec aus dem Schutzgehäuse in das Arbeitsgehäuse befördert. Für den Fall einer Beschädigung dieses Mechanismus ist das Gerät mit einer Vorrichtung ausgerüstet, mit der man ziemlich schnell das Präparat manuell in das Schutzgehäuse zurückbringen kann. Das Gesamtgewicht des Gerätes beträgt 700 kg.

Apparate dieser Art eignen sich zur Durchleuchtung dicker Metallschichten (z. B. Stahl bis zu 250 mm) und gewährleisten einen sicheren Schutz des Bedienungspersonals gegenüber der schädlichen Einwirkung von Gammastrahlen.

Einige Beispiele für die industrielle Werkstoffprüfung mit Gammastrahlen

Gammastrahlen radioaktiver Isotope werden am häufigsten zur Prüfung der Güte von Schweiß- und Gußarbeiten im Maschinenbau und Bauwesen verwendet. In der Sowjetunion befinden sich über 1000 radioaktive Präparate zur industriellen Durchleuchtung verschiedener Stoffe im Einsatz. Die Methodik der Durchleuchtung von Schweißnähten wurde durch GOST standardisiert. In mehreren Ministerien wurden technische Bedingungen und Vorschriften zur Durchleuchtung von Werkstoffen mit Gammastrahlen ausgearbeitet.

Als Beispiel für die wirkungsvolle Anwendung der Gammadefektoskopie sei die Prüfung von Schweißnähten im Kessel- und Druckbehälterbau angeführt. Bei Kesseln für einen Druck von über 30 atü werden alle Nahtstellen durchleuchtet. Bei Kesseln für 15 bis 20 atü werden die Nähte nur stichprobenweise (20% der gesamten Nahtlänge) durchleuchtet. In Kesselwerken erfordert somit die Prüfung von Schweißnähten einen großen Arbeitsaufwand. Die Durchleuchtung von Nähten wird an speziellen Prüfständen vorgenommen. Bei Kesseln bis zu 1,5 m Durchmesser mit kreisförmigen Nähten wird die Quelle in die Mitte dieses Kreises gebracht und die gesamte Naht

gleichzeitig aufgenommen. Werden auf den Aufnahmen in den Nähten Risse und Bindefehler festgestellt, so ist die Naht Ausschuß. Einzelne Luftblasen und Schlackeneinschlüsse werden als zulässig betrachtet. Abb. 46 stellt die Aufnahme einer Schweißnaht mit Luftblasen dar. Gammaaufnahmen geben nicht nur Aufschluß über die Qualität einer Schweißnaht, sondern helfen auch bei der Ausarbeitung der zweckmäßigsten Schweißtechnologie.



Abb. 46. Gammaaufnahme einer defekten Schweißnaht (durchleuchtet mit Gammastrahlen des Europiums 154)

Ein anderes Beispiel für die erfolgreiche Anwendung der Gammastrahlen ist die Prüfung von stumpfgeschweißten Nähten in Gas- und Erdölleitungen. In diesem Falle sind die Vorteile der Anwendung radioaktiver Präparate besonders augenfällig. Die Möglichkeit, sie auch im freien Gelände benutzen zu können, vereinfacht wesentlich die Prüfung von Stumpfnähten. Dieses Prüfverfahren wurde seit dem Bau der Gasleitung Daschawa—Kiew bei allen derartigen Bauten angewandt.

Der wirtschaftliche Nutzen, der sich aus der Verwendung radioaktiver Isotope als Prüfverfahren für Schweißverbindungen im Maschinenbau und Bauwesen ergibt, beträgt viele Millionen Rubel pro Jahr. Diese Einsparungen ergeben sich z. B. beim Bau von Gasleitungen dadurch, daß die mechanische Prüfung von Stumpfschweißnähten durch das Durchleuchtungsverfahren ersetzt werden kann. Die mechanischen Prüfungen sehen Dehnung, Biegung usw. vor. Bei der Durchleuchtung

mit Gammastrahlen kann für jede untersuchte Schweißnaht eine Einsparung von über 200 Rubel erzielt werden. Die Anzahl der zu untersuchenden Schweißungen in Gas- und Erdölleitungen ist groß, und daher betragen die Einsparungen Millionen Rubel.

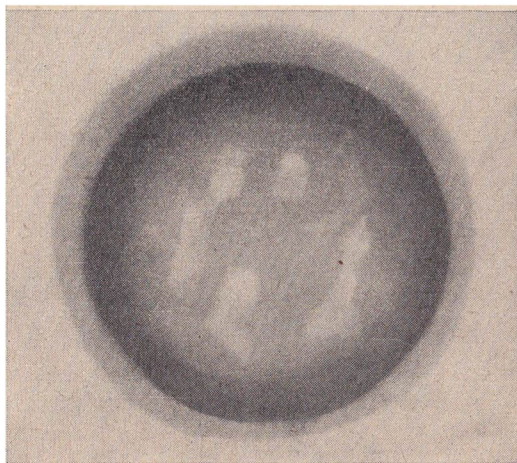
Berücksichtigt man außerdem die höhere Betriebssicherheit der Gasleitungen, die sich aus der besseren Qualität ergibt, so kann man sich eine Vorstellung von dem gewaltigen wirtschaftlichen Nutzen machen, der durch Anwendung von Isotopen erzielt wird.

Bei der Durchleuchtung von Gußteilen für Maschinen kann das Vorhandensein von Poren, Blasen, Schwundlunkern, Rissen und anderen Defekten festgestellt werden.

Das Auffinden solcher Gußfehler in Maschinenteilen vor ihrer Bearbeitung ermöglicht es, die unproduktiven Ausgaben zu senken und die Qualität der Erzeugnisse zu verbessern.

In der Industrie wird die Durchleuchtung mit Gammastrahlen auch dazu verwendet, hochlegierte Stahlbarren wertvoller Stahlsorten zu prüfen. Durchleuchtet werden auch große Maschinenteile, z. B. Preßgestelle an Stellen, an denen das Auftreten von Gußfehlern am wahrscheinlichsten ist.

Abb. 47. Gammastrahlen eines Roheisengusses, der Luftblasen aufweist (durchleuchtet mit Gammastrahlen des Kobalts 60)



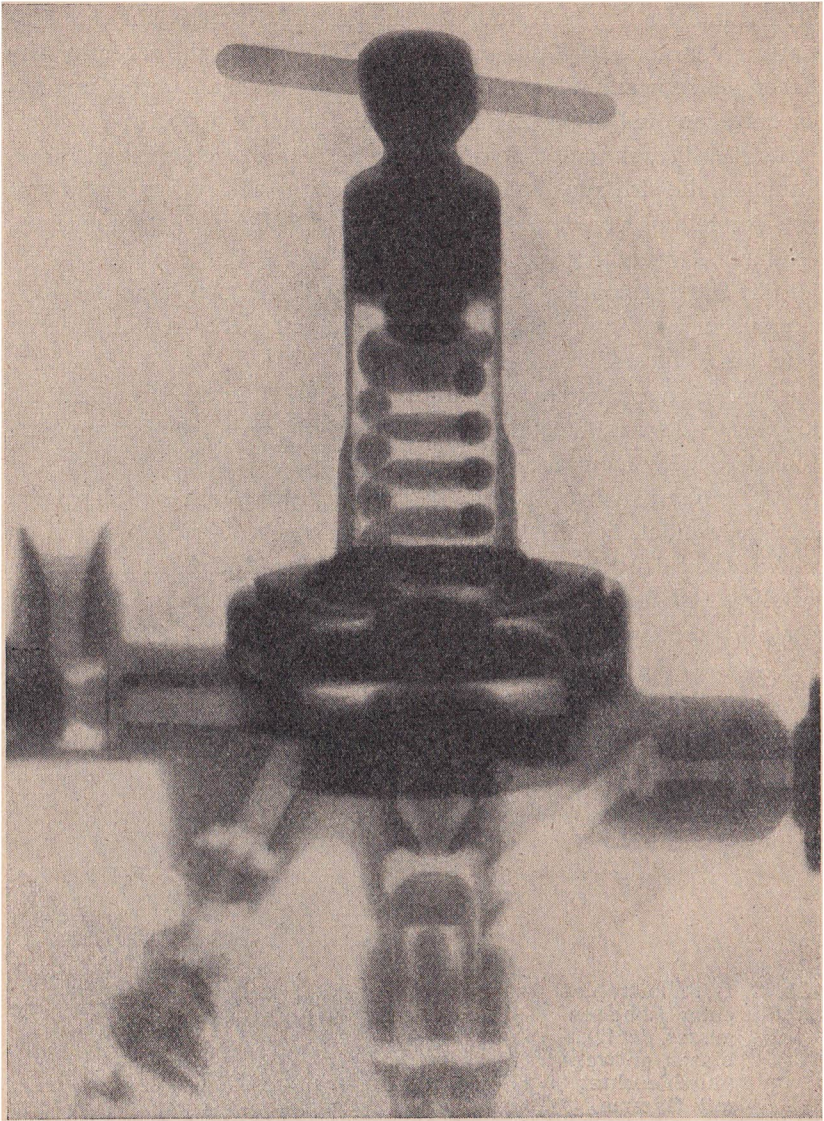


Abb. 48. Gammaaufnahme eines Reduzierventils (durchleuchtet mit Gammastrahlen des Europiums 154)

Interessant ist die Anwendung des Durchleuchtungsverfahrens mit Hilfe von Gammastrahlen zur Feststellung der Richtigkeit des Zusammenbaues von Maschinenmechanismen und zur Untersuchung des Verschleißes von Maschinenteilen ohne Demontage dieser Maschinen. Abb. 48 zeigt die Gammaaufnahme eines Reduzierventils; man sieht sehr deutlich alle Elemente des Ventils.

Die angeführten Beispiele zeugen von einem großen wirtschaftlichen Nutzen der Gammadefektoskopie. Eine Vervollkommnung und Weiterentwicklung der Gammadefektoskopie wird ihr Anwendungsgebiet erweitern und dazu beitragen, die Qualität der Erzeugnisse zu verbessern und den Ausschuß zu senken. Somit wird sie helfen, größere Einsparungen zu erzielen.

Radioaktive Isotope bei der Aufsuchung nutzbarer Mineralien

Beim Niederbringen von Bohrungen zur Aufsuchung und Erkundung nutzbarer Mineralien ist eine genaue Kenntnis des mit ihnen durchfahrenen geologischen Profils unerlässlich. Man muß nicht nur über die durchbohrten Gesteine und ihre Lagerungsverhältnisse unterrichtet sein, sondern muß sich vor allem möglichst umfassende Angaben über alle angetroffenen Mineralien verschaffen. Dies gilt insbesondere für Erdöl- und Erdgasbohrungen, die sowohl zur Erkundung als auch zur nachfolgenden Gewinnung von Öl und Gas niedergebracht werden.

Um Auskunft über die Schichtenfolge einer Lagerstätte zu erhalten, brachte man früher die Bohrungen mit möglichst weitgehender Zutageförderung von Proben der durchbohrten Gesteine nieder. Eine derartige Bohrmethode ist außerordentlich langwierig. Zum Herausholen eines Kernes des durchbohrten Gesteines von 2 bis 3 m Länge aus einer Tiefe von 1 km und mehr (derartige Bohrungen sind heute zur Erkundung und Erschließung von Öl- und Gaslagerstätten üblich) benötigt man bis zu 6 Stunden und mehr. Die niedrigen Bohrgeschwindigkeiten bei den Untersuchungen der Bohrproben schränkten den Verlauf der Erkundung und Gewinnung nutzbarer Mineralien — besonders bei Öl und Gas, die vorwiegend durch Tiefbohrung erfolgen — stark ein.

Die in den letzten Jahren auf dem Gebiet der physikalischen Untersuchungsmethoden erzielten Erfolge gestatteten es, die Methoden der Untersuchung geologischer Bohrprofile grundlegend zu verändern. Im Zusammenwirken von Wissenschaft und Industrie wurden neue geophysikalische (elektrische, radioaktive, thermische u. a.) Methoden zur

kernlosen Untersuchung des geologischen Profils und des technischen Zustandes von Bohrlöchern entwickelt.

Die geophysikalischen Methoden ermöglichen es, vollständige Angaben über das geologische Profil einer Bohrung und der angetroffenen nutzbaren Mineralien (ohne kostspielige Zutageförderung von Gesteinsproben) durch Messung der physikalischen Eigenschaften dieser Gesteine (des spezifischen elektrischen Widerstandes, der Radioaktivität, der magnetischen Eigenschaften u. a.) im Bohrloch zu erhalten. Dabei erlauben es die geophysikalischen Methoden in den meisten Fällen, mit bedeutend größerer Genauigkeit nutzbare Mineralien festzustellen, ihren Gehalt zu schätzen und durch Gegenüberstellung der einzelnen Bohrprofile überaus zuverlässige Auskünfte über den Bau des Erdinneren und die Lagerungsverhältnisse der zu erkundenden Objekte zu erhalten.

Die Anwendung geophysikalischer Methoden der Bohrlochmessung erlaubte es, die Technik der Tiefbohrung umzugestalten und, indem man in den meisten Fällen zum kernlosen Bohren überging, Geschwindigkeiten im Niederbringen von Bohrlöchern zu erreichen, die die früheren um ein Vielfaches übertreffen. Dies erhöhte die Leistung der Erkundung und Erschließung von Öl- und Gaslagerstätten und erbrachte eine Einsparung an Mitteln im Werte vieler Millionen.

Von den geophysikalischen Methoden der Bohrlochmessung erlangen zur Zeit besondere Bedeutung die radioaktiven Methoden, die auf den neuzeitlichen Ergebnissen der Kernphysik und -technik begründet sind. Mit diesen Methoden kann man Gesteine ohne ihre Zutageförderung untersuchen durch Messung der γ -Strahlung der in den Gesteinen in verschiedener Menge enthaltenen natürlichen radioaktiven Elemente, durch Messung der γ -Strahlung von radioaktiven Stoffen, die man künstlich in das Gestein einführt, oder durch Messung der γ -Strahlung, die in den Gesteinen bei ihrer Bestrahlung mit Neutronen entsteht. Ein großer Vorzug der radioaktiven Methoden zur kernlosen Untersuchung von Bohrprofilen vor anderen geophysikalischen Methoden besteht darin, daß es prinzipiell möglich ist, die chemische Zusammensetzung von Gesteinen zu bestimmen sowie Profile von verrohrten Bohrlöchern zu untersuchen. Dies gewährleistet eine überaus vollkom-

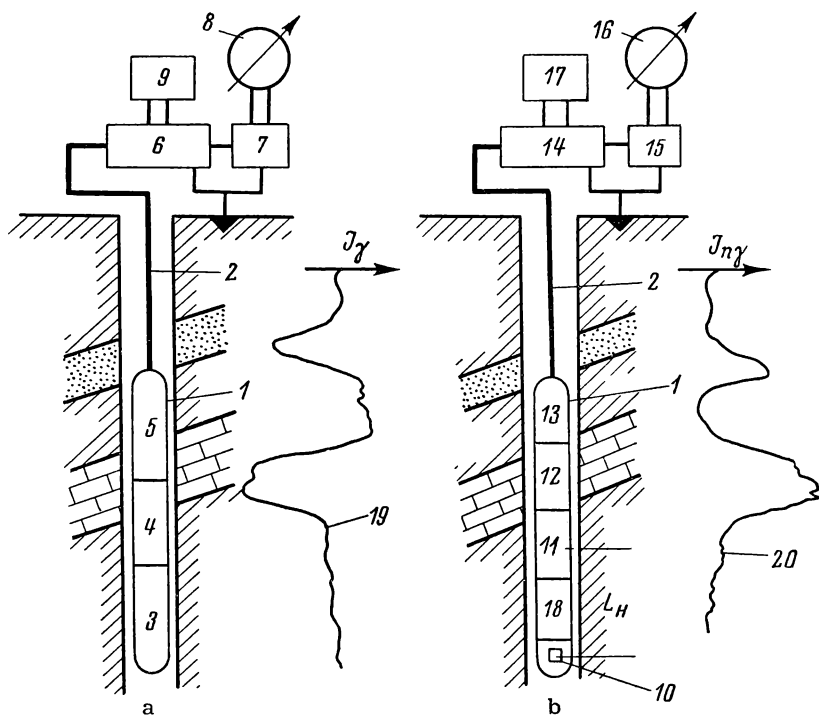


Abb. 49. Prinzipschemata der Messung natürlicher (a) und künstlich erzeugter (b) γ -Strahlung
 1 — Bohrlochsonde; 2 — Kabel; 3 — Indikator der natürlichen γ -Strahlung; 4 — Hochspannungsgenerator; 5 und 6 — Verstärker der registrierten natürlichen γ -Strahlung; 7 — Strahlungszähler; 8 — Registriergerät; 9 — Stromversorgungsgerät; 10 — Neutronenquelle; 11 — Indikator der γ -Strahlung; 12 — Hochspannungsgenerator; 13 und 14 — Verstärker der γ -Strahlung; 15 — Strahlungszähler; 16 — Registriergerät; 17 — Stromversorgungsgerät; 18 — Filter; 19 — Kurve der Intensität der natürlichen γ -Strahlung (I_γ); 20 — Kurve der Intensität der künstlich erzeugten γ -Strahlung ($I_n \gamma$)

mene Untersuchung der Gesteine wie auch die Messung von alten, verrohrten Bohrlöchern und von solchen, die infolge Gebirgsnachfalles unter schwierigen Verhältnissen niedergebracht wurden. Die Messung derartiger unverrohrter Bohrlöcher nach anderen Methoden ist mit bedeutenden Schwierigkeiten verbunden.

Bei der Untersuchung von Bohrprofilen auf der Grundlage natürlicher γ -Strahlung wird in das Bohrloch eine Meßvorrichtung hinabgelassen (Abb. 49), bestehend aus einem Strahlungsmeßgerät (3), das über einen Verstärker mit einem auf der Erdoberfläche aufgestellten Registriergerät (8) verbunden ist. Durch Hinablassen des Gerätes (1) in das Bohrloch erhält man ein Diagramm, das die Veränderung der Strahlungsintensität im Bohrloch anzeigt (19, Abb. 49 a). Da der Gehalt an natürlichen radioaktiven Elementen in den verschiedenen Gesteinen unterschiedlich ist, kann man nach der erhaltenen Kurve der Intensitätsänderung der natürlichen γ -Strahlung feststellen, welche Gesteine in welcher Tiefe durchbohrt wurden. So zeichnen sich z. B. Tone, Kalisalze und andere Gesteine, die eine erhöhte Anzahl natürlicher radioaktiver Elemente — Uran, Thorium und deren radioaktive Zerfallsprodukte, ferner das radioaktive Kaliumisotop — enthalten, als Maxima natürlicher γ -Strahlung ab. Im Gegensatz dazu sind Kalksteine, Sandsteine und Steinkohlen, die schwache Radioaktivität besitzen, durch Minima gekennzeichnet. Insbesondere sind durch Minima natürlicher radioaktiver γ -Strahlung auch die Sammelräume von Erdöl und Erdgas erkenntlich, was es ermöglicht, diese Methoden im großen Umfang zur Untersuchung der Profile von Öl- und Gasbohrungen anzuwenden. Besonders gute Ergebnisse bringt diese Methode bei der Aufsuchung von Kalisalzen, die als Rohstoff für die Düngemittelindustrie dienen. Auf Abb. 50 ist das Diagramm der natürlichen γ -Strahlung im Bohrloch einer Kalisalzlagerstätte gezeigt. Diese Salze (ihre Tiefenlage und Mächtigkeit) sind deutlich als Maxima der γ -Strahlung erkennbar. Die Bohrlochmessung kann bedeutend verbessert werden, wenn außer der natürlichen γ -Strahlung auch die durch Beschießung der Gesteine mit Neutronen künstlich hervorgerufene γ -Strahlung gemessen wird. Zu diesem Zweck wird mit dem Strahlungsmeßgerät eine Polonium-Beryllium-Neutronenquelle in das Bohrloch hinabgelassen (10, Abb. 49 b). Die von der Quelle ausgestrahlten Neutronen dringen in das das Gerät umgebende Gestein ein, wobei ihre Geschwindigkeit rasch nachläßt, und werden von den Atomkernen der das Gestein bildenden Elemente eingefangen. Beim Einfangen der Neutronen ent-

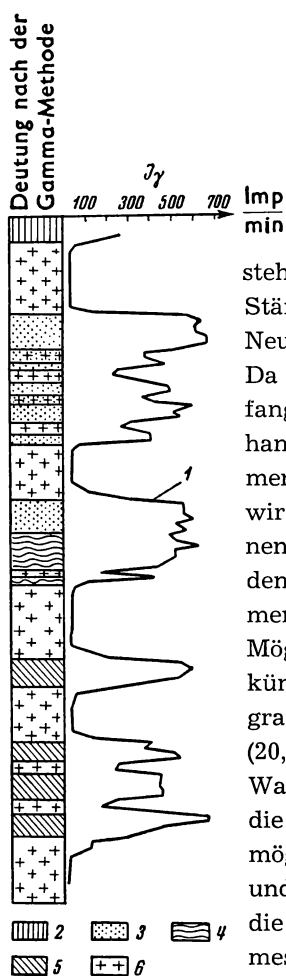


Abb. 50. Bestimmung von Kalisalzen in hydrochemischen Sedimenten mit Hilfe der γ -Strahlung

1 — Kurve der Intensität der natürlichen γ -Strahlung; 2 — Karnallit; 3 — bunter Sylvinit; 4 — Streifen-Sylvinit; 5 — roter Sylvinit; 2, 3 und 4 — Kalisalze; 6 — Steinsalze (nach W.A.Schapak)

steht eine γ -Strahlung, deren Intensität von der Stärke der Abbremsung und des Einfanges der Neutronen abhängt.

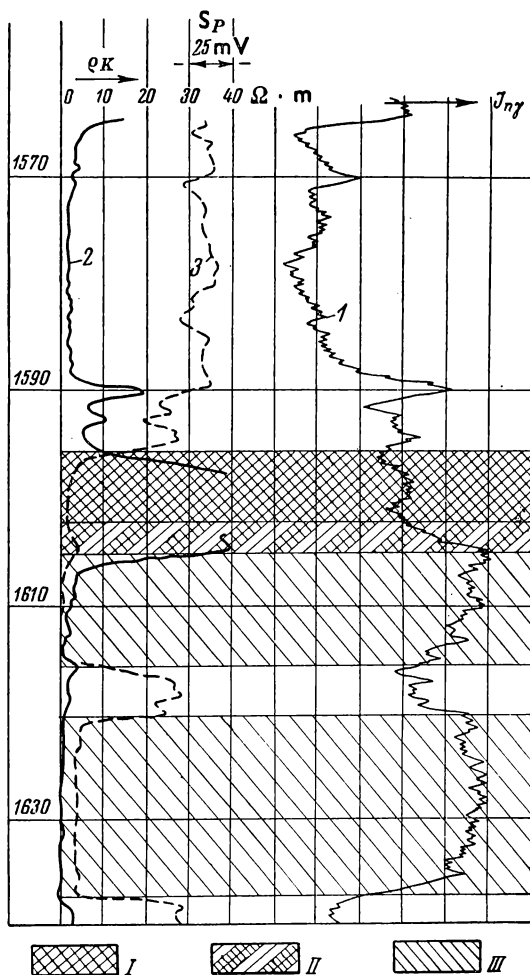
Da der Vorgang der Abbremsung und des Einfanges von Neutronen im Grunde von dem Vorhandensein dieser oder jener chemischen Elemente im Gestein und von deren Menge bestimmt wird, hängt die Zahl der eingefangenen Neutronen und folglich auch die Intensität der entstandenen γ -Strahlung von der chemischen Zusammensetzung des Gesteines ab. Das bietet die Möglichkeit, durch Messung der Intensität der künstlich hervorgerufenen γ -Strahlung ein Diagramm zu erhalten, das das Bohrprofil aufgliedert (20, Abb. 49 b).

Wasserstoff bremst Neutronen am stärksten ab; die Neutronenmethoden der Bohrlochmessung ermöglichen es deshalb, einerseits hochporöse erdöl- und wasserführende Gesteine zu unterscheiden, die sich auf den Diagrammen als Minima der gemessenen Strahlung abzeichnen, und andererseits gasführende und wenig poröse Gesteine zu

unterscheiden, die durch ein Strahlungsmaximum charakterisiert sind. Das Vorhandensein einer großen Menge Chlor im Wasser, das die Neutronen intensiv absorbiert, ermöglicht es, ölführende Gesteine von mineralisierten wasserführenden Gesteinen zu unterscheiden. Die Lös-

sung dieser Aufgabe hat eine überaus große Bedeutung für die Erdöl-industrie, da ohne Kenntnis der Lage der Erdöl/Wasser-Grenze wäh- rend des Abbaues ein rationelles Ausbeuten der Öllagerstätte nicht möglich ist.

Abb. 51. Beispiel zur Un- terscheidung des ölführenden Tei- les vom wasser- führenden Teil einer Schicht
1 — Kurve der Intensität der durch Bestrah- lung der Gesteine mit Neu- tronen künstlich hervorgerufe- nen γ -Strahlung;
2 — Kurve des elektrischen Wi- derstandes; 3 — Kurve des Ei- genpotentials;
I ölführendes Gestein, II wasser- und ölfüh- rendes Gestein, III wasserfüh- rendes Gestein



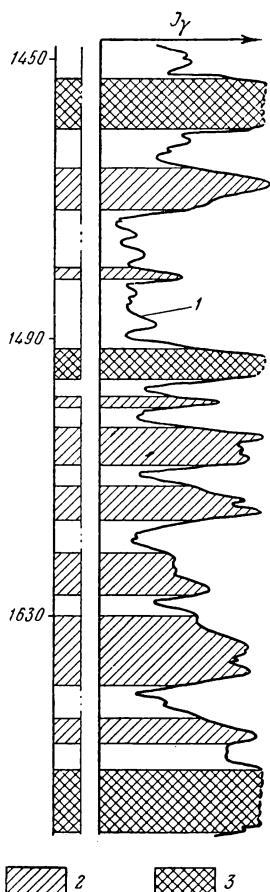


Abb. 52. Beispiel der Feststellung von Schichten erhöhter Porosität und Durchlässigkeit eines erbohrten Profiles nach der Isotopenmethode

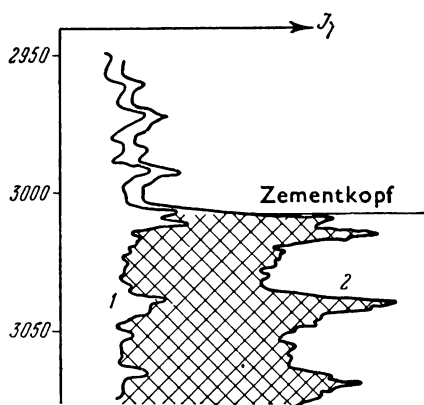
1 — Kurve der Intensität der γ -Strahlung, registriert in einem Bohrloch, das unter Verwendung einer Spülung mit zugesetzten radioaktiven Isotopen niedergebracht wurde; 2 — Gesteine erhöhter Durchlässigkeit; 3 — Gesteine hoher Durchlässigkeit. (Die Gesteine erhöhter und hoher Durchlässigkeit zeichnen sich auf der Intensitätskurve als Maxima ab.)

Diese Aufgabe konnte nur unter Anwendung der Neutronenmethoden erfolgreich gelöst werden. Auf Abb. 51 (Kurve 1) ist das Beispiel eines Diagramms der Neutronenuntersuchung einer Ölbohrung angeführt. Das Intensitätsmaximum der künstlich hervorgerufenen γ -Strahlung bezeichnet deutlich die Lage des wasserführenden Teiles der ölführenden Schicht. Die Neutronenmethoden können auch mit Erfolg bei der Aufsuchung anderer nutzbarer Mineralien, z. B. Bor, Mangan, Quecksilber u. a., angewendet werden.

Beim Niederbringen eines Bohrloches ergeben sich oft Probleme, deren wirksame Lösung durch Anwendung radioaktiver Isotope ermöglicht wurde. So ist es z. B. in vielen Fällen erforderlich, zu wissen, wo eine poröse, die Spülung schluckende Schicht im Bohrprofil liegt. Diese Gesteine können ihrerseits gute Sammelräume für Erdöl und Erdgas darstellen. Durch Verwendung einer Spülung mit zugesetzten radioaktiven Isotopen beim Niederbringen des Bohrloches kann man auf Grund der erhöhten Radioaktivität genau die Lage durchlässiger Gesteine feststellen, in die ein radioaktives Isotop eingedrungen ist. Die Lage dieser Zonen (der durchlässigen Gesteine) ist leicht festzustellen, wenn man das Diagramm der Strahlungsintensität (Abb. 52) mit dem oben beschriebenen Gerät (Abb. 49 a) aufgezeichnet hat.

Nach der Verrohrung des Bohrloches und der Zementierung des Raumes außerhalb der Rohre zum Abschließen gas-, öl- und wasserführender Schichten muß festgestellt werden, bis zu welcher Höhe außerhalb der Rohre der Zement aufgestiegen ist und wie die Qualität der Zementierung ist. Dies kann man leicht erkennen, wenn in den Zement ein radioaktives Isotop gegeben wird. Die Lage des aktivierten Zementes zeichnet sich auf dem Diagramm der γ -Strahlung als Zone erhöhter

Abb. 53. Beispiel der Bestimmung des Zementkopfes außerhalb der Verrohrung nach der Isotopenmethode
1 – Kurve der Intensität der γ -Strahlung, aufgezeichnet vor der Zementierung des Bohrloches;
2 – dieselbe Kurve nach der Zementierung, wobei dem Zement radioaktive Isotope beigegeben wurden. Die schraffierte Fläche des Diagramms, in deren Bereich die Kurven 1 und 2 auseinanderlaufen, bezeichnet den zementierten Teil des Bohrloches.



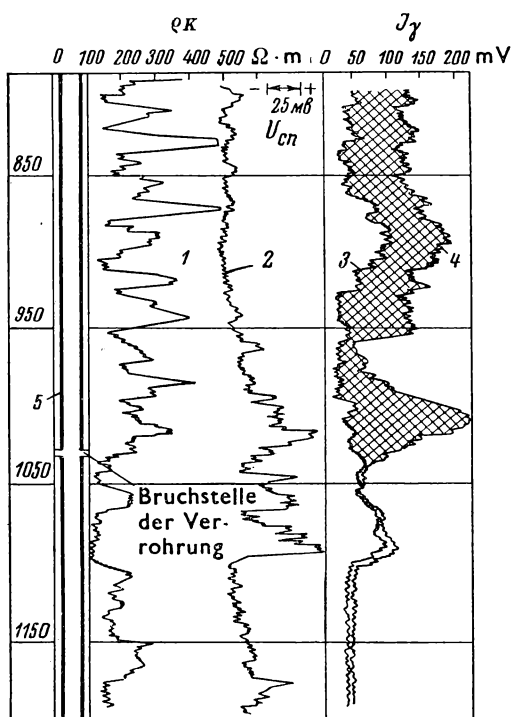


Abb 54. Beispiel der Bestimmung einer Bruchstelle in der Verrohrung und der Zone schlechter Zementierung außerhalb der Verrohrung. Schlechte Zementierung zeichnet sich durch erhöhte Strahlungsintensität in der Kurve aus, die nach Beigabe einer aktivierten Lösung aufgezeichnet wurde 1 – Kurve des scheinbaren Widerstandes; 2 – Kurve des Eigenpotentials; 3 – Kurve der Intensität der natürlichen γ -Strahlung; 4 – dieselbe Kurve nach Beigabe der aktivierten Lösung; 5 – Standrohr

Strahlungsintensität ab (Abb. 53). Auf die gleiche Weise kann man leicht feststellen, an welchen Stellen außerhalb der Verrohrung infolge schlechter Zementierung Wasser zirkuliert, indem man hinter die Rohre radioaktive Lösungen gibt (Abb. 54). Ferner kann man so Spalten, die infolge hydraulischer Wirkungen in einer Schicht entstanden sind, feststellen, ölführende Gesteine von wasserführenden unterscheiden usw. Um letztere Aufgabe zu lösen, wird in das Bohrloch eine aktivierte Flüssigkeit gegeben, die wahlweise in den wasser- oder den ölführenden Teil der Schicht eindringt.

Die weitgehende Anwendung der Kernmethoden der Bohrlochmessung in der Erdölindustrie gestattete es, die kernlose geologische Unter-

suchung von Bohrprofilen und ihres technischen Zustandes bedeutend zu verbessern. Auf Grund der Ergebnisse dieser Methoden wurden z. B. im Gebiet der Lagerstätten auf der Halbinsel Apscheron zahlreiche alte, stillgelegte Bohrungen wieder in Betrieb genommen und aus ihnen Hunderttausende von Tonnen Erdöl gewonnen.

Auf einigen Erdöllagerstätten wurden durch radioaktive Methoden produktive Horizonte in Kalksteinen und Dolomiten festgestellt. Diese Methoden gestatteten es auch, ölführende Schichten in Karbonat-Sulfat-Ablagerungen bei Perm sicher zu finden. Die Verwendung von Isotopen erhöhte die Zuverlässigkeit der Kontrolle des technischen Zustandes von Bohrlöchern und ermöglichte ihre langdauernde Nutzung zur Gewinnung von Öl und Gas.

Die radioaktiven Methoden erlauben es somit, die Überwachung der Bohrlöcher beträchtlich zu verbessern und dadurch die Ergebnisse bei der Auffindung und Erkundung nutzbarer Mineralien zu verbessern. Sie enthalten große, noch nicht völlig genutzte Möglichkeiten. Ihre weitere Ausarbeitung und weitgehende Anwendung im Bergbau wird es ermöglichen, die Technik der Auffindung, Erkundung und Gewinnung nutzbarer Mineralien auf eine noch höhere Stufe zu stellen.

Die Anwendung radioaktiver Isotope in der Medizin

Radioaktive Isotope finden gegenwärtig breite Anwendung in der Medizin zur Diagnose und Heilung vieler Krankheiten. Bei der Verwendung von Isotopen zur Diagnose benutzt man sehr geringe (Indikator-) Mengen radioaktiver Isotope, so daß der Organismus des Patienten nicht geschädigt wird. Zur Heilung von Krankheiten werden naturgemäß ziemlich große Isotopendosen verwendet; die Strahlung dieser Isotope wirkt auf den Krankheitsherd ein und vernichtet ihn.

Aus der großen Anzahl vorhandener radioaktiver Isotope werden in der medizinischen Praxis zur Zeit nur einige wenige in größerem Umfange benutzt.

Die Halbwertszeit des radioaktiven Kobalts ^{60}Co beträgt 5,3 Jahre. Seine starke γ -Strahlung wird zur Heilung bösartiger Geschwülste verwendet. Vor der Entdeckung künstlicher radioaktiver Isotope wurden Geschwülste mit Röntgenstrahlen und γ -Strahlen des Radiums — eines natürlichen radioaktiven Stoffes — behandelt. Jetzt wird das Radium immer mehr von ^{60}Co , das eine Reihe von Vorzügen aufzuweisen hat, verdrängt. Radium ist ein seltenes und teures Element. ^{60}Co kann gegenwärtig praktisch in beliebigen Mengen hergestellt werden und ist bedeutend billiger. Die γ -Strahlen des Radiums haben keine einheitliche Energie, und es ist daher schwierig, die Dosis zu bestimmen, die der Organismus während der Bestrahlung erhält. Die γ -Strahlen des Kobalts sind dagegen fast homogen. Schließlich schädigen die Kobalt- γ -Strahlen den Organismus nicht so stark wie die Radiumstrahlen.

Außerdem verwandelt sich Radium während des radioaktiven Zerfalls in das radioaktive Gas Radon. Dieses kann in die Luft der Arbeits-

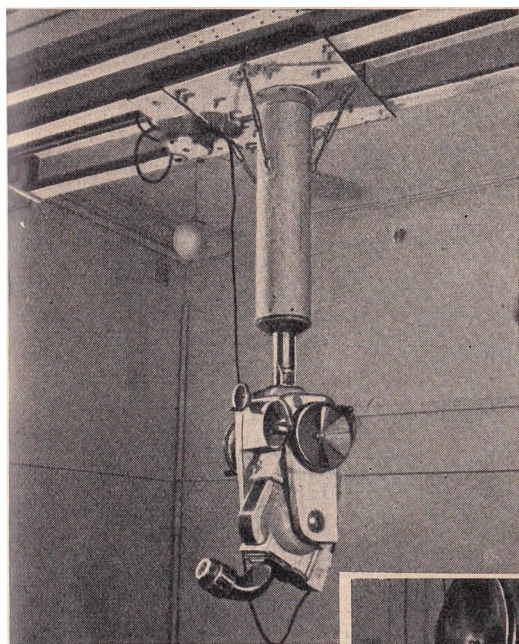


Abb. 55. Therapeutischer γ -Apparat (GUT) mit radioaktivem Kobalt. Die schmalen γ -Strahlenbündel treten aus dem Kanal des unteren hakenförmigen Teiles aus. Der Kanal wird mit Hilfe der seitlichen Kurbelräder geöffnet oder geschlossen

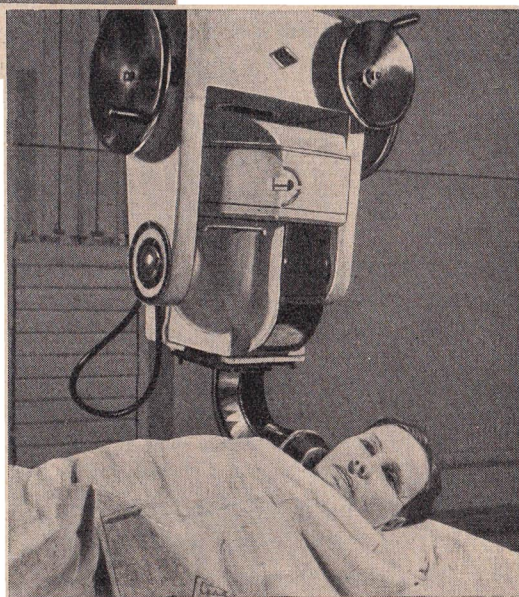


Abb. 56. Bestrahlung einer Hirngeschwulst mit γ -Strahlen des Kobalts

räume und durch die Atmungswege in den Organismus des Patienten oder des Bedienungspersonals gelangen. Beim Zerfall von Kobalt bildet sich kein radioaktives Gas — es ist daher weniger gefährlich. Die große Halbwertszeit (1590 Jahre) des Radiums ist der einzige Vorteil, den dieses Element gegenüber Co^{60} besitzt. Diesem Vorteil kommt aber keine große Bedeutung zu, da Co^{60} in den Apparaturen leicht ausgetauscht werden kann.

Man verwendet Co^{60} zur Heilung bösartiger Geschwülste, die sich entweder auf der Körperoberfläche oder im Inneren des Körpers befinden. Zur Heilung von Geschwülsten, die sich auf der Körperoberfläche befinden (z. B. Hautkrebs), verwendet man das Kobalt entweder in kleinen Röhrchen, die auf die Geschwulst gelegt werden, oder als Nadeln, die in die Geschwulst gesteckt werden. Die Röhrchen und Nadeln mit Radiokobalt bleiben in dieser Lage, bis die Geschwulst zerstört ist. Dabei sollen die gesunden Gewebe, die die Geschwulst umgeben, möglichst geschont werden.

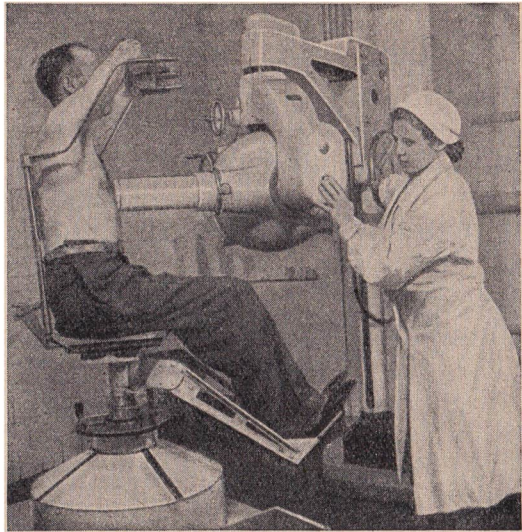
Befindet sich die Geschwulst im Körper (Magen- oder Lungenkrebs), so verwendet man spezielle γ -Apparate mit radioaktivem Kobalt (Abb. 55 und 56, 57). In einem solchen Apparat entsteht ein schmales, sehr intensives γ -Strahlenbündel, welches auf die Geschwulst gerichtet wird. Die Bestrahlung ruft keinerlei Schmerzen hervor — der Patient fühlt sie nicht.

Mit radioaktivem Kobalt wurde eine große Anzahl von Kranken behandelt, die an bösartigen Geschwülsten der Haut, der Mund- und Nasenhöhenschleimhaut, des Oberkiefers, des Kehlkopfes, der Speiseröhre, der Lunge, der Brustdrüsen und der Geschlechtsorgane zu leiden hatten.

Die Behandlung mit Radiokobalt wird selbständig oder öfter in Verbindung mit operativen Eingriffen vorgenommen. Im letzten Falle wird die Bestrahlung der Geschwulst vor oder nach der Operation durchgeführt.

Vielfach wird in der Medizin radioaktives Jod ^{131}J mit einer Halbwertszeit von 8 Tagen verwendet. Im Organismus des Menschen sammelt sich das radioaktive Jod, ebenso wie das gewöhnliche nichtaktive

Abb. 57. Bestrahlung
einer Magenge-
schwulst mit γ -
Strahlen des
Kobalts



Jod, hauptsächlich in der Schilddrüse an. Dabei zerfällt das Jod fortgesetzt unter Aussendung von β - und γ -Strahlen. Die β -Strahlen des Radiojods werden von der Schilddrüse und der Haut abgeschirmt, während die γ -Strahlen die Gewebe des Organismus durchdringen und außerhalb des menschlichen Körpers gemessen werden können.

Radioaktives Jod verwendet man bei der Bestimmung des funktionellen Zustandes der Schilddrüse. Der Patient trinkt eine Radiojodlösung, deren Menge einer diagnostischen Dosis entspricht. Das Radiojod geht schnell in das Blut über und wird in der Schilddrüse gespeichert. An den Hals des auf dem Rücken liegenden Patienten wird von Zeit zu Zeit ein γ -Zählrohr angelegt und die Intensität der Drüsenstrahlung gemessen (Abb. 58).

Die Messungen zeigen, daß die Menge des Radiojods in der Schilddrüse zuerst zunimmt, dann aber abzunehmen beginnt. Die Geschwindigkeit der Zunahme und die maximale Jodmenge in der Schilddrüse hängen von ihrem funktionellen Zustand ab. Bei gesunden Menschen steigt die Menge des Radiojods in der Schilddrüse in mäßigem Tempo an, erreicht

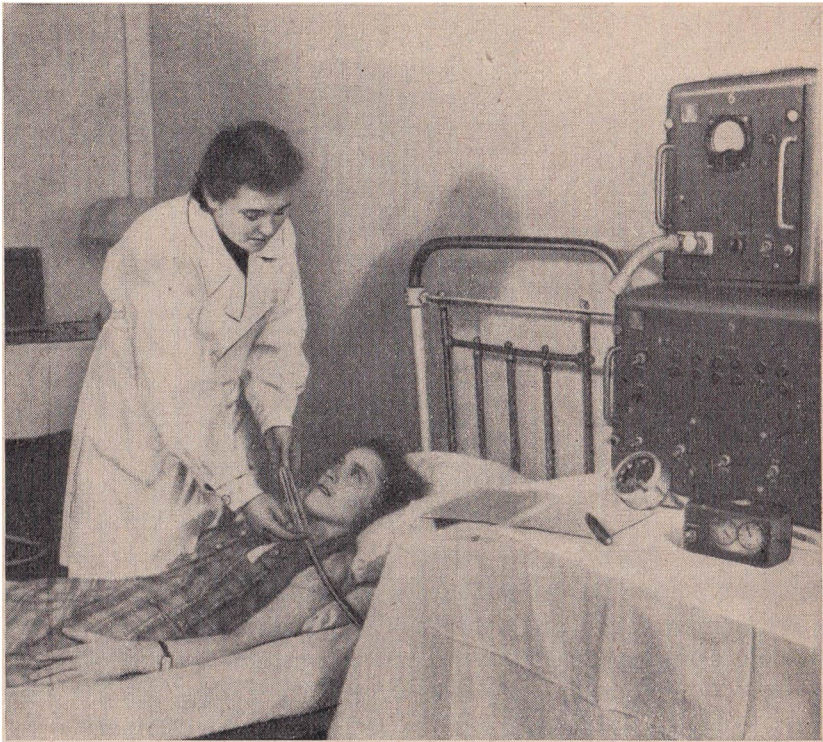


Abb. 58. Anlegen eines γ -Zählrohres an den Hals des Patienten bei der Untersuchung des funktionellen Zustandes der Schilddrüse mit Hilfe von radioaktivem Jod

etwa nach 24 Stunden ein Maximum und nimmt dann ebenso mäßig wieder ab.

Bei der Basedowschen Krankheit und bei anderen Krankheiten, die mit einer Intensivierung der Schilddrüsenfunktion verbunden sind, beobachtet man ein rasches Zunehmen der Radiojodmenge in der Drüse, ein schnelleres Erreichen des Maximums (nach 12 bis 6 Stunden oder noch schneller) und ein rasches Abnehmen der Menge des Radiojods in der Drüse.

Ist die Funktion der Schilddrüse abgeschwächt (das ist bei Myxödem

und einigen anderen Krankheiten der Fall), so zeigt eine Strahlungsmessung mit Hilfe von γ -Zählrohren einen langsamen und dauerhaften (2 bis 3 und mehr Tage währenden) Anstieg der Radiojodmenge in der Schilddrüse, eine geringe Steigerung des Jods und eine ebenso langsame Abnahme der Jodmenge in der Drüse.

Auf diese Art und Weise wird mit Hilfe von radioaktivem Jod sehr einfach und vollständig schmerzlos der funktionelle Zustand der Schilddrüse überprüft. Eine derartige Untersuchung wird nicht nur bei Schilddrüsenerkrankungen durchgeführt, sondern auch bei vielen anderen Krankheiten, da sich jede Störung im Organismus auf die Funktion der Schilddrüse auswirkt. Bei Herzerkrankungen und Hypertonie ist eine Abschwächung der Schilddrüsenfunktion zu beobachten. Diese Abschwächung ist um so stärker, je stärker die Hauptkrankheit wirkt. Bei der Genesung wird die Schilddrüsenfunktion wieder normal. Der gleiche Prozeß vollzieht sich bei Lungentuberkulose. Eine Verstärkung der Schilddrüsentätigkeit (eine schnellere Ansammlung des Radiojods in der Drüse) wird bei Hautentzündungen beobachtet. Nach der Heilung dieser Hautkrankheiten normalisiert sich auch die Funktion der Schilddrüse. Radioaktives Jod wird daher benutzt, um den Verlauf einer Krankheit zu beobachten und die Richtigkeit der Behandlung zu kontrollieren.

Man verwendet Radiojod außerdem zur Diagnose des Brustkropfes. Hat der Patient eine Radiojodlösung getrunken, so wird sich im Kropf mehr Jod ansammeln als in den benachbarten gesunden Körperteilen. Ein γ -Zählrohr, das an die Brust des Kranken gelegt wird, zeigt dann eine erhöhte γ -Intensität an. Eine solche Untersuchung ist wichtig, um die Natur und die Ursache des Kropfes festzustellen.

Man verwendet radioaktives Jod auch bei chirurgischer Entfernung der kranken Schilddrüse, um festzustellen, ob sie restlos entfernt ist. Ist ein Teil der Schilddrüse übriggeblieben, so wird sich in diesem Teil eine gewisse Menge Radiojod ansammeln, dessen Strahlung mit einem γ -Zählrohr festgestellt werden kann.

Um die Lage von Geschwülsten im Gehirn zu bestimmen, verwendet man manchmal auch Radiojod. Es gibt eine chemische Substanz —

Dijodfluoreszein —, die die Eigenschaft hat, sich in großen Mengen in Hirngeschwülsten anzusammeln. Die Atome des gewöhnlichen Jods können in diesem Stoff durch radioaktive Jodatome substituiert werden. Auf diese Weise bekommt man Dijodfluoreszein, dessen Jodatome markiert sind. Im Körper des Patienten sammelt sich der markierte Stoff in großen Mengen in den Geschwülsten und nur in kleinen Mengen in den gesunden Hirngeweben an. Mit einem β -Zähler kann das Gebiet der stärksten Strahlung und somit auch der Ort der Geschwulst aufgefunden werden.

Radioaktives Jod wird nicht nur zur Diagnose, sondern auch zur Behandlung von Krankheiten verwendet. Mit Radiojod wird die Basedowsche Krankheit behandelt. Die Behandlung besteht darin, daß der Kranke eine Radiojodlösung zu trinken bekommt, und zwar in Mengen, die der Heildosis entsprechen. Erfahrungsgemäß bessert sich nach einigen Einnahmen des Radiojods das Befinden des Kranken; das starke Herzklopfen, das zuvor den Kranken belästigte, wird geringer, das Zittern der Hände, die Glotzügigkeit und Kopfschmerzen gehen vorüber, der Schlaf wird ruhiger, die Arbeitsfähigkeit wird wiederhergestellt.

Die Behandlung nimmt etwa einen Monat in Anspruch. In einigen Fällen wird bei schwerer Erkrankung und entsprechender individueller Veranlagung des Kranken eine Wiederholung der Behandlung angeordnet. Bei dieser Behandlungsart ergeben sich in der Regel keine Komplikationen. Für die praktische Medizin hat der radioaktive Phosphor 32 (P^{32}), dessen Halbwertszeit 14,3 Tage beträgt, eine große Bedeutung. Im lebenden Organismus nimmt Phosphor an verschiedenen Stoffwechselprozessen teil. Insbesondere vollzieht sich ein intensiver Phosphoraustausch zwischen Erythrozyten und dem flüssigen Blutanteil. Fügt man dem Blut etwas Radiophosphor zu, so kann man diesen etwas später im Inneren der Erythrozyten auffinden. Die Menge des Radiophosphors, die sich in Erythrozyten ansammelt, hängt vom Zustande des Organismus ab. Die Bestimmung der Menge von Radiophosphor in Erythrozyten kann daher der Diagnostik dienen. Dieses Verfahren ist sehr bequem, da der radioaktive Stoff nicht in den Organismus des Patienten eingeführt wird.

In einem Reagenzglas wird etwas Blut des Patienten mit Radiophosphor versetzt. Eine Stunde lang bleibt das Reagenzglas im Thermostaten, und dann werden die Erythrozyten vom Radiophosphor, der im flüssigen Blutanteil geblieben ist, getrennt. Mit Hilfe eines β -Zählrohres wird die Menge des Radiophosphors in den Erythrozyten gemessen und daraus der prozentuale Anteil des Phosphors in den Erythrozyten bestimmt. Bei gesunden Menschen geht in die Erythrozyten etwa 18 bis 20% des Radiophosphors über. Liegt eine Erkrankung vor, so verringert sich der prozentuale Anteil des Radiophosphors in den Erythrozyten. So beträgt z. B. bei Lungentuberkulose dieser Anteil 13%, bei Herzkrankheiten nicht mehr als 10%.

Mit Hilfe von Erythrozyten, die Radiophosphor enthalten, bestimmt man die Blutmenge, die im Organismus der Patienten zirkuliert. Eine kleine Menge solcher markierter Erythrozyten wird in eine Vene des Patienten eingespritzt. Diese Erythrozyten stammen aus dem Blut desselben Patienten, und daher entstehen keinerlei Komplikationen nach der Einspritzung. Etwas später, nachdem sich die markierten Erythrozyten im Blut gleichmäßig verteilt haben, entnimmt man dem Finger des Kranken etwas Blut und bestimmt mit einem β -Zählrohr die darin enthaltene Menge des Radiophosphors. Kennt man die Menge des Radiophosphors in einem bestimmten Volumen der Erythrozyten vor und nach der Verdünnung im Blut, so kann man leicht ausrechnen, wie stark die markierten Erythrozyten verdünnt wurden. Multipliziert man die so ermittelte Zahl mit dem Volumen der in die Blutader eingeführten Erythrozyten, so erhält man die Menge des Blutes, die im Organismus des Patienten zirkuliert. Bei Kranken, die an Blutarmut und Blutkreislaufstörungen leiden, liegt die Menge des zirkulierenden Blutes unter dem normalen Niveau.

Bestrahlt man die Haut mit den β -Strahlen des Radiophosphors, so rufen die in den Körper eindringenden Strahlen die stärkste Wirkung auf den ersten zwei Millimetern unter der Hautoberfläche hervor. Radioaktiver Phosphor wird daher zur Heilung von Hautkrankheiten verwendet. Manche Menschen haben im Gesicht Muttermale, die mitunter sehr groß sein können. Ihre Beseitigung mit Röntgenstrahlen

und elektrischem Strom bleibt oft ergebnislos und führt zur Entstehung von Narben. Gegenwärtig werden Muttermale, die an der Oberfläche liegen, erfolgreich mit Radiophosphor beseitigt. Dabei wird ein bedeutendes Verblassen der Muttermale erreicht, ohne daß sich Narben bilden. Die Behandlung wird so durchgeführt, daß auf das Muttermal ein Stückchen Stoff gelegt wird, das genau entsprechend der Form des Muttermals ausgeschnitten und mit einer Radiophosphorlösung getränkt ist. Damit die Haut des Kranken nicht radioaktiv verseucht wird, legt man zwischen den Stoff mit Radiophosphor und der Haut ein Blatt Cellophan oder ein anderes Material, das einerseits die Radiophosphorlösung nicht durchläßt, andererseits aber die Strahlen nur wenig absorbiert. Ein solcher Radiophosphorapplikator wird auf dem Gesicht des Patienten mit Binden oder Heftpflaster täglich für einige Stunden befestigt. Die gesamte Kur nimmt 10 bis 12 Tage in Anspruch.

Die bei der Behandlung von Muttermalen mit Radiophosphor gemachten Erfahrungen zeigen, daß der Erfolg der Behandlung von der Beschaffenheit der Haut und vom Alter des Patienten abhängt. Muttermale auf unebener Haut lassen sich nur schwer beseitigen. Bei kleinen Kindern, die eine zarte Haut haben, verblassen die Muttermale meistens nach einmaliger Behandlung. Für Erwachsene ist in der Regel eine Wiederholungskur notwendig, die frühestens ein halbes Jahr nach der ersten Kur durchgeführt wird.

Mit ähnlichen Radiophosphorapplikatoren werden außer Muttermalen Ekzeme, Neurodermatitis und andere Hautkrankheiten behandelt.

Die Behandlung bösartiger Geschwülste an Augenlidern, an der Hornhaut oder an anderen Teilen des Auges durch äußere Bestrahlung mit Hilfe von Radiophosphorapplikatoren führt zur Heilung, ohne daß das Auge beschädigt wird. Früher, als man noch keine radioaktiven Isotope kannte, wurden solche Krankheiten ausschließlich chirurgisch, durch Entfernung des Auges, geheilt.

Manche Patienten leiden unter einer schweren Krankheit, bei der im Blut eine große Anzahl von Erythrozyten oder Leukozyten vorhanden ist. Die Behandlung dieser Blutkrankheiten, die als Erythremie und

Leukämie bezeichnet werden, war vor der Anwendung radioaktiver Isotope wenig wirkungsvoll. Gegenwärtig werden Erythremie und Leukämie erfolgreich mit radioaktivem Phosphor behandelt. Die Kranken trinken eine radioaktive Lösung. Der in den Körper eingebrachte Radiophosphor sammelt sich hauptsächlich in den Knochen an, in denen sich die blutbildenden Organe befinden. Durch Einwirkung der Radiophosphorstrahlen auf die blutbildenden Organe wird die Anzahl der Erythrozyten und Leukozyten herabgesetzt und die Gesundung des Blutes herbeigeführt.

In letzter Zeit hat man begonnen, Radiophosphor in Form des unlöslichen Chromphosphatsalzes zur Heilung einiger bösartiger Geschwülste zu verwenden, so beim Krebs der Harnblase, des Mastdarmes, der Brustdrüsen.

Die radioaktive Substanz wird in diesem Falle direkt in die Geschwulst gebracht. Durch Einwirkung der β -Strahlen des Phosphors wird die Geschwulst zerstört.

Die Behandlung mit radioaktivem Chromphosphat wird gewöhnlich mit einer äußeren Bestrahlung der Geschwulst mit Röntgenstrahlen oder γ -Strahlen des Co^{60} und auch mit chirurgischen Eingriffen verbunden.

Zur Heilung bösartiger Geschwülste (insbesondere zur Heilung des Krebses der Harnblase, des Mastdarmes, der Leber, von Gehirntumoren usw.) verwendet man auch radioaktives Gold in Form einer Kolloidlösung. Entsprechend der Art und dem Orte der Geschwulst wird das radioaktive kolloidale Gold auf verschiedene Weise in den Körper eingebracht: in große Venen, z. B. in die Vene, die die Leber mit Blut versorgt, bei Leberkrebs; in große Körperhöhlen, z. B. bei Bauchfell- oder Magengeschwülsten; in Arterien (bei einigen Gehirngeschwülsten oder unmittelbar in das Geschwulstgewebe). In allen Fällen erreicht das kolloidale Radiogold die Geschwulst, wird hier längere Zeit festgehalten und kann den Tumor bestrahlen. Wegen der kleinen Halbwertszeit des Radiogoldes (2,7 Tage) können in geringen Zeitabständen neue Portionen Radiogold eingeführt werden, wodurch sich die Möglichkeit ergibt, die Bestrahlungsdosis beliebig zu lenken.

Die Heilung bösartiger Geschwülste mit radioaktivem Gold findet neben der Anwendung von Radiophosphor immer größere Anerkennung.

Von den anderen radioaktiven Isotopen mit kurzer Halbwertszeit findet in der Medizin radioaktives Natrium breite Anwendung. Seine Halbwertszeit beträgt 15 Stunden. Man verwendet Radionatrium hauptsächlich zur Bestimmung der Geschwindigkeit des Blutkreislaufes.

Bei Herzkrankheiten, Rheumatismus, Hypertonie und vielen anderen Krankheiten ist eine Veränderung der Geschwindigkeit der Blutbewegung in den Blutgefäßen zu verzeichnen. Die Bestimmung der Geschwindigkeit des Blutumlaufes ist für die Diagnostik von großer Bedeutung. Zur Bestimmung der Kreislaufzeit des Blutes verwendet man oft Natrium. Eine kleine Menge des Radionatriums wird dem Patienten in die Armvene eingespritzt. In der anderen Hand hält der Kranke ein γ -Zählrohr (Abb. 59). Das Gerät spricht nur dann an, wenn das Radionatrium, das sich zusammen mit dem Blut bewegt, die Hand mit dem Zählrohr erreicht hat. Die Intensität der γ -Strahlen wird automatisch auf ein Papierband geschrieben. Bei der Untersuchung wird der Zeitpunkt registriert, an dem das Radionatrium in das Blut eingespritzt wird, und der Zeitpunkt, der dem Ansprechen des γ -Zählrohres entspricht.

Aus der Zeit zwischen diesen beiden Momenten kann die Blutgeschwindigkeit bestimmt werden.

Bringt man das γ -Zählrohr mit verschiedenen Körperteilen in Berührung — mit der Hand, dem Bein, der Brust in Nähe des Herzens —, so kann man die Blutgeschwindigkeit in verschiedenen Teilen des Blutkreislaufsystems bestimmen.

Bei gesunden Menschen entspricht die Geschwindigkeit des Blutes im großen Blutkreislauf bei Messungen mit dem Zählrohr in der Hand einer mittleren Kreislaufzeit von 11 bis 12 sec und im kleinen Blutkreislauf von 5 bis 7 sec (im letzten Falle befindet sich das Zählrohr an der Brust in Nähe des Herzens). Bei Herzkrankheiten und Hypertonie ist die Blutgeschwindigkeit verlangsamt und die Kreislaufzeit ent-

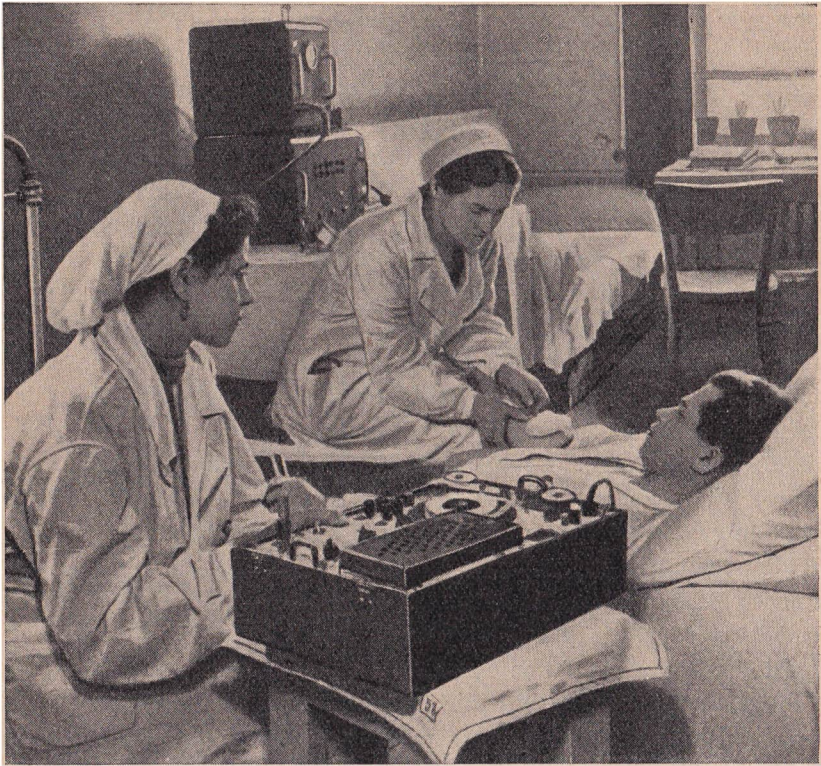


Abb. 59. Messung der Geschwindigkeit des Blutkreislaufes mit Hilfe von radioaktivem Natrium. In die Vene des rechten Armes des Patienten wird eine radioaktive Natriumlösung injiziert. In der linken Hand hält der Patient ein Zählrohr. Die Meßergebnisse werden vom Gerät auf einem Papierstreifen registriert

sprechend größer; je schwerer die Erkrankung ist, desto größer ist die Kreislaufzeit (sie kann 10 bis 30 und mehr sec betragen).

Mit Hilfe von Radionatrium kann auch die sogenannte Gewebedurchblutung aus der Geschwindigkeit des Natriumaustausches zwischen dem Blut und den Geweben bestimmt werden. So beobachtet man z. B. bei Patienten mit Herzfehlern einen langsameren Übergang des Radio-

natriums aus den subkutanen Geweben in die Blutgefäße. Bei Hypertonie verschlechtert sich der Blutabfluß aus den Muskeln in die Blutgefäße. Man verwendet Radionatrium bei Anschwellungen und Entzündungsprozessen im Organismus, bei Herz- und Lungenkrankheiten, d. h. bei Erkrankungen, die mit einer starken Veränderung des allgemeinen und lokalen (Gewebe-) Blutkreislaufes verbunden sind.

Mit Hilfe von Radionatrium kann nicht nur die Kreislaufzeit des Blutes bestimmt, sondern auch der Blutdurchfluß durch die Gefäße untersucht werden. Wenn irgendwo Gefäßverschlüsse oder geplatzte Blutgefäße vorhanden sind, so kann das in die Vene injizierte Radionatrium nicht das γ -Zählrohr erreichen, das hinter der gestörten Stelle mit dem Körper in Berührung gebracht wird. Diesem Verfahren der Diagnostik kommt große Bedeutung in der Chirurgie zu, wenn es um die Frage geht, ob bei Gangrän oder Endarteriitis das Bein amputiert werden soll oder nicht. In diesen Fällen kann der Arzt nur durch Anwendung von Radioisotopen die richtige Entscheidung treffen.

Radionatrium kann auch zur Untersuchung der Nierenfunktion bei solchen Krankheiten wie Nierentuberkulose, Nierensteinen u. a. verwendet werden. Die Untersuchung wird folgendermaßen durchgeführt: In die Armvene des Patienten wird Radionatrium injiziert. Dann wird aus jedem Harnleiter der Urin gesammelt und der Gehalt an Radionatrium untersucht. Die Niere, in deren Urin weniger Radionatrium vorhanden ist, funktioniert schlechter und ist erkrankt.

Zur Behandlung von Krankheiten wird Radionatrium nur in sehr beschränktem Maße benutzt. Man verwendet es hauptsächlich zur Heilung von Erkrankungen der Harnblasenschleimhaut. Durch die natürlichen Öffnungen wird in die Harnblase ein Gummiballon eingeführt und dann mit einer Radionatriumlösung gefüllt. Nach der Bestrahlung wird der Gummiballon entleert und aus der Harnblase wieder herausgezogen. Nach einigen solchen Bestrahlungen tritt die Heilung ein.

Wir haben die wichtigsten Anwendungsgebiete der Radioisotope in der Medizin beschrieben. Mit jedem Jahr aber vergrößert sich die Menge der zur Verfügung stehenden Radioisotope und die Anzahl der Anwendungsmethoden für Diagnose und Therapie. Bereits jetzt gibt es

neue Möglichkeiten für die Anwendung von radioaktivem Kobalt. Es werden spezielle Nylonfäden mit Radiokobalt angefertigt, mit denen das von bösartigen Geschwülsten befallene Gewebe durchzogen wird (bei Zungenkrebs). Man stellt auch Perlen aus Radiokobalt her und fertigt daraus Ketten an, um diese in Körperhöhlungen, die von bösartigen Geschwülsten befallen sind, z. B. in die Speiseröhre bei Speiseröhrenkrebs, einzuführen.

Bei der Anwendung all dieser neuen Verfahren wird das Ziel verfolgt, die Strahlenquelle möglichst nah an die Geschwulst heranzubringen, damit die Einwirkung auf die Geschwulst größer ist und die gesunden Gewebe in der Umgebung weniger geschädigt werden.

Bei der Behandlung von Muttermalen können Radiophosphorapplikatoren durch Applikatoren mit radioaktivem Strontium (dessen Halbwertszeit 25 Jahre beträgt) ersetzt werden, da wegen der verhältnismäßig kleinen Halbwertszeit des Phosphors seine Anwendung nur beschränkt möglich ist.

Radiostrontiumapplikatoren können auch zur Entfernung von Haaren bei Hautkrankheiten (z. B. bei Bartflechte) verwendet werden; die β -Strahlen des Radiostrontiums dringen in die Haut ein und schädigen die Haarzwiebeln. Die Haare gehen zugrunde und können leicht herausgerissen werden. Einen Monat später setzt der Haarwuchs wieder ein.

Der Versuch, Radiophosphor zur Entfernung von Haaren zu verwenden, verlief erfolglos. Die β -Strahlen dieses Radioisotops erreichen die Haarzwiebeln nicht intensiv genug und schädigen sie nicht. Nimmt man aber mehr Radiophosphor oder verlängert man die Bestrahlungszeit, so wird die Haut selbst geschädigt, was unzulässig ist. Aus diesen Gründen wird Radiophosphor in solchen Fällen nicht verwendet.

In letzter Zeit wird mit Hilfe von Radiophosphor verstärkt ein Verfahren zur Diagnose von Krebsgeschwülsten im Magen, Mastdarm und anderen Organen entwickelt. Dieses Verfahren besteht darin, daß in die erkrankte Körperhöhle ein spezielles β -Zählrohr in Form einer Magensonde oder Nadel eingeführt wird. Der Patient trinkt eine Radiophosphorlösung, die über die Eigenschaft verfügt, sich in Geschwülsten

in größeren Mengen anzusammeln als in gesunden Geweben. Durch die natürlichen Öffnungen wird das Zählrohr in die Körperhöhlung eingeführt oder als Nadel direkt in die Geschwulst gesteckt. Die Zählrohre registrieren die β -Strahlen des Radiophosphors, das sich in der Geschwulst angesammelt hat. Derartige Sonden- und Nadelzählrohre stehen bereits zur Verfügung; mit ihnen werden probeweise Untersuchungen durchgeführt.

In letzter Zeit fanden die Radioisotope des Thuliums, Europiums, Zäsiums und andere Anwendung als Quellen weicher γ -Strahlen für die Röntgenoskopie. Die mit Hilfe dieser Isotope angefertigten Bilder des Brustkorbes und anderer Körperteile sind in ihrer Qualität völlig zufriedenstellend. Die Isotope selbst befinden sich in kleinen, leicht transportablen Kistchen. Solche γ -Quellen sind sehr bequem und können in Verbindung mit Leuchtschirmen in jedem beliebigen verdunkelten Raum zur Anwendung gelangen; hierdurch unterscheiden sie sich in günstiger Weise von den umfangreichen Röntgenapparaten.

Anwendung des Verfahrens markierter Atome in der Biologie und Landwirtschaft

Durch Anwendung radioaktiver Isotope in der Biologie und Landwirtschaft konnten völlig neue Möglichkeiten zur Untersuchung von Problemen erschlossen werden, die noch bis vor kurzem als unlösbar galten.

In weniger als 10 Jahren hat das Verfahren der markierten Atome einschneidende Veränderungen in unseren Grundvorstellungen auf den Gebieten der Biochemie, Physiologie und Agrochemie hervorgerufen. Der alte Wunschtraum der Experimentatoren, die notwendigen Elemente und Verbindungen zu kennzeichnen und dann ihr Schicksal im Verlaufe der gesamten chemischen Umwandlungen beim Stoffwechsel zu verfolgen, wurde Wirklichkeit.

In diesem Aufsatz wird über einige Ergebnisse berichtet, die von sowjetischen Wissenschaftlern mit Hilfe von markierten Atomen erzielt wurden und die anschaulich die große Zukunft dieser Methode aufweisen.

Der Stoffwechsel im Organismus der Tiere

Die Anwendung von radioaktivem Kohlenstoff, Phosphor und Schwefel zur Untersuchung des Stoffwechsels im Gehirn bei verschiedenen funktionellen Zuständen des Organismus, besonders bei Erregungs- und Hemmungszuständen, erwies sich als sehr fruchtbar. Es wurde festgestellt, daß während der Narkose der Stoffwechsel im Gehirn aktiv verläuft, wobei die Prozesse der Synthese von energiereichen Verbindungen

dungen (Kohlehydrate, Nukleinsäure, Adenosintriphosphorsäure) den Abbau überwiegen; daraus erklärt sich die Wiederherstellung der Arbeitsfähigkeit des Organismus.

Bei einer durch elektrische Reize hervorgerufenen Übererregung nimmt die Menge der Adenosintriphosphorsäure im Gehirn ab, und es tritt eine Erschöpfung des Nervensystems ein, die eine Hemmung der unter Beteiligung labiler Phosphorverbindungen ablaufenden Reaktionen zur Folge hat.

Mit Hilfe von radioaktivem Kohlenstoff konnte bewiesen werden, daß die Geschwindigkeit der Erneuerung von Glykogen (tierische Stärke) im Gehirn etwa gleich oder sogar größer ist als die Geschwindigkeit seiner Erneuerung in der Leber und bedeutend größer ist als die Erneuerungsgeschwindigkeit des allgemeinen Kohlenstoffes des Hirngewebes. Damit wurde die frühere Auffassung widerlegt, nach der das Glykogen hauptsächlich strukturelle Bedeutung hat, und die wesentliche Rolle des Hirngewebeglykogens im gesamten Energiehaushalt des Gehirns bewiesen.

Mit Hilfe des Isotopenverfahrens konnten nicht nur die quantitativen Gesetzmäßigkeiten der funktionellen Biochemie des Gehirns festgestellt und die Rolle einzelner Verbindungen in der Gewährleistung der Funktionen des zentralen Nervensystems geklärt werden, sondern auch der Zusammenhang konnte untersucht werden, der zwischen spezifischen Reizerregern (Licht, Schall) und dem Stoffwechselliveau im entsprechenden Gehirnteil besteht. So wurde festgestellt, daß bei Reizung der Tiere mit Tonsignalen sich der Phosphoraustausch in der Gehirnrindensubstanz des Gehörzentrums verstärkt.

Es wurde ferner festgestellt, daß die biologisch aktive Substanz Adrenalin eine stimulierende Wirkung auf die Synthese von Glykogen bei gesunden ausgehungerten Tieren hat. Bei hungernden Tieren, die unter Zuckerkrankheit (Diabetes) leiden, beobachtet man die stimulierende Wirkung des Adrenalins nicht, da die Synthese des Leberglykogens vollständig aufhört. Das Glykogenmolekül stellt ein stark verzweigtes Netz dar, das aus Glykoseresten aufgebaut ist. Es zeigte sich, daß die Geschwindigkeit synthetischer Reaktionen in den äußeren Teilen des

Moleküls etwa 4- bis 7mal größer ist als in den inneren Teilen. Diese Besonderheit weist auf die Bedeutung der eigenartigen chemischen Struktur des Glykogens hin und erklärt den Mechanismus der Biosynthese von Kohlehydraten.

Als ein weiteres Beispiel der erfolgreichen Anwendung der Isotopenmethode kann die Untersuchung des Mechanismus der Avitaminose (Vitaminmangel) dienen, die zu ernsten Störungen im Stoffwechsel führt.

Die Untersuchung der Avitaminose mit Hilfe des radioaktiven Schwefelisotops ermöglichte die Feststellung, daß diese Krankheit nicht von einer bedeutenden Veränderung des Schwefelgehalts in verschiedenen Organen und Geweben der Tiere begleitet ist. Die Hauptschädigung des Organismus, die Keratinisation¹⁾, vollzieht sich nicht, wie früher angenommen wurde, durch Synthese neuer Eiweißstoffe, die viel Schwefel enthalten, sondern durch einen Umbau bereits vorhandener Eiweißstoffe in Oxydationsprozessen.

Mit Hilfe des radioaktiven Schwefelisotops konnten auch die Störungen im Eiweißstoffwechsel der Gewebe und Organismen von Tieren, die unter C- und D-Avitaminose leiden, festgestellt werden. Es wurde gezeigt, daß Rachitis oder D-Avitaminose eine Erkrankung des gesamten Organismus ist und nicht nur mit Störungen im Mineralstoffwechsel zusammenhängt, wie dies früher vielfach angenommen wurde. Die Störungen des Stoffwechsels, die dadurch hervorgerufen werden, daß in der Nahrung der Tiere keine Vitamine der D-Gruppe vorhanden sind, führen in allen Erkrankungsstadien zu einer fast zweimaligen Verminderung der Geschwindigkeit des Stoffwechsels der allgemeinen und auch der wasserlöslichen Skelettmuskeleiweißstoffe. Gleichzeitig tritt eine Verlangsamung des Eiweißstoffwechsels der Herzmuskeln und Nieren auf; die Intensität der Erneuerung der Lebereiweißstoffe bleibt unverändert.

Bei der C-Avitaminose oder dem Skorbut tritt gleichfalls eine bedeu-

¹⁾ Als Keratinisation bezeichnet man den Prozeß der Vergrößerung von Molekülen schwefelhaltiger Eiweißstoffe durch Bildung von Disulfidbrücken (S — S) zwischen den einzelnen Aminosäureketten.

tende Verminderung der Erneuerungsgeschwindigkeit der Eiweißstoffe in den Skelett- und Herzmuskeln, im Gehirn, in der Leber und den Nieren ein.

In den letzten Jahren wurden radioaktive Isotope in breitem Umfang zur Lösung einer Reihe praktischer Probleme der Tierzucht herangezogen. Es wurde festgestellt, daß die Intensität des Phosphorstoffwechsels bei hochproduktiven Milchkühen (Kostromskaja-Rasse) sich entsprechend der Erhöhung der Milchleistung verstärkt.

Es wurde weiterhin die Durchdringbarkeit der Plazenta für Phosphor und die Besonderheiten des Phosphoraustausches zwischen dem Mutterorganismus und der Frucht untersucht. Es wurde festgestellt, daß im Vergleich zum Blut des Gesamtorganismus der Phosphorgehalt in der Plazentaflüssigkeit zweieinhalbmal und im Blut der Frucht zweimal geringer ist. Anscheinend kann dies mit den Regulationsfunktionen der Plazenta erklärt werden.

Man fand, daß in einer gesunden Milchdrüse die einzelnen Euterteile nur über das Blut miteinander verbunden sind.

Untersuchungen mit Hilfe von radioaktiven Isotopen widerlegten die Ansicht, daß die wesentlichste Kalziumquelle zur Bildung der Schale von Hühnereiern das Futterkalzium ist, das direkt aus dem Verdauungstrakt in das Blut übergeht. Das gesamte Futterkalzium wird, bevor es sich in der Eischale ablagert, vom Skelett aufgenommen, von wo aus sein Verbrauch streng reguliert wird, wobei die Geschwindigkeit der Erneuerung des Huhnskeletts eng mit der Produktivität der Hühner zusammenhängt. Bei Hühnern, die im Laufe von zwei Monaten 25 Eier legten, erneuerte sich das Skelett fast vollständig (95%), während sich das Skelett bei Hühnern, die keine Eier legten, nur um 52% erneuerte.

Zur Vorbeugung und Bekämpfung der wichtigsten Hautkrankheiten bei Tieren verwendet man hauptsächlich Medikamente. Um sie in Abhängigkeit von dem jeweils erwünschten Effekt (Oberflächen- oder Tiefenwirkung) am wirksamsten anzuwenden, muß man wissen, wie schnell die am weitesten verbreiteten Arzneimittel die Haut verschiedener Tiere durchdringen.

Es stellte sich heraus, daß die Methode der radioaktiven Isotope am besten geeignet ist, das Eindringen von Arzneimitteln durch die Haut der Tiere schnell abzuschätzen.

In einer Vielzahl von Experimenten mit landwirtschaftlichen Nutztieren (Rinder, Schafe, Schweine, Kaninchen) bekam man neue Angaben über Wege und Geschwindigkeit des Eindringens einiger Arzneimittel durch die Haut in den Organismus. Es wurde festgestellt, daß Wasser sowie wäßrige Lösungen von Arzneimitteln und schwefelhaltige Verbindungen nicht durch die unbeschädigte Haut des Rindes eindringen können; eine Ausnahme bilden phenolhaltige wäßrige Lösungen, die die Zellen der Hautdecke zerstören und in den Organismus des Tieres eindringen.

Sonnenblumen- und Sojaöl, ölige Lösungen der Präparate und organische Lösungsmittel (Alkohole, Chloroform und Äther) dringen durch die Haarkanälchen und Kanäle der Talgdrüsen in den Organismus ein.

Das Eindringen der Arzneimittel in den Körper durch die Haut hängt wesentlich von der Temperatur ab. Bei einer örtlichen Erwärmung um 2 bis 3° vollzieht sich der Prozeß doppelt so schnell, bei einer örtlichen Abkühlung zweimal langsamer.

Keines der untersuchten Arzneimittel drang durch die Schweißdrüsen oder ihre Kanäle in den Körper ein.

Die gewonnenen Erkenntnisse spielen eine wichtige Rolle bei der Ausarbeitung von Vorbeugungs- und Bekämpfungsmaßnahmen gegen Larven der Dasselfliege, gegen Krätze und andere Hautkrankheiten.

Radioaktive Isotope werden jetzt auch mit Erfolg zur Lösung anderer veterinärmedizinischer Probleme herangezogen.

Bekanntlich ist die Brucellose der landwirtschaftlichen Nutztiere — eine Krankheit, die der Viehzucht einen großen Schaden zufügt — um so mehr gefährlich, als auch Menschen infiziert werden können. Obwohl bestimmte Erfolge bei der Heilung dieser Krankheit erzielt wurden, sind doch die gewöhnlichen Untersuchungsmethoden der Ausbreitung der Brucelloseinfektion im tierischen Organismus ziemlich kompliziert; außerdem liefern sie kein klares Bild der Entwicklungsdynamik dieser Krankheit.

Mit Hilfe von Radiophosphor wurden die Krankheitserreger — Brucellen — markiert und der Verlauf ihrer Ausbreitung und Ausscheidung aus dem Organismus untersucht. Es zeigte sich, daß die Zahl der in den Organismus eingeführten Brucellen während der ersten 3 bis 4 Tage ansteigt und dann nach und nach abnimmt. Die Ausscheidung der Infektionserreger aus den verschiedenen Organen und Geweben erfolgt ungleichmäßig. Die meisten Brucellen verbleiben im Halslymphknoten, Knochenmark und in der Milz.

Im Körper eines gegen Brucellose geimpften Tieres verbreiten sich die Bazillen langsamer, und der Organismus befreit sich schneller von der Infektion. Alle diese Erkenntnisse sind von Interesse für die praktischen Bedürfnisse der Veterinärmedizin und können bei der Prüfung neuer Arzneimittel und Heilmethoden Anwendung finden.

Die Frage, inwieweit Fische mineralischen Phosphor aus Wasserbecken verwerten können und welche Möglichkeiten sich in diesem Zusammenhang ergeben, blieb bisher vollständig ungeprüft. Diese Frage, der eine große praktische Bedeutung zukommt, konnte dank der Anwendung der Methode markierter Atome geklärt werden. Es wurde festgestellt, daß der Phosphor, der als Dünger ins Wasser eingebracht wird, nicht nur durch die Mundöffnung und Kiemen in den Fischorganismus eindringt, sondern auch durch die Körperoberfläche; das Wachstum und die Entwicklung des Organismus werden dabei beschleunigt. Im Fischorganismus verwandelt sich der anorganische Phosphor schnell in organischen. Er ist außerdem hauptsächlich in labiler Bindung in Eiweißverbindungen vorhanden.

Man fand ebenfalls, daß der in Pflanzen enthaltene Phosphor nicht direkt in das Wasser übergeht, sondern ausschließlich von Bakterien aufgenommen wird, die sich in den Pflanzen entwickeln. Die Bakterien werden von Einzellern gefressen, die ihrerseits den Fischen als Nahrung dienen.

Die Düngung von Teichen mit Düngern, die Mineralstoffe in organischer Form enthalten (gemähtes Gras), war erfolgreich: die Fischproduktion der Teiche stieg von 60 bis 80 kg/ha (natürliche Produktivität) bis auf 450 kg/ha.

Die Nährstoffaufnahme der Pflanzen und das Problem des Düngens

In den letzten Jahren wurde in breitem Umfange in wissenschaftlichen Instituten und Versuchsstationen Superphosphat, dessen Phosphor-Atome markiert sind, zum Studium der Nährstoffaufnahme von Pflanzen und der Anwendung von Düngemitteln verwendet. Der wichtigste Vorteil in der Anwendung von markiertem Superphosphat bei der Untersuchung der Termine und der Art und Weise des Düngens mit Phosphormineraldünger besteht in der Möglichkeit, unmittelbar zu beobachten, wie sich der Phosphoranteil, der als markierter Dünger in den Boden gebracht wurde, in den Pflanzen und auch im Boden verhält, und in der Möglichkeit einer direkten Bestimmung der Phosphormenge, die von den Pflanzen aus dem Dünger bezogen wurde.

Die Bestimmung des aus dem Dünger bezogenen Phosphors (oder anderer Elemente) nach der Isotopenmethode liefert genauere Ergebnisse als die gewöhnliche chemische Methode, die auf der Messung der Differenz beruht, die zwischen dem Phosphorgehalt der Pflanzen in Kontrollversuchen und den gedüngten Pflanzen vorhanden ist. Bekanntlich aber ist der Bedarf an Nährstoffen während verschiedener Entwicklungsphasen der Pflanzen verschieden. Um die einzelnen Düngungsmethoden richtig zu beurteilen, ist wichtig, nicht nur die gesamte Menge des bezogenen Düngers zu bestimmen, sondern sich auch ein klares Bild darüber zu verschaffen, welche Quellen für die Ernährung der Pflanzen maßgeblich sind. Eine derartige differenzierte Kontrolle wurde durch Anwendung von Isotopen möglich.

Mit Hilfe von markierten Atomen konnte man in Erfahrung bringen, wie die Phosphordünger am besten während der einzelnen Vegetationsperioden der landwirtschaftlichen Kulturen verteilt werden müssen. So stellte sich heraus, daß es im Anfangsstadium des Pflanzenwachstums am günstigsten ist, den Dünger lokal in die Saatsfurchen oder Nester in unmittelbare Nähe der Samen einzubringen.

Einige Autoren schlagen vor, alle Baumwollsaamen mit Superphosphat zu bepudern, wobei sie annehmen, daß alle Pflanzen im Anfangsstadium ihrer Entwicklung Phosphor aufnehmen. Frühe Einbringung von

Phosphatdüngern während der Aussaat ist ein unvollkommenes Verfahren, da nur ein verhältnismäßig geringer Prozentsatz der Pflanzen diese Düngerherde verwerten kann. Die Wahrscheinlichkeit eines schnell eintretenden Kontaktes mit dem Düngerherd ist bei gering entwickeltem Wurzelsystem der Baumwollkeime sehr gering.

Eine der besten Formen des Phosphatdüngers zur Einführung in die Saatsfurchen ist granuliertes Superphosphat. Granulierter Dünger kann besser gestreut werden, er kann bequemer in geringen Mengen in den Boden gebracht werden, und außerdem werden in vielen Böden granuliert Phosphordüngemittel besser von den Pflanzen aufgenommen, da die Absorption der Phosphate durch den Boden geringer ist. Eine direkte Beobachtung der Aufnahme von radioaktivem Phosphor durch Hirsepflanzen während der ersten 30 Tage nach ihrem Auflaufen zeigte, daß der Phosphor aus feinkörnigem Superphosphat besser von den Pflanzen aufgenommen wird. Der Vorteil kleiner Düngerkörner (2 mm · 2 mm) bei Streuung in die Saatsfurchen besteht möglicherweise darin, daß bei dichter Lage der Körner in der Furche die Wahrscheinlichkeit eines Kontaktes zwischen ihnen und den Pflanzenwurzeln größer ist.

Das wirksamste Verfahren, den Pflanzen ein erhöhtes Nährstoffniveau im Laufe aller Vegetationsperioden zu schaffen, besteht darin, die Saatsfurchendüngung mit einer tiefeingebrachten Superphosphatdüngung zu kombinieren. Mit Hilfe der Isotopenmethode konnte quantitativ bestätigt werden, daß ein derartiges Düngungssystem den Pflanzen ein erhöhtes Phosphorniveau im Anfang ihres Wachstums bietet und eine ununterbrochene Phosphoraufnahme in den darauffolgenden Vegetationsperioden gewährleistet.

Interessante Erkenntnisse ergaben sich aus der Untersuchung der Termine und Methoden des Düngens von Obstpflanzen mit Superphosphat. In einigen wissenschaftlichen Instituten und Versuchsstationen wurde gezeigt, daß die Phosphorsäure des Superphosphats in dem Jahre, in dem dieses in die Furchen eingebracht oder beim Umgraben den Pflanzen zugeführt wird, sehr wenig von den Blättern und Früchten der Apfelbäume aufgenommen wird und die aufgenommene Menge nur

1 bis 2% der Gesamtmenge beträgt. Der gleiche prozentuale Anteil von Phosphor wurde auch in Blättern der Himbeersträucher bei Sommerdüngung mit Superphosphat gefunden. In Blättern der Johannisbeersträucher ist der prozentuale Anteil des markierten Phosphors größer; bei dem besten Düngungsverfahren beträgt er bis zu 7%. Eine derartig geringe Ausnutzung der Phosphorsäure seitens mehrjähriger Pflanzen bei Oberflächendüngung mit Superphosphat ist anscheinend damit verbunden, daß ein tiefes Einbringen des Düngers in die Entwicklungszone der Pflanzenwurzeln schwierig ist.

Die Autoren schlagen daher vor, von einer alljährlichen Oberflächendüngung mit mineralischen Phosphorverbindungen abzusehen und diese Dünger nur selten in die Wurzelzone einzubringen, und zwar in Mengen, die ausreichen, um die Pflanzen mit diesen Elementen vollständig zu versorgen.

Durch Anwendung des radioaktiven Phosphors konnten viele neue Tatsachen in Erfahrung gebracht werden, die weitere Verfahren zur Regelung der Nährstoffverhältnisse durch Wurzelkopfdüngung und auch andere Kopfdüngungsarten betreffen.

Eine besonders große praktische Bedeutung kommt der Phosphorkopfdüngung von Baumwollsträuchern während der Fruchtbildung zu.

Mit Hilfe des Isotopenverfahrens konnte der Beweis erbracht werden, daß das auf die Blätter aufgetragene Superphosphat von diesen absorbiert wird, sich sowohl nach oben wie auch nach unten in den Pflanzen bewegt, schnell in den Stoffwechsel einbezogen wird und bereits nach einigen Stunden in allen phosphorhaltigen Verbindungen anzutreffen ist. Die größte Phosphormenge wird vor dem Ausreifen in den Baumwollkapseln aufgespeichert. Daraus erklärt sich die bessere Entwicklung der Kapseln, die in der Nähe des Haupttriebes wachsen, ihre schnellere Reifung, ihre größeren Abmessungen und die besseren technologischen Eigenschaften der aus ihnen stammenden Fasern.

In der Usbekischen und Tadshikischen Republik wird die Kopfdüngung der Baumwollsträucher auf großen Flächen vorgenommen, wobei mit Hilfe von Flugzeugen oder einfach mit Zerstäubern die Superphosphatlösung zerspritzt wird.

Die Methode der markierten Atome wurde auch verwendet, um die Kopfdüngung von Tomatenpflanzen während der Fruchtbildung und von Zuckerrüben vor der Ernte zu untersuchen.

In allen Fällen führte die Kopfdüngung zur Erhöhung des Ernteertrages.

Die Kopfdüngung ist somit eine wertvolle zusätzliche Phosphorquelle in den entscheidenden Entwicklungsperioden landwirtschaftlicher Kulturen.

Strahlen und Isotope in der Metallurgie und im Maschinenbau

Die Entwicklung der Technik fordert die Herstellung von Stählen hoher Festigkeit, von hitzebeständigen Legierungen und von anderen Metallarten mit verschiedenen physikalischen und mechanischen Eigenschaften. Die damit verbundenen Probleme können nur dann erfolgreich gelöst werden, wenn man über ein tiefes Verständnis des Schmelzprozesses und des Verhaltens der Metalle unter verschiedenen Bedingungen verfügt und wenn eine sorgfältige und vielseitige Kontrolle der Qualität hochbeanspruchter Metallerzeugnisse erfolgt. Die Kenntnis der Gesetzmäßigkeiten der Diffusion von Atomen in bestimmten Richtungen und der interatomaren Wechselwirkungen in Metallen ist der Schlüssel zur Lösung vieler praktischer Probleme, die mit einer Untersuchung verschiedenartiger Stähle und Legierungen sowie mit den Fragen ihrer Bearbeitung zusammenhängen.

Diese Faktoren bestimmen z. B. die Festigkeit der Materialien, die Lebensdauer und die Temperaturgrenze hitzebeständiger Legierungen, was in gewissem Maße durch die Besonderheiten des Einflusses des Metallgefüges auf ihre Eigenschaften bedingt ist. Es ist z. B. bekannt, daß hitzebeständige Legierungen nur dann ihren Anforderungen genügen, wenn sie in einem zweiphasigen Zustand hergestellt werden, der durch die disperse Verteilung der einen Phase in der anderen gekennzeichnet ist. Dieser Zustand ändert sich aber bei Verwendung solcher Legierungen im Gebiete hoher Temperaturen wegen der Umgruppierung der Atome einzelner Legierungsbestandteile; diese Veränderungen haben also grundsätzlich Diffusionscharakter. Es ist weiterhin wichtig, die Verteilung der Beimischungen und der Legierungs-

bestandteile in Mikrovolumen der Legierungen zu kennen. Durch Anwendung radioaktiver Isotope und anderer Errungenschaften der Kernphysik konnten in den letzten Jahren solche Fragen in mancher Hinsicht gelöst werden.

Zur Untersuchung der Diffusion in festen Körpern, d. h. zur quantitativen Beschreibung des Prozesses, der mit der Verschiebung der Atome zusammenhängt, werden gegenwärtig radioaktive Isotope der Elemente Eisen, Kobalt, Nickel, Chrom, Wolfram, Molybdän, Silber, Kupfer, Phosphor, Schwefel, Kalzium und vieler anderer angewendet. Die Verwendung radioaktiver Isotope für diese Zwecke bringt gewaltige Vorteile. Erstens verringert sich der Arbeitsaufwand bei der Bestimmung der Diffusionseigenschaften wesentlich, zweitens besteht die Möglichkeit, die Selbstdiffusion, d. h. die Mischung gleichartiger Metallatome durch die Wärmebewegung, zu untersuchen.

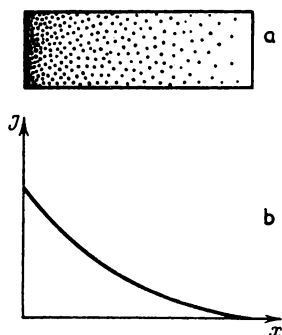
Die ersten Untersuchungen der Selbstdiffusion wurden 1920 in England unter Verwendung natürlicher radioaktiver Elemente vorgenommen. Künstlich hergestellte radioaktive Isotope wurden 1937 im physikalisch-technischen Uralinstitut zur Untersuchung der Selbstdiffusion in Metallen verwendet. Einen großen Aufschwung nahmen diese Arbeiten in den letzten zehn Jahren; reiche Erfahrungen wurden gesammelt und wichtige Gesetze erkannt. Vorher mußte natürlich eine gewaltige Kleinarbeit zur Entwicklung entsprechender Untersuchungsverfahren bewältigt werden.

Das Wesen der Verfahren, die auf Anwendung radioaktiver Isotope beruhen und zur Untersuchung der Diffusion herangezogen werden, besteht in folgendem: a) Auftragen einer dünnen Schicht radioaktiver Isotope auf die Proben; b) Erwärmen der Proben; c) Messen der Radioaktivität der Proben.

Die radioaktiven Isotope sind in diesem Falle ein bequemes Mittel zur Bestimmung der Konzentration der Atome des in das Metall diffundierenden Stoffes (Abb. 60). Diese Bestimmung erfolgt durch Messung der Radioaktivität der Proben nach Abtragen dünner Schichten. Aus den Ergebnissen kann eine solche Größe wie der Diffusionskoeffizient D , der unter gewissen Bedingungen den Atomfluß charakterisiert, be-

Abb. 60. Zur Untersuchung der Diffusion in Metallen

a — Metallprobe; b — Verteilung der Radioaktivität in der Probe
(J — Radioaktivität, x — Diffusionstiefe)



rechnet werden. Kennt man den Diffusionskoeffizienten bei verschiedenen Temperaturen, so kann man auch einen anderen Diffusionsparameter — die Aktivierungsenergie — bestimmen, die die Temperaturabhängigkeit der Diffusionsgeschwindigkeit beschreibt. In den letzten Jahren wurde festgestellt, daß diese Größe in gewissen Fällen direkt die interatomaren Kräfte im Kristallgitter eines festen Körpers charakterisiert.

Wir wollen nun einige der interessantesten Ergebnisse beschreiben, die bei der Untersuchung der Diffusion in Metallen mit Hilfe radioaktiver Isotope erzielt wurden, nämlich die Bestimmung des Einflusses der Zusammensetzung und Beschaffenheit der Bestandteile des Legierungsgefüges auf die Diffusion und die Feststellung des Zusammenhanges zwischen Diffusionsgrößen und anderen Konstanten eines festen Körpers (so für viele Metalle, unter anderem auch für viele schwerschmelzbare Metalle, was früher unmöglich war).

Bekanntlich besteht ein so weitverbreitetes Material wie Stahl aus Eisen und Kohlenstoff. Eine bemerkenswerte Eigenschaft des Stahls besteht darin, daß sich sein Kristallgitter mit der Temperatur (von 700 bis 1000° C) ändert. Die Kenntnis der wichtigsten Gesetzmäßigkeiten dieser Änderung ermöglicht es, durch verschiedenartige Warmbehandlung Stähle verschiedener Eigenschaften herzustellen, ohne daß ihre Zusammensetzung geändert wird. So kann entweder Stahl außerordentlicher Festigkeit und Härte oder sehr geschmeidiger Stahl her-

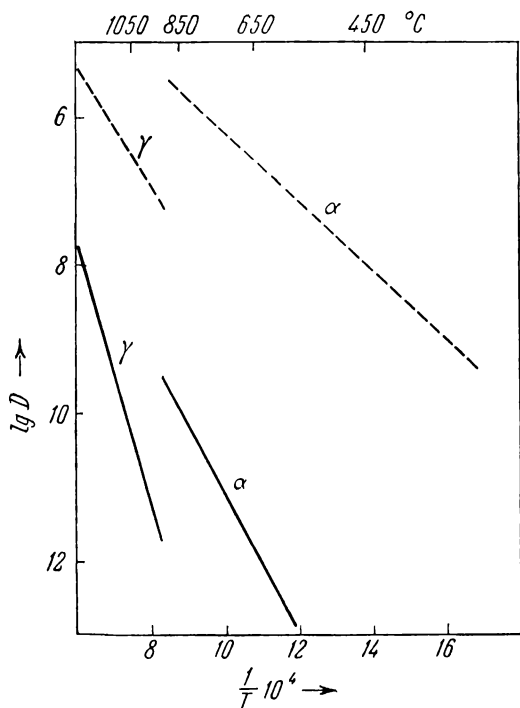


Abb. 6. Die Temperaturabhängigkeit des Selbstdiffusionskoeffizienten für Eisen (ausgezogene Linie) und des Diffusionskoeffizienten für Kohlenstoff in Eisen (gestrichelte Linie)
 α – für Ferrit;
 γ – für Austenit

gestellt werden. Alles wird hier davon abhängen, wie schnell und in welchem Umfang Kohlenstoff und die Legierungselemente diffundieren. Hieraus sieht man, wie wichtig es ist, zu wissen, daß die Diffusionsgeschwindigkeit der Eisen- und Kohlenstoffatome im Ferrit wesentlich höher sein kann als die Diffusionsgeschwindigkeit im Austenit. Hieraus folgt beispielsweise, daß das Schweißen von Eisen und das Sintern von Metallpulvern in manchen Fällen bei niedrigerer Temperatur sich schneller vollzieht als bei höherer Temperatur. Alle diese Tatsachen wurden mit Hilfe radioaktiver Eisen- und Kohlenstoffisotope festgestellt (Abb. 61).

Aus Messungen des Diffusionskoeffizienten und der Größen, die die Umwandlung fester Metalle in Dampf (Sublimation) charakterisieren,

fand man, daß die Erhöhung des Kohlenstoffgehalts des Stahls die Bindung zwischen den Eisenatomen wesentlich schwächt. Aus dieser Tatsache erklären sich viele Besonderheiten des Verhaltens von Stählen unter verschiedenen Bedingungen. Es wird z. B. verständlich, warum mit Erhöhung des Kohlenstoffgehalts (bis zu 1%) die Festigkeit des Stahls bei Erwärmung auf hohe Temperaturen wesentlich schneller abnimmt.

Zur Verfestigung wird der Stahl gewöhnlich gehärtet. Bereits in dem vorigen Jahrhundert wurde vom Gründer der wissenschaftlichen Metallkunde Tschernow festgestellt, daß ein gewisses Temperaturgebiet existiert, in dem bei der Härtung des Stahls nicht die gewünschten Ergebnisse erzielt werden. Der Stahl nimmt entweder die Härtung nicht an (er hat ungenügende Festigkeit und Elastizität) oder die Ergebnisse weichen bezüglich Festigkeit und anderer Eigenschaften voneinander ab. Diese Erscheinung konnte erst in den letzten Jahren erklärt werden. Es handelt sich darum, daß bei Erwärmung des Stahls bis zur Abschrecktemperatur sich die Struktur der Gefügebestandteile ändert. Wegen der Phasenumwandlung spalten die einzelnen Gefügebestandteile der Hochtemperatur- γ -Phase (Austenit) in kleinere auf. Somit entstehen in den Gefügebestandteilen neue Grenzflächen, was zu einer wesentlichen Beschleunigung der Diffusion führt. Bei der Härtung werden somit die Diffusionsprozesse nicht aufgehalten, d. h. der Stahl nimmt praktisch die Härtung nicht an oder seine Eigenschaften entsprechen, wie bereits erwähnt, nicht den gewünschten (Abb. 62 a). Die Erwärmung des Stahls auf eine höhere Temperatur (die über dem B-Tschernow-Punkt liegt) normalisiert das Verhalten des Stahls, da in diesem Falle die zusätzlichen Grenzflächen in den Gefügebestandteilen verschwinden (Abb. 62 b).

Durch Anwendung von Mikroskopen konnte in der Metallurgie ein außerordentlich wichtiger Fortschritt in der Untersuchung der Metalleigenschaften und in der Qualitätsprüfung erzielt werden. Es wurde festgestellt, daß Metalle und Legierungen aus einzelnen kleinen Kristallen bestehen. An den Grenzflächen der Kristalle und mitunter auch in den Kristallen selbst unterscheidet sich die Konzentration der Ele-

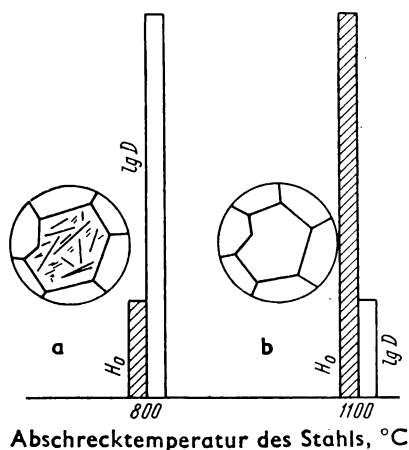


Abb. 62. Veranschaulichung des Einflusses der Beschaffenheit der Gefügebestandteile auf die Diffusion ($\lg D$) und Härte (H_0) des Stahls bei der Härtung

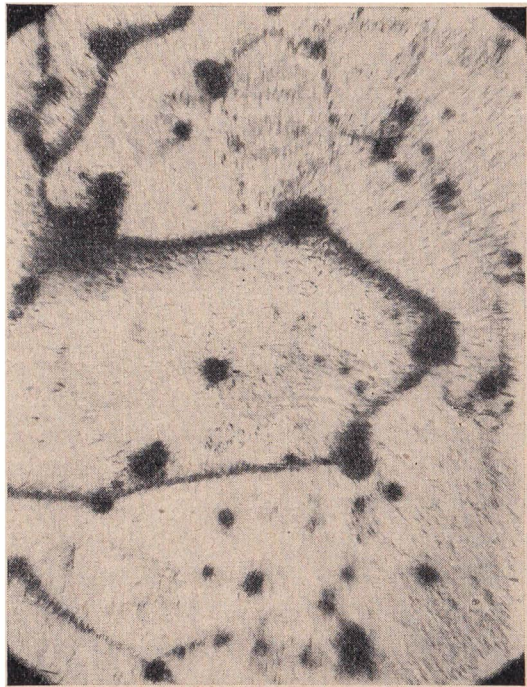
mente oft stark von der mittleren Legierungszusammensetzung, d. h. Legierungen sind in Mikrovolumen meist sehr inhomogen hinsichtlich ihrer Zusammensetzung. Mit Hilfe von Mikroskopen kann aber oft die Verteilung einzelner Elemente in Mikrovolumen der Legierungen nicht festgestellt werden. In vielen Fällen gelingt es aber, dieses Problem mit Hilfe radioaktiver Isotope zu lösen, und zwar mit dem Radiographieverfahren. Das Wesen dieses Verfahrens besteht darin, daß unter bestimmten Bedingungen auf einen Fotofilm die Metallplatte gelegt wird, in die das radioaktive Isotop des zu untersuchenden Elements eingefügt wurde. Nach einer gewissen „Belichtungszeit“ wird der Film entwickelt, und es entsteht ein Bild, das die Verteilung des Elements im Metall zeigt. Ein solches Radiogramm ist in Abb. 63 dargestellt (Verteilung von Schwefel in Eisen). Auf diese Weise wurde die Verteilung von Kohlenstoff, Chrom, Schwefel und anderer Elemente in Barren, Schweißnähten, Schienen und anderen Erzeugnissen untersucht.

Eine Untersuchung der Verteilung von Legierungselementen und schädlichen Beimischungen in Legierungen gibt in vielen Fällen die Möglichkeit, die Eigenschaften dieser Legierungen zu verbessern. In diesen Fällen besteht die Aufgabe darin, eine Technologie des Schmel-

zens und der Legierungsbehandlung zu entwickeln, die eine gewünschte Verteilung der Elemente gewährleistet.

Ein Bild der Verteilung von Elementen in Legierungen kann man mit Hilfe des Autoradiographieverfahrens entweder dadurch bekommen, daß man das radioaktive Isotop dem Metall während des Schmelzprozesses zugibt, oder dadurch, daß man das Metall in Atomreaktoren bestrahlt. In beiden Fällen ergeben sich im Vergleich zu den bekannten Verfahren (dem metallographischen und dem lokalen physikalisch-chemischen Verfahren) völlig neue Möglichkeiten. Es handelt sich darum, daß wir durch Anwendung der Errungenschaften der Kernphysik die Möglichkeit erhalten, die Verteilung der Elemente in Legierungen bei außerordentlich geringen Konzentrationen festzustellen (Abb. 63).

Abb. 63. Autoradiographie der Verteilung von Schwefel in Stahl (die schwarzen Felder entsprechen dem Schwefel). 200fache Vergrößerung



In den letzten Jahren wird immer häufiger die Isotopenmethode bei der Lösung vieler Probleme verwendet, die mit der Produktion von Gußeisen und Stahl verbunden sind. Mit Hilfe dieser Methode werden solche Fragen gelöst wie die Untersuchung der Verteilung von Beimischungen in flüssigen Metallen und der Bedingungen, unter denen eine Gleichgewichtsverteilung der Elemente zwischen dem Metall und der Schlacke eintritt, die Kontrolle des Zustandes einzelner metallurgischer Aggregate usw. In vielen Werken der Sowjetunion, darunter auch in solch großen wie in den Kusnetzkie- und Magnitogorskie-Hüttenkombinaten, wird mit Hilfe von Isotopen der Futterzustand der Hochöfen und Martinöfen kontrolliert. Zu diesem Zweck werden in die feuerfeste Auskleidung radioaktive Quellen eingebaut. Brennt die feuerfeste Auskleidung auf eine bestimmte Tiefe ab, so kommt der radioaktive Einsatz in das Schmelzgut, was dadurch festgestellt werden kann, daß die Radioaktivität an der Außenwand des Ofens überwacht oder die Radioaktivität der Schmelzproben einer Messung unterworfen wird. So konnte festgestellt werden, daß der untere Teil der feuerfesten Auskleidung eines Hochofens außerordentlich schnell ausbrennt.

Dieses Ergebnis ist für Hütteningenieure von außerordentlicher Bedeutung.

Die Methode der radioaktiven und stabilen Isotope wird gegenwärtig im Hüttenwesen zur Kontrolle von Gasströmungen und Bewegungen der Beschickungsmaterialien verwendet, um neue Methoden zur Hebung der Leistungsfähigkeit von Hochöfen zu entwickeln.

In den einzelnen Schmelzen muß der Stahl möglichst homogen sein. Er darf auch keine Schlackeneinschlüsse oder Einschlüsse anderer nicht-metallischer Stoffe enthalten. Im Kusnetzkie-Hüttenkombinat hat man untersucht, in welchem Maße sich Chrom in großen Martinöfen mit dem flüssigen Stahl mischt. Man führte dazu in den Ofen außer Ferrochrom auch ein radioaktives Chromisotop ein. Die zur vollständigen Mischung mit dem Legierungselement Chrom notwendige Zeit fand man dadurch, daß man in gewissen Zeitabständen aus verschiedenen Stellen des Ofens Metallproben entnahm und ihre Radioaktivität be-

stimmte. Diese Versuche zeigten, daß die Technologie zu ändern war; die Schmelzzeit konnte so wesentlich herabgesetzt werden.

Beim Abstich gelangen in die Metallbarren oft Körner der Schlacke oder feuerfester Stoffe, wodurch die Qualität des Metalls verringert wird. Die Körner der feuerfesten Stoffe können aus der Gießrinne des Martinofens, aus der Gießkelle oder aus der Kokille stammen. Um den Einfluß der einzelnen Verunreinigungsquellen festzustellen, mischt man zu den einzelnen feuerfesten Substanzen radioaktive Isotope und mißt die Radioaktivität des Metalls. Auf diese Weise kann festgestellt werden, in welchen Fällen es zweckmäßig ist, die verwendeten feuerfesten Stoffe durch beständigere Materialien zu ersetzen.

In der Sowjetunion und im Ausland fanden radioaktive Isotope vielseitige und umfassende Anwendung im Hüttenwesen. In einem kurzen Artikel können nicht einmal die wichtigsten Ergebnisse aller Arbeiten beschrieben werden. Es sei aber noch ein charakteristisches Beispiel für die Anwendung der Radioisotope angeführt: Die Kontrolle der Metall- und Schlackenzusammensetzung. Im Werk „Asowstahl“ verwendet man z. B. radioaktive Phosphorisotope zur Bestimmung des Phosphorgehaltes im Metall und in der Schlacke während des Schmelzprozesses. Es handelt sich hier um eine Schnellanalyse, die es ermöglicht, den Schmelzprozeß schneller durchzuführen und die Qualität des Metalls und der Schlacke zu erhöhen.

Die Entwicklung des Maschinenbaues fordert die Schaffung geeigneter Prüfungsverfahren zur Untersuchung des Verschleißes verschiedener Maschinenteile. Auch in dieser Hinsicht wurde viel mit radioaktiven Isotopen und Kernstrahlungen erreicht. Die Methode der Bestrahlung in Kernreaktoren und das Verfahren der radioaktiven Einsätze dienen gegenwärtig zur Kontrolle und Untersuchung des Verschleißes von Maschinenteilen an Wasserturbinen und Verbrennungsmotoren.

Ein wichtiges Problem ist die Kontrolle des Einarbeitens der Kolbenringe bei Einlaufbeginn eines Motors. Die Kontrolle geschieht in diesem Falle durch Bestimmung der Radioaktivität des Schmieröls im Kreislaufsystem, wobei diese Radioaktivität vom Verschleiß der aktiven Einsätze in den Kolbenringen herrührt. Auf diese Weise wer-

den die günstigsten Bedingungen für das Einarbeiten gefunden, die es ermöglichen, die Einlaufzeit der Motoren zu verkürzen und ihre erhöhte Verschleißfestigkeit zu gewährleisten.

Einer der wichtigsten Faktoren, von denen die Lebensdauer eines Kraftfahrzeug-, Traktor- und Flugzeugmotors abhängt, ist der Staub, der mit der Luft in die Motorenzylinder gesaugt wird und hier den Verschleiß der Zylinderwände, des Kolbens und der Kolbenringe hervorruft. Um den Staubgehalt herabzusetzen, werden verschiedenartige Luftfilter verwendet.

Die modernen Methoden, die bei der Filterprüfung Anwendung finden, sind sehr zeitraubend und ungenau, außerdem versagen sie bei der Prüfung von Luftfiltern, die unter wechselnden Betriebsbedingungen arbeiten. Gewöhnlich kann eine endgültige Beurteilung der Brauchbarkeit einer Filterkonstruktion nur nach längerer Prüfung des Motors auf Landstraßen geschehen (Strecken von einigen zehntausend Kilometern). Die Anwendung von Radioisotopen verkürzt die zu dieser Beurteilung nötige Zeit auf einige zehn Minuten und erhöht dabei die Genauigkeit der Ergebnisse wesentlich.

Um eine schnelle Prüfung der Luftfilter mit radioaktiven Isotopen durchführen zu können, wurden spezielle Dosierungsapparate entwickelt. Diese Apparate leiten radioaktiven Staub in den Luftfilter. Aus dem Filter gelangt die Luft in einen Staubspeicher, in dem die Radioaktivität des Staubes gemessen werden kann. Die Wirksamkeit des Luftfilters wird an Hand der Radioaktivität des Staubes im Staubspeicher bestimmt. So wurde festgestellt, daß die Wirksamkeit der Filter bei pulsierendem Betrieb geringer ist.

Auch folgende Probleme haben große Bedeutung für den Maschinenbau: Die Bestimmung der Größe der Berührungsflächen zwischen reibenden Flächen, die Feststellung des Einflusses der Ölschichtdicke auf den Metallverschleiß, die Untersuchung der physikalisch-chemischen Wechselwirkung zwischen Schmieröl und Reibflächen, die Kontrolle der Abnutzung von Schneidewerkzeugen u. a. Auch viele dieser Probleme können verhältnismäßig einfach durch Anwendung radioaktiver Isotope gelöst werden.

Die Erfahrungen zeigen, daß die Methode der radioaktiven Indikatoren ein sehr nützliches Hilfsmittel zur Lösung technischer Probleme ist; in einer Reihe von Fällen ist diese Methode wegen ihrer außerordentlich hohen Empfindlichkeit und wegen der Möglichkeit, verschiedene, den Betriebszustand der Maschinen charakterisierende Prozesse kontinuierlich zu registrieren, unentbehrlich.

Die Ausnutzung der Errungenschaften der Kernphysik beschränkt sich aber nicht ausschließlich auf die Anwendung radioaktiver Isotope. In der Metallurgie hat z. B. die Anwendung der Neutronenstrahlen eine große Zukunft. Die vorliegenden Angaben zeugen davon, daß bei Untersuchung der Wirkung der Neutronenstrahlen von Kernreaktoren auf die Eigenschaften fester Körper bedeutende Fortschritte gemacht wurden. Weit vorangetrieben wurden auch die Arbeiten zur Bestimmung der atomaren und molekularen Struktur fester Körper mit Hilfe der Neutronenstrukturanalyse.

Die Wirkung der Neutronenbestrahlung auf die Eigenschaften fester Körper besteht hauptsächlich in Versetzungen der Atome aus ihrer

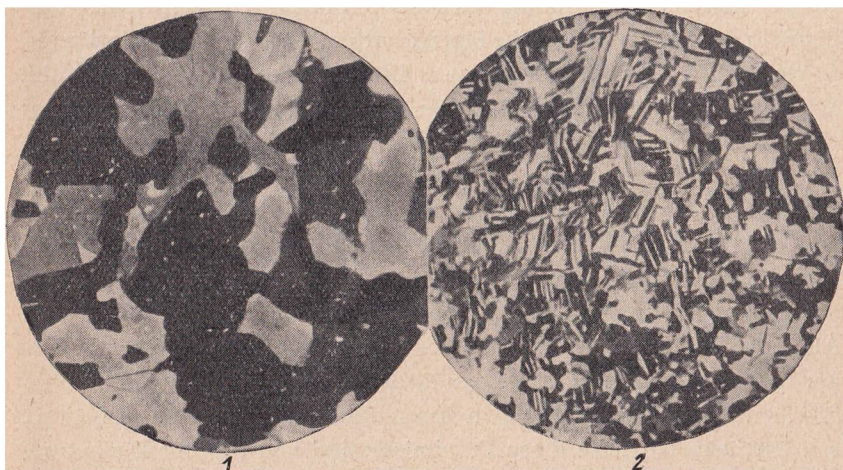


Abb. 64. Mikrostruktur des Zirkons. 200fache Vergrößerung
1 — vor der Bestrahlung; 2 — nach der Neutronenbestrahlung

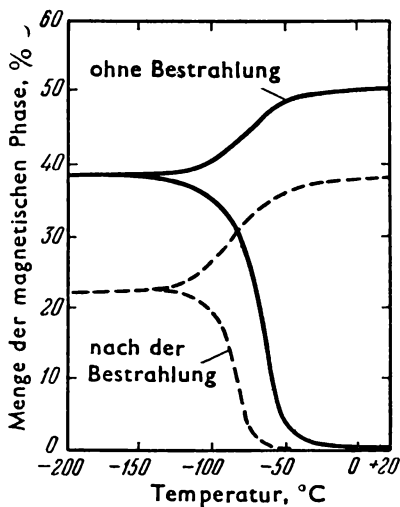


Abb. 65. Veränderung der Menge der magnetischen Phase in einer Eisen-Nickel-Legierung bei Abkühlung in flüssigem Stickstoff und Erwärmung auf Zimmertemperatur unbestrahlter und 200 Stunden im Reaktor bestrahlter Proben

Gleichgewichtslage. Dadurch entstehen im festen Körper mikroskopische Gebiete, in denen die normale Anordnung der Atome gestört ist; das ist der Grund für die Veränderung der Eigenschaften fester Körper. Bei der Bestrahlung von Metallen mit intensiven Neutronenbündeln verändern sich solche Eigenschaften, wie Festigkeit, Elastizität, Härte, elektrischer Widerstand u. a. Die Festigkeitsgrenze von Stahl, der mit Neutronen bestrahlt wurde, kann auf mehr als 50% steigen; die Struktur der Metalle ändert sich dabei ebenfalls (Abb. 64).

Im Institut für Metallkunde und Metallphysik des Zentralen Forschungsinstitutes für Schwarzmetalle konnte kürzlich gezeigt werden, daß die Bestrahlung von Legierungen mit Neutronen einen wesentlichen Einfluß auch auf die Geschwindigkeit hat, mit der sich verschiedene Umwandlungen in diesen Legierungen vollziehen.

Als Beispiel dieser Wirkung der Neutronenbestrahlung auf feste Körper kann die Änderung der magnetischen Phase in Abhängigkeit von Erwärmung und Abkühlung in Eisen-Nickel-Legierungen angeführt werden (Abb. 65). Alle diese Ergebnisse sind von größter Bedeutung für die Metallkunde und andere Gebiete der Festkörperphysik, insbesondere für Probleme, die Halbleiter betreffen.

Die Metalle und andere feste Körper weisen eine komplizierte Struktur auf. Mit Hilfe von Röntgenstrahlen wurde festgestellt, daß die Anordnung der Atome in den Kristallen einer bestimmten Ordnung unterliegt. Es gelingt aber nicht immer, die komplizierte Struktur von Festkörpern durch Röntgenstrukturanalyse zu ermitteln; in vielen Fällen aber können diese Probleme mit Hilfe der Neutronenstrukturanalyse gelöst werden. Dies hängt mit der Eigenschaft der Neutronen zusammen, daß sie im Kristall nicht wie Röntgenstrahlen von Elektronen gestreut werden, sondern von Atomkernen. Mit Hilfe der Neutronenstrukturanalyse wurde eine Reihe solcher Probleme gelöst wie die Bestimmung der Anordnung leichter Atome (Wasserstoff u. a.) im Kristallgitter von Festkörpern und die Feststellung der gegenseitigen Anordnung von Atomen in Legierungen, die aus Metallen mit ähnlichen Eigenschaften bestehen (Eisen-Nickel-, Eisen-Kobalt-Legierungen u. a.).

Anwendung von radioaktiven Isotopen in der chemischen Analyse

Für die Entwicklung von Wissenschaft und Industrie hat die chemische Analyse große Bedeutung. Die Kontrolle des Ablaufs technologischer Prozesse, die Analyse der industriellen Rohstoffe und Erzeugnisse, beruht auf den Methoden der analytischen Chemie. Sie hat in dieser Hinsicht außerordentlich wichtige Aufgaben zu erfüllen.

Die Anforderungen an die chemische Analyse bei der Bestimmung von immer geringeren Stoffmengen ist gegenwärtig in ständigem Steigen begriffen. Die Qualität verschiedener Legierungen und Metalle hängt z. B. oft von der Anwesenheit geringster Mengen von Beimischungen ab, die die Eigenschaften der Metalle wesentlich verändern.

Eine große Hilfe leistet die chemische Analyse in der Geochemie, Biologie und Mineralogie bei der Lösung einer Reihe von Fragen, für die es notwendig ist, die quantitative Zusammensetzung verschiedener Stoffe zu kennen.

Radioaktive Isotope finden eine breite und vielseitige Anwendung in der analytischen Chemie. Das erklärt sich aus der außerordentlich hohen Empfindlichkeit der Meßmethoden für radioaktive Substanzen, die es ermöglichen, das Verhalten von winzigen Stoffmengen (Hunderte und Tausende von Atomen) zu untersuchen. Radioaktive Isotope werden zur Lösung theoretischer Fragen der analytischen Chemie herangezogen. Mit ihrer Hilfe können Methoden der quantitativen Bestimmung verschiedener Elemente ausgearbeitet werden.

Erfolgreich werden gegenwärtig spezifisch radiochemische Methoden der quantitativen Analyse entwickelt, wie die Methoden der Aktivierungsanalyse, der Isotopenverdünnung und der Bestimmung von Elementen an Hand reflektierter β -Strahlung.

Mit Hilfe von radioaktiven Isotopen konnte eine bedeutende Verbesserung der chemisch-analytischen Kontrolle der Produktion in den Werklaboratorien herbeigeführt und Methoden zur Bestimmung von Spurenelementen in verschiedenen Substanzen (Gesteinen, Erzen, Metallen und Legierungen) ausgearbeitet werden.

Einen großen Nutzen brachten radioaktive Isotope bei der Erforschung neuer und Verbesserung bereits bekannter Herstellungsmethoden ultrareiner Materialien.

Zweifellos wird die Anwendung von radioaktiven Isotopen bei der Lösung verschiedener Fragen der chemischen Analyse in Zukunft noch bedeutendere Resultate liefern.

Die einzelnen Anwendungsgebiete der radioaktiven Isotope in der chemischen Analyse werden in den weiteren Ausführungen behandelt.

Allgemeine Fragen der analytischen Chemie

Die Lösung der allgemeinen und theoretischen Fragen der analytischen Chemie mit Hilfe von Radioisotopen hat größte Bedeutung, insbesondere bei der Untersuchung des Verhaltens äußerst geringer Stoffmengen, für die sich andere Untersuchungsmethoden als untauglich erwiesen.

Die Möglichkeit der Bestimmung von Spuren verschiedener Elemente mit Hilfe radiochemischer Methoden hat die Grundlage für ein sich gegenwärtig am Anfang seiner Entwicklung befindliches besonderes Gebiet der analytischen Chemie geschaffen, das „analytische Spurenc Chemie“ genannt werden kann.

Aus dem Fragenkomplex der analytischen Chemie, der durch Anwendung markierter Atome gelöst werden kann, sollen nur die Erscheinung der Mitfällung, die mit dem Problem der Erhaltung von reinen Niederschlägen verbunden ist, die Bestimmung der Löslichkeit schwerlöslicher Verbindungen und die Trennung von Elementen mit Hilfe der Extraktionsmethode behandelt werden.

Die Erscheinung der Mitfällung durch Adsorption

Bei der Durchführung einer chemischen Analyse besteht der wichtigste Schritt in der Abscheidung der Ionen verschiedener Elemente in Form schwerlöslicher Niederschläge. Auf diese Weise wird die Trennung einiger Stoffe voneinander vorgenommen.

Oft aber werden gemeinsam mit den schwerlöslichen Verbindungen Stoffe mitgefällt, die gemäß den Versuchsbedingungen in Lösung bleiben müßten. Diese Erscheinung zeigt die negative Seite der Methode.

Die Mitfällung spielt aber auch eine positive Rolle, da verschiedene Niederschläge ausgenutzt werden können, um Spuren von Substanzen zu konzentrieren und sie dann zu identifizieren.

Die grundlegenden Gesetze der Erscheinung der Mitfällung durch Adsorption wurden mit Hilfe von radioaktiven Isotopen geklärt. Dadurch ergab sich die Möglichkeit, diese komplizierten Vorgänge besser zu verstehen und sie in einigen Fällen sogar zu lenken.

Die Ausnutzung der Erscheinung der Mitfällung zur Konzentrierung von Spurenelementen hat gegenwärtig eine große Bedeutung erlangt. An die chemische Analyse werden Forderungen gestellt, die darauf hinauslaufen, immer geringere Stoffmengen zu bestimmen, was nur nach vorangegangener Konzentrierung mit Hilfe von Niederschlägen möglich ist. So können z. B. Spuren von Blei, Zink und Quecksilber durch gemeinsame Fällung mit Kupfersulfid als Träger konzentriert werden. An Hand dieses Verfahrens kann man aus einem Liter Lösung noch $2 \cdot 10^{-8}$ g Quecksilber abscheiden.

Die Ausarbeitung von Methoden zur Konzentrierung von Ultramikro-Stoffmengen kann nur mit Hilfe von radioaktiven Isotopen vorgenommen werden.

Bei der Untersuchung des Mechanismus der Mitfällung ermöglichten radioaktive Isotope die Bestimmung der Verteilung von Verunreinigungen in einzelnen Mikrokristallen, indem die photographische Platte zu Hilfe genommen wurde (Autoradiographie). Dadurch wurde ein tieferes Verständnis der Erscheinung der Mitfällung möglich.

Die Extraktion

Bei der Abtrennung der Spuren verschiedener Stoffe vom großen Überschuß der Hauptkomponente besitzt die Methode eine große praktische Bedeutung, bei der die Spuren mit Hilfe von organischen Lösungsmitteln extrahiert werden. Die Extraktion ist oft selektiv und kann daher zur Abscheidung von geringen Stoffmengen aus großen Lösungsvolumen benutzt werden. Mit Äther kann z. B. Eisen-III-Chlorid gut extrahiert und von anderen Metallen (Nickel, Aluminium) getrennt werden.

Die Wahl des zweckmäßigsten Lösungsmittels, das eine möglichst vollständige Ausscheidung geringer Stoffmengen gewährleistet, die Untersuchung des Einflusses von Elektrolyten und anderer Faktoren auf die Vollständigkeit der Extraktion von Mikrokomponenten kann mit Erfolg durch Radioisotopen kontrolliert werden.

Bei der Untersuchung der Extraktion sehr geringer Stoffmengen hat man es gegenwärtig mit solchen Konzentrationen zu tun, wie sie früher, vor der Anwendung des Verfahrens markierter Atome, gar nicht untersucht werden konnten.

Löslichkeit von Niederschlägen

Vom analytischen Standpunkt aus ist die wichtigste Eigenschaft der Niederschläge ihre Löslichkeit. In der Analyse ist man bei der Trennung verschiedener Elemente voneinander bestrebt, die einen oder anderen in der Lösung enthaltenen Ionen möglichst vollständig als Niederschlag auszuscheiden. Daher hat die Kenntnis der Löslichkeit analytischer Niederschläge und das Vorhandensein von Methoden zu ihrer Bestimmung große Bedeutung.

Als Beispiel für einen Stoff, dessen Löslichkeit bestimmt werden muß, kann man Quecksilbersulfid (HgS) anführen. Die Löslichkeit dieser Verbindung beträgt etwa 10^{-24} g/l. Die Bestimmung derart geringer Stoffmengen ist mit Hilfe von anderen Methoden sehr schwer. Man sieht, welchen großen Nutzen in diesem Falle Radioisotope bringen können.

Die Löslichkeit analytischer Niederschläge wurde meist an Hand der elektrischen Leitfähigkeit bestimmt. Der Nachteil dieses Verfahrens besteht aber darin, daß schon Spuren von Fremdionen einen störenden Einfluß auf die Messungen haben.

Die Anwendung von Radioelementen hat in diesem Falle den Vorteil, daß das Vorhandensein von fremden Elektrolyten nicht störend wirkt und daß daher eine hohe Empfindlichkeit erreicht werden kann.

Quantitative Bestimmung von Elementen

Radioaktive Isotope finden eine immer breitere Anwendung in den verschiedenen Gebieten der analytischen Chemie.

Neben den klassischen Methoden der analytischen Chemie — der Gewichts- und der volumetrischen Analyse, in denen immer öfter „markierte“ Atome verwendet werden — entwickeln sich mit Erfolg spezifische Methoden der radiochemischen Analyse. Zu den letzten zählen die Methoden der Aktivierungsanalyse und der Isotopenverdünnung. Außerdem findet auch eine Methode Anwendung, die auf der Messung der Intensität reflektierter β -Strahlung beruht.

Gewichtsanalyse

In der Gewichtsanalyse wird bekanntlich das zu bestimmende Element in Form einer schwerlöslichen Verbindung ausgefällt und nach entsprechender Behandlung gewogen. An Hand der Formel des Niederschlages wird dann die Menge des zu bestimmenden Elements errechnet.

Bei der Verwendung von radioaktiven Isotopen ist die Wägung des Niederschlages nicht erforderlich, es ist lediglich seine Aktivität zu messen, aus der sich dann die Menge des zu bestimmenden Elements berechnen läßt.

Dieses Verfahren beruht auf der Proportionalität zwischen Aktivität und Masse des Stoffes. Folgende Arbeitsmethodik wird angewandt:

Zur Lösung, die die zu bestimmenden Ionen enthält, wird die Verbindung eines Radioelements gegeben, das mit den zu bestimmenden Ionen eine schwerlösliche Verbindung eingeht. Ist die Aktivität einer bestimmten Menge von markierten Atomen in dem zugefügten Reagenz bekannt und hat man die Aktivität des Niederschlages gemessen, so kann man die Menge der markierten Atome im Niederschlag berechnen. Aus der Formel der Verbindung, in dessen Form das gegebene Element ausgefällt wurde, berechnet man die Menge der zu bestimmenden Komponente. An Hand des beschriebenen Prinzips wurden eine Reihe von Verfahren zur Bestimmung geringer Mengen verschiedener Elemente, z. B. des Aluminiums, Kalziums, Indiums, Lanthans, Zirkoniums und anderer Metalle, entwickelt, die auf der Bildung von schwerlöslichen Phosphaten beruhen. Zur Ausfällung von Ionen der angeführten Metalle wurde Na_2HPO_4 benutzt, das markierten Phosphor enthält.

Volumetrische Analyse

Radioisotope werden auch bei volumetrisch-analytischen Methoden verwendet, die auf der Bildung von Niederschlägen beruhen. Gewöhnlich wird das Ende der Reaktion in diesen Verfahren mit Hilfe von entsprechenden Indikatoren bestimmt. Brauchbare Indikatoren gibt es aber nur für wenige Niederschlagsreaktionen.

Durch Anwendung von Radioisotopen kann das Ende der Titration aus der Veränderung der Aktivität der zu untersuchenden Lösung bestimmt werden. Da gegenwärtig Radioisotope der meisten Elemente des Periodischen Systems zur Verfügung stehen, sind für eine große Anzahl von Reaktionen, die zur Bildung von schwerlöslichen Verbindungen führen, die entsprechenden Ionen zu finden.

Die Analyse nach dem Verfahren der radiometrischen Titration wird folgendermaßen durchgeführt. Der zu titrierenden Lösung fügt man ein Radioisotop des zu bestimmenden Elements zu. Titriert wird dann mit der Lösung einer Verbindung, die mit dem gegebenen Element einen

unlöslichen Niederschlag bildet. Während der Titration wird die Flüssigkeit über dem Niederschlag in ein spezielles Zählrohr gesaugt und ihre Aktivität gemessen. Da die zu bestimmenden Ionen im Verlaufe der Titration aus der Lösung ausgefällt werden, sinkt die Aktivität langsam ab. Bei vollständiger Ausfällung ist die Aktivität der Lösung sehr gering, praktisch gleich Null. Bei weiterer Hinzufügung der Reagenzlösung wird sie sich nicht mehr verändern, und der Endpunkt der Titration kann festgestellt werden. Aus der Menge des verbrauchten Reagenzes läßt sich der Gehalt des zu bestimmenden Elements berechnen.

Aktivierungsanalyse

Dieses Verfahren ist verhältnismäßig neu und durch äußerst hohe Empfindlichkeit gekennzeichnet (es können Stoffmengen von 10^{-5} bis 10^{-11} g bestimmt werden). Die Aktivierungsanalyse ist deshalb dann anzuwenden, wenn man sehr geringe Stoffmengen nicht durch andere Verfahren bestimmen kann.

Grundsätzlich besteht dieses Verfahren darin, daß die zu untersuchende Probe mit langsamen Neutronen im Kernreaktor oder mit anderen Elementarteilchen im Zyklotron bestrahlt wird.

Als Ergebnis von Kernreaktionen bilden sich verschiedene Radioisotope, unter ihnen auch Radioisotope des zu bestimmenden Elements.

In einer Reihe aufeinanderfolgender chemischer Trennungsprozesse wird das Radioisotop des zu bestimmenden Elements nach Zufügung eines nichtaktiven Trägers in radioaktiv reiner Form isoliert.

Parallel mit der zu untersuchenden Probe wird ein Standardpräparat derselben Behandlung unterzogen, wobei dessen Gehalt an dem zu bestimmenden Element bekannt ist. Aus dem Vergleich der Aktivitäten beider Proben findet man die Menge des gesuchten Elements gemäß der Relation:

Masse des zu bestimmenden Elements

$$= \frac{\text{Masse der Standardprobe} \times \text{Aktivität des zu bestimmenden Elements}}{\text{Aktivität der Standardprobe}}$$

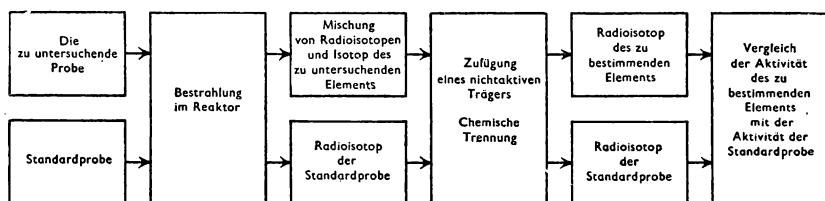


Abb. 66. Schema der Aktivierungsanalyse

Der Einfachheit wegen ist das beschriebene Verfahren in der Praxis am meisten verbreitet.

Das Schema der Analyse zeigt Abb. 66.

Das Verfahren der Isotopenverdünnung

Dieses Verfahren ist gekennzeichnet durch die Tatsache, daß man, im Gegensatz zur herkömmlichen chemischen Analyse, die Trennung der Ionen nicht mehr quantitativ vorzunehmen braucht. Der Vorteil der Isotopenverdünnungsmethode besteht darin, daß sie die quantitative Bestimmung von Elementen und Stoffen mit ähnlichen chemischen Eigenschaften gestattet. Dieses Verfahren kann daher zur Analyse von Stoffen herangezogen werden, deren Bestimmung auf anderem Wege große Schwierigkeiten bereiten würde, wie z. B. bei Tantal und Niob, Zirkonium und Hafnium, Natrium, Kalium und Rubidium, aber auch bei organischen Verbindungen, wie z. B. Aminosäuren.

Das Wesentliche dieses Verfahrens besteht in folgendem:

Angenommen, es soll Blei in einem Gestein bestimmt werden. Nach Auflösung der Probe wird ein lösliches Bleisalz, das radioaktives Blei enthält, zugefügt. Dann wird das Blei in Form eines schwerlöslichen Salzes, z. B. PbSO_4 , gefällt (nicht vollständig) und das Gewicht und die Aktivität des Niederschlages bestimmt.

Die Berechnung verläuft folgendermaßen: Angenommen, es wurden m Gramm Blei, dessen spezifische Aktivität¹⁾ A ist, hinzugefügt. Be-

¹⁾ Unter spezifischer Aktivität ist das Verhältnis der in Curie ausgedrückten Aktivität zur Masseneinheit (Curie/mg) zu verstehen.

zeichnen wir das Gewicht des ursprünglich vorhandenen Bleis mit x , so können wir diese Größe aus der folgenden Beziehung finden:

$$mA = (m + x) A_1,$$

und daher:

$$x = \frac{mA}{A_1} - m,$$

wobei A_1 die spezifische Aktivität des Bleis im Niederschlag ist.

Quantitative Bestimmung von Elementen durch Messung der Intensität reflektierter β -Strahlen

Da durch dieses Verfahren die Elemente mit großer Schnelligkeit bestimmt werden können und außerdem die anzuwendenden Geräte recht einfach sind, haben wir die Überzeugung, daß diese Methode in der Praxis der chemischen Analyse breite Anwendung finden wird.

Experimente zeigten, daß im Falle von binären Legierungen die Intensität der reflektierten β -Strahlung proportional zum Gehalt des schwereren Metalls in der Legierung ist. Auf dieser Grundlage wurde z. B. ein Verfahren zur Bestimmung von Niob in Niob-Chrom-Legierungen ausgearbeitet.

Der Gang der Analyse verläuft wie folgt (Abb. 67 und 68):

Die zu untersuchende Legierungsprobe wird auf eine Plexiglasplatte gelegt, die mit einem Loch versehen ist. Unter der Platte befindet sich auf einem Bleigestell die Strahlungsquelle (z. B. der β -Strahler Tl^{204}) und noch weiter unten das Zählrohr, mit dessen Hilfe die von der Probe reflektierte Strahlung gemessen wird. Zwischen die Probe und das Zählrohr wird eine Aluminiumfolie eingeschoben, deren Durchlässigkeit für die von den Niobatomen reflektierten Strahlen größer ist als für die von den Chromatomen reflektierten. Zur Auswertung der Messung wird eine Reihe von Standardproben vorbereitet, deren Gehalt an Niob bekannt ist. Das Ergebnis der Messungen mit den Standardproben wird graphisch aufgetragen (Abb. 68). Vergleicht man nun die Intensität der β -Strahlung, die von der zu untersuchenden Probe reflektiert

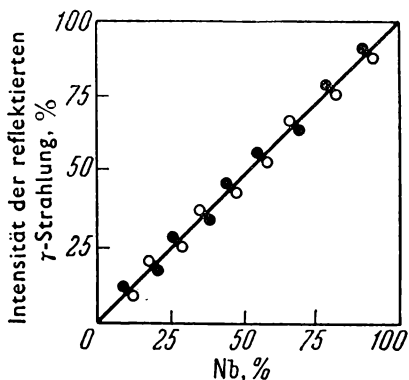
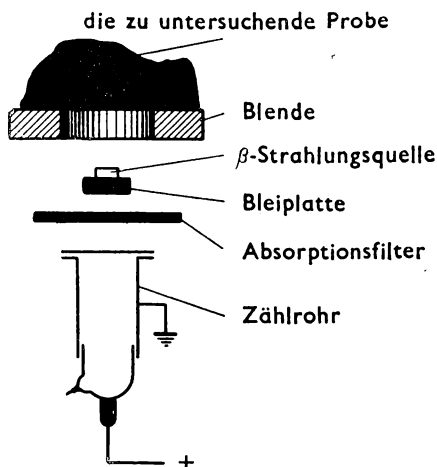


Abb. 68

Abb. 67. Schema der Bestimmung des Gehaltes von Elementen an Hand der Intensität reflektierter β -Strahlung

wurde, mit der Eichkurve, so kann man sofort den prozentualen Gehalt an Niob in der Legierung ablesen.

Zweifelloos wird das beschriebene Verfahren als Schnellanalyse eine vielseitige Anwendung finden und intensiv weiterentwickelt werden.

Anwendung von Radioisotopen bei der Entwicklung neuer Methoden der analytischen Chemie und der chemischen Technologie

Mit Hilfe von Radioisotopen werden einerseits bereits bekannte analytische Methoden überprüft und andererseits neue Methoden ausgearbeitet, die eine Analyse von Elementen mit ähnlichen chemischen Eigenschaften gestatten. Der Bestimmung von Spuren verschiedener Elemente in einigen Analyseobjekten, z. B. in ultrareinen Metallen, wird große Aufmerksamkeit geschenkt. Erwähnenswert ist noch die

chromatographische Analyse. Bei der Ausarbeitung dieser Methode zur Trennung chemisch ähnlicher Elemente spielen die Radioisotope eine große Rolle. Obwohl die chromatographische Methode verhältnismäßig neu ist, gelingt es gegenwärtig bereits, komplizierte Mischungen zu analysieren, deren Trennung auf anderen Wegen mit großen Schwierigkeiten verbunden ist. Von besonderer Bedeutung ist das Verfahren bei der Trennung des Gemisches der seltenen Erden.

Erfolgreich verläuft die Anwendung von Radioisotopen in der chemischen Industrie bei der Abschätzung der Qualität von Reinigungsmethoden für verschiedene Materialien. Gegenwärtig braucht die analytische Chemie besonders reine Reagenzien. Mit Hilfe von Radioisotopen können neue technologische Schemen der Reinigung von Reagenzien ausgearbeitet und Verunreinigungen in so geringen Mengen (10^{-5} bis 10^{-6} %) erkannt werden, in denen sie mit den bisher üblichen Methoden der chemischen Analyse nicht nachzuweisen waren, weil deren Empfindlichkeit oft nicht ausreichte. Mit Hilfe markierter Atome kann bei der Herstellung von Legierungen die Menge der Legierungsbestandteile leicht kontrolliert werden, wie z. B. der Anteil von Phosphor im Gußeisen. Bei der Herstellung des Gußeisens wird ihm markierter Phosphor zugesetzt und dann an Hand der Aktivität entnommener Proben der Gehalt dieses Elements überwacht.

Die Anwendung radioaktiver Indikatoren in der chemischen Analyse ist eine der aussichtsreichsten Untersuchungsmethoden.

Zweifellos wird diese neue Methode der chemischen Forschung in naher Zukunft eine noch breitere Anwendung in der analytischen Chemie finden. In den Forschungs- und Werklaboratorien werden neben gewöhnlichen Reagenzien auch solche mit markierten Atomen zur Anwendung gelangen.

Die analytische Chemie ist gegenwärtig, in Zusammenhang mit den großen Entdeckungen auf dem Gebiet der Radioaktivität, in ein neues Entwicklungsstadium getreten; die Erfolge in ihrer Vervollkommnung hängen davon ab, in welchem Umfang radioaktive Isotope Anwendung finden werden.

