

Mottenkugeln zum Nachweis der Kernstrahlung: Hartmut Kallmann (1896–1978) und die organischen Szintillatoren

Prof. Dr. Siegfried Niese, 01723 Wilsdruff, Am Silberblick 9
<siegfried@niese-mohorn.de>

Hartmut Kallmann (1896-1978) war ein außergewöhnlicher Wissenschaftler, dessen Arbeitsgebiete im Kaiser-Wilhelm-Institut für physikalische Chemie und Elektrochemie in Berlin-Dahlem von der theoretischen über die experimentelle Physik bis zur Chemie reichten. Er wurde 1933 wegen seiner jüdischen Herkunft entlassen. Nach misslungenen Emigrationsversuchen stellten ihm die IG Farben und die AEG ein Labor für die Weiterführung seiner Arbeiten zur Verfügung. Nach der Befreiung begann er mit großem Elan wieder in seinem alten Institut mit der Arbeit und entdeckte die organischen Szintillatoren. Angesichts der Ignoranz seines akademischen Umfeldes gegenüber den Verbrechen des Naziregimes fühlte er sich in Deutschland wieder fremd und emigrierte 1948 in die USA, wo er die in Berlin begonnenen Forschungen fortführte.

Im Bericht wird die die Radioaktivitätsmessung revolutionierende Entdeckung der organischen Szintillatoren im Kontext mit seinem Leben und Wirken behandelt. Grace Marmor Spruch würdigte sein Wirken in einem Nachruf.¹ Einen ausführlichen Überblick über sein Leben und Werk mit besonderer Berücksichtigung der Wirkung seines politischen Umfeldes gibt Stefan Wolff.² Einen lebendigen Eindruck von der Zeit, in der die Szintillationszähler erfunden wurden, vermitteln Kallmanns Doktoranden Immanuel Broser³ und Liselott Herforth.⁴ Ihren Beitrag zur Untersuchung organischer Szintillatoren habe ich auch an anderer Stelle gewürdigt.⁵ Mit einem historischen Abriss der Entwicklung der Flüssigszintillationszählung beginnt auch Hans-Jörg Rheinberger einen Beitrag zur Geschichte der kommerziellen Entwicklung entsprechender Geräte.⁶

Herkunft und Ausbildung

Hartmut Kallmann wurde am 5. Februar 1896 in Berlin geboren. Seine Eltern stammen aus jüdischen Familien, die sich schon vor längerer Zeit zum Protestantismus bekannten. Kallmann selbst erfuhr erst während der Nazizeit von seiner jüdischen Herkunft. Sein Vater Felix Kallmann war Rechtsanwalt und bis 1913 als Direktor der Auergesellschaft für deren wirtschaftliche Leitung zuständig. In Kallmanns Elternhaus verkehrten auch Walter Nernst und Fritz Haber. Hartmut Kallmann wuchs in einer wohlhabenden Familie auf. Er verlor jedoch mehrere Schuljahre durch eine langwierige Erkrankung. 1916 begann er an der TH Berlin-Charlottenburg ein Chemiestudium, wechselte nach einem Jahr zur Physik an die Universität Berlin und promovierte 1920 bei Max Planck über die spezifische Wärme von Wasserstoffmolekülen.

Forschung zur Molekül- und Kernphysik und Aufbau eines Tandem-Beschleunigers im KWI bei Fritz Haber

Kallmann war nach seinem Studium kurze Zeit bei Otto Hahn im Kaiser-Wilhelm-Institut (KWI) für Chemie und wurde dann Assistent in dem von Fritz Haber geleiteten KWI für physikalische Chemie und Elektrochemie in Berlin-Dahlem. Neben seiner wissenschaftlichen Arbeit betätigte er sich auch auf den Gebieten Organisation, Verwaltung und Finanzen.

Er untersuchte zuerst gemeinsam mit verschiedenen Kollegen theoretisch und experimentell den Energietransfer bei Molekülreaktionen in der Gasphase und habilitierte sich 1927 auf diesem Gebiet. Dafür entwickelten Kallmann und Rosen eine Methode für das Abstreifen der Ladung mit anschließender Umladung von Molekülionen.⁷ Dieses für Molekülionen bei Spannungen von ca. 300 V angewandte Tandem-Prinzip hat er später auch zur Umladung von mit einer 1000fachen Spannung beschleunigten Ionen angewandt, um für Kernreaktionen die doppelte Energie im Vergleich zu einfachen Beschleunigern zu erreichen. Mit Fritz London entwickelte er eine Theorie der Übertragung von Energie und Ladung über relativ große Entfernungen auf der Grundlage der kurz zuvor entdeckten Quantenmechanik.⁸

Obwohl er im KWI zuerst an Molekülreaktion experimentierte, interessierte er sich von Anfang an auch für die Kernphysik.^{9, 10} Der Direktor des KWI Fritz Haber interessierte sich ebenfalls für die Kernforschung. Deshalb wurde im Institut der Aufbau eines Beschleunigers für kernphysikalische Experimente geplant, der

dann zu einem großen Teil von der Rockefeller-Stiftung finanziert wurde. Die Hochspannungsanlage lieferte die Fa. Siemens.¹¹ Kallmann und Kuhn konstruierten und fertigten einen Entladungstopf, bei dem in der Mitte zwischen der Ionenquelle und dem Target eine gasdurchspülte Umladungskammer oder eine Folie angebracht war, an die eine positive Hochspannung von 300 keV angelegt wurde. Mit dieser Tandemanordnung konnten die gleich hinter der Ionenquelle durch Umladung erzeugten negativen Ionen nach einer Beschleunigung und erneuten Umladung auf die doppelte Energie beschleunigt werden.¹² Über den erfolgreichen Aufbau und erste Messergebnisse berichtete Fritz Haber am 6. April 1933 der Preußischen Akademie der Wissenschaften. Die Anlage war Mitte 1933 voll einsatzbereit.

Entlassung, misslungene Emigration, kernphysikalische Forschung und Erfindung der Neutronenradiografie in einem ehemaligen Pferdestall

Nach dem Gesetz zum Berufsbeamtentum vom April 1933 verlor Kallmann durch Bescheid vom 15. Juli am 30. September seine Stelle am KWI und mit Schreiben vom 2. September die Venia Legendi an der Berliner Universität. Trotzdem sich Haber sehr für ihn eingesetzt hatte, scheiterten alle Bemühungen für Kallmann mit seinem Beschleuniger eine Stelle im Ausland zu finden.

Der Vorstandsvorsitzende der IG-Farben Carl Bosch ermöglichte Kallmann zusammen mit Ernst Kuhn auf dem Gebiet der Kernphysik in einem von der AEG in einem umgebauten Pferdestall zur Verfügung gestellten speziellen Labor zwar ohne Anstellung aber mit Stipendien weiterzuarbeiten. Sie untersuchten die Bildung von Neutronen bei der D-D-Reaktion und die Reaktion von schnellen Neutronen mit Aluminium.¹³ In einem von der AEG mit den Erfindern Dr. phil. Hartmut Israel Kallmann und Dr. phil. Ernst Kuhn am 5.9.1940 vom Reichspatentamt erteilten Patent „Zur Erzeugung großer Mengen negativer Ionen“ wird der Umladungsprozess von positiven Kanalstrahlen in negative Ionen beschrieben. Den zusätzlichen Vornamen Israel musste Kallmann auf Grund seiner jüdischen Herkunft und der NS-Rassengesetze tragen.

Kallmann erfand die Neutronenradiografie, bei der nicht wie bei den Röntgen- und Gammastrahlen die schweren Elemente, sondern Wasserstoff und andere leichten Elemente die Strahlung auf dem Weg zum Film absorbieren bzw. streuen. Eine erste Mitteilung war in den Naturwissenschaften in Druck gegangen, durfte aber aus „rassischen Gründen“ nicht erscheinen und kam erst 1948 an die Öffentlichkeit.¹⁴ Seine Erfindungen zur Neutronenradiografie sind in einer gro-

ßen Zahl von US-Patenten festgehalten und Kallmann wird als ihr Erfinder anerkannt, wie es eine Reihe von Publikationen z.B. von Harold Berger¹⁵ belegen.

Kallmann war besonders nach der Reichskristallnacht 1938 zahlreichen Repressalien ausgesetzt. Einer in jenen Tagen drohenden Verhaftung entging er durch Flucht. Sein Vater starb dabei nach einer Herzattacke. Es folgte das Verbot, Kolloquien, Bibliotheken und andere Einrichtungen der Universität zu besuchen. Er durfte noch bis 1939 die AEG-Firmenbibliothek besuchen, musste aber im gleichen Jahr auch seine Arbeit beenden und aus der Deutschen Physikalischen Gesellschaft austreten. Erst 1943 konnte Kallmann seine Versuche zur Neutronenradiografie für die AEG fortsetzen, weil diese dafür vom Heereswaffenamt Aufträge erhalten hatte.

Bei seiner jahrelangen Beschäftigung mit Neutronen erwuchs der Wunsch, auch diese ungeladenen Teilchen direkt zu zählen. Kallmann sah eine Möglichkeit, die beim Stoß von Neutronen auf Wasserstoffkerne erzeugten energiereichen Protonen wie Alphateilchen durch Szintillation einer fluoreszierenden wasserstoffhaltigen organischen Substanz nachzuweisen. Da bekannt war, dass die ebenen mehrkernigen aromatischen Verbindungen fluoreszieren, dachte er zuerst an Naphthalin. Diese Idee verfolgte er während des Krieges nicht weiter, weil er keinen Beitrag zur Entwicklung einer Kernwaffe leisten wollte.

Kallmann wird Professor für Theoretische Physik, richtet im KWI ein Labor ein und beginnt mit Arbeiten zum Szintillationszähler

Bereits drei Monate nach der Befreiung Deutschlands vom Nationalsozialismus beteiligte sich Kallmann am Wiederaufbau des physikalisch-chemischen Instituts der Kaiser-Wilhelm Gesellschaft, wurde Abteilungsleiter und als einer der wenigen „Unbelasteten“ ordentlicher Professor für theoretische Physik an der TH Berlin. Mit großem Enthusiasmus begann er nach den unter den Nationalsozialisten zu erduldenen Diskriminierungen und Beschränkungen mit den noch im Krieg geplanten Experimenten. War ihm in den Jahren der NS-Herrschaft der Zugang zu wissenschaftlichen Einrichtungen, Bibliotheken und Publikationsmöglichkeiten verwehrt, so fand er sich jetzt in leitender Position in einem völlig ausgeräumten Labor wieder. Alle nicht schon vor Kriegsende nach Südwestdeutschland verlagerten Ausrüstungen waren von den sowjetischen Truppen konfisziert worden. Bei der Entwicklung seines geplanten Verfahrens zur Messung von Kernstrahlen ging er schrittweise vor. Er musste sich dabei auch nach der Verfügbarkeit der notwendigen Geräte und Chemikalien richten.

Kallmann finanzierte Geräte, Chemikalien und anfangs auch zeitweise seine Mitarbeiter mit dem Verkauf von Zigaretten, die ihm ein amerikanischer Freund zukommen ließ. Die elektronischen Bauelemente stammten auch zu einem Teil aus ehemaligen Wehrmachtsgeräten. Baugruppen aus Rundfunkgeräten konnte man gut für Verstärker in Zählgeräten nutzen. Im KWI für Chemie fand er noch ein radioaktives Präparat, das bei der Institutsverlagerung in den letzten Kriegsjahren nach Hechingen liegen geblieben war. Nach Broser¹⁶ besaß Kallmann privat auch noch eine Ra-Be-Neutronenquelle. Kallmann hatte schon bei seinen Arbeiten, die er als Habilitationsschrift zusammengefasst hatte, gezeigt, dass er gut mit vielen Kollegen arbeitsteilig zusammenarbeiten konnte. Seine jungen Doktoranden motivierte er, indem er sie sehr selbständig arbeiten ließ und ihren Anteil an den Arbeiten als Erst-, bzw. Mitautoren oder in entsprechenden Hinweisen in den Publikationen besonders zum Ausdruck brachte und ihre zügige Promotion förderte.

Als Kallmann in Berlin seine Arbeiten zur Kernstrahlungsmesstechnik durchführte, galt das vom Alliierten Kontrollrat der vier Besatzungsmächte erlassene Gesetz Nr.25, dass „neben allen militärischen Zwecken dienenden Untersuchungen auch generell die Arbeiten auf dem Gebiet der angewandten Kernforschung“ verbot. Wir dürfen annehmen, dass seine Arbeiten von kernphysikalisch ausgebildeten US-Kontrolloffizieren geduldet und auch gefördert wurden.

Erfindung eines Szintillationszählers

Unter Szintillation verstehen wir einen Vorgang, bei dem Materie durch hochenergetische Teilchen angeregt wird und einen Teil der Energie als sichtbare Strahlung wieder abgibt. Der Szintillationsvorgang selbst ist schon seit den Untersuchungen von Elster, Geitel und Crookes im Jahre 1903¹⁷ bekannt. Seitdem wurde zur Messung von α -Strahlen ein Zinksulfid-Leuchtschirm benutzt, wobei die schwachen Lichtblitze auf dem Leuchtstoff mit einer Lupe beobachtet wurden.

Es gab verschiedene Bemühungen, die visuelle Zählung durch ein physikalisches Verfahren zu ersetzen. Dazu musste der Lichtblitz in ein elektrisches Signal umgewandelt und dieses vor dem Zählvorgang verstärkt werden. Für die Verstärkung schien ein Geiger-Müller-Zählrohr geeignet zu sein. Dazu hat Boris Rajewsky¹⁸ an der Innenseite des Zählrohres eine fotoelektrische Substanz aufgetragen und auf der gegenüberliegenden Seite ein Quarzfenster angebracht, durch das Licht auf die Fotokathode gelangen kann. Adolf Krebs vom KWI für Bio-

physik in Frankfurt/M. hat eine entsprechende Apparatur zur Demonstration der Diffusion von Emanation aufgebaut.¹⁹

Kallmann erwartete oder hat schon bei entsprechenden Vorversuchen während des Krieges festgestellt, dass die bei der von ihm geplanten Zählung von Neutronen durch Szintillation einer aromatischen Verbindung erzeugte Lichtintensität wesentlich geringer als beim Nachweis von α -Strahlen mit ZnS ist. Deshalb hielt er eine besonders hohe Signalverstärkung für notwendig. Auch ihm erschien für die Erhöhung der Zahl der Elektronen das Geigerzählrohr als Vorbild, bei dem sich unter der Wirkung der angelegten Hochspannung die Zahl der von der Fotokathode erzeugten Elektronen durch Mehrfachstöße lawinenartig erhöht. Deshalb wolle er den Szintillator mit einer Fotokathode kombinieren und die Zahl der erzeugten Elektronen in einem Zählrohr erhöhen.

Bei Kallmann arbeitete seit Ende 1945 Immanuel Broser, der bei dem Schüler von Hans Geiger, Otto Haxel, über Zählrohre diplomiert hatte. Die Versuche von Kallmann und Broser, ein solches lichtempfindliches Zählrohr zum Verstärken der Zahl der Photoelektronen für die Szintillationszählung zu bauen, führten jedoch nicht zum gewünschten Ergebnis. Das erwies sich aber als Vorteil. Denn die daraufhin begonnenen Experimente mit dem seit einiger Zeit in der Fernsichttechnik eingesetzten Sekundärelektronenvervielfacher (SEV) leiteten eine stürmische Entwicklung der Kernstrahlungsmesstechnik ein. Mit einem SEV wird die Zahl der in einer Photozelle aus Lichtquanten entstehenden Elektronen vervielfacht, um anschließend elektronisch registriert und vermessen zu werden.

Broser erinnerte sich, in den Semesterferien mit einem Gerät zur Geschwindigkeitsmessung von Leuchtpurgeschossen gearbeitet zu haben, in dem ein Weisscher Fotovervielfacher mit etwa zwanzig Prallgittern enthalten war. Ein solcher SEV konnte aus den Resten der nach dem Krieg stillgelegten Fabrik erworben werden. Kallmann ließ dann ein Zählgerät mit einem ZnS-Schirm und einem SEV an Stelle eines Zählrohres aufbauen. Daran konnten sie sowohl einen mechanischen Telefongesprächszähler als auch ein Oszilloskop anschließen, mit dem sie Impulse nach ihrer emittierten Lichtenergie unterscheiden konnten. Mit dem Gerät wurde die Lichtanregung eines polykristallinen Cu-aktivierten ZnS-Leuchtschirms durch einzelne α -Teilchen, die Dauer und Form des Abklingens der Szintillationserscheinung und das Verhältnis von Lichtintensität und α -Energie untersucht. Da die emittierte Photonenzahl der im Szintillator absorbierten Energie proportional ist, konnten sie so auch bequem die Energie der Strahlung bestimmen.²⁰

Mit einer Versuchsanordnung, bei der vor das Zählwerk ein Thyatron geschaltet war, zählen sie nur Impulse, die noch bei einer gewissen Sperrspannung am Thyatron zum Zählwerk gelangten. Die durch die Spaltung von Uran beim Beschuss von Neutronen erzeugten hochenergetischen Spaltprodukte konnten sie noch bei einer Sperrspannung von 35 V nachweisen, aber ohne Neutronenquelle nur bis zu einer Sperrspannung von 13 V die von der α -Strahlung des Urans herrührenden Impulse zählen.²¹

Für die Messung der Alphastrahler wurde die Radioaktivität anfangs dem polykristallinen ZnS-Pulver direkt zugemischt. Dabei fand man für die Verteilung der Pulshöhen eine breite Bande. Die in der von Rudolf Frerichs geleiteten und auf dem Gebiet der Photoleitung arbeitenden benachbarten Arbeitsgruppe tätige Ruth Warminsky, die spätere Ehefrau von Immanuel Broser, stellte CdS-Kristalle her, mit denen die vom SEV erzeugten Stromimpulse der absorbierten Energie der Alphateilchen proportional waren.²²

Über diese Arbeiten fertigte Broser seine Dissertation an.²³ Er blieb noch einige Jahre im Institut und wurde dann Professor an der TH Berlin, wo er sich vor allem mit den elektronischen und optischen Eigenschaften von ZnS, CdS und anderen AIBVI-Halbleitern beschäftigte.²⁴

Für die Messung der Aktivität von α -Strahlern wurde die Kombination von ZnS-Szintillator und SEV noch viele Jahre angewandt. Kallmann hatte schon in seinem Refugium geplant, eine chemische Verbindung, die sowohl genügend Wasserstoff enthielt, als auch wie Naphthalin fluoreszierte, für die direkte Messung von Neutronen als Szintillator zu nutzen. Nachdem die Szintillationsmessung von α -Strahlen mit Zinksulfid zufriedenstellend funktionierte, erinnerte sich Kallmann an seine damalige Idee. Doch zuvor wollte er mit Naphthalin als Szintillator erst einmal Beta- und Gammastrahlung messen. Naphthalin fand sich im Instituts Keller in Gestalt von Mottenkugeln.

Die Entdeckung eines organischen Szintillators

Über die erfolgreichen Versuche zur Szintillationsmessung, wobei er auch die ersten Ergebnisse mit Naphthalin vorstellte, hatte Kallmann auf einem Kolloquium im Juni 1947 im KWI vorgetragen.²⁵ Werner Bloch berichtete darüber in der populärwissenschaftlichen Zeitschrift „Natur und Technik“.²⁶ So kam es, dass die erste Nachricht über einen organischen Szintillator zuerst in einer populärwissenschaftlichen Zeitschrift erschien. Als Zitat finden wir dann in der amerikanischen

Literatur „Kallmann, Natur und Technik, Juli 1947“.²⁷ Gleichzeitig wurde über die Versuche auf einer kleinen Ausstellung im Institut informiert.²⁸

Im Institut herrschte eine sehr produktive Arbeitsatmosphäre. Die erste bereits oben zitierte Arbeit über den Szintillationszähler wurde von Broser und Kallmann bereits am 2. Mai 1947 wenige Wochen vor dem Vortrag von Kallmann in Dahlem eingereicht.²⁹ Darin war das Naphthalin noch nicht erwähnt worden. In zwei ausführlichen Arbeiten berichteten sie auch über die Ergebnisse mit anderen Szintillatorsubstanzen wie Zn_2SiO_4 , $CaWO_3$ und organischen Szintillatoren und reichten diese am 27. Juni 1947 ein.³⁰ In beiden zitierten Arbeiten wird in Zusammenhang mit den organischen Szintillatoren darauf hingewiesen, dass Liselott Herforth und Ursula Martius Messungen durchgeführt haben und dazu bereits eine weitere Arbeit im Druck sei.

Zur gleichen Zeit wurden auch in den USA Arbeiten zum Szintillationszähler durchgeführt. Auf dem Meeting der American Physical Society vom 19.-21. Juni 1947 hielten Marshall und Coltman vom Westinghouse Research Laboratory zwei Vorträge, deren Kurzreferate in den Physical Reviews publiziert wurden. Sie schrieben, dass dieser Detektor dem Geiger-Müller-Zählrohr überlegen sei, man α -, β -, γ -Strahlen und hochenergetische Elektronen, Protonen und Neutronen messen und dabei sowohl einzelne Impulse registrieren als auch bei hohen Intensitäten Ströme messen könne. Über das Detektormaterial wird in den Kurzreferaten noch nichts geschrieben. Ausführlicher publizierten sie im ersten Heft der im November 1947 neu herausgegebenen Zeitschrift Nucleonics³¹, wobei sie besonders auf die elektronische Schaltung, die Analyse der Pulshöhen und den Dunkelstrom eingingen und als Szintillator einen ZnS-Fluoreszenzschirm erwähnten.

Im September des gleichen Jahres wurde auch ein Report der US-Atomenergiekommission von Curran und Baker vom 17.11.1944 mit dem Titel „A photoelectric alpha particle detector“ deklassifiziert und damit der Öffentlichkeit zugänglich gemacht.³² Auch darin wird als Szintillator nur ZnS genannt. Somit wurde das Prinzip des Szintillationszählers mit SEV von Kallmann und den o.g. Autoren unabhängig voneinander erfunden, aber ein organischer Szintillator wurde erstmalig von Kallmann verwendet.

Es erscheint verblüffend, dass nach dem Kriege bei der Überführung der großen wissenschaftlichen Kapazitäten der USA in die zivile Kernforschung der die Messung von Radioaktivität revolutionierende organische Szintillator nicht dort, sondern unter den extrem ungünstigen Bedingungen im KWI von Kallmann entdeckt wurde. Seine breiten wissenschaftlichen Kenntnisse ermöglichten ihm eine

intensive geistige Durchdringung der von ihm erkannten Probleme, wobei ihn die beschränkten experimentellen Möglichkeiten zwangen, die einzelnen Versuche sehr intensiv zu durchdenken.

Martin Deutsch sichert in den USA Kallmanns Priorität

Ein amerikanischer Chemiker brachte die Nachricht über den Vortrag und wahrscheinlich noch weitere Informationen zu dem im Massachusetts Institute of Technology (M.I.T) tätigen Kernphysiker Martin Deutsch.³³ Dieser wiederholte umgehend die Versuche von Kallmann, bestätigte die Ergebnisse und fasste angesichts der großen Bedeutung dieser Entdeckung darüber einen internen Institutsbericht ab, den er persönlich an interessierte Kollegen verteilte. Um die Priorität der Entdeckung durch Kallmann nicht zu gefährden, hat er, bevor er seine Ergebnisse in der Zeitschrift *Nucleonics* publizierte, die Publikation von Kallmann in einer Fachzeitschrift abgewartet.³⁴ Martin Deutsch schrieb mir:

Vielen Dank für Ihre Arbeit über den Beitrag von L. Herforth zu der Entwicklung der Szintillationszähler. Sie haben sicher Recht, dass sie nicht genug Anerkennung gefunden hat. Das ist wohl zum Teil das Resultat der politischen Entwicklung in Mitteleuropa nach 1933. Mein Laboratoriumsbericht, den Sie erbeten, wurde geschrieben, um eben solchen Situationen vorzugreifen. Ich werde versuchen ein Exemplar für Sie aufzutreiben. ... Eines Tages, in 1947, sprach mich ein Kollege im Korridor des M.I.T an. Er war Chemiker, Ordinarius, beträchtlich älter als ich und arbeitete gelegentlich als wissenschaftlicher Berater für die U.S. Besatzungskräfte in Deutschland. Er zeigte mir ein hektographiertes Manuskript mit der Erklärung, dass jemand in Deutschland wissen wollte ‚ob da was dran ist‘.

Es war die Arbeit von Kallmann, die Sie zitieren. Zu der Zeit arbeitete ich gerade an dem Problem, Detektoren mit kürzerer Zeitauflösung als die üblichen Gaszähler zu entwickeln und hatte einen Studenten der mit Photomultiplikatoren arbeitete. Ich ging sofort zum Drugstore und kaufte eine Schachtel Mottenkugeln. In zwei Wochen hatten wir uns überzeugt, dass die Ausbeute für typische Gammastrahlen die von Geigerröhren um eine Größenordnung überstieg und dass die Zeitauflösung besser als 0.1 Mikrosekunde war. Ich sah sofort die große Nützlichkeit des Instruments und wollte so schnell wie möglich die Aufmerksamkeit anderer Kernphysiker darauf lenken. Das Einfachste wäre ein "letter to the editor" in der *Physical Review* gewesen, aber ich fürchtete, dass das dann routinemäßig als Quelle für die Entdeckung zitiert würde. Ich schrieb und hektographierte (lange bevor es Xerox gab) daher einen internen Laboratoriumsbericht, der ja nicht als Veröffentlichung zählt, da er nicht automatisch allgemein erhältlich ist. Das wurde dann, zusammen mit einer Kopie von Kallmanns Dokument, welches ich von meinem Kollegen bekommen hatte, an alle mir bekannten interessierten amerika-

nischen Physiker (damals eine kleine Zahl) geschickt. Das Manöver war erfolgreich: Obwohl ich in den folgenden Monaten mehrere, nicht ganz unbedeutende kernphysikalische Resultate unter Anwendung von Szintillationszählern veröffentlichte, verstanden die Leute doch, dass Kallmann und nicht ich die Methode eingeführt hatte.

Viel später – ich glaube es war in den siebziger Jahren – gab es noch eine unerwünschte Sequäla. Der Gebrauch von organischen Szintillatoren wurde nämlich in den USA (ich glaube von Pringl und Standil) patentiert und prinzipiell müsste jeder, der einen solchen Zähler herstellt, den Patentinhabern etwas zahlen. Natürlich wurde dieses Patent angefochten, hauptsächlich auf Grund der früheren Veröffentlichung. Da mein Rundschreiben nicht eine Veröffentlichung darstellte, suchte man das früheste Dokument von Kallmann. Ich verfolgte diese Sache nicht weiter. Auf jeden Fall war die Anfechtung erfolglos.³⁵

Detaillierte Untersuchungen organischer Szintillatoren

Im Jahre 1947 war Liselott Herforth, die bei Hans Geiger über Zählrohre diplomiert hatte, mit der Messung der Radioaktivität Erfahrung besaß und in den Kriegsjahren in verschiedenen Industriebetrieben und Universitätsinstituten tätig gewesen war, zu Kallmann gekommen. Sie sollte die Vorgänge bei der Szintillation von fluoreszierenden aromatischen Verbindungen systematisch untersuchen und die Bedingung für eine möglichst hohe Lichtausbeute ermitteln.

Sie suchten erst nach der Ursache für die unterschiedlichen Lichtausbeuten bei Naphthalin verschiedener Herstellerfirmen, erkannten dabei, dass die Lichtausbeute von der Reinheit des Naphthalins abhängt und stellten durch bestimmte Beimengungen eine Szintillationslöschung fest, die in der Folgezeit Quenchung genannt wurde. Diese spielt eine große Rolle in der Flüssigszintillationsspektrometrie (LSC). Da das ursprünglich zum Umkristallisieren benutzte Tetrachlormethan, wegen dessen starken Löschwirkung ungeeignet war, benutzten sie stattdessen Methanol und Glykol. Für die Aufnahme von Quenchkurven wird noch heute Tetrachlormethan wegen dessen starken Löschwirkung verwendet.

Da im Vergleich zum ZnS(Ag) die relative Lichtausbeute von Naphthalin für α -Strahlen nur 1.4%, aber für β -Strahlen 233% beträgt, ist das Naphthalin besonders zur Messung der β -Strahlung geeignet. Die im Vergleich zur absorbierten Energie geringere Lichtausbeute des Naphthalins bei Anregung durch α -Strahlung erklärten sie mit einer durch die höhere Ionisationsdichte verursachte Eigenlöschung. Sie fanden, dass außer Naphthalin auch andere aromatische Kohlenwasserstoffe als Szintillatormaterial geeignet sind. In gemeinsamen Experi-

menten bestimmten Broser, Herforth, Martius und Kallmann³⁶ das unterschiedliche Abklingverhalten der Photonenemission nach Absorption von α - und β -Strahlung. Auf diesem Unterschied beruht die in den letzten Jahren in kommerzielle Geräte eingeführte α/β -Diskriminierung, die eine selektive Messung α -strahlender Nuklide ermöglicht.

Herforth fand heraus, dass die Photonenausbeute mit der Temperatur stetig abnimmt, beim Schmelzen auf einen sehr geringen Wert absinkt und beim Wiedererstarren nur einen Bruchteil des Ursprungswertes erreicht. Bei der Messung der Szintillationsausbeute der flüssigen Verbindungen Diphenyl und Phenanthren fand sie nur ungefähr 6% bzw. 15% der Ausbeute der sublimierten Substanzen.³⁷ Die geringere Lichtausbeute in der Schmelze erkannten sie als Folge einer Konzentrationslöschung wie sie schon bei der Fluoreszenzanregung mit UV-Licht gefunden wurde. Bei optisch angeregter Fluoreszenz dieser Stoffe in Lösung war bei wachsender Konzentration der arteigenen Moleküle bereits eine starke Auslöschung beobachtet worden.³⁸ Auf diese Weise erklärten sie die geringere Lichtausbeute von geschmolzenen reinen Szintillatoren und zeigten den Weg zur Erhöhung der Lichtausbeute bei flüssigen Szintillatoren. Das Problem wurde später von Kallmann durch geeignete Verdünnung der fluoreszierenden Substanz gelöst.

Liselott Herforth fasste die Arbeiten zu den organischen Szintillatoren in ihrer Dissertation zusammen.³⁹ In einer Arbeit, die sie nach ihrer Dissertation und dem Weggang von Kallmann anfertigte, bestimmte sie Fluoreszenzspektren und Lichtausbeuten weiterer kondensierter aromatischer Verbindungen.⁴⁰ Lieselott Herforth hat bald nach ihrer Promotion das Institut verlassen und danach auf den Gebieten angewandte Radioaktivität und Strahlenschutz gearbeitet. Sie hat viele Jahre als Direktorin des Institutes für Strahlenschutzphysik der Technischen Universität Dresden gewirkt und sich besonders mit der Weiterentwicklung von Thermolumineszenzdetektoren beschäftigt. Daneben war sie von 1965-1968 Rektorin der TU Dresden.⁴¹

Kallmann hat die mit seinen Mitarbeitern im KWI durchgeführten Arbeiten in einem Beitrag in den *Physical Reviews*⁴² zusammengefasst, durch weitere Untersuchungen ergänzt und dabei auch die inzwischen von seinen amerikanischen Kollegen auf diesem Gebiet publizierten Arbeiten zitiert.

Die SEVs haben auch einen Nachteil. Unter der Wirkung der angelegten Spannung werden von der Fotokathode auch dann Elektronen freigesetzt, wenn auf sie kein Licht fällt. Dieser mit der Temperatur ansteigende Dunkelstrom liefert einen lästigen Untergrund, der vor allem die Messung niederenergetischer Strah-

ler stört. Sie behelfen sich im KWI damit, dass sie den SEV kühlen, um die durch thermische Bewegung verursachte spontane Freisetzung von Elektronen zu verringern. Eine bessere Lösung demonstrierte Kallmann dann nach seiner Emigration in die USA.

Die Resonanz von Kallmanns Arbeiten in den USA

Unmittelbar nach dem Deutsch die Arbeiten von Kallmann und seiner Mitarbeiter in den USA bekannt gemacht hatte, wurden sie in verschiedenen Instituten der USA sehr schnell aufgegriffen. Es wurden nicht nur andere organische Verbindungen ausprobiert, sondern auch fluoreszierende anorganische Stoffe auf ihre Eignung als Szintillator geprüft. P.R. Bell vom Oak Ridge National Laboratory beginnt einen Artikel über den Einsatz von Anthrazen als Szintillationszähler, den er am 19.4.1948 eingereicht hatte:

Die Methode der Zählung ionisierender Strahlung durch photoelektrische Messung von Fluoreszenzlichtimpulsen, die durch verschiedene organische Substanzen ausgesandt werden, hat als erstes H. Kallmann gezeigt und M. Deutsch bestätigt.⁴³

Er bemerkte, dass beide in erster Linie Naphthalin als Szintillatoren verwendeten, als Alternative aber unter anderen Aromaten auch Anthrazen vorgeschlagen hatten. Er hat auch die von schnellen Neutronen produzierten Rückstoßprotonen nachgewiesen und damit jenes Experiment durchgeführt, das Kallmann schon während des Krieges vorschwebte. Feazel und Smith vom Applied Physics Laboratory der John Hopkins University beschrieben ausführlich eine Vorschrift zur Herstellung von Kristallen aus Naphthalin und Anthrazen für Szintillationszähler, was darauf hinweist, dass auch in diesem Institut am gleichem Thema gearbeitet wurde.⁴⁴ Kommerziell erhältliche Szintillationszähler mit Anthrazenkristallen gehörten mehrere Jahre zur Standardausrüstung radiochemischer Laboratorien, bis sie durch Flüssigszintillationszähler bzw. in Polystyren gelöste stärker fluoreszierende Substanzen abgelöst wurden. Über einen Vortrag von Collins und Hoyt auf dem Jahresmeeting der Amerikanischen Physikalischen Gesellschaft 1948 lesen wir im Kurzreferat, dass mit den Betastrahlen des Radiums die Szintillatormaterialien BaSO_4 mit 5% PbSO_4 , Anthrazen, Naphthalin und Biphenyl erprobt wurden⁴⁵

Robert Hofstadter hat 1948 den mit Thallium aktivierten Natriumiodidkristall in die Gammastrahlungsmessung eingeführt.⁴⁶ Auf einem Szintillations- und Halbleiter-Symposium im Dezember 1974 sprach er über "25 Jahre Szintillationszäh-

ler⁴⁷ und würdigte Kallmann, der den ersten Szintillationszähler mit Naphthalin entwickelte. Hofstadter hatte von Kallmanns Arbeit mit Naphthalin auf einem Vortrag von Martin Deutsch gehört. Hofstadter besaß einen Kaliumiodidkristall mit einer geringen Thalliumverunreinigung, der bereits 1938 hergestellt worden war. Er hielt ihn wegen der hohen Dichte besonders für die Messung von γ -Strahlen als Szintillator für günstig und hatte auch sofort Erfolg. Wegen der Radioaktivität des Kaliums stellte er daraufhin thalliumhaltige NaI-Kristalle her. NaI(Tl)-Szintillationsdetektoren wurden in den Laboratorien viele Jahre zur Gammaskpektrometrie benutzt. Jetzt finden sie vorwiegend in Gammakameras Anwendung. Nicht immer wurde in der Folgezeit Kallmann zitiert. In einem Vortrag von C.-T. Peng über die Geschichte der Flüssigszintillationsspektrometrie (LSC) wurde Kallmann nicht erwähnt.⁴⁸

Die Entdeckung der organischen Szintillatoren hinterließ in den USA einen starken Eindruck. Sie war Anlass vom folgenden Jahr an, aller zwei Jahre ein Symposium über Szintillationszähler durchzuführen, das später als Symposium für Kernforschung weitergeführt wurde.

Kallmanns Forschungen in den USA

Kallmann war von der Haltung seiner Kollegen zu den Verbrechen der nationalsozialistischen Herrschaft so enttäuscht, dass er nicht mehr in Deutschland bleiben wollte.⁴⁹ In einer Biographie über James Franck schreibt Jost Lemmerich, dass Kallmann „empört über den wiederaufkommenden Antisemitismus nach Amerika gegangen“ ist.⁵⁰ Klaus Hentschel schreibt von einer „Persilscheininflation“ zu jener Zeit.⁵¹

Kallmann ging im November 1948 unmittelbar nach der Promotionsprüfung von Liselott Herforth in die USA. Seine Mitarbeiterin Ursula Martius ging nach ihrer Promotion 1949 nach Kanada, wo sie als Professorin so erfolgreich wirkte, dass man eine Akademie nach ihr benannte. Aus Kallmanns Umgebung ging auch Rudolf Frerichs in die USA, wo er in Illinois CdS nicht als Szintillatormaterial, sondern direkt als Halbleiter zur Strahlungsmessung verwendete.

Die große Beachtung der Entdeckung der organischen Szintillatoren bewog das U.S. Signal Corps, Kallmann auf Empfehlung von Martin Deutsch in die USA einzuladen. Er war daraufhin ein Jahr in den Signal Corps Engineering Laboratories der US Army, New Jersey (SCEL) tätig, wo er mit Carl A. Accardo ein Koinzidenzverfahren entwickelte.⁵² Sie ordneten an einen Stilbenkristall als Strahlungsdetektor drei SEVs an und akzeptierten im Zähler nur solche Signale,

die gleichzeitig in allen drei SEVs registriert wurden und demnach in erster Linie aus dem Szintillationskristall und nur mit geringster Wahrscheinlichkeit von zufällig in allen drei SEVs gleichzeitig erfolgten elektronischen Rauschereignissen stammen konnten. Damit konnte der Untergrund, dessen Signale größtenteils vom Rauschen stammen, um drei Größenordnungen unterdrückt und auch die lichtschwache Szintillation niederenergetischer Betastrahler gemessen werden.

Flüssigszintillationszählung

1950 ging Kallmann an die New Yorker Universität (Washington Square College of Arts and Science, New York University, New York), wo er ein Labor für Strahlung und Festkörper einrichtete. Da er mit Herforth festgestellt hatte, dass geschmolzene Aromaten prinzipiell zur Szintillation geeignet, aber wegen starker Selbstlöschung die Lichtausbeuten geringer als die der festen Verbindungen sind, untersuchte er Lösungen von höheren in niederen Aromaten und fand dabei wie erwartet höhere Lichtausbeuten.⁵³ Damit war der Weg für die Entwicklung der Flüssigszintillationszählung (Liquid Scintillation Counting, LSC) frei.

Kallmann bearbeitete dieses Gebiet mit Milton Furst umfassend. Die Arbeiten wurden weiterhin von den SCEL finanziert. Sie bestimmten die Szintillatoreigenschaften einer großen Zahl von Flüssigkeiten und Lösungen. Die in Berlin von Kallmann und seinen Mitarbeitern bereits angesprochenen Prozesse, die beim Energietransport von der ionisierenden und anregenden Strahlung über ionisierte und angeregte Moleküle bis zur Emission der Fluoreszenzstrahlung stattfinden, hat er mit Milton Furst ausführlich behandelt.⁵⁴ Er untersuchte reine Flüssigkeiten als auch Lösungen, denen höhere Aromaten in geringen Konzentrationen zugesetzt waren. Er zitiert dabei auch eine kleine kurz zuvor publizierte Arbeit von Reynolds und Mitarbeitern über die Messungen einiger aromatischen Flüssigkeiten und Lösungen mit einer Koinzidenzeinrichtung.⁵⁵ Über Lichtausbeuten von weiteren Lösungsmitteln und Lösungen im Vergleich mit einem Anthrazenkristall berichteten Kallmann und Furst 1951 in *Nucleonics*. In den folgenden Arbeiten beschäftigte sich Kallmann verstärkt mit dem Mechanismus des Energietransports in Flüssigkeiten, wobei er als Lösungsmittel Toluol und Xylen am geeignetsten hielt.⁵⁶

In der Folgezeit wurde die Lichtausbeute flüssiger Szintillatoren derart gesteigert, dass sie die der reinen festen Szintillatoren übertraf, was dazu führte, dass heute mehr Betastrahlungsmessungen mit flüssigen Szintillatoren als mit Zählrohren durchgeführt werden. Auch Raben und Bloembergen verwendeten Lösungen höherer Aromaten in niederen Aromaten als Szintillationsflüssigkeit,

erreichten mit 5g/l Terphenyl in Xylol die Lichtausbeuten von kristallisiertem kondensierten Aromaten und konnten damit ^{14}C direkt in der Lösung messen.⁵⁷ Mit einem Gemisch von Toluol und Ethanol, in dem geringe Mengen Wasser löslich sind, konnten Hayes und R.C.Gould ^3H -markierte wässrige Proben direkt mit dem organischen Szintillator mischen.⁵⁸ Kallmann führte dann Dioxan als Szintillatorlösungsmittel für die Messung wässriger Proben ein.⁵⁹

In mehreren Arbeitsgruppen in den USA wurden neue Lösungsgemische erprobt. Eine neue Qualität wurde mit einer Lösung von Diphenyloxazol (POP) in Xylen erreicht.⁶⁰ In den frühen fünfziger Jahren synthetisierten Hayes und Mitarbeiter vom Los Alamos Scientific Laboratory Hunderte von arylsubstituierten Heterocyclen, studierten ausführlich die Beziehung zwischen chemischer Struktur und Szintillationseigenschaften und sie fanden die höchste Lichtausbeute mit einem ternären Gemisch aus 2,5-Diphenyloxazol (POP) und 1,4- bis 2-(5-Phenyloxazolyl)-Benzene (POPOP) in Toluol oder Xylen. Diese Gemische waren bis das giftige Toluol abgelöst wurde über Jahrzehnte die am häufigsten verwendete Szintillatorlösungen.

Grundlagen der organischen Licht emittierenden Dioden (OLED)

In seinem Laboratorium beschäftigte sich Kallmann auch mit den optischen und elektrischen Eigenschaften von anorganischen und organischen Substanzen. Mit Pope entdeckte er 1960 die energetischen Bedingungen für Kontaktelektroden zur Injektion von Löchern und Elektronen in organischen Substanzen. Diese Elektrodenkontakte sind die Grundlage aller molekularen und polymeren organischen Licht emittierenden Dioden, wobei die energetischen Bedingungen für die Konstruktion der OLEDs eingehalten werden müssen. Mit Magnante untersuchten sie auch die Elektrolumineszenz von mit Tetrazene dotierten Anthrazenkristallen.⁶¹

1968 ging Kallmann nach seiner Pensionierung wieder nach Deutschland und bekam eine Gastprofessur und Arbeitsmöglichkeiten an der TU München. Auf Initiative seines Schülers Broser wurde er 1971 Ehrendoktor der FU Berlin. 1978 starb Kallmann in München im Alter von 82 Jahren.

Entwicklung kommerzieller Geräte für die LSC

Die große Zahl der zu messenden Proben und die Möglichkeit, das Messvolumen zu standardisieren, stimulierte die Entwicklung von automatischen Probenwechslern. Es kamen bald mehrere Firmen auf den Markt, die mit Probenwechslern versehene hochentwickelte LSC-Geräte anboten. Nachdem auf dem Markt eine gewisse Sättigung eingetreten war, verringerte sich die Zahl solcher Firmen wieder. Die Entwicklung einer dieser Firmen beschreibt Rheinberger am Beispiel der Fa. Packard.⁶²

Breite Anwendung der Szintillatoren auch nach der Entwicklung von Halbleiterdetektoren

Ein organischer Szintillator in Kombination mit einem Gammastrahlungsdetektor eignet sich besonders gut für die Messung von Nukliden, die gleichzeitig β - und γ -Strahlen emittieren. Nach diesem Prinzip der β,γ -Koinzidenzspektrometrie kann gleichzeitig der Umgebungsuntergrund um zwei bis drei Größenordnungen verringert werden. Das Wissen um den Energietransport bei den flüssigen Szintillatoren wird auch für die Herstellung fester Lösungen der Szintillatorsubstanzen POP und Dimethyl-POPOP in Polymeren genutzt, aus denen man Folien und Körper in verschiedenen Formen herstellt.

In der Gammaskpektrometrie werden Platten aus einem solchen Polymer um die Bleiabschirmung herum angeordnet, um den Einfluss der Myonen als intensivste Komponente der Höhenstrahlung zu reduzieren, indem alle gleichzeitig im Szintillatormantel und im Germaniumdetektor registrierten Ereignisse mit Hilfe einer Antikoinzidenzschaltung ignoriert werden. Aus besonders großen Platten von ca. 10 cm Dicke und mehreren Metern Länge und Höhe werden Freimessanlagen und LKW-Schleusen aufgebaut, um zu sichern, dass Material, welches eine Anlage verlässt, vorgegebene Grenzwerte der Radioaktivität nicht überschreitet.

Für extrem empfindliche Messungen im Rahmen der Elementarteilchenphysik werden eine Vielzahl großer LSC-Einheiten zusammengestellt, wobei alle Materialien so ausgewählt werden, dass sie recht wenig natürliche Radioaktivität enthalten. Um die Wirkung der Höhenstrahlung auszuschließen, werden sie in Messlabors mit kilometerdicker Gesteinsabschirmung untergebracht. An solchen unter dem Namen BOREXINO bekannten Experimenten hat auch M. Deutsch bis zuletzt mitgearbeitet.

Summary

Hartmut Kallmann with his colleagues and assistants did a number of pioneering work in physics: quantum mechanic description on transfer of energy and charge over relatively long distances, the tandem-principle of accelerators, neutron radiography, organic scintillators, and organic light emitting diodes. This paper is focused on his discovery of organic scintillators. Working with neutron radiography during World War II he had the idea of direct counting of neutrons using an organic fluorescent compound like naphthalene as scintillator. After the war, he created independently with scientists from the USA the scintillation counter with a photo multiplier tube. After successfully testing with ZnS(Ag), he demonstrated the possibility of counting β - and γ -radiation with naphthalene and other aromatic compounds as scintillators.

- 1 Grace Marmor Spruch, „obitaries Hartmut Kallmann,“ *Physics Today*, October 1978, 76.
- 2 Stefan Wolff, „Hartmut Kallmann (1896-1978) – ein während des Nationalsozialismus ver-
hinderter Emigrant verlässt Deutschland nach dem Krieg,“ in: Dieter Hoffmann, Mark Wal-
ter (Hg.), „Ausländische und rassistisch verfolgte Wissenschaftler im Dienst des Dritten
Reiches,“ Göttingen (Wallstein) i.D.
- 3 Immanuel Broser, „50 Jahre Szintillationszähler,“ *Phys. Blätter*. 54 (1998), 935-937; sowie
persönliche Mitteilungen.
- 4 Werner Stolz, Liselott Herforth, „Sechzig Jahre Geiger-Müller Zählrohr – Vierzig Jahre
Szintillationszähler,“ *Isotopenpraxis* 24 (1988), 394-398.
- 5 Siegfried Niese, „The first paper about fluorescence of liquid biphenyl and phenanthren by
fast electrons by Liselott Herforth and Hartmut Kallmann,“ *Radiocarbon* 43 (2001), 125-126.
- 6 Hans-Jörg Rheinberger, „Putting Isotopes to work: liquid scintillation counters 1950-1970,“
in: B. Joerges, T. Shin (ed.) „Instrumentation: between science, state, and industry“ (Dor-
trecht 2001), S. 143-174.
- 7 Hartmut Kallmann, B. Rosen, „Über den Durchgang von Ionen durch verdünnte Gase,“ *Nat-
urwissenschaften* 17 (1929), 709-710; dies., „Über den direkten Nachweis der durch Umla-
dung entstanden Ionen,“ *Naturwissenschaften* 18 (1930), 355; dies., „Über die Bildung
neutraler Teilchen hoher Geschwindigkeit durch Umladung“, *Naturwissenschaften* 18
(1930), 867-868.
- 8 Hartmut Kallmann, Fritz London, „Quantenmechanische Theorie der anormal großen Wir-
kungsquerschnitte bei der Energieübertragung zwischen atomaren Systemen“, *Naturwissen-
schaften* 17 (1929), 226-227.
- 9 Hartmut Kallmann, „Neue Versuche über den Durchgang von α -Teilchen durch Materie,“
Referat in *Naturwissenschaften* 9 (1921), 417-418.

- 10 Hartmut Kallmann, „Zur Theorie der Atomzertrümmerung durch Resonanz,“ *Naturwissenschaften*, 20 (1931), 393-396.
- 11 Burghard Weiss, „Höchste Spannung – Fritz Haber, Hartmut Kallmann und das Tandem-Prinzip – Ein frühes Kapitel der Beschleuniger – Geschichte,“ *Kultur & Technik*, 1 (1997), 42-49.
- 12 Hartmut Kallmann, Ernst Kuhn, „Untersuchungen über die D-D-Kernreaktion,“ *Naturwissenschaften* 25 (1937), 231-232.
- 13 Hartmut Kallmann, Ernst Kuhn, „Über die D-D-Kernreaktion,“ *Naturwissenschaften* 26 (1938), 106; dies., „Kernanregung durch schnelle Neutronen,“ *Naturwissenschaften* 26 (1938), 107-108.
- 14 Hartmut Kallmann, „Neutron Radiographie,“ *Research* 1 (1948), March 1 (6), 254-260.
- 15 Harold Berger, „Neutron radiography,“ *Annual Review of Nuclear Science*, 21 (1971), 335-364; ders., „Advances in neutron radiographic techniques and applications: a method for nondestructive testing,“ *Applied Radiation and Isotopes*, 61 (2004), 347-442.
- 16 Immanuel Broser, persönliche Mitteilung, Februar 2009.
- 17 Julius Elster, Hans Geitel, „Über die durch radioaktive Emanation erregte scintillierende Fluoreszenz der Sidot-Blende,“ *Phys. Z.* 4 (1903), 439-440; William Crookes, „The emanation of Radium,“ *Proc. Royal Soc.* A71 (1903), 405-408.
- 18 Boris Rajewski, „Anordnung zur Messung kleinster Lichtintensitäten,“ *Z. Physik* 63 (1930), 576; ders., „Weitere Erfahrungen mit dem Lichtzähler I. Teil. Beschreibung verschiedener Lichtzählertypen,“ *Ann. Physik* 20 (1934), 13. In den USA kombinierte Locher eine Fotokathode aus einem Alkalimetall und Anilinfarbstoff mit einem Zählrohr und konnte damit schwache Lichtintensitäten messen. Das Gerät fand in der Astronomie Anwendung (Gordeon L. Locher, „Photoelectric Quantum Counters for Visible and Ultraviolet Light. Part I,“ *Phys. Rev.* 42 (1932), 525). Eine Kombination von Szintillator, Fotokathode und Zählrohr wurde auch von M.V. Scherb vorgestellt (*Phys. Rev.* 73 (1948), 86).
- 19 Adolf Krebs, „Ein Demonstrationsversuch zur Emanationsdiffusion,“ *Ann. Physik* 39, 5 (1941), 330-332.
- 20 Immanuel Broser, Hartmut Kallmann, „Über die Anregung von Leuchtstoffe durch schnelle Korpuskularteilchen I (Eine neue Methode zur Registrierung und Energiemessung schwerer geladener Teilchen),“ *Z. Naturforschung*, 2a (1947), 439-440; dies., „Die Bestimmung der Energie von α -Teilchen mit dem Kristall-Leuchtmassenzähler,“ *Ann. Physik* 6.3 (1948), 317-321).
- 21 Immanuel Broser, Hartmut Kallmann, „Anregung von Leuchtstoffen durch die energiereichen Kerntrümmer der Uranspaltung,“ *Ann. Physik* 6.4 (1948), 85-89.
- 22 Hartmut Kallmann, Ruth Warminsky, „Über den Verstärkungseffekt der elektrischen Leitfähigkeit von Cadmiumsulfid-Kristallen bei Bestrahlung mit α -Teilchen, Elektronen und γ -Quanten,“ *Ann. Physik* 6.4 (1948), 69.
- 23 Immanuel Broser, „Über die Anregung von Leuchtstoffen durch α -Teilchen,“ *Dissertation TU Berlin-Charlottenburg*, eingereicht 5.4.1948.
- 24 Als AIII BVI-Halbleiter werden Kristalle aus chemischen Verbindungen je eines Elementes der 2. und der 6. Gruppe des Periodischen Systems der Elemente bezeichnet. Dazu zählt ne-

- ben den altbekannten ZnO, ZnS und CdS auch das neuerdings für Halbleiterdetektoren und Fotovoltaikschichten eingesetzte CdTe.
- 25 Hartmut Kallmann, „Der Elementarprozess der Lichtanregung in Leuchtstoffen. – Über eine neue Methode der Zählung und Energiemessung geladener Teilchen.“ Vortrag auf dem Dahlemer Kolloquium, 5. Juni 1947. Der Titel ist in Kallmanns Publikationsliste in der Personalakte des KWI für physikalische Chemie und Elektrochemie / Fritz-Haber-Institut der MPG (Signatur: II. Abt., Rep. 22, PA Kallmann, 1947-48) angegeben.
- 26 Werner Bloch, „Kann man Elektronen sehen,“ *Natur und Technik*, 13 (1947), 15-17.
- 27 Hartmut Kallmann, *Natur und Technik*, Juli 1947, zit. nach Anm. 25 und 26.
- 28 Immanuel Broser, persönl. Mitteilung.
- 29 s. Anm. 20.
- 30 Immanuel Broser, Hartmut Kallmann, „Über den Elementarprozess der Lichtanregung in Leuchtstoffen durch α -Teilchen, schnelle Elektronen und γ -Quanten II,“ *Z. Naturforschung*, 2a (1947), 642-650; ders., „Die Bestimmung der Energie von Alphateilchen mit dem Kristall-Leuchtmassenzähler,“ *Ann. Physik* 6.3 (1948), 317-321.
- 31 Hugh Marshall, J.W. Coltman, „The Photo-Multiplier Radiation Detector,“ *Phys. Rev.* 72 (1947) 528; J.W. Coltman, Hugh Marshall, „Some Characteristics of the Photo-Multiplier Radiation Detector,“ *Phys. Rev.* 72 (1947), 528; J.W. Coltman, Hugh Marshall, „Photo-Multiplier Radiation Detector,“ *Nucleonics*, 1 (1947), 58-64.
- 32 Samuel Crowe Curran, W.R. Baker, „A photoelectric alpha particle detector,“ US Atomic Energy Commission, Report MDDDC 1296, 17. November 1944, declassified 23. September 1947.
- 33 Martin Deutsch (29.1.1917-16.8.2002), Professor für Physik und führender Elementarteilchenphysiker war 1935 mit seinen Eltern, den Psychoanalytikern Felix und Helene Deutsch aus Österreich in die USA emigriert. Aus Wolfgang L. Reiter, „1938 und die Folgen für die Naturwissenschaften,“ in: Friedrich Stadler (Hg.), „Vertriebene Vernunft, Emigration und Exil österreichischer Wissenschaft 1930-1940,“ (Münster 2004), S. 664-680, hier S. 671; Anonym, „Martin Deutsch, MIT physicist who discovered positronium, dies at 85,“ Nachruf des M.I.T vom 20. August 2002, M.I.T news office, <http://web.mit.edu/newsoffice/2002/deutsch.html>.
- 34 Martin Deutsch, „Naphthalin as Scintillator,“ *Mass. Inst. of Technology, Inst. of Nuclear Sciences, M.I.T. - I.N.S. Rept. No.3*, Dez. 1947, „Naphthalin counters for β - und γ -radiation,“ *Nucleonics* 2, 3 (1948) 58.
- 35 Martin Deutsch, E-Mail vom 23. April 2000.
- 36 Immanuel Broser, Liselott Herforth, Hartmut Kallmann, Ursula Maria Martius, „Über den Elementarprozess der Lichtanregung von Leuchtstoffen III: Die Anregung des Naphthalins (weitere Versuche mit dem Leuchtmassenzähler)“, *Z. Naturforschung* 3a, (1948) 6.
- 37 Liselott Herforth, Hartmut Kallmann, „Die Fluoreszenzanregung von festem und flüssigem Naphthalin, Diphenyl und Phenanthren durch Alphateilchen, schnelle Elektronen und Gammastrahlung,“ *Annalen der Physik* 6. 4 (1949), 231-245.
- 38 Theodor Förster, „Energiewanderung und Fluoreszenz,“ *Naturwissenschaften* 33 (1946), 166-175.

- 39 Liselott Herforth, „Die Fluoreszenzanregung organischer Substanzen mit Alphateilchen, schnellen Elektronen und Gammastrahlen,“ Dissertation, Berlin-Charlottenburg, vorgelegt am 13.9.1948.
- 40 Liselott Herforth, „Die Fluoreszenzanregung organischer Substanzen durch Alphateilchen und Gammastrahlen,“ *Ann. Physik*, 6.7 (1950), 312-320.
- 41 Volker Schuricht, „Laudatio für das Festkolloquium anlässlich des 60. Geburtstages von Frau Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Liselott Herforth,“ TU Dresden 1976.
- 42 Hartmut Kallmann, „Quantitative Measurements with Scintillation Counters,“ *Phys. Rev.* 75 (1949), 623-626.
- 43 Persa Raymond Bell, „The Use of Anthracene as a Scintillation Counter,“ *Phys. Rev.* 73 (1948), 1405-1406.
- 44 C.E. Feazel, C.D. Smith, „Production of Large Crystals of Naphthalene and Anthracene,“ *Rev. Sci. Instruments* 19 (1948), 817-818.
- 45 George B. Collins, Rosalie C. Hoyt, „Detection of Beta-Rays by Scintillation,“ *Phys. Rev.* 73 (1948), 1259-1260.
- 46 Robert Hofstadter, „Alkali Halid Scintillation Counters,“ *Phys. Rev.* 74 (1948), 100-101, eingereicht 20. Mai 1948.
- 47 Robert Hofstadter, „Twenty five years of scintillation counting,“ *IEEE Trans Nucl. Sci* 22 (1975), 13-35.
- 48 C.-T. Peng, „The History of Liquid Scintillation Counting,“ 13th Int. Conf. on Advances in Liquid Scintillation Spectrometry, Vienna, 1992, edited by J. E. Noakes, F. Schönhofer, Radiocarbon, Tucson, Arizona 1993.
- 49 s. Anm. 2.
- 50 Jost Lemmerich, *Aufrecht im Sturm der Zeit, der Physiker James Franck 1882-1964* (Diep-holz 2007), hier S. 303.
- 51 Klaus Hentschel, *Die Mentalität deutscher Physiker in der frühen Nachkriegszeit* (Heidel-berg 2005).
- 52 Hartmut Kallmann, Carl A. Accordo, „Coincidence Experiments for Noise Reduction in Scintillation Counting,“ *The Review of Scientific Instruments* 21, 1, (1950), 48-51, Received August 1, 1949.
- 53 Hartmut Kallmann, „Scintillations counting with solutions,“ *Phys. Rev.* 74 (1950), 621.
- 54 Hartmut Kallmann, Milton Furst, „Fluorescence of Solutions Bombarded with High Energy Radiation I (Energy-Transport in Liquids),“ *Phys. Rev.* 79 (1950), 857-870.
- 55 George T. Reynolds, F. B. Harrison, G. Salvini, „Liquid Scintillation Counters,“ *Phys. Rev. Letters to the Editor*, 79 (1950), 488.
- 56 Hartmut Kallmann, Milton Furst, „Fluorescent Liquids for Scintillation Counters“, *Nucleon-ics*, 8, March (1951), 32-39; dies., „Fluorescence of Solutions Bombarded with High Energy Radiation II (Energy-Transport in Liquids)“, *Phys. Rev.* 81 (1951), 853-864; dies., *Nucleon-ics* 8,3 (1951), 32; Milton Furst, Hartmut Kallmann, „High Energy induces Fluorescence in Organic Liquid Solutions III (Energy-Transport in Liquids),“ *Phys. Rev.* 85 (1952), 816-825;

- dies., "Energy Transfer by Means of Collision in Liquid Organic Solutions under High-Energy and Ultraviolet Excitations," *Phys. Rev.* 94 (1954), 503.
- 57 M. S. Raben, Nicolas Bloembergen, "Determination of Radioactivity by Solution in a Liquid Scintillator," *Science* 114 (1951), 363.
- 58 F. Newton Hayes, R.C.Gould, "Liquid scintillation counting of H-3 labeled water and organic compounds," *Science* 117 (1953), 480.
- 59 Hartmut Kallmann, Milton Furst, F. H. Brown, "Increasing Fluorescence Efficiency of Liquid Scintillation Solutions," *Nucleonics* 13, 4 (1955), 58.
- 60 F. Newton Hayes, Betty S. Rogers, Phylline C. Sanders, "Importance of Solvent in Liquid Scintillations," *Nucleonics*, 13, 1 (1955), 46-48. Dazu auch Milton Furst, Helmut Kallmann, Felix H. Brown, "Increasing Fluorescence Efficiency of Liquid Scintillation Solution," *Nucleonics* 13, 4 (1955), 58-60; sowie Helmut Kallmann, Milton Furst, "The Basic Processes Occurring in the Liquid Scintillators," in: Carlos G. Bell Jr., and F. Newton Hayes (ed.), *Liquid Scintillation Counting*, Oxford 1958.
- 61 Hartmut Kallmann, Martin Pope, "Surface controlled Bulk Conductivity in Organic Crystals," *Nature*, 31 (1960) 753; Martin Pope, Hartmut Kallmann, P. Magnante, "Electroluminescence in Organic Crystals," *Journal of Chemical Physics*, 38 (1963), 2042-2043.
- 62 Hans-Jörg Rheinberger, "Putting Isotopes to Work: Liquid scintillation counters 1950-1970," in: B. Joerges, T. Shin (ed.), *Instrumentation between science, state, and industry* (Dortrecht 2001), S. 143-174.