

Die Bedeutung der Chemie bei der Entwicklung und Auswertung der Atomkernenergie*

Von Prof. Dr. FR. MÜLLER, Goslar

Die gewaltigen Erfolge der Physiker in der neuzeitlichen Atomkernforschung und ihrer Auswertung haben die Bedeutung der an dieser Forschung und Entwicklung maßgebend beteiligten Chemiker in den Hintergrund treten lassen. Dabei erhielten bezeichnenderweise von bedeutenden Kernphysikern verschiedene den Nobelpreis für Chemie (CURIE, ASTON, F. und J. JOLIO-CURIE), und bis 1943 wurden die Kernchemiker SODDY, UREY und VON HEVESY mit dem Nobelpreis ausgezeichnet, und wiederum sind in der neuesten entscheidenden Epoche an zwei Chemiker Nobelpreise verliehen worden, 1944 an HAHN und 1951 an SEABORG.

Der Chemiker HAHN erbrachte auf Grund jahrelanger Erfahrungen seiner glänzenden analytischen Experimentiertechnik den folgenschweren Nachweis, daß die Trümmer des von ihm entdeckten Uranzerfalls nicht dem Uran benachbarte Elemente, sondern solche aus dem mittleren Bereich des periodischen Systems waren. Der Chemiker SEABORG entdeckte das Plutonium und studierte an einem halben Milligramm, welches ihm Ende 1942 zur Verfügung stand, nicht nur alle wichtigen physikalischen und chemischen Daten, sondern entwickelte auch die schwierigen Trennungsmethoden dieses Plutoniums von dem in gewaltigem Überschuß vorhandenen Uran und einer großen Anzahl weiterer Zerfallsprodukte. Auf Grund dieser mikrochemischen Methoden wurden ohne weitere Versuche im halbertechnischen Maßstab die riesigen Trennanlagen ab 1943 gebaut, welche schließlich das Plutonium im kg-Maßstab produzierten – es war die erste sensationelle Verwirklichung einer «großtechnischen Kernchemie», welche künstliche Elemente in diesen Mengen erzeugen konnte. SEABORG, der auch die Transurane 95–98 entdeckte und erforschte, hat in einem Bericht (*The Impact of Nuclear Chemistry*)¹ eine fesselnde Darstellung seiner ultramikrochemischen Untersuchungsmethoden gegeben.

Die Mengen Plutonium, welche SEABORG für diese Untersuchungen zur Verfügung standen, waren 10 Tril-

lionen mal kleiner als die später in den Trennanlagen erhaltenen, und trotzdem war durch die ultramikrochemischen Arbeiten SEABORGs und seiner Mitarbeiter und durch spätere Arbeiten mit etwas größeren Mengen die Chemie des Plutoniums und seiner Verbindungen bald besser erforscht als die mancher anderen chemischen Elemente.

Begriffsbestimmungen und Wesen der Kernchemie

Die Kernchemie ist in ihren Grundlagen sowie in ihrer unmittelbaren und mittelbaren Auswertung und Anwendung zu einem weitverzweigten Forschungsgebiet geworden, welches sich in seinen vielen Verästelungen oft nicht überall von der Kernphysik streng abgrenzen läßt und sich mit dieser überschneidet. Ganz allgemein gesprochen, könnte man zur Kernchemie (*nuclear chemistry*) alle Gebiete der Atomkernforschung zählen, bei denen chemische Grundlagen und Methoden eine wesentliche Rolle spielen.

Die Kernchemie beschäftigt sich mit den chemischen Möglichkeiten von Kernumwandlungen, mit dem Studium und der Abtrennung von stabilen und instabilen Kernarten, der Erforschung des Kernzerfalls und der Anwendung von Nucleiden (*nuclides*, also aller Arten von Kernen, von gleichen oder verschiedenen Elementen) als Hilfsmittel für die chemische Forschung².

Die «Radiochemie» (*radiochemistry*) als ein Teilgebiet der Kernchemie befaßt sich mit der Gewinnung, Abtrennung und Identifizierung von Nucleiden, einschließlich ihrer Verwendung als «tracers» («Spurensucher», «Spurenfinder», radioaktive Indikatoren, «Leitisotope»).

Die «Strahlungschemie»³ (*radiation chemistry*) beschäftigt sich mit dem Studium der chemischen Wirkungen, die durch Absorption aller Arten energiereicher Strahlung aus radioaktiven Umwandlungen und hoch beschleunigten Teilchen hervorgerufen werden; sie ist der

² D. CORYELL und W. IRVINE, J. Chem. Educat. 28, 14 (1951); I. PERLMAN, J. Chem. Educat. 25, 273 (1948); I. PERLMAN und T. SEABORG, J. Chem. Educat. 28, 10 (1951).

³ Symposium on Radiation Chemistry and Photochemistry, J. Phys. Coll. Chem. 52, 437 (1948); S. DANTON, Annu. Rep. Progr. Chem. 45, 5 (1948), Annu. Rev. Phys. Chem. 2, 99 (1951); A. McDOWELL, Annu. Rep. Progr. Chem. 47, 51 (1950); C. LIND, J. Phys. Coll. Chem. 52, 437 (1948); *The Chemical Effects of Alpha Particles and Electrons*, Amer. Chem. Soc. Monogr. No. 2, Reinhold Publishing Corp., New York 1928; O. HIRSCHFELDER, J. Phys. Coll. Chem. 52, 447 (1948); L. MAGEE, J. Amer. Chem. Soc. 73, 3270 (1951); M. BURTON, J. Chem. Educat. 28, 404 (1951), Annu. Rev. Phys. Chem. 1, 113 (1950); SMITH, Sci. Progr. 38, 389 (1950); L. PLATZMANN, Symposium on Radiobiology, Oberlin Coll. 1950, 97, Disc. 115 (1952); Chem. Eng. News 30, 647 (1952).

* Nachdem in einer Abhandlung des Nobelpreisträgers VON HEVESY (Chimia 6, 201, 1952) ein Überblick über die Entwicklung der Anwendung von radioaktiven Indikatoren unter besonderer Berücksichtigung der Arbeiten von HEVESY auch mit stabilen Isotopen und Bevorzugung der biologischen und physiologischen Gebiete gegeben wurde, werden in diesem Referat kern- bzw. radiochemische Probleme und Anwendungen der künstlichen Radioisotopen in der eigentlichen Chemie, Metallurgie und Metallkunde, Werkstoffprüfung, Technologie u. ä. behandelt und ein kurzer Überblick über die Aufgaben und Probleme des Chemikers und Metallurgen bei der Entwicklung der Uranbrenner gegeben.

¹ T. SEABORG, Ind. Eng. Chem. News Ed. 24, 1192 (1946).

photochemischen Forschung verwandt. In neuerer Zeit gewinnt sie für den Chemiker besondere Bedeutung durch die Möglichkeit, beispielsweise Polymerisationsreaktionen ohne höhere Temperaturen, Druck oder Katalysatoren durchzuführen. Zur Strahlungschemie kann man auch die sogenannte «hot atom chemistry» rechnen. Diese befaßt sich mit dem Studium von Reaktionen, welche von mittels Kernreaktionen angeregten Atomen ausgelöst werden.

Nachdem sich die Verwendung chemischer Methoden in der Atomkernforschung schon bald nach Entdeckung der natürlichen Radioaktivität eingeführt hatte und insbesondere durch HAHN, die Curies, HEVESY, PANETH u. a. zu großer Vollendung weiterentwickelt wurde, hat sich nach der Entdeckung der künstlichen Radioaktivität, der Entwicklung der großen Teilchenbeschleuniger und besonders schließlich nach Inbetriebnahme der Uranbrenner der Umfang dieser Anwendung außergewöhnlich erweitert.

Die Radiochemie, welche mit Hilfe von radioaktiven Methoden das Verhalten von Stoffen in extremen Verdünnungen besonders nach der *tracer*-Methode erforscht, steht vor einer ungewöhnlich zukunftsreichen Entwicklung, welche durch die sich rasch steigernde Produktion künstlicher radioaktiver Isotope in den Uranbrennern stark gefördert wird. Hemmend steht dieser Entwicklung zurzeit noch ein empfindlicher Mangel an geschultem Personal entgegen. In den USA und England werden deshalb bereits seit einigen Jahren an Forschungsinstituten und Hochschulen besondere theoretische und praktische Kurse für Kernchemie abgehalten⁴. Auch in Deutschland werden neuerdings «Isotopenkurse» von der Gesellschaft Deutscher Chemiker abgehalten. Neuere Monographien und Sammelreferate vermitteln zusammenfassende Übersichten über kernchemische bzw. radiochemische Fragen⁵.

⁴ R. WILLIAMS und Mitarbeiter, J. Chem. Educat. 26, 210, 310, 667 (1949), 28, 8 (1951); T. OVERMAN, J. Chem. Educat. 28, 2 (1951); M. CLARK, J. Chem. Educat. 28, 4 (1951); E. CURTIS, J. Chem. Educat. 28, 21 (1951); I. PERLMAN und T. SEABORG, siehe ²; D. CORYELL und W. IRVINE, siehe ². Die Special Training Division des Oak Ridge Instituts of Nuclear Studies hält neuerdings regelmäßige Unterrichtskurse ab (siehe Chem. Eng. News 1953, 586; Chem. Ind. 5, 145, 1953).

⁵ W. HEISENBERG, *Die Physik der Atomkerne*, Vieweg, Braunschweig 1949; W. RIEZLER, *Einführung in die Kernphysik*, Hübner, Berlin-Buxtehude 1950; W. FINKELNBURG, *Einführung in die Atomphysik*, Springer, 1951; O. HAHN, *Künstliche neue Elemente*, Verlag Chemie, 1948; P. SCHREIBER, *Nucleonics* 2, No. 1, 33 (1948); P. SÜE, *Dix ans d'application de la radioactivité artificielle*, Soc. Ed. Sci., Paris 1948; J. ARROL, *Research* 2, 253 (1949); F. CURTIS, *Measurements of Radioactivity National Bureau of Standards*, Circ. 473; C. v. WEIZSÄCKER, *Angew. Chem. (A)* 59, 105 (1947); W. BOTHE, *Angew. Chem. (A)* 59, 108 (1947); J. BORKOWSKI, *Anal. Chem.* 21, 348 (1949); L. MEYER-SCHÜTZMEISTER, *Naturwiss.* 37, 501 (1950); G. FRIEDLÄNDER und W. KENNEDY, *Introduction to Radiochemistry*, John Wiley, New York 1949; T. SEABORG, KATZ und MANNING, *The Transuranium Elements*, Research Papers, McGraw-Hill, New York 1949; P. MOON, *Artificial Radioactivity*, New York, Cambridge University Press, London 1949; C. AEDERSOLD, *ASME-Paper No. 49 bis A 59* (1950), Address before the Society for Non-Destructive Testing, 26. 10. 1950; W. IRVINE, *Anal. Chem.* 21, 364 (1949); *Atomic Energy Commission (AEC): International Bibliography of Atomic*

Die Anwendungsmöglichkeiten radioaktiver Isotope

Die wichtigsten Verwendungsmöglichkeiten der Radioisotopen bestehen entweder in ihrer Benutzung als *Strahlungsquellen* oder als *radioaktive Indikatoren (tracer)*.

Verwendung der Radioisotopen als Strahlungsquelle

Von dieser Verwendungsart gibt es in der *medizinischen Radiologie* und in der *Strahlungsbiologie* zahlreiche Anwendungen, weiterhin gehören in dieses Gebiet die schon erwähnte *Strahlungschemie* und viele *technologisch-radiologische* Anwendungsgebiete, wie z. B. zerstörungsfreie Werkstoffprüfungen usw. Auch die Beseitigung unerwünschter elektrischer Aufladungen, besonders in der Papier- und Textilindustrie oder der Oberflächenladungen in Mikrowaagen und Gaswaagen, gehört in dieses Anwendungsgebiet. Man verwendet als solche «static eliminators», besonders in England das Radioisotop ²⁰⁴Tl (0,78-MeV- β -Strahler mit einer Halbwertszeit von 2,7 Jahren), welches man auf Kupferfolien elektrolytisch niederschlägt und zum Schutz mit einer dünnen Zinkschicht elektrolytisch überzieht. Man erhält bei diesen in Harwell hergestellten Eliminatoren Oberflächenaktivitäten bis zu 0,5 m C/cm². Für die Beseitigung störender Ladungen in der Textilindustrie – vor allem beim Spinnprozeß – kommt man schon mit wesentlich geringeren Aktivitäten aus⁶.

Die technologischen Anwendungen nützen die Durchdringungsfähigkeit der von den Radioisotopen ausgehenden γ - oder β -Strahlung und ihre Schwächung beim Durchgang durch Materie aus.

So ist beispielsweise die *Dickenmessung* dünner Schichten mit Hilfe von Radioisotopen auf diese Weise sehr ele-

Energy, Vol. II: *Scientific Aspects* (mit 24000 Literaturzitaten), Columbia University Press, New York 1950; R. GLASCOCK, *Labelled Atoms*, Interscience Publishers, New York 1951; K. FEARNSIDE und Mitarbeiter, *Applied Atomic Energy*, Temple Press, 1951, Chem. & Ind. 1952, 920; R. WILLIAMS, *Principles of Nuclear Chemistry*, Van Nostrand, New York 1950; D. CORYELL und N. SUGARMAN, *Radiochemical Studies—The Fission Products*, 3 Bände, McGraw-Hill, 1951; L. GORDON, (*Nucleonics*) *Anal. Chem.* 21, 96 (1949), 23, 81 (1951); T. SEABORG und H. TEMPLETON, *Ann. Rev. Physic. Chem.* 2, 99 (1951); H. SELIGMAN, *Chem. & Ind.* 1951, 724; *Isotopes—A Five Year Summary of US Distribution*, AEC, Oak Ridge 1952; E. BRODA, *Advances in Radiochemistry and in the Method of Producing Radioelements by Neutron Irradiation*, Cambridge University Press, London 1952; L. MEITNER, *Angew. Chem.* 64, 1 (1952); J. HILLER und A. JAKOB, *Die Radio-Isotope*, Urban & Schwarzenberg, München-Berlin 1952; *Radioactive Applications of Industrial Significance*, TJD 5078, Office of Technical Services, Department of Commerce; K. CLUSIUS, *Verhandlungen der Schweizer Naturforschenden Gesellschaft* 1950, 33; E. KRUSE, *Chem.-Ing.-Techn.* 24, 45 (1952); R. BRADFORD, *Radioisotopes in Industry*, Reinhold Publishing Corp., New York 1953; *Radioisotopes in Industry*, *Times Sci. Rev.* 12, Spring 1953; E. ZIMEN, *Angewandte Radioaktivität*, Springer, 1952; *Atomic Energy Research Establishment (AERE): Bimonthly Publications Ministry of Supply; Annual Review of Nuclear Science*, Vol. I (1952), *Annu. Rev. Inc.; AEC: Nuclear Science Abstracts; AEC: Semiannual Report of the United States Energy Commission*; G. VON HEVESY und F. PANETH *Lehrbuch der Radioaktivität*, Barth, Leipzig 1928; K. SCHWEITZER und M. JACKSON, *J. Chem. Educat.* 29, 513 (1952).

⁶ Siehe auch: D. GRAVES, *Metal Progr. Nov.* 1952, 94; L. PUTMAN, *Research* 5, 369 (1952).

gant möglich⁷, wobei man von dem Prinzip Gebrauch macht, daß die von einem dünnen Blech usw. durchgelassene Strahlungsintensität umgekehrt proportional der Schichtdicke ist. Der Vorteil der radioaktiven Methode besteht darin, daß kein mechanischer Kontakt mit allen seinen Nachteilen notwendig ist und bei der Dickenmessung kontinuierlich gemessen und auch registriert werden kann (z. B. kann man den durch die Strahlung in einer Ionisationskammer bewirkten Ionisationsstrom nach Verstärkung mit einem Schreiber registrieren; man kann auch eine zweite Ionisationskammer mit einer Isotopenstrahlungsquelle und einem Material standardisierter Schichtdicke mit der ersten zu einer Differenzschaltung kombinieren). Die Auswahl der als Strahlungsquelle zu verwendenden Isotope richtet sich nach der Dicke der Materialprobe und der Durchdringungsfähigkeit der Strahlung. Man kann z. B. das schon genannte ²⁰⁴Tl für Schichtdicken von ca. 30–150 mg/cm² benutzen oder ⁹⁰Sr, ebenfalls einen reinen β -Strahler, für Schichtdicken von ca. 150–800 mg/cm². Viele Materialien, wie Papier, Kunststoffe und dünne Metallschichten, lassen sich damit gut durchdringen. Für besonders leichte Mineralien genügen schwache β -Strahler, wie etwa ³⁵S oder ¹⁴C.

Für schwere Materialien, wie z. B. Stahlplatten usw., verwendet man Isotope mit einer nicht zu intensiven γ -Strahlung. In letzter Zeit hat man nach einem modifizierten Verfahren zur Dickenmessung nicht die durchgelassene, sondern die reflektierte β -Strahlung verwendet, deren Intensität von der Atomnummer und der Dichte des zu untersuchenden Materials abhängig ist⁸. Diese Methode eignet sich besonders gut für die Dickenmessung von *Filmen und dünnen Überzügen auf anderen Metallen* usw. und besitzt noch den Vorteil, daß das zu untersuchende Material nur einseitig zugänglich zu sein braucht.

Für die *zerstörungsfreie Werkstoffprüfung*, z. B. die Untersuchung von Gußstücken, Schweißnähten usw., läßt sich das für die Durchleuchtung häufig angewendete Radium bzw. die Röntgendurchleuchtung in vielen Fällen durch billigere Radioisotope mit γ -Strahlung ersetzen⁹, besonders wenn man *radiographische Methoden*

(γ -Radiographie, Autoradiographie)¹⁰ anwendet. Bei diesen legt man im einfachsten Falle ein zu untersuchendes Muster zwischen eine photographische Platte und eine radioaktive Strahlungsquelle – also das gleiche Prinzip wie bei der entsprechenden Analyse mit γ -Strahlen von Radium oder Röntgenstrahlen. Auf der entwickelten Platte kann man dann die infolge lokal verschiedenen großer Absorption der Strahlen durch das Muster entstandenen Schwärzungsunterschiede auswerten. Als strahlende Isotope sind dazu besonders geeignet Ir 192 (Halbwertszeit 70 Tage, maximale γ -Energie 0,6 MeV), Ta 182 (117 Tage, 0,26 MeV) und Co 60 (5,26 Jahre, 1,33 MeV). Die Radiopräparate können im Uranbrenner wieder reaktiviert werden. In Guß- und Schweißstellen kann man leicht feine Risse und Sprünge, auch Lunker und schwammige Stellen feststellen, weil dort mehr Strahlung als durch die unbeschädigten Werkstoffteile durchtritt. Durchstrahlungen bis zu Wandstärken von 25-mm-Stahl sind bei Verwendung von Co 60 ohne wei-

523 (1950); O. VAUPEL, Technik 5, 155, 285 (1950); A. MORRISON, Metal Progr. 58, No. 1, 80 (1950); Techn. Rdsch. 42, No. 2/6, 27 (1950); R. BERTHOLD, Chem.-Ing.-Techn. 23, 33 (1951); A. TROST, Z. Ver. dtsh. Ing. 93, 4, 73 (1951); L. SCHWINN, Amer. Soc. Test. Mat. Symposium, Philadelphia 1951; Atomics 2, 112 (1951); F. GOTTFELD, Métaux – Corrosion – Industries 26, No. 315, 456 (1951); A. DICKINSON, Steel Process. 37, No. 5, 221, 257 (1951); C. BRACHER, Métaux – Corrosion – Industries 26, 69, 205 (1951); S. BLAIR, Iron Coal Trades Rev. 163, No. 4367, 1349, No. 4368, 1405 (1951); D. HISLOP, Engineering 171, 327 (1951); E. JONES, Steel 128, No. 13, 78 (1951); E. MATTING, Schweißen u. Schneiden 3, Sonder-Nr. Nov., 3 (1951); M. MICHIE, Foundry Trade J. 91, 615 (1951); R. BERTHOLD und A. TROST, Z. Ver. dtsh. Ing. 93, Heft 4 (1951); O. VAUPEL und N. v. WETTERNECK, Metall 5, 293 (1951); H. STAEGE, Techn. Mitt. Essen 45, No. 2, 41 (1952); HANLE, Z. Ver. dtsh. Ing. 94, Heft 20 (1952); J. HARR, Foundry Trade J. 93, No. 1890, 583 (1952); Metallurgie 45, 28 (1952); K. KAINDL, Mikroskopie 7, 244 (1952); Iron Age 1952, 113; H. JUVAN, Berg- u. hüttenmänn. Mh. montan. Hochsch. Leoben 97, 165 (1952); C. FRITZ, Ver. dtsh. Ing. Nachr. 6, 24, 2 (1952), Industrieblatt 53, 26 (1953); R. BERTHOLD, O. VAUPEL und N. v. WETTERNECK, Stahl u. Eisen 72, 492 (1952).

¹⁰ G. TAMANN und G. BANDEL, Arch. Eisenhüttenwesen 6, 293 (1932/33); Stahl u. Eisen 53, 80 (1933), Z. Metallkde. 25, 153, 207 (1933); E. STEPHENS und N. LEWIS, Physic. Rev. 69, 43 L (1946); T. WESTERMARK, Nature 164, 1086 (1949); M. McDONALD und Mitarbeiter, Science 107, 550 (1948); MARTON und ABELSON, Nucleonics 1, No. 2, 52 (1947); F. KAISER, Trans. ASM 27, 403 (1939); CARNEGIE Inst. Techn. Amer. Progr. Rep. Juli 1947, Juli 1948; J. SYNDER, Science 105, 241 (1947); H. YAGODA, Radioactive Measurements With Nuclear Emulsions, Wiley, New York 1949; C. EVANS, Nucleonics 2, 52 (1948); A. GORMAN, Nucleonics 2, 30 (1948); A. MORRISON, Non-Destructive Testing 1947, 24; C. AEDERSOLD, Amer. Soc. Test. Mat. 1950; W. CZYGAN, Iron Age 166, No. 8, 68 (1950); Atomics 1, 108 (1950), 2, 112 (1951); H. HERZ, Nucleonics 9, No. 3, 24 (1951); E. BUTTON und Mitarbeiter, Nucleonics 9, No. 5, 34 (1951); T. BURWELL und F. MURRAY, Nucleonics 9, No. 3, 24 (1951); H. WEIL und J. WILLIAMS, Angew. Chem. 63, 457 (1951); H. GUEST, Radioisotopes Industrial Applications, Toronto 1951; M. HILLERT, Nature 168, 59 (1951), Research 5, 192 (1952); K. KAINDL und A. MATHIASCHITZ, Werkstoffe u. Korr. 2, 268 (1951); M. MICHIE, Iron Coal Trades Rev. 162, 1493 (1950), 163, 23 (1951); Eldorado Mining and Refining Co., Ltd.: Handbook of Radiography, Ottawa 1951; C. CHAUSSIN, Métallurgie Constr. Mécan. 84, Jan., 35, 39, Febr., 52, 99 (1952); S. EASTWOOD, Nucleonics 9, No. 1, 50 (1951); C. PENNOCK, Amer. Foundryman 21, 260 (1952); E. HOPKINS, U.K.S.M. Memo No. 153/48; Conference on Industrial Uses of Radioactive Isotopes, CRIB 405 (Jan. 1949); A. KOHN, Rev. Mét. 48, 226 (1951); D. KIRSCHENBAUM und Mitarbeiter, Anal. Chem. 23, 1440 (1951); V. RIGUEY und F. BAXTER, Non-Destructive Testing 11, 34 (1952); E. RABINOWICZ, Nature 170, 1029 (1952); M. FALK, Atomics 3, 249 (1952).

⁷ C. AEDERSOLD, Proc. Amer. Soc. Test. Mat. 48, 527 (1940); W. IRVINE, Anal. Chem. 21, 367 (1949); W. KOLB, Stahl u. Eisen 72, 945 (1952); Modern Plastics 29, No. 2, 141, 213 (1951); J. ANTAL und H. WEDER, Rev. Sci. Instr. 23, 424 (1952); J. DELMONTE, Modern Plastics 29, No. 8, 141, 146 (1952); A. TROST, Stahl u. Eisen 72, 941 (1952); Chem.-Ing.-Techn. 24, 163 (1952); TH. WUPPERMANN, DBP 847 203, K. 42b, Gr. 11 (1952); R. BERTHOLD, Chem.-Ing.-Techn. 24, 163 (1952).

⁸ C. AEDERSOLD, siehe ⁷; C. CLAPP und S. BERNSTEIN, Gen. Electr. Rev. 53, No. 11, 39 (1950); R. DIXON, Atomics 2, 273 (1951); E. CLARKE und E. BARBOUR, Electr. Eng. (New York) 70, 35 (1951); S. EASTWOOD, siehe L. PUTMAN, Research 5, 372 (1952).

⁹ A. JOHNSON, J. Appl. Physics 12, 304 (1941); M. DE COUREL, Docum. Métall. 1950, No. 6, 47; E. BIRCHMALL und O. PHILBROCK, Iron Age 164, No. 19, 77, 174 (1949); C. AEDERSOLD, Non-Destructive Testing 9, No. 3, 10 (1950/1951); E. PULLIN, Welding 18, 166 (1950); A. GROWTH, Handbook of Industrial Radiology, E. Arnold, London 1949; P. GROVE, Iron Coal Trades Rev. 157, 1249 (1948); E. JOHNSTON, J. Res. Development Brit. Cast Iron Res. Ass. 3, No. 8,

tercs möglich. Ein besonderer Vorteil der Durchstrahlung mit Radioisotopen liegt darin, daß man sehr viele Werkstücke gleichzeitig prüfen kann, indem man z. B. eine ganze Reihe Gußstücke mit hinterlegten Filmen kreisförmig um einen zentral angebrachten γ -Strahler herum aufstellt.

Übrigens kann man auch so vorgehen, daß man das Radioisotop mit Fett gemischt unter hohem Druck einpreßt und nach dem Abwischen des Fetts die photographische Platte auflegt.

Auch *Entmischungsvorgänge in Metallschmelzen* kann man radiographisch untersuchen, indem man der Schmelze sehr kleine Mengen von Radioisotopen zusetzt, das Metall nach dem Erkalten poliert, auf eine photographische Platte legt und nach deren Entwicklung das Schwärzungsmuster auswertet. Bei der General Electric Co. wurde mit radioaktivem W 185 die Verteilung von Wolfram in den Dendriten einer Legierung von 70% Ni, 25% Cr und 5% W radiographisch ermittelt. In Kobaltlegierungen konnte man auf ähnlichem Wege feststellen, daß das Wolfram im allgemeinen mit den Dendriten verbunden ist.

Die Absorption der von einem Radioisotop ausgehenden Strahlung kann man natürlich auch noch für die Kontrolle vieler technischer Operationen ausnutzen. So kann man, um nur einige wenige Beispiele zu nennen, die *Füllhöhe von Flüssigkeiten oder Schmelzen* in Kesseln, Tanks, Öfen usw. messen, registrieren und steuern¹¹, entweder durch Messung der Strahlenschwächung oder Registrierung der bei der Absorption von γ -Strahlung entstehenden Sekundärstrahlung oder indem man einen γ -Strahler in einem Schwimmer auf den Flüssigkeitsspiegel anbringt und seine Strahlung außerhalb des Tanks mit einem GEIGER-MÜLLER-Zählrohr verfolgt.

Zur Messung der *Größe unregelmäßig geformter Oberflächen* bringt man die Probe zwischen eine gleichmäßige, ebene Oberfläche einer Strahlungsquelle und eine Elektrode, welche zu einem Anzeigergerät führt¹². Als Strahler kann man zweckmäßig Polonium verwenden, dessen γ -Strahlung schon durch äußerst dünne Schichten des Materials absorbiert wird.

Die Abnahme bzw. das Verschwinden von Strahlung kann man zur Feststellung des *Abnutzungsgrades von feuerfesten Wänden in Schmelzöfen* benutzen, indem man – eventuell an verschiedenen Stellen – Co-60-Präparate in die Ofenwand einbaut und deren Strahlung von außen mißt. Wenn das Co-Präparat infolge der Wandabnutzung angegriffen wird, so verschwindet die Strahlung¹³.

Bei der *Markierung von Stoffen bzw. Mischungen* mit Radioisotopen, besonders auch von in Bewegung befindlichen Systemen, kommt es nicht auf die chemischen

Eigenschaften dieser Isotope an, sondern es handelt sich dabei im Prinzip um den Ersatz eines Nachweisverfahrens durch ein anderes, besonders empfindliches. Einige Beispiele dazu:

Bei der *Kontrolle des Hochofenprozesses*¹⁴ wurde die Durchsatzgeschwindigkeit des Gebläsewindes vom Eintritt bis zur Gicht und die Verweilzeit der Gase im Ofen mit Hilfe von Radon bestimmt¹⁵. Nach dem gleichen Prinzip kann man auch z. B. die *Wirksamkeit von Entlüftungsanlagen* prüfen (etwa mit A 41 und Xe 133)¹⁶ oder *Leckstellen in unterirdischen Wasser-, Gas- oder Ölleitungen, Kabeln* usw. ermitteln, etwa mit Äthyl- oder Methylbromid, das mit Br 82 markiert ist¹⁷; man kann auch den *Verlauf unterirdischer Wasserläufe* damit verfolgen (mit 86 RbCl)¹⁸. Die sonst schwierige Feststellung der *Verteilung abgestreuter Insektizide* kann man mittels beigemischter radioaktiv markierter öllöslicher Mn-Verbindungen, deren Aktivität am Boden gemessen wird, mit einer Empfindlichkeit von 10 g/ha messen¹⁹.

Man hat die *Durchströmungsgeschwindigkeit in Kläranlagen* mit Hilfe von ²⁴NaCl verfolgt²⁰ (der übliche Nachweis mit zugesetzten Farbstoffen stößt auf Schwierigkeiten, weil diese entweder in trüben Wässern nicht zu erkennen sind oder von den Filtersubstanzen adsorbiert werden).

Wichtig sind Untersuchungen mit Radioisotopen zum *Studium von Reibungsvorgängen zwischen Metallen und ihrer Beeinflussung durch Schmiermittel* geworden. Die sehr kleinen Mengen von Metallen, die selbst bei harten Metallen während der Reibung gegenseitig ineinander übergehen, kann man durch Zusatz von Radioisotopen bestimmen²¹. Man kann bei solchen Untersuchungen z. B. Kolbenringe mit Radioisotopen überziehen oder sie in einem Urانبrenner radioaktiv machen und dann den Gehalt an radioaktivem Eisen oder etwa Chrom bei verchromten Stücken in Schmieröl laufend ermitteln (was auch durch Kombination mit radiographischen Methoden möglich ist). Man erhält so wertvolle Aufschlüsse auch über die *Wirksamkeit von Schmiermitteln*.

¹⁴ W. LOONZ, Stahl u. Eisen 72, 509 (1952); W. VOICE, siehe ¹³, Steel 129, No. 11, 102, 104, 106 (1951); GILLINGS und W. VOICE, J. Iron Steel Inst. 162, 336 (1949).

¹⁵ R. MAYORCAS und W. THIRING, Nature 152, 3868, 723 (1937); W. VOICE, J. Iron Steel Inst. 163, 312 (1950), 166, 315 (1950), Research 4, 418 (1951).

¹⁶ J. GUERON, Nucleonics 9, No. 5, 43 (1951).

¹⁷ J. GUERON, siehe ¹⁶; E. HULL und W. KENT, Ind. Eng. Chem. 44, 2749 (1952); A. MONTENS, Gas- u. Wasserfach 93, 411 (1952); Canad. Chem. Process. 36, No. 7, 60 (1952); W. KLEIN, Eng. Dig. 13, No. 6, 176 (1952); Iron Age, 26. 3. 1953, 156; A. GEMANT, J. Appl. Physics 24, 93 (1953).

¹⁸ K. FEARNside, siehe ⁵.

¹⁹ W. IRVINE, Anal. Chem. 21, 364 (1949).

²⁰ R. GARDENER, Mod. Ind. 1948, 15; A. THOMAS und S. ARCHIBALD, Proc. Amer. Soc. Civil Eng. 77, 8, 84, 1/12 (1951); KNOP, Wasserwirtschaft 41, 117 (1950/51).

²¹ T. BURWELL und W. IRVINE, J. Appl. Physics 15, 459 (1944); N. GREGORY, Nature 157, 443 (1946); T. BURWELL, Nucleonics 1, 38 (1947); T. BURWELL und F. MURRAY, Nucleonics 6, No. 1, 34 (1950); R. JACKSON und Mitarbeiter, siehe Chem. Eng. News 29, 4850 (1951); BOWDEN und TEDEN, Proc. Roy. Soc. A 161, 371 (1939); E. RABINOWICZ (Auszug), Stahl u. Eisen 73, 427 (1953); T. BURWELL und O. STRANG, Metal Progr. 1951, 69.

¹¹ P. SCHREIBER, Nucleonics 2, No. 1, 33 (1948); D. McCUTCHEON, Non-Destructive Testing 7, No. 3, 7 (1948/49); J. COMBERG, Physic. Rev. (2) 83, 875 (1949); R. BERTHOLD, Chem.-Eng.-Techn. 23, 33, 65 (1951), Bull. Amer. Physic. Soc. 26, No. 4, 11 (1951).

¹² M. BLAN und R. CARLIE, Electronics 21, 78 (April 1948).

¹³ W. VOICE, J. Iron Steel Inst. 167, 157 (1951).

Solche Untersuchungen²² sind wertvoll und geben Aufschlüsse über die Abhängigkeit des Abriebs vom Druck und der Härte und ergeben zum Beispiel, daß manche technisch verwendeten schwefelhaltigen Schmierölsätze einen sehr dünnen, aber sehr fest haftenden Oberflächenfilm bildeten, durch den eine katalytische Oxydationswirkung des Metalls auf das Schmieröl verhindert wurde.

Der Abrieb von Hartmetallschneiderwerkzeugen²³ aus Wolframcarbid (~ 86%) mit Titancarbid (3,5 bis 4,7%), in einem Falle noch mit 2,5% TaC, und Co als Binder ist ganz neuerdings wieder radiometrisch in der Weise untersucht worden²⁴, daß die Hartmetallwerkzeuge einer einstündigen Neutronenbestrahlung von 10^{12} n/cm²/s ausgesetzt wurden. Neben Co 60, Ti 51 und Ta 182 werden die zum Nachweis am geeignetsten Wolframisotope W 185 und W 187 gebildet. Die Aktivität wurde mit dem GEIGER-MÜLLER-Zählrohr bzw. autoradiographisch gemessen.

Auch bei der Bestimmung des Verschleißes von Drahtziehformen aus W und Co (10 : 1) wurden diese von BUTTON, DAVIES und TOURRETT²⁵ in einem Uranbrenner bis zu einer Aktivität von 500 m C aktiviert. Unter Benutzung verschiedener Schmiermittel wurden Drähte aus Cu mit den aktivierten Drahtziehformen gezogen und die Aktivität bestimmt. Die Abnutzung betrug für 30 cm Drahtlänge etwa 3×10^{-8} g.

Die Empfindlichkeit der radiometrischen Methoden ist außergewöhnlich groß, besonders natürlich dann, wenn die verwendeten Radioisotope eine hohe spezifische Aktivität (= Aktivität/g) aufweisen. Beispielsweise läßt sich durch seine β -Strahlung Phosphor noch in einer Menge von 10^{-15} g mit einem Zählrohr nachweisen. Diese hohe Empfindlichkeit gestattet Untersuchungen in vielen Fällen, wo andere, z. B. mikrochemische Methoden längst versagen.

In den letzten Jahren sind radioaktive Verfahren auch bei der Untersuchung der Aufbereitungsverfahren von Erzen eingeführt worden²², besonders durch das Richards Mineral Engineering Laboratory, Cambridge (Mass.), und die Stamford Research Laboratories of the American Cyanamid Co. in Stamford (Conn.). Überwiegend ist man damit beschäftigt, mit Radioisotopen Flotationsvorgänge im Hinblick auf deren großen Umfang (schätzungsweise werden täglich 250 000 t Erz flotiert!) zu untersuchen, d. h. mit «markierten» Verbindungen die hier so wichtigen Grenzflächenerscheinungen zu studieren und weiter aufzuklären. Aber auch mechanische Trennverfahren

wie die mechanische Auslese von hochwertigem Erz von Gangart kann man dadurch verbessern, daß man an eine Neutronenaktivierung der Erze eine automatische Erz-auslese anschließt.

In diesem Zusammenhang sei auch auf neuere Arbeiten hingewiesen, die sich mit der *Nutzbarmachung und Trennung von Mineralien auf Grund induzierter Radioaktivität durch Neutronenbestrahlung* beschäftigen²⁶. Natürliche radioaktive Mineralien kann man ja schon durch ihre Strahlung nach empfindlichen Methoden entdecken – bei der Suche nach Uranerzlagern macht man davon Gebrauch^{26a}. Im Brookhaven National Laboratory wurden 150 Proben von 51 Mineralien im Uranbrenner mit Neutronen bombardiert und auf Grund der induzierten Aktivitäten mit den von entsprechenden reinen Verbindungen berechneten verglichen.

Die *eigentlichen «tracer»-Methoden* (Radioindikatorenmethoden), insbesondere in der analytischen Chemie, beruhen bekanntlich darauf, daß die Radioisotopen das gleiche chemische Verhalten wie die stabilen Isotopen des gleichen Elementes aufweisen und ohne Störung alle dessen Reaktionen mitmachen, und daß man sie in kleinsten Mengen durch ihre Strahlung nachweisen kann. Sie sind gewissermaßen die «Spione» in der Gemeinschaft der normalen Isotope, begleiten diese bei allen Vorgängen und werden dabei durch keine physikalischen oder chemischen Einwirkungen zerstört. Man setzt sie – als Element oder Verbindung – dem stabilen Element bzw. dessen Verbindung zu, man markiert, etikettiert (*to label*) die stabilen Partner und erhält durch den höchstempfindlichen Nachweis der radioaktiven Teilnehmer jederzeit Aufschluß über den Ablauf der zu untersuchenden Vorgänge. Der wesentliche Vorteil der radioaktiven Indikatormethoden ist einmal ihre große Empfindlichkeit, zum anderen ihre spezifische Wirkung, weil die radioaktiven Begleiter unabhängig von allen übrigen Partnern und deren Reaktionen verfolgt und nachgewiesen werden können. Die Empfindlichkeit der *tracer*-Methode durch Messung der ausgesandten Strahlung ist außergewöhnlich groß und natürlich abhängig von der Halbwertszeit, also der der Zerfallsgeschwindigkeit des Radioisotops. Von kurzlebigen Isotopen, wie z. B. Na 24, lassen sich noch 4×10^{-10} g nachweisen! Weiterhin hängt die Empfindlichkeit von der ausgesandten Strahlungsintensität ab (wobei noch darauf zu achten ist, daß weiche β -Strahlung von sehr geringem Durchdringungsvermögen, wie z. B. von Cl 34 mit 0,14 MeV, schon von der zu untersuchenden Probe erheblich und von Al-Folien von 100 μ Dicke ganz absorbiert wird).

²² L. CLARK und Mitarbeiter, J. Appl. Physics 14, 428 (1946); L. PINOTTI und Mitarbeiter, Quart. Trans. SAE 3, 364 (1949); Petr. Eng. 21, No. 6, 3 (1949); E. BUTTON und Mitarbeiter, Nucleonics 9, No. 5, 34 (1951); T. BURWELL und F. MURRAY, siehe ²¹.

²³ E. MERCHANT und J. KRABACHER, J. Appl. Physics 22, 1507 (1951).

²⁴ B. COLDING und G. ERWALL, Nucleonics 11, No. 2, 46 (1953).

²⁵ S. CARR (AERE Report), *Radioactive Isotopes in Mineral Dressing Research Ministry of Supply Harwell 1952* (mit vielen Literaturangaben); Min. J. 9. 5. 1952, 473; 26. 9. 1952, 340; 16. 1. 1953, 70.

²⁶ M. GAUDIN und Mitarbeiter, Min. & Metallurgy 1948, 432, Bull. Inst. Min. Met. No. 552, 29 (1952); Trans. Amer. Inst. Min. Eng. 187, 495 (1950); E. SENFLE und Z. LEAVITT, Nucleonics 6, No. 5, 54 (1950); A. KAUFMAN, Can. Min. & Met. Bull. 43, 450 (1950); E. SENFLE und A. GAUDIN, Nucleonics 8, No. 5, 53 (1951).

^{26a} R. MENKE, U. S. Pat. 2551449 (1951); F. BCHONNEK (tschechisch), Ref. Z. anal. Chem. 137, 201 (1952). Die Minerals Engineering Co. in Grand Junction (Colo.) liefert ein Gerät, welches den Gehalt an Uranoxyd direkt in Prozenten abzulesen gestattet (Eng. Min. J. 1953, 165).

Im Hinblick auf den außerordentlich großen und sich ständig steigernden Umfang, den die Anwendung der *tracer*-Methode genommen hat, können im Rahmen dieses Übersichtsberichtes nur einige charakteristische Anwendungsbeispiele erwähnt werden. Im übrigen wird auf Monographien und Sammelreferate über dieses Gebiet verwiesen²⁷.

In der sogenannten radiometrischen Analyse fällt man den zu bestimmenden Stoff mit einem radioaktiv markierten Füllungsmittel aus – z.B. Ag mit KJ, welches mit radioaktivem Jod markiert ist²⁸ – und berechnet seine Menge aus der Aktivität des Niederschlags oder der Aktivitätsabnahme der überstehenden Lösung.

Die verschiedenen Modifikationen der *tracer*-Analyse können hier nur gestreift werden, Einzelheiten unter²⁷.

Die sogenannte «Verdünnungsanalyse» (*isotope dilution analysis*) bietet besondere Vorteile dann, wenn entweder die zu untersuchende Substanz in äußerst kleiner Konzentration vorliegt oder von anderen Reaktionsteilnehmern nicht quantitativ abgetrennt werden kann. Man setzt dann einem Gemisch verschiedener Verbindungen die zu untersuchende Verbindung, welche ein Radioisotop in einem bekannten Verhältnis zum stabilen Element enthält, zu und mißt die Änderung des Verhältnisses infolge der Verdünnung, die durch die Menge des schon im System vorhandenen Elements bewirkt wird. Aus dieser Änderung kann man die ursprünglich im Gemisch vorhandene Gesamtmenge der Verbindung berechnen. Das zu analysierende Muster muß chemisch rein sein. Die Genauigkeit der Methode, die vom Verdünnungsgrad, nicht aber von der Konzentration im Ausgangsmaterial abhängt, beträgt etwa 1%. Sie ist für Analysen in schwer zu trennenden Gemischen besonders geeignet und wird besonders in der Biochemie häufig verwendet²⁹.

²⁷ R. EHRENBURG, *Radiometrische Methoden*, in *Physikalische Methoden der analytischen Chemie*, I, Leipzig 1933; W. RIEZLER, *Angew. Chem.* (A) 59, 113 (1947); J. MATTAUCH, *Angew. Chem.* (A) 59, 37 (1947); R. FLEISCHMANN, *Angew. Chem.* 61, 277 (1948); C. AEBERSOLD, *Proc. Amer. Soc. Test. Mat.* 48, 527 (1948); W. WILSON, C. NIER und P. RUMANN, *Symposium on Preparation and Measurement of Isotopic Tracers*, J. W. Edwards, Ann Arbor (Mich.) 1946; G. v. HEVESY, *Radioactive Indicators*, Interscience Publishers, New York 1948; E. YANKWICH, *Anal. Chem.* 21, 318 (1949); N. SCHACHT, *Angew. Chem.* 61, 465 (1949); E. BOYD und N. HUME, *Radiochemical Analytical Methods—Analytical Chemistry of the Manhattan Project*, Chapter 28; H. YAGODA, *Radioactive Measurements With Nuclear Emulsions*, John Wiley, New York 1949; F. LOT, *Les isotopes radioactifs*, Paris 1951; K. SCHWEITZER und B. WHITNEY, *Radioactive Tracer Techniques*, Van Nostrand Co., New York 1949; W. SRI, *Isotopic Tracers and Nuclear Radiations*, McCraw-Hill, New York 1949; E. BRODA, *Österr. Chem.-Ztg.* 52, 7 (1951), auch *Österr. Chem.-Ztg.* 51, 33 (1950); M. GARRISON und G. HAMILTON, *Chem. Rev.* 49, 237 (1951); C. WAHL und A. BONNER, *Radioactivity Applied to Chemistry*, John Wiley, New York 1951; *Isotope Technique Conference*, Oxford 1951, *Proceedings*, Vol. II: *Industrial and Allied Research Applications*, London 1952; W. KENNEDY, *Radioactive Atoms and Isotopic Tracers*, 26th Annual Priestley Lectures, Pennsylvania State College, 1952; L. PUTMAN, *Research* 5, 368 (1952); H. GÖTTE, *Chem.-Ing.-Techn.* 24, 204 (1952).

²⁸ P. SÜZ, *Bull. Soc. Chim. France* 1947, 405, auch 1946, 102.

²⁹ Siehe etwa: D. KAMEN, siehe ²⁶; C. WAHL und A. BONNER, siehe ²⁷; D. RITTENBERG und L. FORSTER, *J. Biol. Chem.* 127, 285, 291, 333, 385 (1938), 133, 737 (1940); C. HENRIQUES und C. MAR-

Bei der sogenannten «Aktivitätsanalyse» (*activity analysis*)³⁰ bestimmt man ein einzelnes Radioisotop in einem Gemisch mehrerer radioaktiver Elemente durch die Art und den Betrag seiner Strahlung – ausgedrückt als absolute Aktivität oder in Prozenten der Gesamtaktivität aller anwesenden radioaktiven Elemente. Solche Bestimmungen sind z. B. für die Analyse der zahlreichen Spaltprodukte von U 235 von großer Bedeutung. Auf die Einzelheiten der quantitativen Durchführung dieser Analysenmethode, die Probenahme, die Auswahl der inaktiven Trägerisotope (*carrier isotopes*) und die Methodik der Strahlungsmessung kann hier nicht näher eingegangen werden. Wenn keine umfangreichen Trennoperationen erforderlich sind, so lassen sich Analysen oft sehr schnell durchführen. Man konnte z. B. den Niobgehalt in einem Gemisch mit Zirkonium und seltenen Erden in einer Stunde quantitativ ermitteln.

In der «Aktivierungsanalyse» (*activation analysis*)³¹ induziert man Radioisotope, indem man die zu untersuchende Probe mit hochenergiereichen Teilchen aus einem Teilchenbeschleuniger oder besser mit Neutronen aus einem Uranbrenner bestrahlt. Man identifiziert die erzeugten Radioisotope durch ihre spezifische Strahlung (Halbwertszeit, Energieverteilung, Art und Vorzeichen der ausgesandten Strahlen) und kann daraus qualitative und quantitative Schlüsse ziehen. Man konnte beispielsweise nach dieser Methode 0,001 γ As quantitativ nachweisen³². Die recht empfindliche Analysenmethode setzt allerdings das Vorhandensein eines Uranbrenners (*reactors*) voraus und wird deshalb nur in Zusammenarbeit mit den großen, mit Uranbrennern ausgestatteten Forschungsstellen in den USA und England (Harwell) durchgeführt. Besonders in den USA wird jedoch diese Methodik im Hinblick auf die weiteren in Betrieb kommenden kleineren Uranbrenner immer weitere Verbreitung finden. Das zu untersuchende Element muß zum Nachweis geeignete radioaktive Isotope besitzen, und aus anderen mitanwesenden Elementen dürfen durch die Bestrahlung keine Radioisotope entstehen, deren Strahlungseigenschaften denjenigen der zu messenden Isotope zu ähnlich sind.

GUETTI, *Anal. Chem.* 18, 476 (1946); E. YANKWICH, siehe ²⁷; A. ABRAMS, *Arch. Biochem.* 30, 44 (1951); H. GÖTTE, *Chem.-Ing.-Techn.* 24, 207 (1952); O. KIRSCHENBAUM und V. GROSSE, *Trans. ASM* 45, 758 (1953).

³⁰ Siehe z. B. N. HUME, *Anal. Chem.* 21, 322 (1949).

³¹ Siehe z. B. E. BOYD, *Anal. Chem.* 21, 335 (1949); W. RIEZLER, *Z. Naturforsch.* 4a, 545 (1949); C. WAHL und A. BONNER, siehe ²⁷; C. AEBERSOLD, siehe ²⁷; W. LEDDICOTTE und A. REYNOLDS, *Nucleonics* 8, No. 3, 62 (1951); O. MEULHOUSE und E. THOMAS, *Nucleonics* 7, No. 1, 9 (1950); D. GOLDBERG und H. BROWN, *Anal. Chem.* 22, 308 (1950); J. TAYLOR und W. HARRIS, *Nucleonics* 6, No. 4, 54 (1950); P. LONG, *Analyst* 76, 644 (1951); A. SMALES, *Chem. Age* 23, 1459 (1951); E. HUDGENS und C. NELSON, *Anal. Chem.* 24, 171, 1472 (1952); T. KELLEY und Mitarbeiter, (*Ref.*) *Anal. Chem.* 24, 1523 (1952); J. ATCHINSON und H. BLAMER, *Anal. Chem.* 24, 1812 (1952); J. DELBECQ und H. YUSTER, *Anal. Chem.* 25, 350 (1953); W. HERR, *Angew. Chem.* 64, 679 (1952); G. EICHHOLZ, *Nucleonics* 10, No. 12, 58 (1952); *Chem. Abstr.* 46, 7468 (1952), 47, 2638 (1953); E. HUDGENS und J. DARAGIAN, *Nucleonics* 10, No. 5, 25 (1952).

³² A. SMALES und D. PATE, *Analyst* 77, 717 (1952).

Die Untersuchung von *Austauschreaktionen* und *Diffusionsvorgängen* mittels radioaktiver Isotope ist von großer Bedeutung geworden, besonders in der *Metallkunde* und *Metallurgie*.

Da sich Atome mit gleicher Elektronenkonfiguration chemisch nicht unterscheiden, konnte man beispielsweise die *Selbstdiffusion* früher experimentell nicht untersuchen. Die Selbstdiffusion bei verschiedenen Temperaturen ist wichtig wegen der Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften durch thermische und mechanische Behandlung. Sie wurde schon frühzeitig durch VON HEVESY mit natürlichen Radioisotopen, z. B. mit radioaktivem Blei, untersucht^{32a}.

Zuden Diffusionsmethoden gehört auch die von HAHN³³ schon frühzeitig entwickelte «*Emaniermethode*». Bei dieser verfolgt man die Diffusion eines fremden gasförmigen Elements, wie etwa ThEm, und den Austritt desselben aus der Oberfläche. Änderungen der inneren Struktur des Metalles bewirken dann eine sprunghafte Änderung des Emanationsaustritts.

Mit der Verfügbarkeit von künstlichen Radioisotopen ließen sich die Methoden zur Bestimmung der Selbstdiffusion wesentlich verfeinern und erweitern³⁴. Man kann auf einem Metall zunächst (durch Aufdampfen oder elektrolytisch) eine dünne Schicht einer definierten Isotopenzusammensetzung aufbringen. Diese kann man übrigens auch durch Bestrahlung der Oberfläche mit positiven Teilchen erzeugen (nicht mit γ -Strahlen oder Neutronen, weil diese über die Oberflächenschicht hinaus in das Metallinnere eindringen würden).

Nach Messung der Oberflächenaktivität kann man das Metall erhitzen, wobei die radioaktiven Atome in das Innere diffundieren. Aus der daraus resultierenden Abnahme der Oberflächenaktivität kann man auf den Selbstdiffusionskoeffizienten in Abhängigkeit von der Temperatur schließen. Die Messungen ergeben interessante Ergebnisse, z. B. daß die Selbstdiffusionskoeffizienten häufig um Größenordnungen kleiner als die Fremddiffusionskoeffizienten sind und ihre Größe durch Beimengungen stark anwächst. Da die Selbstdiffusion maßgeblich von der Fehlordnung im Kristallgitter beeinflusst wird und

andererseits die Fehlordnung für wichtige Eigenschaften, wie Leitvermögen, Reaktionsfähigkeit usw., verantwortlich ist, so gewinnt die Bestimmung der Selbstdiffusionskoeffizienten – die, wie erwähnt, mit anderen Methoden als den radioaktiven nicht ermittelt werden konnte – erhöhte Bedeutung für die Feinstruktur in Metallen und die von dieser abhängigen Materialeigenschaften.

Auch in Flüssigkeiten und Gasen kann man mit Radioisotopen die Selbstdiffusion messen³⁵, und natürlich auch die Diffusion verschiedener Atome, Ionen, auch für *Austausch-* und *Adsorptionsvorgänge*. Die Diffusion von radioaktivem Zink in $\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ und ZnO wurde von LINDNER³⁶ untersucht, der Austausch zwischen gasförmigem und chemisch sorbiertem CO an Eisenoberflächen von EISEHENS³⁷, die Austauschreaktion zwischen Kobalt(II)- und Kobalt(III)-Ionen in Perchlorsäurelösung von BONNER und HUNT³⁸, Austausch- und Diffusionsvorgänge an Silberelektroden von GERISCHER³⁹, auch von DE CARMO ANTA⁴⁰ und ROLLIN⁴¹. Schon VON HEVESY hatte die Austauschreaktionen zwischen einer Elektrode und ihren Ionen studiert⁴². Neuere Untersuchungen darüber führten SIMNAD und RUDER⁴³ durch, auch QUAGLIOZZI und RESCIGNO⁴⁴, ebenso BAPTISTA⁴⁵, COFFIN und TINGLER⁴⁶, PALACIOS und BAPTISTA^{46a}. Wegen weiterer mit Radioisotopen verfolgter Austauschreaktionen siehe z. B. ADAMSON und MAGEE⁴⁷, E. YANKWICH und McNAMARA⁴⁸, GAMBOA und MADDOCK⁴⁹, R. BENTLEY⁵⁰. BETTS und MCKENZIE⁵¹ bestimmten radiochemisch Aktivitätskoeffizienten in gemischten Elektrolyten. SPINKS⁵² bestimmte die Diffusion in gebundenem Zement mit Hilfe radioaktiver Ionen.

In der *Adsorptionskatalyse* kann man durch Einbau von Radioisotopen in die Oberfläche entscheiden, ob

³⁵ Literatur siehe C. WAHL und A. BONNER, S. 75 ff.; E. BURHELL und T. SPINKS, Can. J. Chem. 30, 311 (1952).

³⁶ R. LINDNER und Mitarbeiter, Acta Chem. Scand. 6, 647 (1952).

³⁷ P. EISEHENS, J. Amer. Chem. Soc. 74, 6167 (1952).

³⁸ A. BONNER und P. HUNT, J. Amer. Chem. Soc. 74, 1866 (1952).

³⁹ H. GERISCHER und W. VIELSTICH, Z. Elektrochem. 56, 380, 386 (1952).

⁴⁰ M. DE CARMO ANTA und M. COTTIN, C. R. Acad. Sci. 234, 1668 (1952).

⁴¹ V. ROLLIN, J. Amer. Chem. Soc. 62, 86 (1940).

⁴² G. v. HEVESY und B. BLITZ, Z. physik. Chem. B 3, 271 (1929), Physik. Z. 16, 52 (1915).

⁴³ T. SIMNAD und C. RUDER, J. Electrochem. Soc. 98, 301 (1951).

⁴⁴ Siehe auch G. v. HEVESY und L. ZECHMEISTER, Ber. deutsch. chem. Ges. 53, 410 (1920); E. QUAGLIOZZI und A. RESCIGNO, Helv. Chim. Acta 35, 1227 (1952); D. ARMSTRONG und J. SCHUBERT, Science 106, 403 (1947); P. JORDAN, Helv. Chim. Acta 34, 699 (1951).

⁴⁵ M. BAPTISTA, Gaz. Fis. 2, 2051 (1952), C A 46, 10019 (1952).

⁴⁶ C. COFFIN und J. TINGLER, J. Chem. Physics 17, 502 (1949).

^{46a} J. PALACIOS und M. BAPTISTA, C. R. Acad. Sci. 234, 1676 (1952).

⁴⁷ W. ADAMSON und S. MAGEE, J. Amer. Chem. Soc. 74, 1590 (1952).

⁴⁸ E. YANKWICH und E. McNAMARA, J. Chem. Physics 20, 1352 (1952).

⁴⁹ M. GAMBOA und G. MADDOCK (spanisch), Chem. Zbl. 1952, 4566, 7619.

⁵⁰ R. BENTLEY, Nucleonics 2, 18 (1948); siehe auch M. HAÏSSINSKY und M. COTTIN, J. Chim. Physique 46, 476 (1949).

⁵¹ H. BETTS und N. MCKENZIE, Can. J. Chem. 30, 146 (1952).

⁵² T. SPINKS und Mitarbeiter, Can. J. Chem. 30, 20 (1952).

^{32a} G. v. HEVESY, Physik. Z. 14, 49, 1202 (1913), Phil. Mag. 25, 390 (1913), 27, 586 (1914); F. PANETH, Koll.-Z. 13, 297 (1913), Radioelements as Indicators, McGraw-Hill, New York 1928.

³³ O. HAHN und E. ZIEMENS, Naturw. 12, 1140 (1924), 17, 295 (1929), Z. physik. Chem. (A) 191, 1 (1942); weiteres siehe ²⁷.

³⁴ G. v. HEVESY, Trans. Faraday Soc. 34, 841 (1938); C. MCKAY, Trans. Faraday Soc. 34, 845 (1938); B. ROLLIN, Physic. Rev. 55, 231 (1939); F. FLAGG, J. Franklin Inst. 228, 471, 623 (1939); J. STEIGMAN, N. SHOCKLEY und C. DIX, Physic. Rev. 56, 13 (1939); A. JOHNSON, Trans. Amer. Inst. Min. Eng. 143, 107 (1941), 147, 331 (1942); H. MILLER, J. Appl. Physics 12, 303 (1941); K. STANLEY, Nucleonics 1, No. 2, 70 (1947); NIX und JANNOT, Physic. Rev. 80, 119 (1950); R. LINDNER und G. JOHANSSON, Acta Chem. Scand. 4, 307 (1950); M. HAÏSSINSKY und PESCHANSKI, J. Chim. Physique 47, 191 (1950); M. HAÏSSINSKY und M. COTTIN, J. Physique Radium 11, 611 (1950); W. SEITH, (Ref.) Metall 5, 253 (1951), Erzmetall 4, 390 (1951); R. HOLGATE, Metallurgia 45, 179 (1951); C. HUTTER, Bull. Soc. Chim. France 1951, 7; weitere Literatur siehe z. B. bei A. KOHN, Rev. Mét. 48, 219 (1951); C. WAHL und A. BONNER, siehe ²⁷; R. LINDNER, Z. Elektrochem. 54, 430 (1950); H. SCHREINER, Österr. Chem.-Ztg. 53, 238 (1952).

Ionen aus der anderen Phase elektrostatisch angelagert werden oder ein Austausch zwischen Oberflächenionen und Lösungslösungen stattfindet⁵².

Über die Adsorption von Ionen an Glas und den Austausch bzw. die Diffusion von Natrium im Glas wurden verschiedene Untersuchungen angestellt⁵⁴.

Beim Studium der Wirkung von Ionenaustauschern hat man ebenfalls Radioisotope eingesetzt⁵⁵.

Die radioaktive Messung der Adsorption von oberflächenaktiven Stoffen⁵⁶ ist auch bei der Verwendung von Netz- und Waschmitteln in der Textilindustrie eingeführt worden. Man kann beispielsweise dem Waschwasser für Textilien radioaktives Calciumbicarbonat zur Markierung zusetzen und dann die Wirksamkeit verschiedener Waschmittel durch Bestimmung der im getrockneten Gut zurückbleibenden Menge des Ca-Isotops kennzeichnen. Man kann auch das Wasch- oder Netzmittel selbst durch Radioschwefel oder Radiokohlenstoff imprägnieren und nun den Verlauf der Netzmittelwirkung durch Messung des Isotops laufend verfolgen.

Nicht nur in der Metallkunde, sondern auch in der Metallurgie finden Radioisotope eine dauernd steigende Anwendung. Übersichtsberichte u. ä.⁵⁷

Beim Studium der Verteilung des Phosphors zwischen Stahl und Schlacke kann man der Schlacke Calciumphosphat mit P32 zusetzen und nun aus der Bestimmung des im Stahl auftretenden P32 die Geschwindigkeit bestimmen, mit der sich das Gleichgewicht zwischen beiden Phasen einstellt⁵⁸.

Wichtige Untersuchungen wurden zur Klärung der

Frage durchgeführt, wie der Schwefelgehalt des Stahls im Hochofen von dem Verhältnis des pyritischen zum organischen Schwefel in der Kohle beim Übergang in Koks abhängt⁵⁹. Durch Beimengung von radioaktivem Schwefel S35 zu einer Charge von 12 t Kohle konnte man während der Verkokung ermitteln, wieviel Schwefel in die Gasphase übergeht und wieviel im Koks zurückbleibt. Es zeigte sich, daß der im Koks zurückbleibende Schwefelbetrag unabhängig von der Form ist, in welcher er ursprünglich in der Kohle vorhanden war. Es hat also keinen Zweck, die Kohle nach ihrem größeren pyritischen oder organischen Schwefelgehalt auszuwählen, sondern man muß nur zur Herstellung von schwefelarmem Koks Kohlen mit einem niedrigen Gesamtgehalt an Schwefel verwenden.

KOCH und FINK⁶⁰ konnten durch Zusatz von radioaktivem Schwefel S35 zum Heizgas eines 50-t-SIEMENS-MARTIN-Ofens nachweisen, daß selbst beim Einsetzen oberflächenreichen Schrotts der Anteil des aus dem Gas in den Stahl gelangenden Schwefels gering bleibt gegenüber dem Anteil, der durch Einsatz in den Stahl gelangt. Die Schwefelaufnahme aus dem Gas erfolgte fast ausschließlich während der Einschmelzzeit.

STANLEY⁶¹ studierte mit radioaktivem Kohlenstoff die Aufkohlung von Stahl, indem er die Eindringtiefe bei 50-stündigem Einsatz bei 950°C in Abhängigkeit von der Zusammensetzung des Aufkohlungsmittels untersuchte. Mit radioaktivem Ca wurde die Verteilung von Calcium zwischen geschmolzenen Schlacken und kohlenstoffgesättigtem Eisen untersucht⁶². 0,00006% Ca konnten nach dieser Methode noch erfaßt werden.

Auch zur Prüfung der Reinigung von Metalloberflächen, z. B. vor der Galvanisierung, hat man radioaktive Methoden eingesetzt⁶³. Man verwendet als «Prüfsmutzz» einen mit C 14 markierten Stoff, etwa Stearinsäure. Die Empfindlichkeit der Methode ist sehr hoch; man kann Verunreinigungen von 2×10^{-7} g/cm² Oberfläche und weniger nachweisen.

Das Phosphatierungsverfahren wurde von EISLER und CHAMBERLAIN mit Radioisotopen untersucht⁶⁴.

Für elektrochemische Untersuchungen werden in steigendem Maße Radioisotope eingesetzt⁶⁵. Dazu gehören die schon erwähnten Austauschreaktionen zwischen Metallen und ihren Ionen in wäßriger Lösung, Diffusions- und Polarisationserscheinungen und besonders die kathodische Abscheidung von Metallen, auch aus sehr ver-

⁵² K. FAJANS, J. Appl. Physics 12, 306 (1941).

⁵⁴ C. SCHOONOVER, J. Res. Nat. Bur. Stand. 15, 377 (1935); O. LONG und E. WILLARD, Ind. Eng. Chem. 44, 916 (1952); A. JOHNSON, J. Appl. Physics 20, 129 (1949); W. HENSLEY, O. LONG und E. WILLARD, J. Amer. Chem. Soc. 70, 3146 (1948); T. SCHOENFELD und E. BRODA, Mh. Chem. 81, 459 (1950).

⁵⁵ J. SPIEGLER und D. CORVELL, Science 113, 546 (1951); YENG-TSONG-YANG, Anal. Chim. Acta 4, 59 (1950).

⁵⁶ K. DIXON und Mitarbeiter, Nature 163, 845 (1949); G. ANTIANSOON und O. LAMM, Nature 165, 357 (1950); J. Physic. Coll. Chem. 55, 1286 (1951).

⁵⁷ K. FEARNSIDE, Met. Ind. 79, 415 (1951); J. HARWOOD, Nucleonics 2, 57 (1948); D. LITTLE, Iron Age 161, No. 18, 85 (1948); B. WINKLER und J. CHIPMAN, Trans. Amer. Min. Met. Eng. 167, 111 (1948); O. LAMM, Jernkont. Ann. 133, Nr. 7, 247 (1949); O. RÜDIGEN, Stahl u. Eisen 69, 671 (1949); P. SÜE, Rev. Mét. Mém. 46, No. 2, 72 (1949); J. MASSINON und E. JONCKERS, Soc. Roy. Belg. Ing. Ind. Bull. No. 3, 129 (1950); M. HOLGATE, Metallurgia 45, 179 (1951); S. EASTWOOD und Mitarbeiter, Radioactive Tracers in Metallurgical Research, AERE, H. M. Stationery Office, London 1950; J. GOVAERTS und C. BARCIA-GOYANES, Nature 168, 198 (1951); A. KOHN, Rev. Mét. Mém. 48, 219 (1951); B. FERGUSON, Met. Ind. 1951, 439; H. GUEST, Metal Progr. 59, No. 3, 366 (1951); Canad. Metals 15, No. 2, 36 (1952); A. KOHN und A. PORTEVIN, C. R. Acad. Sci. 233, No. 25, 1617 (1951); R. STANDIFER und G. FONTANA, Metal Progr. 60, No. 3, 65 (1951); M. FINNISTON, Iron Coal Trades Rev. 164, No. 4377, 493 (1952); J. STARR und Mitarbeiter, Metal Progr. 59, 673 (1951); W. CAHN, siehe Isotope Technique Conference²⁷; G. OLDHAM, British Steel-maker 10, 460 (1952); P. PICKHART, (Ref.) Angew. Chem. 65, 63 (1953); Verein Deutscher Eisenhüttenleute: Bibliographie über Verwendung radioaktiver Isotope zu Untersuchungen im Eisenhüttenwesen, Verlag Stahl Eisen, Düsseldorf 1952.

⁵⁸ W. ATEN und A. HEYN, Philips Techn. Rev. 8, 10, 289 (1946); B. WINKLER und J. CHIPMAN, J. Iron Steel Inst. 163, No. 3, 312 (1949), Amer. Inst. Min. Met. Eng., Techn. Publ. 1946, 1987.

⁵⁹ E. EATON und Mitarbeiter, Amer. Inst. Min. Met. Eng., Techn. Publ. 1948, 2453, Anal. Chem. 21, 1062 (1949).

⁶⁰ W. KOCH und K. FINK, Arch. Eisenhüttenwesen 22, 371 (1951).

⁶¹ K. STANLEY, Metal Progr. 52, No. 2, 227 (1947).

⁶² O. PHILBROOK und Mitarbeiter, J. Metals, Trans. 188, 361 (1950).

⁶³ C. HARRIS und Mitarbeiter, Amer. Soc. Test. Mat. Bull. No. 158, 49 (1949), 170, 82 (1950), J. Electrochem. Soc. 97, 430 (1950); W. HENSLEY, Iron Age, 13, 11, 1952, 151, Amer. Soc. Test. Mat., Spec. Techn. Bull. No. 115 (1952).

⁶⁴ L. EISLER und G. CHAMBERLAIN, Met. Finishing, Juni 1952, 113, Dez. 1952, 54.

⁶⁵ M. BROWN, J. Electrochem. Soc. 94, 37 N (1948); L. EISLER und J. DOSS, Metal Finishing 50, 54, 69 (Dez. 1952).

dünnen Lösungen⁶⁶. Bei der Untersuchung der elektrolitischen Zink/Kupfer-Trennung ließ sich unter Benutzung von radioaktivem Zn 65 feststellen, daß 1 g Cu mit weniger als 10^{-15} g Zn verunreinigt ist⁶⁷. Von der Atomic Energy Commission (AEC) wurden unter Überwachung durch die American Platers Society neuerdings in galvanotechnischen Betrieben Prüfungen der Niederschlagsgüte, der Porosität usw. mit Hilfe von Radioisotopen durchgeführt. Die Verteilung der Stromdichte und Metallabscheidung an verschiedenen Kathodenbezirken wurde von KROSBEIN mit Radioisotopen untersucht⁶⁸. Beim Studium der elektrolitischen Verchromung mit radioaktiven Cr-Isotopen stellten OGBURN und BRENNER⁶⁹ fest, daß die kathodische Cr-Abscheidung direkt aus dem 6-wertigen Zustand erfolgt⁷⁰. Auch der Mechanismus der elektrochemischen Vorgänge im Bleiakкумулятор wurde radiochemisch untersucht^{70a}. Auch Korrosionserscheinungen sind mit Hilfe von Radioisotopen untersucht worden⁷¹.

In der analytischen Chemie ergeben sich natürlich zahlreiche Verwendungsmöglichkeiten der radioaktiven Indikatoren⁷². Verschiedene Beispiele sind schon in den vorhergehenden Abschnitten, auch bei der Aktivitäts-, Aktivierungs- und Verdünnungsanalyse gebracht worden.

In chromatographischen Verfahren, besonders papierchromatographischen, hat man vielfach radioaktive Methoden eingeführt⁷³, wobei man die Streifen mit einem GEIGER-Zähler durchzählt oder autoradiographisch arbeitet.

Auch natürliche Radioisotope lassen sich für die radiochemische Analyse verwenden; über ihre Bestimmung in natürlichen radioaktiven Elementen, wie U und Th,

siehe z. B. RODDEN⁷⁴. Kaliumbestimmungen kann man elegant und schnell durch Messung der Strahlung des im natürlichen Kalium zu 0,011 % vorkommenden K 40 durchführen⁷⁵.

In der organischen Elementaranalyse bestimmte GROSSE⁷⁶ durch Zugabe bekannter Mengen der natürlichen Isotope Sauerstoff, Kohlenstoff und Stickstoff aus dem mit dem Massenspektrometer ermittelten Isotopenverhältnis. In einer modifizierten Anordnung bestimmte KIRSCHENBAUM⁷⁷ den Sauerstoff in Derivaten von Fluorkohlenstoffverbindungen.

Für schwierige Trennungsooperationen hat sich die Verwendung von Radioisotopen ganz besonders bewährt bei der Trennung der seltenen Erden durch Ionenaustauschverfahren. Die Analysenverfahren wurden dadurch wesentlich verfeinert und empfindlicher gemacht. Die Bestimmung von Cer und Praseodym durch HARRIS und TOMPKINS⁷⁸ mit Hilfe von Ce 141 und Pr 143 ist dafür ein eindrucksvolles Beispiel.

Bei der Herstellung ultrareinen Germaniums zur Verwendung in Transistoren dürfen Verunreinigungen nur in einer Konzentration von maximal 0,0001 % vorliegen. Die Reinheitsprüfung – die sich z. B. auch auf den Graphit der Schiffchen erstreckt, in denen GeO₂ mit Wasserstoff zum Metall reduziert wird – wird von der Sylvania Electric Products Inc. in ihrem radiochemischen Laboratorium in Bayside (N. Y.) mit Hilfe radiochemischer Aktivierungsanalysen und autoradiographischer Methoden durchgeführt⁷⁹.

Man kann also auf diesem Wege Nachweismöglichkeiten erreichen, die mit anderen Methoden nicht zu erzielen sind. HUDGENS und CALI⁸⁰ ermittelten z. B. in einer Probe von 0,5 g Zirkonoxyd das in diesem zu nur 0,5 parts per million enthaltene Antimon.

In der Analyse von Legierungen kann man beispielsweise in Na-haltigen Aluminiumlegierungen noch 0,001 % Na bestimmen.

ERBACHER und PHILIPP stellten mit Hilfe von Au 198 fest⁸¹, daß die bisherigen Analysenmethoden zur Trennung des Goldes von Platin und Iridium ungenügend waren. Eine ganze Reihe von Trennungsmethoden konnte so kontrolliert und verbessert werden, ebenso wie sich die Vollständigkeit von Ausfällungen mit radioaktiven

⁶⁶ B. ROGERS und Mitarbeiter, J. Electrochem. Soc. 95, 33 (1949); E. HUDGENS, Anal. Chem. 24, 1705 (1952); M. HÄSSINSKY, Experientia 8, 125 (1952) (mit weiteren Literaturangaben).

⁶⁷ CH. HENNY und P. MIVELAZ, Helv. Chim. Acta 31, 633 (1948).

⁶⁸ J. KROSBEIN, Proc. Amer. Electropl. Soc. 37, 279 (1950).

⁶⁹ F. OGBURN und A. BRENNER, J. Electrochem. Soc. 96, 347 (1949); Radiochemische Sulfatbestimmung in Chrombädern, siehe L. FISLER, Plating 39, 1019 (1952).

⁷⁰ Siehe aber Steel 126, 332 (1950).

^{70a} L. CLARK und R. ROWAN, J. Amer. Chem. Soc. 63, 1299 (1941).

⁷¹ K. LOEBBERG, Metallforsch. 2, 230 (1947); H. BRASHER und R. STOVE, Chem. & Ind. 1952, 171, Metallurgia 45, 182 (1951); L. TETSUGORO-FUTAGAMI (japan.), C A 47, 282 (1953).

⁷² Guter Überblick mit Literatur siehe z. B. bei E. HUDGENS, Anal. Chem. 24, 1704 (1952); P. DAUDEL, Anal. Chim. Acta 5, 426 (1951); W. HERR, (Ref.) Angew. Chem. 63, 493 (1951); über radio-metrische Titration (mit radioaktivem Ag als Indikator) siehe A. LANGER, Anal. Chem. 22, 1288 (1951).

⁷³ R. FINK und K. FINK, Science 107, 253 (1948); R. TOMARELLI und K. FLOREY, Science 107, 630 (1948); TH. WIELAND und L. WIRTH, Naturwiss. 36, 280 (1949); A. TAUCOG und Mitarbeiter, Nature 164, 181 (1949); S. KESTON und Mitarbeiter, J. Amer. Chem. Soc. 69, 3151 (1947), 72, 748 (1950); H. WEIL und J. WILLIAMS, siehe ¹⁰; O. LINDBERG und P. HUMMEL, Ark. Kem. Mineral. Geol. 1, No. 2, 17 (1949); H. STRAIN, Anal. Chem. 21, 76 (1949), 23, 34 (1951); J. FRIERSON und W. JONES, Anal. Chem. 23, 1447 (1951); P. KAUFMANN, Fette u. Seifen 53, 69, 253 (1951); R. JONES, Anal. Chem. 24, 1055 (1952); B. ROCKLAND und Mitarbeiter, Anal. Chem. 24, 778 (1952); M. CALVIN, Chem. Eng. News 26, 2880 (1948); M. CALVIN und A. BENSON, Science 108, 304 (1948); A. BENSON und Mitarbeiter, J. Amer. Chem. Soc. 72, 1710 (1950); S. SOROWY und Mitarbeiter, Nucleonics 10, No. 14, 52 (1952).

⁷⁴ C. RODDEN, Anal. Chem. 21, 327 (1949); siehe auch E. ZIMEN und A. HEDVALL, Ark. Kem. Mineral. Geol. 22 A, No. 25 (1946).

⁷⁵ R. BARNES und D. SALLEY, Ind. Eng. Chem., Anal. Ed. 15, 4 (1943); O. GÜBELI und K. STAMMBACH, Helv. Chim. Acta 34, 1245 (1952).

⁷⁶ V. GROSSE und Mitarbeiter, J. Amer. Chem. Soc. 68, 2119 (1946), Science 105, 101 (1947), Nature 160, 187 (1947), Anal. Chem. 21, 386 (1949); Bestimmung von Schwefel siehe z. B. D. KIRSCHENBAUM und V. GROSSE, Anal. Chem. 22, 613 (1950), 24, 584 (1952).

⁷⁷ D. KIRSCHENBAUM und Mitarbeiter, Anal. Chem. 24, 1361 (1952).

⁷⁸ D. HARRIS und E. TOMPKINS, J. Amer. Chem. Soc. 69, 2792 (1947).

⁷⁹ H. MORRISON, Nucleonics 11, No. 1, 28 (1953).

⁸⁰ E. HUDGENS und J. CALI, Anal. Chem. 24, 171 (1952).

⁸¹ O. ERBACHER und K. PHILIPP, Angew. Chem. 48, 409 (1935); siehe auch B. CHRISTIAN und Mitarbeiter, Physic. Rev. (2) 86, 946 (1952).

Indikatoren gut überwachen läßt. Auch *Löslichkeiten fester Stoffe* in Flüssigkeiten und *von Gasen* in Flüssigkeiten (z. B. die sehr geringe Löslichkeit von Wasser in Kohlenwasserstoffen⁸² lassen sich radiochemisch kontrollieren. Bei einer Untersuchung der beim starken Erhitzen von Ruthenium auftretenden Verluste konnte THIERS⁸³ den Nachweis erbringen, daß kein Ruthenium verdampft, sondern nur in die Schlacke geht. *Sehr geringe Dampfdrucke* wurden u. a. von YOUNG⁸⁴ bestimmt.

In der *Agrikulturchemie* hat man u. a. mittels radioaktivem Phosphor die Natur und Verfügbarkeit von anorganischen Phosphaten im Boden untersucht⁸⁵.

In der chemischen *Reaktionskinetik* werden zur Aufklärung von Oxydations-, Reduktions-, Polymerisations-, Dehydrierungs-, Austausch- und anderen Reaktionen in steigendem Maße radiochemische Methoden eingesetzt⁸⁶. Ein interessantes Beispiel in der technischen Katalyse ist die Untersuchung der FISCHER-TROPSCH-Synthese, bei der man einerseits den Eisenkatalysator radioaktiv markierte, andererseits das Kohlenoxyd. Man konnte dabei zeigen, daß nicht, wie man zunächst angenommen hatte, intermediär ein Eisencarbid gebildet wird^{86a}.

Der *radioaktive Kohlenstoff*, insbesondere das ¹⁴C-Isotop, spielt natürlich eine besonders wichtige Rolle, um in der *organischen Chemie* Verbindungen zu markieren, Partial- und Totalsynthesen durchzuführen oder aber auch zwecks Strukturaufklärung und Deutung des Reaktionsmechanismus^{86b} die Stellung des radioaktiven Kohlenstoffs in einer markierten Verbindung zu bestimmen (z. B. bei der Verfolgung des Aufbaues komplizierter Verbindungen aus einfachen im Organismus), und auch für analytische Zwecke.

Eine ausführliche Zusammenstellung über den radioaktiven Kohlenstoff und seine laboratoriumsmäßige Handhabung findet sich in der Monographie von CALVIN und Mitarbeitern⁸⁷, von der GÖTTE⁸⁸ einen ausgezeichneten ergänzten Auszug publizierte. Kohlenstoff enthält außer den natürlichen Isotopen C12 und C13 (zu 1,1% im natürlichen Kohlenstoff vorhanden) noch die radioaktiven Isotopen C10, C11 und C14, von dem C11, in der Hauptsache aber C14 als Indikatoren verwendet werden. C11 hat eine kurze Halbwertszeit von nur 20,5 min, sendet aber eine energiereiche Positronenstrahlung von 0,97 MeV aus. Die Halbwertszeit von C14 beträgt 5600 Jahre, die von ihm ausgesandte, sehr weiche

β-Strahlung besitzt eine Energie von nur 0,15 MeV. Dies erschwert die Strahlenmessung etwas, außerdem spielt die Selbstabsorption in den zu messenden Präparaten bereits eine erhebliche Rolle, wenigstens bei Präparaten mit einer Schichtdicke von mehr als etwa 0,5 mg/cm². Die Messung des radioaktiven Kohlenstoffs geschieht entweder in Form von ¹⁴CO₂ oder von aus diesem durch Einleiten in Ba(OH)₂ hergestellten Ba¹⁴CO₃. Das ¹⁴CO₂ wird zweckmäßig in Ionisationskammern oder aber auch in besonderen Zählrohren gemessen, das Bariumcarbonat mit definierter Schichtdicke in geeigneten Endfensterzählrohren. Von erheblicher Bedeutung für solche Bestimmungen ist die «nasse Verbrennung» nach VAN SLYKE⁸⁹ geworden, bei welcher die organische Substanz mit einem Gemisch von Chromsäure, Jodsäure, Schwefelsäure und Phosphorsäure im Sieden verbrannt wird. VAN SLYKE hat diese genaue und schnelle Methode mit radiochemischen Verfahren kombiniert⁹⁰ und weiter ausgebaut.

Für Markierungssynthesen – bei denen man die betreffende Verbindung an verschiedenen Stellen markieren kann (so z. B. Essigsäure als ¹⁴CH₃COOH oder CH₃¹⁴COOH oder auch ¹⁴CH₃¹⁴COOH) – kann man von vielen markierten Kohlenstoffverbindungen ausgehen, wie etwa von radioaktivem Methanol oder Phosgen usw., die man sich selbst herstellen kann, die aber heute auch bereits in zahlreichen mit C14 markierten Verbindungen von Oak Ridge, Harwell u. a. geliefert werden (siehe S. 135). Die letzte Preisliste der Atomic Energy Commission enthält bereits 220 mit C14 markierte Verbindungen! Vom Argonne National Laboratory der AEC soll durch LANGSDORF⁹¹ ein verbessertes Verfahren zur C-14-Herstellung ausgearbeitet worden sein, bei welchem man Luftstickstoff als Berylliumnitrid an Be bindet und in dieser Form im Uranbrenner in C14 umwandelt.

Auf die interessanten Arbeiten der synthetischen (auch biosynthetischen) und analytischen markierten C-Verbindungen kann hier nicht näher eingegangen werden. Über einige mehr analytische amerikanischen Arbeiten siehe z. B. BEAMER⁹², EDINOFF⁹³, ANDERSON und Mitarbeiter⁹⁴. In Deutschland sind die Arbeiten von WEYGAND⁹⁵ besonders zu erwähnen; in der Schweiz hat SCHMID^{96a} an der Universität Zürich wertvolle Arbeiten auf diesem Gebiet geleistet. Hinzu kommen in steigendem Maße die zahlreichen hier nicht zu erörternden *biologischen* und *biochemischen* Forschungsarbeiten⁹⁶.

⁸² G. JORIS und H. TAYLOR, J. Chem. Physics 16, 45 (1948); C. BLACK und Mitarbeiter, J. Chem. Physics 16, 537 (1948).

⁸³ R. THIERS und Mitarbeiter, Anal. Chem. 20, 831 (1948).

⁸⁴ R. YOUNG, J. Appl. Physics 12, 306 (1941).

⁸⁵ C. ROSENBLUM, Nucleonics 6, No. 4, 25 (1950); siehe auch W. BORLAND und Mitarbeiter, Ind. Eng. Chem. 44, 2726 (1952).

⁸⁶ Siehe z. B. E. CROMPTON, bei C. WAHL und A. BONNER, siehe 27, S. 44.

^{86a} T. KUMMER und Mitarbeiter, J. Amer. Chem. Soc. 70, 3632 (1948); v. ARNSTEIN und R. BENTLEY, Nucleonics 6, No. 6, 11 (1950).

^{86b} Radiochemische Untersuchungen an freien Radikalen: Siehe z. B. A. HOLLIS und A. PANETH, Nature 169, 618 (1952).

⁸⁷ M. CALVIN und Mitarbeiter, *Isotopic Carbon*, John Wiley, New York 1949.

⁸⁸ H. GÖTTE, Angew. Chem. 63, 89 (1951).

⁸⁹ D. VAN SLYKE und Mitarbeiter, J. Biol. Chem. 102, 635 (1933), 136, 509 (1940), 191, 299 (1951); E. BACKLIN, Biochem. Z. 217, 483 (1930).

⁹⁰ D. VAN SLYKE und Mitarbeiter, J. Biol. Chem. 192, 769 (1951).

⁹¹ Chem. Ind. 5, 144 (1953).

⁹² H. BEAMER und J. ARCHISON, Anal. Chem. 22, 303 (1950).

⁹³ L. EDINOFF, Anal. Chem. 22, 529 (1950).

⁹⁴ CH. ANDERSON und Mitarbeiter, Anal. Chem. 24, 1298 (1952).

⁹⁵ F. WEYGAND, Angew. Chem. 61, 295 (1949).

^{96a} H. SCHMID, Helv. Chim. Acta 35, 1879 (1952).

⁹⁶ G. v. HEVESY, *Radioactive Indicators, Their Application in Biochemistry, Animal Physiology, and Pathology*, Interscience Publishers, New York 1948; T. BERNERT, *Die künstliche Radioaktivität in Biologie und Medizin*, Wien 1949; W. WILSON (Herausgeber), *A Symposium on the Use of Isotopes in Biology and Medicine*, University

Auch der *radioaktive Schwefel* in Form seines Isotops S35 (Halbwertszeit 88 Tage, Maximalenergie der emittierten β -Strahlung nur 0,17 MeV) wird für organische, biochemische und anorganische Untersuchungen viel verwendet⁹⁷. Auch hier gibt es im Handel bereits etwa 50 mit S35 markierte Verbindungen. In sehr vielen Fällen kann man das aus Harwell relativ billig zu erhaltende, fast trägerfreie ³⁵Sulfat-Ion in wäßriger Lösung verwenden. In den zu untersuchenden Proben isoliert man den Schwefel meist als Ba³⁵SO₄ oder auch als Benzidinsulfat.

Die im vorstehenden geschilderten Beispiele stellen nur einen Ausschnitt aus den ungemein zahlreichen Verwendungsmöglichkeiten der radioaktiven Isotopen in Chemie und Technologie dar. Wegen weiterer Anwendungen muß auf die Literatur verwiesen werden (siehe z. B. ⁵, ²⁷ und weitere; über die Verwendung stabiler Isotope siehe ^{97a}; die letzten Jahressachregister der «Chemical Abstracts» enthalten allein unter dem Stichwort «Isotops as Indicators» Hunderte von Referaten in von Jahr zu Jahr stark anschwellender Zahl).

Zusammenstellungen über natürliche und radioaktive Isotope finden sich vielerorts, z. B. bei RIEZLER⁵, MEYER-SCHÜTZMEISTER⁵, ZIMEN⁵, WAHL und BONNER²⁷, FLEISCHMANN²⁷, SEABORG und PERLMAN⁹⁸, SULLIVAN⁹⁹, *Isotope Division der AEC*¹⁰⁰, MATTAUCH und FLAMMERSFELD¹⁰¹, FRIEDLÄNDER und KENNEDY⁵, im *AERE-Katalog von Harwell*¹⁰², *Isotopes Division der AEC*¹⁰³, *National Bureau of Standards*^{103a}, LANDOLT-BÖRNSTEIN^{103b}, HILLER und JAKOB⁵.

of Wisconsin Press, Madison 1948; H. LAWRENCE and G. HAMILTON (Herausgeber), *Advances in Biological and Medical Physics*, Academic Press, New York 1948, 1950; F. WEYGAND, siehe ⁹⁵; P. BULL, *Physical Biochemistry*, John Wiley, New York 1948; W. SINI, *Isotopic Tracers and Nuclear Radiations With Applications to Biology and Medicine*, McGraw-Hill, New York (1949); J. SACKS, *Chem. Rev.* 42, 411 (1948); D. KAMEN, *Radioactive Tracers in Biology*, Academic Press, New York 1951; G. v. HEVESY, *J. Chem. Soc.* 1951, 1618; G. OVERAND, *The Use of Tracer Elements in Biology*, Heinemann, 1952; M. FRIMMER, *Angew. Chem.* 64, 638 (1952); H. SCHWIECK (Herausgeber), *Künstliche radioaktive Isotope in Physiologie, Diagnostik und Therapie*, Verlag Springer, 1953; M. BERGEN, *Anal. Chem.* 24, 84 (1952).

⁹⁷ L. V. ERICHSEN und R. MÜLLER, *Angew. Chem.* 64, 580 (1952).

^{97a} H. SCHAEFER, *Angew. Chemie (A)* 59, 42 (1947); G. v. HEVESY, *Chimia* 6, 201 (1952); E. YANKWICH, siehe ²⁷; M. SCHACHT, siehe ²⁷; J. MATTAUCH, siehe ²⁷.

⁹⁸ G. SEABORG und J. PERLMAN, *Rev. Modern Physics* 20, 585 (1948).

⁹⁹ W. SULLIVAN, *Trilinear Chart of Nuclear Species*, John Wiley, New York 1949.

¹⁰⁰ AEC, *Isotope Division: Isotopes, Catalogue and Price List No. 3*, Oak Ridge (Tenn.) 1949.

¹⁰¹ J. MATTAUCH und A. FLAMMERSFELD, *Isotopenbericht*, Verlag Naturforschung, Tübingen 1951.

¹⁰² Atomic Energy Research Establishment (AERE), *Isotope Division*, Harwell (Berks.) und Radiochemical Centre, Amersham (Bucks.): *Radioactive Materials and Stable Isotopes Catalogue No. 2* (1950), *Labelled Compounds* (1952), *Amendment to Radioactive Materials and Stable Isotopes* (1952).

¹⁰³ AEC: *Nuclear Science Abstracts*, Vol. 6 (1952); AEC, *Isotopes Division: Catalogue and Price List No. 4* (März 1951).

^{103a} National Bureau of Standards: *Nuclear Data*, Circ. No. 499 (1950), Supplement 1, 2 (1951), und 3 (1952).

^{103b} LANDOLT-BÖRNSTEIN, *Zahlenwerte und Funktionen*, 6. Auflage, 1. Band, Teil 5, Springer, 1952.

Bezugsquellen für Radioisotope sind vor allem: die United States AEC, Isotopes Division¹⁰³; die Isotope Division von Harwell¹⁰²; das Commissariat à l'énergie atomique, Paris 7^e, die Eldorado Mining and Refining, Ltd., in Ottawa (Can.) und verschiedene amerikanische Firmen, wie vor allem Tracerlab., Inc., Boston 10; Nuclear Instrument and Chemical Corporation, Chicago 10; Radioactive Products, Inc., Detroit 26; Isotopes Specialities Co. (Kohlenwasserstoffe großer Radioreinheit) u. a.

Für Deutschland werden alle Isotope aus Harwell durch das Isotopenlaboratorium der Medizinischen Forschungsanstalt der MAX-PLANCK-Gesellschaft in Göttingen beschafft.

Im Reaktor des Brookhaven National Laboratory wurde kürzlich die stärkste Co-60-Quelle hergestellt mit einer Intensität von 5000 Curie! Sie wurde in einem 2-t-Bleibehälter mit 12 cm dicken Wänden verschickt. Man will damit in der Columbia University in New York zunächst Studien über die strahlungsschemische Einwirkung auf Mikroorganismen durchführen¹⁰⁴.

Die Nuclear Instrument and Chemical Corporation in Chicago hat eine «Isotopenfarm» eingerichtet, in der standardisierte biologische radioaktive Verbindungen durch Züchtung von Pflanzen in einer Atmosphäre mit ¹⁴CO₂ hergestellt werden¹⁰⁵.

Neuerdings wird durch die AEC auch Polonium 210 vertrieben als erstes handelsübliches Radioisotop, welches α -Strahlen aussendet. Die Lieferung radioaktiver Isotope durch die AEC und Harwell hat in den letzten Jahren außerordentlich stark zugenommen; die AEC versandte in den letzten Jahren allein an etwa siebenhundert private Firmen etwa 25000 Isotope.

Das National Bureau of Standards stellt verschiedene *radioaktive Standardlösungen* her (Preisliste durch National Bureau of Standards, Radioactivity Section, Washington 25, D. C.).

Wegen der *Versuchsmethodik* beim Arbeiten mit Radioisotopen muß auf die Literatur verwiesen werden, z. B. ⁵, ²⁷, besonders auf die Arbeiten von MEYER-SCHÜTZMEISTER⁵ (physikalische Voraussetzungen usw.), GÖTTE¹⁰⁵ (radioaktive Verseuchung und ihre Gefahren beim Arbeiten mit Radioindikatoren), HANLE¹⁰⁶, SCHWEITZER und WHITNEY²⁷, RIEZLER⁵, MATTAUCH⁵, BORKOWSKI⁵, weiterhin Lit. ⁴, CURTIS⁵, TAYLOR⁵, EHRENBERG²⁷, SCHACHT²⁷, ROSSI und STAUB¹⁰⁷, KOHMAN¹⁰⁸, KORFF¹⁰⁹, CURRAN und CRAGGS¹¹⁰, CURTISS¹¹¹, SALOMON

¹⁰⁴ Chem. Products, März 1953, 119; A. LAWRENCE und Mitarbeiter, *Nucleonics* 11, No. 1, 9 (1953).

¹⁰⁵ Chem.-Ing.-Techn. 25, 167 (1953).

¹⁰⁶ W. HANLE, *Künstliche Radioaktivität, kernphysikalische Grundlagen und Anwendungen*, Piscator-Verlag, Stuttgart 1952.

¹⁰⁷ D. ROSSI und H. STAUB, *Ionisation Chambers and Counters*, McGraw-Hill, 1949.

¹⁰⁸ T. KOHMAN, *Anal. Chem.* 21, 352 (1949).

¹⁰⁹ S. KORFF, *Electro- and Nuclear Counters*, Van Nostrand, New York 1946.

¹¹⁰ C. CURRAN und D. CRAGGS, *Counting Tubes, Theory and Applications*, Academic Press, New York 1949.

¹¹¹ F. CURTISS, *Measurements of Radioactivity*, Nat. Bur. Stand.

und FORSTER¹¹², PEYCHES¹¹³, TAYLOR¹¹⁴, COOK und DUNCAN¹¹⁵, BRADFORD⁵, FAY^{116a}.

Aufgaben und Probleme der Chemie bei der Entwicklung der Uranbrenner

Außer den bisher geschilderten Anwendungsmöglichkeiten der Kernchemie stellt sich dem Chemiker noch eine Fülle direkter und indirekter Aufgaben bei der bisherigen und weiteren Entwicklung der Uranbrenner¹¹⁸, insbesondere für deren künftige Verwertung zur Energieerzeugung. PITZER und ENGLISH¹¹⁷ haben in letzter Zeit eine Reihe von zu behandelnden Aufgaben geschildert, die zum Teil schon zu Beginn der Arbeiten am Uranbrenner auftraten. Denken wir an die extremen Reinheitsanforderungen an den als Bremssubstanz verwendeten Graphit, an die zu Beginn dieser Abhandlung geschilderten Schwierigkeiten der chemischen Abtrennung des Plutoniums von großen Mengen Uran und zahlreichen gleichzeitig auftretenden Spaltprodukten usw.

Bekanntlich ist es für die Erzeugung der thermischen Energie im Uranbrenner notwendig, daß dieser bei wesentlich höheren Temperaturen betrieben werden kann als bisher. Die Lösung dieser Forderung macht deshalb große Schwierigkeiten, weil die im Brenner verlegten Rohre für das die Wärme abführende Kühlmittel und die Schutzrohre für die Uranstäbe bei höheren Temperaturen korrodieren, bzw. weil es schwierig ist, Materialien zu finden, welche genügend mechanisch und chemisch beständig sind und gleichzeitig möglichst wenig Neutronen absorbieren. Das bisher dafür verwendete Rein-aluminium ist in bezug auf geringe Neutronenabsorption allen Kupfer- und Eisenlegierungen überlegen, aber chemisch und mechanisch bei höheren Temperaturen nicht beständig. Magnesium absorbiert ebenfalls wenig Neutronen, doch ist es gegen heißes Wasser noch unbeständiger als Aluminium. Bei der eingehenden Prüfung zahl-

reicher Materialien untersuchte man in letzter Zeit auch eingehend das beständige Zirkonium, das jedoch eine noch zu hohe Neutronenabsorption aufzuweisen schien. Erst als man der Vermutung nachging, daß dafür das im Zirkon stets vorhandene Hafnium, welches ja dem Zirkonium chemisch außerordentlich ähnlich ist, verantwortlich zu machen ist, und unter erheblichen Mühen hafniumfreies Zirkonium herstellte (über die Fortschritte in der Chemie des Zirkoniums und Hafniums siehe z. B. LARSEN¹¹⁸), zeigte sich, daß dieses Zirkonium nun tatsächlich nur noch sehr wenig Neutronen absorbiert und ein recht geeignetes Material darstellt. Dem Chemiker erwachsen bei dieser Sachlage neue Aufgaben, wie z. B. die möglichst vollständige und wirtschaftliche Abtrennung des Hafniums, z. B. durch fraktionierte Destillation des $ZrCl_4$ mit Phosphoroxychlorid, Auflösen des Kondensats in Methanol und Ausfällen von Zirkonoxyd durch Ammoniak¹¹⁹, oder durch Ionenaustauschverfahren¹²⁰ und Ausarbeitung verbesserter Darstellungsmethoden von Zirkonium usw. Die zivilen Anwendungsgebiete des – ausgezeichnet korrosionsbeständigen – Zirkoniums und auch Hafniums (welches für Verwendung im Uranbrenner für diejenigen Konstruktionsteile, bei denen umgekehrt eine starke Neutronenabsorption erwünscht ist, gebraucht werden kann) werden sich dadurch bald erweitern.

Wichtige Untersuchungen über neue Kühlmittel und Wärmeträger werden bereits jetzt durchgeführt. Hier sind das chemische Reaktionsvermögen, die Strahlungsstabilität, das Wärmeübertragungsvermögen und großes Temperaturintervall im flüssigen Zustand in erster Linie maßgebende Faktoren. Flüssige Metalle¹²¹, wie z. B. Natrium, Blei, Wismut, Gallium, Natrium-Kalium-Legierungen und flüssige anorganische und organische Salze, werden für diesen Zweck erprobt. Ein möglichst wirksamer Wärmeübergang wird in beweglichen Brennern, wie z. B. in Flugzeugen oder U-Booten, besonders wichtig, weil in diesen die Menge der Kühlmittel schon aus Raum- und Gewichtsgründen begrenzter ist als in stationären Anlagen.

Diskutiert und im Versuchsstadium erprobt wird die Frage, ob nicht eine flüssige Bremssubstanz (Moderator) gleichzeitig die Funktion des Kühlmittels mit übernehmen kann, ebenso die Möglichkeit, den Brennstoff als Salz in einem solchen flüssigen Brems- und Kühlmittel aufzulösen¹²².

Für die chemische Korrosionsforschung und Materialprüfung liegt noch eine große Fülle von Aufgaben vor,

Circ. 476 (1949), *The Geiger-Müller Counter*, Nat. Bur. Stand. Circ. 490 (1950).

¹¹² K. SALOMON und A. FORSTER, *Anal. Chem.* 21, 304 (1949).

¹¹³ J. PEYCHES, *Chim. & Ind.* 64, 218 (1940).

¹¹⁴ D. TAYLOR, *The Measurement of Radio Isotopes*, Methuen, London 1951.

¹¹⁵ B. COOK und F. DUNCAN, *Modern Radiochemical Praxis*, Oxford University Press, 1952.

^{116a} J. FAY, *Atomies* 3, 143 (1952).

¹¹⁸ Siehe dazu etwa: FR. MÜLLER, *Techn. Rdsch. Nr.* 16b, 17 (1952); R. HAFSTAD, *Chem. Eng. News* 30, 3808 (1952); K. GLENNAN, *Chem. Eng. News* 30, 5240 (1951); H. KINGDON, *Nucleonics* 10, No. 4, 18 (1951); S. ISBIN, *Nucleonics* 10, No. 3, 10 (1951) (Katalog der Kernreaktoren); Umschau 1952, 583; R. DUBS, *Chimia* 3, 101 (1949); J. COCKCROFT, *Mem. Proc. Manchester, Lit. Philos. Soc.* 93, 15 (1951/52); *Metal Progr. Sept.* 1952, 85; J. LALIVE d'EPINAY, *Schweiz. Bauzeitung* 70, 91 (1952); CH. STARR, *Nucleonics* 11, No. 1, 62 (1953).

¹¹⁷ S. PITZER und G. ENGLISH, *Chem. Eng. News* 29, 4836 (1951); siehe auch H. SPEDDING, *J. Electrochem. Soc.* 95, 17 C (1949); E. EVANS, *Iron Age*, 13. 3. 1952, 93; J. KOSHIDA und P. CALKINS, *Metal Progr. Juli* 1952, 97; P. BAXTER, *Rev. Pure Appl. Chem.* 1, 25 (1951); F. HOGERTON, *Chem. Met. Eng.* 52, No. 12, 98 (1945); *Chem. Eng. News* 30, 5252 (1952), 31, 894 (1953); M. FINNISTON, *Research* 5, 456 (1952); E. MERCHANT, *Metal Progr. Dez.* 1952, 138; F. FLAGG und L. ZEBROWSKI, *Scient. Am. Juli* 1952, 62; A. TANMAROW, *Metal Progr. Febr.* 1953, 83.

¹¹⁸ Siehe z. B. M. LARSEN, *J. Chem. Educat.* 28, 529 (1951).

¹¹⁹ Siehe z. B. B. LITTON, *Metal Progr. Dez.* 1951.

¹²⁰ J. LISTER, *Chem. Soc. (London)* 1951, 3123; siehe auch AEC: U. S. Pat. 2566665, 2567661 (1951).

¹²¹ N. LYON (Herausgeber), *Liquid Metals Handbook*, 2. Auflage, Juni 1952; AEC: *Department of the Navy*; TH. TROCKI, *Nucleonics* 10, No. 1, 28 (1952).

¹²² *Chem. Eng. News* 30, 3506 (1952); *Chem.-Ztg.* 1952, 799; *Chem. Eng. Febr.* 1953, 323; E. EVANS und Mitarbeiter, *Nucleonics* 11, No. 1, 67 (1953); *Chem. Eng. News* 31, 894 (1953); *Scient. Am. Dez.* 1952, 58.

wobei hier die erschwerten Bedingungen durch die gleichzeitige Strahleneinwirkung zu berücksichtigen sind. Die Strahlungschemie wird durch diese Untersuchungen auch in ihrer Grundlagenforschung stark gefördert.

Neue Konstruktionsmaterialien (auch z. B. metallkeramische), die thermisch, mechanisch und chemisch beständig sind und günstige nukleare Eigenschaften haben, verfügbar und billig sind, müssen gefunden und erprobt werden. Die Sylvania Electric Products Inc. z. B. arbeitet intensiv an besseren Materialien für Kernreaktoren^{122a}.

Chemische Trennungsmethoden, besonders zur Aufarbeitung und Wiedergewinnung des Brennstoffes – auch Extraktionsmethoden mit organischen Lösungsmitteln, Verwendung von Ionenaustauschern, elektrochemische Methoden usw. –, bieten für den Chemiker ein weites Betätigungsfeld. Die in den USA während des Krieges fast ausschließlich getriebene Zweckforschung

auf dem Gebiete der Atomkernenergie erbrachte gleichzeitig äußerst wertvolle Erkenntnisse für die Grundlagenforschung, die nach dem Krieg in großem Stil systematisch intensiviert und weiter ausgebaut wurde. Viele bis dahin unbekannte physikalische und chemische Daten auch neuerer Elemente und Isotope wurden an extrem kleinen Mengen gewonnen. Zur Gewinnung exakter Daten, besonders von thermodynamischen und spektralen Eigenschaften, mußten Elemente und Verbindungen in Makromengen hergestellt werden. Es ist bemerkenswert¹²³, daß von den radioaktiven selteneren Elementen vor dem Zweiten Weltkrieg nur Radium und Protaktinium rein isoliert werden konnten, in den letzten acht Jahren dagegen allein acht, nämlich Technetium (43), Promethium (61), Polonium (84), Actinium (89), Neptunium (93), Plutonium (94), Americium (95) und Curium (96); bei Astatine (85) und Francium (87) ist das nicht möglich, weil kein Isotop genügender Lebensdauer existiert.

^{122a} Chem. Eng. März 1953, 214; Eng. Min. J. April 1953, 129; Nucleonics 11, No. 4, 66 (1953).

¹²³ J. PERLMAN und T. SEABORG, J. Chem. Educat. 28, 12 (1951).