

Prekäre Stoffe

Radiumökonomie, Risikoepisteme und die Etablierung der Radioindikatortechnik in der Zeit des Nationalsozialismus

Alexander von Schwerin

Precarious Matters. The Radium Economy, Episteme of Risk and the Emergence of Tracer Technique in National Socialism

Following the traces of radioactive material is – as scholars have recently shown – a valuable historical approach in order to evaluate the material ‘factor’ of science in action. Even though the origins of materials like radium and artificial isotopes are quite different, their circulation is interconnected. A material pathway can be drawn from the radium industry to the scientific rise of artificial isotopes as indicator substances in the 1930s, continuing to the building of networks by German scientists working for the war efforts. Also, this pathway reveals the role of radiation protection in establishing that material culture. Finally, the dynamics of material traces and institutional linkages is shown by the tracer work of biophysicists and radiation biologists working at the Genetic Department of the Kaiser Wilhelm Institute for Brain Research in Berlin and at the Institut de Chimie Nucléaire at Paris, which at that time was occupied by German troops.

Keywords: radioactivity, radiation protection, military-academic complex, biophysics, radiochemistry

Schlüsselwörter: Radioaktivität, Strahlenschutz, militärisch-akademischer Komplex, Biophysik, Radiochemie

Strahlende Substanzen haben in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts eine schnelle und weite Verbreitung gefunden und bilden deshalb auch den Stoff für sehr unterschiedliche Geschichten. Die Anwendung von Radium und anderen natürlichen Strahlern in der medizinischen Therapie ist Thema der Medizingeschichte. Konsumprodukte wie Lebensmittel und Seife, die mit Strahlenstoffen versetzt wurden, oder die Verbreitung von Radioaktivität in der Balneologie und in Kurorten bilden ein Kapitel der Konsum- und Kulturgeschichte, und schließlich begründeten künstlich erzeugte radioaktive Isotope eine neue Ära in der Geschichte der Atomphysik sowie in der medizinischen und biologischen Forschung. Keiner der erwähnten Bereiche existierte allerdings unabhängig von den anderen. Die Weise, wie sie miteinander verknüpft waren, erinnert an den von Bruno Latour beschriebenen „Kreislauf wissenschaftlicher Tatsachen“, durch den die unterschiedlichsten Interessen

und Dinge in einen Zusammenhang treten (Latour 2000: 119). Sein Beispiel sind die mühevollen Versuche des französischen Atomphysikers Frédéric Joliot, am Vorabend des Zweiten Weltkriegs eine atomare Kettenreaktion möglich zu machen (ebd.: 116f.). Sie half Joliot, die Forschungsinteressen des Militärs, der Industrie und weiterer Einrichtungen zu mobilisieren. Beachtung verdienen aber auch die Stoffe, die bei diesen und anderen atomphysikalischen Versuchen im Spiel waren und als wissenschaftliche Objekte, militärpolitische Ressourcen und Waren zirkulierten. Nicht zuletzt diese Stoffe bildeten den Kitt in dem Netz von Verknüpfungen. Ein fragiles Netz, das mit dem Einmarsch der deutschen Wehrmacht in Paris kollabierte.

Maria Rentetzi hat die Spuren der radioaktiven Stoffe in Wissenschaft und Gesellschaft genauer untersucht. Sie spricht von „trafficking materials“, um die Wege aufzuzeigen, auf denen solche Stoffe als wissenschaftliche Objekte, als Rohstoff und Ware quer zu den Grenzen gesellschaftlicher Teilbereiche zirkulieren (Rentetzi 2009). Die materielle Kultur der Wissenschaft und die Materialität von Dingen wird damit das Thema eigener historischer Betrachtung (vgl. Klein/Lefèvre 2007). Dabei zeigt sich nicht nur, dass die soziale Ordnung verschiedene Vorstellungen vom Material hervorbringt (Lavine 2002), sondern dass auch umgekehrt die Stoffe die Reproduktion und Transformation der sozialen Ordnung antreiben (Rentetzi 2009).

Anknüpfend an diesen doppelten Aspekt der Materialität von Dingen soll eine weitere Spur der „trafficking materials“ aufgenommen werden. Zunächst scheinen radioaktive Stoffe wie Radium und Radioisotope in erster Linie Objekte in einem nachvollziehbaren Warenkreislauf zu sein – Jeffrey Hughes spricht von „radium economy“ (1993) –, der entsprechend den Erfordernissen des Materials organisiert ist und kontrolliert wird.¹ Doch zu den Eigenschaften der Stoffe gehört auch, dass sie entweichen und außer Kontrolle geraten können. Als flüchtige Stoffe gelangten sie nicht nur geplant, sondern vielfach auch ungeplant in den menschlichen Körper, wie spätestens der tragische Fall der vergifteten Leuchtziffermalerinnen deutlich vor Augen führte (Rentetzi 2004). Die Forschung reagierte darauf mit Bemühungen, das Wissen von der Bewegung der radioaktiven Stoffe und der von ihnen ausgehenden Gefahr zu mehren. Das hiermit begründete, heterogene Forschungsfeld formte eine Wissensstruktur, die man als ‚Risikoepisteme‘ der Radioaktivität bezeichnen kann. Die Risikoepisteme ist die Formation wissenschaftlicher Beziehungen, die in einer gegebenen Zeit eine bestimmte Repräsentation von Gefährdetem und Gefahr hervorbringt und die in teils enger Wechselwirkung mit den jeweiligen Strategien und politischen Rationalitäten steht, die zur Regulation von Gefahren aufgewendet werden, kurz: mit der Risikopolitik. Die Risikoepisteme wird durch Mechanismen und Techniken, Instanzen und Personen abgesichert, die über die Identifikation und Unterscheidung echter und idiosynkratischer, relevanter und vernachlässigbarer sowie regulierbarer, vermeidbarer und unvermeidbarer Gefahren

und Risiken entscheiden und wachen.² Zu letzteren gehörte die Gruppe jener Wissenschaftler, die mit ihren Messgeräten in Industriebetrieben der radioaktiven Kontamination nachspürten. Diese ‚messenden Wissenschaftler‘ arbeiteten mit staatlichen Instanzen der Gefahrenregulierung und nicht selten zugleich mit der radiochemischen Industrie in Forschungsprojekten eng zusammen. Damit wird deutlich, dass die problematische Seite der Stoffbewegung und die unkontrollierte, innere Zirkulation der Stoffe im Körper als Teil jener materiell-sozialen Verflechtung von Ökonomie, Wissenschaft und Technik, die sich aus dem Bewegungsbild der „trafficking materials“ ergibt, verstanden werden müssen. Die radioaktiven Stoffe erweisen sich dann im spezifischen Sinne als prekäre Stoffe. Die Gleichzeitigkeit von Multiplizierung und Beschleunigung der Strahlencirkulation sowie ihrer Kontrolle, Eindämmung und Kanalisierung resultierte bereits aus den Konstitutionsbedingungen der Strahlen als hochaktive und zugleich beunruhigend gefährliche Agenzien (Wahrig/Stoff/Schwerin/Balz 2008).³ Damit stellt sich die Aufgabe, die soziale und wissenschaftliche Produktivität dieser prekären „trafficking materials“ nachzuvollziehen.

Am Beispiel der Verwendung von radioaktiven Stoffen als Radioindikatoren lassen sich diese Zusammenhänge genauer untersuchen. Die Radioindikator-technik oder Tracertechnik entwickelte sich, nachdem die ersten Atommeiler in Betrieb gegangen waren, zu einer Schlüsseltechnik der physiologischen Biochemie und Molekularbiologie (Broda 1960, Rheinberger 2001, Jones/Martensen 2003: 96). Im Unterschied zu dieser Expansionsphase der Tracertechnik, die bereits einige Beachtung gefunden hat⁴, ist die Zeit der 1930er und 1940er Jahre, die als Etablierungsphase charakterisiert werden kann, nicht so gut untersucht (Hevesy 1948, Kohler 1977, Heilbron/Seidel 1989). Die Rolle, die dabei die Kriegsmobilisierung der Wissenschaft in Deutschland spielte, ist ausführlich gezeigt worden (Gausemeier 2005, Schmaltz 2005). Dass auch die Radiumökonomie und die Regulation radioaktiver Stoffe in dieser Entwicklung ihre Spuren hinterließen, wurde dabei aber kaum berücksichtigt.

Im Zentrum des Geschehens stand die Auergesellschaft, ein Unternehmen, das mit der Produktion von Gasglühlicht groß geworden ist (Klauer 1962). Ihr Beispiel zeigt, dass die Radiumindustrie, anders offenbar als in den USA, in den 1930er Jahren für die einsetzende Produktion, Distribution und Anwendung künstlich radioaktiver Isotope als enger Kooperationspartner radiochemischer und biophysikalischer Forschungslabore eine wichtige Funktion erfüllte. Die entscheidenden Impulse für die Einführung der Tracertechnik kamen in Deutschland insbesondere aus der Radiochemie und Technik. Biowissenschaftler wurden in diese Entwicklung erst in einem zweiten Schritt involviert. Ausschlaggebend waren dabei die risikopolitischen Probleme, welche die zunehmende Zirkulation radioaktiver Stoffe mit sich brachte. In den folgenden Abschnitten wird zum einen ge-

zeigt, wie Chemie und Technik die Etablierung der Radioindikatormethode in Deutschland vorangetrieben haben, zum anderen, dass diese Entwicklung innerhalb der Verwertungskette des Radiums ihren Ausgang nahm. Die Industrie verfügte indes nicht nur über dringend benötigte Techniken und Ressourcen. Die Gefahren, die die Anwendung radioaktiver Stoffe mit sich brachte, erforderte die Zusammenarbeit von Radiumindustrie und Biophysikern. Anschließend wird verdeutlicht, dass sich die radiochemischen und die risikoepistemischen Verknüpfungen zwischen Industrie und Wissenschaft überlagerten. Als Gefahrenstoffe fügen die „trafficking materials“, so die These, dem Geflecht aus wissenschaftlichen und ökonomischen Verbindungen eine Dimension hinzu, deren wissenschaftliche und soziale Produktivität zu untersuchen ist. Am Beispiel des Kaiser-Wilhelm-Instituts (KWI) für Hirnforschung wird dargestellt, wie sich aus den risikoepistemischen Problemen, die die Biowissenschaftler für die Industrie bearbeiteten, die Möglichkeit ergab, die Radioindikatormethode in die biologische Forschung einzuführen. Dieser Fall führt dann ins Institut de Chimie Nucléaire in Paris und zeigt, wie die militarisierten Forschungsstrukturen des Zweiten Weltkriegs die Bedingungen für die solchermaßen initiierte Forschung im Weiteren sicherstellten.

Radiumökonomie und Risikoepisteme im Nationalsozialismus

Die Radiumökonomie im nationalsozialistischen Deutschland ist nicht von der Rüstungsforschung und den Kriegereignissen zu trennen. Als die Wehrmacht im Oktober 1938 das tschechoslowakische Sudetenland besetzte, fiel auch der Bergbau des südlichen Erzgebirges in deutsche Hand. Das Reichswirtschaftsministerium vergab die Förder- und Verarbeitungsrechte an den Radiumerzgruben an die deutsche Radiumindustrie, angeführt durch die Chininfabrik Braunschweig, Buchler & Co. und die Auergesellschaft mit Sitz in Berlin (Elsner/Karbe 1999: 96, Hayes 2004: 247). Die Frankfurter Degussa AG hatte letztere im Zuge der „Arisierung“ der deutschen Wirtschaft im Jahr 1934 vollständig übernommen (Hayes 2004: 99–103). Kaum ein Jahr später gerieten die Gruben wegen der dortigen Uranvorkommen auch ins Visier der deutschen Rüstungsforschung. Im September 1939 organisierten sich die deutschen Atomphysiker, Radiochemiker und Militärs im später sogenannten Uranverein, dessen Ziel die Entwicklung einer deutschen Atombombe war (Walker 1989). Die deutschen Behörden schlossen die bestehende Uranfarbenfabrik in St. Joachimsthal, und deutsche Betriebe übernahmen fortan die Uranverarbeitung.

Das atomphysikalische Waffenprojekt erforderte die Zusammenarbeit von Industrie, Wissenschaft und staatlichen Stellen. Die dazu notwendigen Verbindungen mussten allerdings nicht erst geknüpft werden, da das Atom-

projekt auf den eingespielten Kooperationen der Radiumökonomie aufbauen konnte. Schon Ende der 1920er Jahre bildete das KWI für Chemie eine entscheidende Schnittstelle von Wissenschaft und Radiumindustrie. Die IG Farben AG finanzierte Arbeitsräume und die Deutsche Gasglühlicht-Auer-Gesellschaft umwarb eifrig die Mitarbeiter des KWI (Kant 2005: 294–299). Die Auer-Gesellschaft war zwar mit der Entwicklung und Produktion des Gasglühlichts groß geworden, drängte aber jetzt ins Radiumgeschäft. Die Angebote zur Zusammenarbeit stießen auf Gegeninteresse. So übernahm der frisch promovierte Radiochemiker Nikolaus Riehl als neuer Mitarbeiter der Auer-Gesellschaft die Aufgabe, neue Anwendungsmöglichkeiten für radioaktive Stoffe zu erkunden (Riehl 1981: 310). Das größte Potential versprach die Materialprüfung, für welche die Durchdringungskraft der Strahlen genutzt wurde.

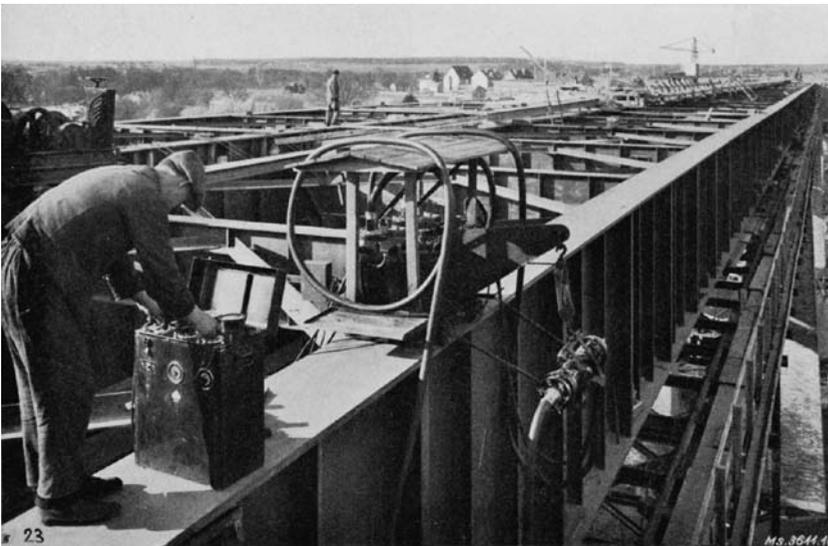


Abb. 1: Werkstoffprüfung mittels Röntgenstrahlen (Ernst 1942: 124).

Die zerstörungsfreie Materialprüfung erlebte in den 1930er Jahren einen Boom und trug erheblich zur Verbreitung strahlender Stoffe weit über die medizinische Anwendung hinaus bei. Zu den neuen Einsatzorten von Röntgen- und Strahlenpräparaten gehörten Fabrikhallen, Brücken und Werften. Die auf Strahlen basierende – sogenannte zerstörungsfreie – Materialprüfung führte in den 1930er Jahren damit zu einer bedrohlichen Verbreitung von Radioaktivität und Röntgenstrahlen. Wie in Abbildung 1 zu sehen ist, prüften Arbeiter mittels Röntgenstrahlen zum Beispiel Schweißnähte an Verstreben eines Hochbaus. Ein Mitarbeiter der Unfallversicherung kommentiert dies kritisch: „Gegen die Stellung des Arbeiters ist vom Standpunkt des Strahlenschutzes nichts einzuwenden, doch besteht erhebliche Absturzgefahr. Aus diesem Grunde kann hier das Berühren eines mit ge-

ringfügiger Restladung versehenen Kondensatorkabels zum Tode führen.“ (Ernst 1942: 124) Die Nachfragen der Reichsbahn, der Dampfkesselindustrie und der angeheizten Rüstungsindustrie sorgten wesentlich dafür, dass sich die Strahlenmethode zu einem Standardinstrument in der Werkstoff- und Produktionskontrolle entwickelte (Maier 2007: 404–406). Insbesondere in der Massenproduktion von Kriegsschiffen und in der Serienfertigung von U-Booten aus Fertigteilen galt sie bald als unentbehrliche Methode, um die Festigkeit und Dichtigkeit von Schweißnähten zu überprüfen.

Die neue und effektive Form der Materialprüfung konfrontierte den Arbeitsschutz in der Industrie mit den gefährlichen Eigenschaften der Strahlen. Die Streustrahlen, die bei der Bestrahlung auftraten, stellten eine ständige und lautlose Gefahr für die Gesundheit der Arbeiter dar. Bislang hatte man sich mit diesem Problem aber nur in der Radiologie auseinandergesetzt. Mitarbeiter verschiedener Berufsgenossenschaften beobachteten aber zunehmend alarmiert die Verbreitung der neuen Strahlentechniken.⁵ „Vagabundierende“ Strahlen⁶ und unkontrolliert freigesetzte radioaktive Stoffe bedrohten nicht zuletzt das staatliche Primat der Leistungsfähigkeit. Unter den Vorzeichen des Nationalsozialismus zielte eine bis in die Spannkraft des einzelnen Körpers hineinreichende Vorsorge auf die totale staatliche Verwaltung und Bewirtschaftung des arbeitsfähigen Körpers (Knödler 1991: 116, Baader 2001). Vor diesem Hintergrund nahmen Ende der 1930er Jahre die Bemühungen zu, die Zirkulation von Strahlen und strahlenden Stoffen besser zu kontrollieren. Das Ergebnis war die durch das Reichsarbeitsministerium erlassene Strahlenschutzverordnung aus dem Jahr 1941, die Arbeiten mit radioaktiven Stoffen in Radiumbetrieben regulierte und genaue Vorschriften und Angaben zu solchen Tätigkeiten enthielt, bei denen „Röntgenstrahlen und Strahlen radioaktiver Stoffe zur Untersuchung, Prüfung und Behandlung von Roh- und Werkstoffen oder von Fertigerzeugnissen“ verwendet wurden (Koelsch 1942: 17; vgl. Abb. 2).

Auf dem Weg zur staatlichen Regulierung der Strahlengefahren spielten Mediziner und insbesondere Genetiker und Biophysiker eine entscheidende Rolle. Einer der ersten, die auf die Gefahren der zerstörungsfreien Materialprüfung aufmerksam machten, war der Direktor des Berliner Instituts für Strahlenforschung Walter Friedrich (Friedrich/Noethling 1936). Auch ein Schüler Friedrichs, der Physiker Karl G. Zimmer, dessen Name später vor allem durch die gemeinsam mit dem Physiker Max Delbrück und dem Genetiker Nikolai Timoféeff-Ressovsky ausgearbeitete Treffertheorie der genetischen Strahlenwirkung bekannt wurde, tat sich damit hervor (Fischer 1985: 75–80). Als Mitarbeiter in der Strahlenabteilung des Berliner Cäcilienkrankenhauses beschäftigte sich Zimmer hauptsächlich mit der Verbesserung der Radiumdosimetrie und damit zusammenhängend mit Fragen des Strahlenschutzes in medizinischen Einrichtungen und in Forschungsbetrieben (Zimmer 1936). Aus den Verbindungen zur Radiumindustrie, die sich dabei



Abb. 2: Arbeitsschutz in der Radiumindustrie: Präparation von Proben unter einem Abzug (Holstein 1942: 52).

ergaben, entwickelten sich gemeinsame Arbeitsprojekte mit dem Ziel, die Gefährdung des Erbguts durch Strahlenanwendungen einzugrenzen (Pickhan/Zimmer 1937: 87). Zusammen mit Riehl und mit Unterstützung der Auergesellschaft gelang es etwa, für die Zwecke der Röntgendiagnostik einen empfindlicheren Durchleuchtungsschirm zu entwickeln, der es erlaubte, die verwendeten Strahlendosen zu senken (Riehl/Zimmer 1937).

Zimmer entwickelte sich in den 1930er Jahren zum Prototyp eines ‚messenden Wissenschaftlers‘. Die Aufgabe dieser risikopolitischen Akteure war es, vagabundierende Strahlen aufzuspüren und die Wege zu verfolgen, auf denen sich radioaktive Stoffe unkontrolliert verteilten. Auf diese Weise stellten die messenden Wissenschaftler eine direkte Verbindung von Risikopolitik und Strahlenschutzpraxis her.⁷ Damit in den Betrieben die – ab 1941 vorgeschriebenen – täglichen Routinemessungen vorgenommen werden konnten, kamen bald aber auch einfach zu bedienende Strahlungsmessgeräte auf den Markt. So etwa die von Zimmer konstruierte Kondensatorkammer oder das von der Auergesellschaft vertriebene und zusammen mit der Berufsgenossenschaft für Gesundheitsdienst und Wohlfahrtspflege entwickelte „Dosiskop“ (Ernst/Jäger/Zeiller 1944). Das tragbare Messgerät konnte

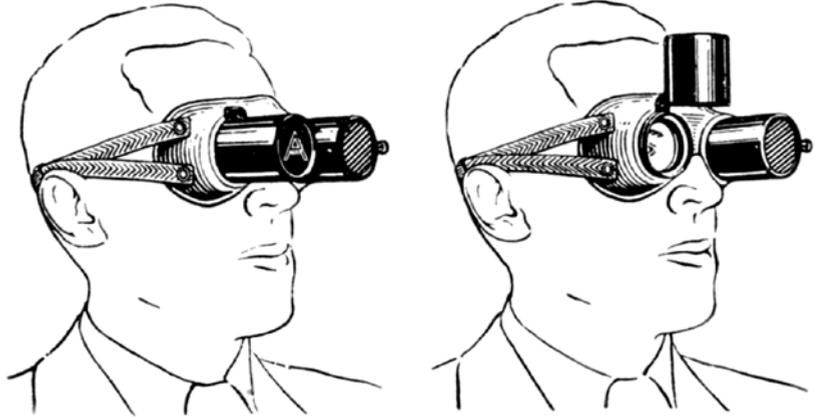


Abb. 3: Instruktion zur Handhabung eines Dosiskops (Ernst/Jäger/Zeiller 1944: 126).

wie eine Schutzbrille getragen werden und machte die im Werkraum oder der Fabrikhalle vagabundierenden Strahlen und entwichenen Stoffe sichtbar (Abb. 3). In die Brillengläser waren geeichte Leuchtfarben eingelassenen, die sich bei Überschreitung der Toleranzdosis charakteristisch verfärbten.

Indikatortechnik und Radiumökonomie

Zur selben Zeit, in der die messenden Wissenschaftler ihre Labore verließen, um die Verfolgung vagabundierender Strahlen und Strahler aufzunehmen, setzte die Ära der radioaktiven Indikatoren ein. Bereits in den 1920er Jahren hatte der Chemiker George de Hevesy in Freiburg damit begonnen, das Prinzip der radioaktiven Markierung systematisch auszuarbeiten (Hevesy 1948: 129, Kohler 1977: 274, Deichmann 2001: 277). Insofern existierte bereits die Vorstellung, dass sich mit Hilfe von radioaktiven Substanzen Vorgänge im lebenden Körper oder auch die Wege biochemischer Prozesse sichtbar machen ließen. Von der Feststellung des Prinzips zur massenhaften Zirkulation radioaktiver Isotope war es aber ein weiter Weg, der keineswegs ohne Hürden verlief. In den 1930er Jahren befand sich die Indikatortechnik noch in der Etablierungsphase. Die Forscher kämpften, wie Robert Kohler bereits vor dreißig Jahren am Beispiel der USA verdeutlicht hat, mit allerlei experimentellen, aber auch finanziellen Schwierigkeiten und Rückschlägen (Kohler 1977: 297). Auch der deutsche Biochemiker Otto Meyerhof äußerte noch im Jahr 1938 auf einer von Niels Bohr und Hevesy in Kopenhagen einberufenen Konferenz, die die Brauchbarkeit radioaktiver Isotope für biologische Zwecke zum Thema hatte, grundsätzliche Bedenken am Nutzen der Methode (Levi 1985: 93, Niese 2005: 139). Meyerhofs Skepsis korrespondierte mit der Ansicht des Vorstandsvorsitzenden der Auergesellschaft Prof. Karl

Quasebart, wonach die Entwicklungsaussichten der Methode noch nicht zu übersehen waren (Schmaltz 2005: 259f.).

Fortschritte blieben indes nicht aus. Der deutsche Emigrant und Biochemiker Rudolf Schönheimer und der Physiker Harold Urey erforschten an der New Yorker Columbia School of Physicians and Surgeons erfolgreich die Stoffwechselbiochemie (Kohler 1977). Seit 1934 unterstützte die Rockefeller Foundation auch eine Kooperation zwischen Bohr, dem Physiologen August Krogh und Hevesy, der Mitte 1934 aus Deutschland nach Kopenhagen emigrieren musste und dort eine beachtliche Forschungsaktivität entfaltete. Zwischen 1935 und 1939 publizierten Hevesy und seine Mitarbeiter 25 Artikel über Indikatorexperimente mit radioaktiven Isotopen, weitere fünfzehn Artikel bis 1945 (Hevesy 1948: 147, Levi 1985: 92). Ute Deichmann kommt zusammenfassend zu dem Ergebnis, die Forschung und die Entwicklung der Radioindikatortechnik während der 1930er und 1940er Jahre hätten unter maßgeblicher Beteiligung von jüdischen Emigranten aus Deutschland und fast ausschließlich in den USA stattgefunden (2001: 271). Zwar mussten tatsächlich viele Biochemikerinnen und Biochemiker flüchten, aber auch in Deutschland gingen Versuche weiter, Isotope und vor allem radioaktive Isotope für die Forschung nutzbar zu machen.⁸ Hier war es allerdings nicht die Gruppe der Biochemiker, die wie in den USA die Entwicklung trug (Kohler 1977). Sowohl auf Konferenzen als auch in Übersichtsartikeln, die zu dieser Zeit in deutschen Zeitschriften zum Thema erschienen, gaben physikalische Chemiker, Analytiker und Radiochemiker den Ton an. In Tabelle 1 sind die zwischen 1930 und 1945 erschienenen deutschsprachigen Darstellungen der Anwendungsmöglichkeiten radiochemischer Methoden zum Schwerpunkt Indikatortechnik erfasst, wobei es sich zum Teil auch um Kurzberichte über zusammenfassende Vorträge handelt. Deutlich wird, dass die analytische Chemie und die Radiochemie die Entwicklung bis Anfang der 1940er Jahre angeführt haben.

Den Anfang machte die Deutsche Bunsengesellschaft für angewandte physikalische Chemie, deren Tagungen (kurz Bunsentagungen genannt) ein traditioneller Treffpunkt von Industrie und akademisch arbeitenden Chemikerinnen und Chemikern darstellten. Dort wurde bereits 1932 erstmals die Nutzenanwendung der Radioaktivität und der „Indikatorenmethode“ diskutiert (Erbacher/Philipp 1932: 588; vgl. Tab. 1, Nr. 1). Anwesend waren Größen der Radioaktivitätsforschung wie Ernest Rutherford, Otto Hahn, Lise Meitner, George de Hevesy, Friedrich Paneth, Hans Geiger und Stefan Meyer (Kant 2005: 302f.). Der erste Übersichtsartikel zur Anwendung der Indikatortechnik erschien 1934, und in ihm wurden nicht zuletzt Methoden aufgegriffen, die bereits auf der Bunsentagung vorgestellt worden waren (vgl. Tab. 1, Nr. 2). Die Autoren des Artikels waren Hans Käding, Mitarbeiter am KWI für Chemie, und Nikolaus Riehl. Sie berichteten auch über gemeinsame Entwicklungsarbeiten am KWI und des wissenschaftlichen Laboratoriums der Auergesellschaft, die vereinfachte Methoden für die Untersuchung von

Tab. 1: Entwicklung der Indikator-technik im Spiegel von Überblicks-artikeln.

Nr.	Autor	Disziplin	Anwendung	Jahr	Erscheinungs-ort
1	Thema „Radioaktivität“ auf der Bunsentagung	Chemiker	Chemie, Metallurgie, Technik, Biologie, Medizin	Mai 1932	<i>Naturwissenschaften</i> 20 (Bericht von Erbacher u. Philipp)
2	Käding, Riehl	Chemiker	Chemie, Technik	1934	<i>Angewandte Chemie</i> 47
3	Erbacher, Philipp	Chemiker	Chemie	1935	<i>Angewandte Chemie</i> 47
4	Thema „Deuteriumverbindungen“ auf der Bunsentagung	Chemiker	analytische Chemie	1937	<i>Angewandte Chemie</i> 50
5	Maier-Leibnitz	Physiker	organische Chemie	1938	<i>Angewandte Chemie</i> 51
6	Erbacher	Chemiker	Chemie, Metallurgie	1938	<i>Die Umschau</i> 42
7	Clusius	Chemiker	anorganische Chemie	1938	<i>Angewandte Chemie</i> 51
8	Geib	Chemiker	organische Chemie	1938	<i>Angewandte Chemie</i> 51
9	W. Gerlach	Physiker	Medizin	1938	<i>Strahlentherapie</i> 63
10	Enders	Chemiker	Biochemie	1940	<i>Angewandte Chemie</i> 53
11	Felix	Physiologe	Physiologie, Biochemie, Medizin	1940	<i>Jahreskurse für ärztliche Fortbildung</i> 31
12	Fleischmann	Physiker	verschiedene	1940	<i>Angewandte Chemie</i> 53
13	Born, Zimmer	Radiochemiker, Physiker	Technik	1940	<i>Die Gasmaske</i> 12
14	Dirscherl	Biochemiker	Physiologische Chemie	1941	<i>Z. für Elektrochemie</i> 47
15	Timoféeff-Ressovsky	Genetiker	Chemie, Biologie	1941	<i>Chemiker-Zeitung</i> 65, <i>Angewandte Chemie</i> 54
16	Wolf, Born	Radiochemiker	Chemie, Biochemie, Biologie	1941	<i>Chemiker-Zeitung</i> 65
17	Born, Timoféeff-Ressovsky, Zimmer	Chemiker, Genetiker, Physiker	Technik, Chemie, Biologie	1941	<i>Die Umschau</i> 45
18	Pickhan	Mediziner	Physiologie	1941	<i>Deutsche medizinische Wochenschrift</i> 67
19	Riezler	Physiker	Chemie, Medizin, Biologie	1941	Riezler 1941
20	Schubert	Mediziner	Medizin	1942	<i>Strahlentherapie</i> 71
21	Bothe	Physiker	Werkstoffprüfung, Biologie, Medizin	1943	<i>Stahl und Eisen</i> 63

22	„Kernphysikalische Arbeitstagung 1943“ des Reichsforschungsrats u. Heereswaffenamts	Physiker, Biophysiker, Genetiker, Mediziner	Biologie, Medizin, Technik	1943	unveröffentlicht
23	„Kriegsarbeitstagung Isotope als Indikatoren für analytische Methoden“ des Vereins Deutscher Chemiker	Physiker, Chemiker (u.a. Biochemiker), Mediziner	Chemie, Technik, Biologie, Medizin	1944	<i>Die Chemie</i> 58 (1945) bzw. <i>Angewandte Chemie A</i> 59ff.
24	Schubert	Mediziner	Medizin	1944	<i>Deutsche medizinische Wochenschrift</i> 69
25	v. Ardenne	Physiker	grundsätzlich	1944	v. Ardenne 1944
26	Schubert	Mediziner	Medizin	1946, 1947	<i>Deutsche medizinische Wochenschrift</i> 71, <i>Ärztliche Forschung</i> 1
27	Schubert	Mediziner	Medizin, Biologie	1947	Schubert 1947

Aktivkohlen, die Bestimmung der absoluten Oberfläche von Metallen, die Sichtbarmachung der Korngrenze und von Schlackeneinschlüssen bei Metallen oder die Bestimmung kleinster Substanzmengen zum Ziel hatten (Käding/Riehl 1934: 263).

Die Entwicklung der Tracertechnik stützte sich nicht zufällig auf die enge Zusammenarbeit mit der Radiumindustrie. Denn die Methoden, die Käding und Riehl vorstellten, beruhten nicht auf der Verwendung künstlich radioaktiver Isotope, sondern von Radium und genauer noch auf einem Zerfallsprodukt, der gasförmigen Radiumemanation. Ende der 1920er Jahre hatte Hahn die Grundlagen für die Emaniermethode gelegt (Erbacher/Käding 1930: 439). Da Forscher und Stoffe bereits zwischen KWI und Industrielabor hin- und herwechselten, lag nichts näher, als die Labormethode nun auch gemeinsam für die breite Anwendung in Industrie und Technik weiterzuentwickeln. Notwendig waren etwa Apparate, mit denen die gasförmige Radiumemanation ohne großen Aufwand an beliebigen Orten erzeugt werden konnte. Möglich machte dies der „Radonator“, ein serienfertiges Gerät zur Gewinnung konzentrierter Emanationspräparate, an dessen Entwicklung Riehl beteiligt war und mit dem die Auergesellschaft auf einen wachsenden Markt strahlentherapeutischer Anwendungen drängte (Wolf/Riehl 1931: 173). Unter dem Schlagwort Radiumschwachtherapie ging der Trend des Radiumkonsums sogar dahin, mit solchen Geräten radioaktive Stoffe bis ins heimische Wohnzimmer und Schlafzimmer zu bringen, um Feierabend und Schlaf für die gesundheitsförderliche Wirkung der Radioaktivität zu nutzen (Helmstädter 2005). Dass die Auergesellschaft bereits daran arbeitete, die Beweglichkeit der radioaktiven Stoffe zu erhöhen, konnte ihr Interesse an den neuen radiochemischen Analysemethoden nur steigern.

Dieses Interesse fand seine Entsprechung auf Seiten der Forschung. Bis Ende der 1930er Jahre erschienen die meisten Übersichtsartikel, die sich mit den Erwartungen an die Indikator-technik befassten, in der Zeitschrift *Angewandte Chemie*, dem Organ des Vereins deutscher Chemiker (vgl. Tab. 1). Viele Originalarbeiten erschienen dagegen in der *Zeitschrift für Physikalische Chemie*.⁹ Die Radiochemikerinnen und Radiochemiker befassten sich also fast ausschließlich mit chemischen, physikalisch-chemischen und technischen Problemen, die mit radioaktiv-chemischen Methoden elegant und effektiver zu lösen sein sollten als bisher. Sie erörterten aber nicht nur die Radiumemanation, sondern auch die Erfahrungen, die mit anderen natürlichen radioaktiven Stoffen wie den Bleiisotopen Thorium X und Radium D gemacht wurden (vgl. Tab. 1, Nr. 2, 3, 17). Einige Forscher setzten ihre Hoffnungen auf stabile, also nicht radioaktive Isotope. Dazu gehörte insbesondere Deuterium, das schwere Isotop des Wasserstoffs, zu dessen Anwendungsmöglichkeiten die Bunsengesellschaft im Jahr 1937 eine eigene Tagung veranstaltete (Tab. 1, Nr. 4). Dieser Experimentalansatz blieb in Deutschland aber randständig, anders als in den USA, wo das Deuterium beziehungsweise das daraus gebildete schwere Wasser der entscheidende Stoff war, mit dem physikalische Chemikerinnen und Chemiker, Biologinnen und Biologen die Indikator-methode in der biologischen Forschung auf den Weg brachten (Kohler 1977: 267–269).¹⁰

Für biologische Forschungsfragen tat sich eine völlig neue Perspektive auf, als es 1934 möglich wurde, radioaktive Isotope künstlich zu erzeugen. Eines der ersten Atome, die durch den Beschuss mit Neutronenstrahlen radioaktiv gemacht werden konnten, war Phosphor und damit zugleich ein wichtiger Bestandteil organischer Stoffe. Möglich wurde damit auch, chemische Moleküle, Pharmazeutika oder die verschiedensten biologischen Verbindungen radioaktiv zu markieren. Hevesy war einer der ersten, die sich sofort auf die neue Methode stürzten (Hevesy 1935, Levi 1985: 87). In Deutschland führte der Biochemiker Otto Meyerhof, Abteilungsleiter am KWI für medizinische Forschung in Heidelberg, den radioaktiven Phosphor in die biochemische Forschung ein (Meyerhof/Ohlmeyer/Gentner/Maier-Leibnitz 1938, Meyerhof 1939). Diese Arbeiten währten jedoch nicht lange, denn Meyerhof und seine Frau flüchteten im Herbst 1938, als sich die antisemitische Bedrohungslage zuspitzte (Schmaltz 2005: 415f., Rürup/Schüring 2008: 268–271). Von Meyerhof abgesehen waren es also vor allem wieder Chemikerinnen und Chemiker und an erster Stelle die Mitarbeiter des KWI für Chemie, wie Otto Erbacher und Kurt Philipp, die – gleich 1935 – auf die Anwendungsmöglichkeiten der künstlichen Radioisotope aufmerksam machten (Tab. 1, Nr. 3). In ihren eigenen Versuchen befassten sie sich konsequent mit solchen Elementen wie Gold und Halogenen, die für die Anwendung im chemischen Laboratorium interessant waren (Erbacher/Philipp 1936).

Technologie und biologische Indikatorforschung

Es dauerte noch einmal ein Jahr, bis auch andere Arbeitsgruppen in Deutschland damit begannen, künstliche radioaktive Isotope in biologischen oder medizinischen Experimenten anzuwenden (vgl. Tab. 1, Nr. 10f.). Die Radiumindustrie und die Radiochemie hatten an dieser Entwicklung ihren Anteil. Denn die üblichen radioaktiven Proben, die mit Hilfe von Neutronenstrahlen hergestellt werden konnten, hatten den Mangel, dass ihre Konzentration für viele Anwendungen zu gering war. Sowohl die Radiochemiker am KWI für Chemie als auch Mitarbeiter der Auergesellschaft widmeten sich deshalb mit Akribie den radiochemischen Trennverfahren, ohne die, so der Direktor der radiochemischen Abteilung des KWI, „ja ein Arbeiten mit künstlich radioaktiven Substanzen gar nicht denkbar ist“¹¹. Zugleich regte die Auergesellschaft weitere Forschungsarbeiten am KWI für Chemie an (Schmaltz 2005: 259).

Dem mit Hahn befreundeten Vorstandsvorsitzenden der Auergesellschaft Quasebart schwebte indes nicht nur die Entwicklung chemisch-analytischer Verfahren für die Zwecke der chemischen und anderer Industrien vor Augen. Der Firmenstrategie dachte auch an die Anwendung von radioaktiven Substanzen in der Stoffwechselforschung und vor allem in der medizinischen Diagnostik und Therapie (ebd.: 259f.). Ihm war dabei klar, dass trotz aller Bemühungen der Radiochemiker alle existierenden Verfahren zu uneffektiv waren, um Radioisotope in relevanten Mengen zu erzeugen. Anfang 1938 übernahm deshalb Quasebart zusammen mit der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft die Initiative zur Errichtung eines besonders leistungsstarken Teilchenbeschleunigers (ebd.: 258–260). Aus seiner Sicht war der Neutronengenerator der Firma Phillips, der Mitte 1939 in Betrieb ging, die strategisch-technische Vorbedingung für verbesserte Produktionsbedingungen und die gewinnbringende Verwertung der künstlichen Radioaktivität. Die Neutronenanlage änderte aber auch für die Forschung die Bedingungen der Produktion radioaktiver Isotope nicht zuletzt durch ihren Standort entscheidend: Die Auergesellschaft hatte die Anlage in der Genetischen Abteilung des KWI für Hirnforschung in Berlin-Buch errichten lassen. In Kopenhagen, Heidelberg oder Paris benutzten die Physiker bislang für diesen Zweck ihre kostbaren Radiumvorräte. Üblicherweise waren das nicht mehr als wenige Hundert Milligramm. Die Genetische Abteilung besaß gerade mal 10 Milligramm, und in ganz Deutschland kursierten Ende 1939 ganze 20 Gramm, wie Zimmer später in sowjetischen Verhören schätzte.¹² Die Energie des Neutronenstrahls, den der Phillips-Generator produzierte, entsprach dagegen einer Radiummenge von etwa 300 Gramm (ebd.: 261).

Die Aussicht, in absehbarer Zeit über den leistungskräftigsten Beschleuniger in Deutschland zu verfügen, vereinte nicht nur die Forscher der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft und die radiochemische Industrie in einem ge-

meinsamen Interesse, sondern auch Vertreter des Reichsforschungsrats, des Reichsamtes für Wirtschaftsaufbau sowie das Heereswaffenamt und damit einige der für die deutsche Kriegsvorbereitung zentralen Institutionen. Die Geschichte des Neutronengenerators ist ein Beispiel für erfolgreiche kooperative Forschungsförderung im Nationalsozialismus (Schmaltz 2005: 264, Gausemeier 2005: 186). Die Kooperation setzte sich nahtlos fort in der Arbeit des Uranvereins, der das deutsche Atomprojekt plante und in dem nicht nur Atomphysiker, sondern auch Vertreter der Auergesellschaft und Biophysiker aus Berlin-Buch vertreten waren. Am Beispiel des neuen Beschleunigers zeigt sich jedoch deutlich, dass es letztlich nicht die atomare Kettenreaktion wie im eingangs zitierten französischen Beispiel Latours war, die die verschiedenen Akteure zusammenführte, sondern die künstliche Radioaktivität und die verschiedenen Möglichkeiten ihrer Anwendung.

Der Neutronengenerator war ein Universalinstrument, das die Biologen am KWI für Hirnforschung in die bereits bestehenden Arbeitsbeziehungen zwischen Industrie, Radiophysikern und -chemikern einbezog und diese Beziehungen festigte. Unter der Leitung des charismatischen Genetikers Timoféeff-Ressovsky galt die Genetische Abteilung als eine international führende Forschungsstätte für Mutations-, Evolutions- und Genforschung (u.a. Satzinger/Vogt 2001). Mit der Einführung des Generators veränderten sich jedoch in einschneidender Weise die Arbeitsschwerpunkte (Gausemeier 2005: 177). Die neue Isotopenquelle fungierte als Schlüsselinstrument in gemeinsamen Forschungsprojekten der Abteilung mit der Auergesellschaft. Auswärtige Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler nutzten sie als Ressource wie etwa die Atomforscher des KWI für Chemie (Sime 2007: 286). Schließlich schlüpfte die Genetische Abteilung in die Rolle des Lieferanten von radioaktiven Präparaten. Radioarsen erhielt etwa Otto Erbacher, der am KWI für Chemie im Tierversuch die Verteilung des Stoffs radiographisch darzustellen versuchte. Andere Anfragen kamen aus Frankfurt am Main von der Degussa AG, einer Forschungsstelle auf Norderney oder aus Graz vom dortigen Physiologischen Institut.¹³ Aus der Nachfrage nach den mit dem Generator produzierten Radioisotopen entwickelte sich eine Reihe neuer Arbeits-, Austausch- und Geschäftsbeziehungen, die die Abteilung zu einem Zentrum der biologischen Indikatorforschung und Knotenpunkt in der Strahlenstoffökonomie machten. Besonders nachgefragt war Radiophosphor. Proben des Stoffs gingen an die Biologische Reichsanstalt, das KWI für Biologie, das KWI für Biochemie, das Luftfahrtmedizinische Institut in Hamburg und sogar an das KWI für Eisenforschung.¹⁴ Es musste nicht erst ein noch leistungskräftigeres Cyclotron sein wie in den USA (Jones/Martensen 2003: 96), schon der Phillips-Beschleuniger und die damit erzielte größere Produktion von Radioisotopen ermöglichte die kontinuierliche Zunahme biologischer Radioindikatorstudien (vgl. Tab. 1, Nr. 10f.).

Ausgehend von diesem Beispiel lässt sich auch zeigen, wie Isotope innerhalb kurzer Zeit in ein weitläufiges Netz von Abhängigkeiten und Kooperationen von Einrichtungen eingespannt waren, die alle an biologischen Forschungsfragen Beteiligte einschlossen. In Abbildung 4 sind die wesentlichen Institutionen dargestellt, die an der Herstellung von radioaktiven Isotopen, ihrer Aufarbeitung, ihrer Erforschung, ihrer Benutzung als Indikatoren und ihrer Verwertung beteiligt waren. Die Pfeile kennzeichnen die Verbindungen, die durch den Austausch von radioaktiven Isotopen zustande kamen. Die Zusammenstellung veranschaulicht den Umstand, dass sich die Indikatorstechnik zusehends in ein technologisches Projekt wandelte. Mehr noch als die Verwendung natürlicher Isotope erforderten künstliche radioaktive Isotope, ihre Gewinnung mit Hilfe der Beschleunigertechnik und ihre radiochemische Aufarbeitung das Zusammenspiel von verschiedenen Akteuren, Ressourcen und Techniken, wie radiochemischem Handwerk und Anreicherungsverfahren.

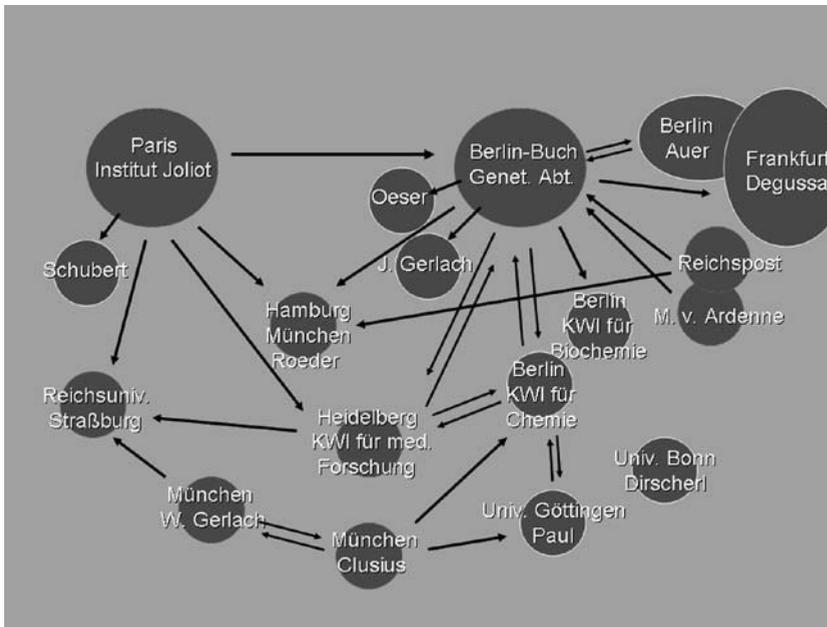


Abb. 4: Isotopenzirkulation im Zweiten Weltkrieg.

Von der Inkorporation radioaktiver Stoffe zur Radioindikatortechnik

Die durch die Großapparatur in Berlin-Buch einmal in Gang gebrachte Zirkulation von künstlichen Radioisotopen sorgte dafür, dass institutionelle und thematische Grenzen unkenntlich wurden. Klare Trennlinien zwischen KWI- und Industrieforschung waren jedenfalls bald kaum noch auszumachen.

chen (Gausemeier 2005: 183). Die genaue Analyse des Falls zeigt darüber hinaus, wie eng die Risikoepisteme mit der Einführung der Radioindikatortechnik in die Biowissenschaften verbunden waren. Bezeichnend ist zunächst, dass mit dem Neutronengenerator jene messenden Wissenschaftler, die die risikopolitische Regulierung der Strahlen- und Stoffzirkulation vorantrieben, ins Zentrum der forschungspolitischen Steigerung der strahlentechnischen Kapazitäten und damit der Atomforschung rückten. Zimmer, der die Radium- und Röntgendosimetrie an der Berliner Cäcilienklinik betreute, wechselte als Spezialist für Neutronendosimetrie an das Neutronenlaboratorium in Berlin-Buch. Dies prädestinierte ihn dazu, von Hahn als Experte für Dosimetrie und Strahlenschutz in die Planungen des Uranvereins und damit in die militarisierte Förderstruktur des deutschen Atomprojekts einbezogen zu werden (Sime 2007: 285). Neben Zimmer führte eine Reihe weiterer Biophysiker, Strahlenbiologen und Genetiker Forschungen im Auftrag des Heereswaffenamts beziehungsweise des Bevollmächtigten für Kernphysik im Reichsforschungsrat (RFR) durch.¹⁵ Anlass dazu gaben die Probleme des Strahlenschutzes, die sich durch die leistungsfähigen Neutronenquellen erheblich verschärften. Im Vordergrund der durch das Heereswaffenamt angestregten Maßnahmen stand die Absicherung der Arbeiter, Angestellten, Techniker, Radiochemiker und Atomphysiker, die im atomphysikalischen Netzwerk arbeiteten.¹⁶ Gleiche Beweggründe führten auch im US-amerikanischen Manhattan Project dazu, dass Radiologen in eine neue Beratungsfunktion aufrückten (Lenoir/Hays 2000: 33). In Deutschland waren es hingegen eher jene Genetiker und Biophysiker, die sich seit den 1930er Jahren als Agenten des Strahlenschutzes hervorgetan hatten und die nun zu den biowissenschaftlichen Experten innerhalb des Uranprojektes avancierten.

Auch die Auergesellschaft profitierte von den speziellen Kompetenzen der Biowissenschaftler. Fragen des Strahlenschutzes gingen dabei fließend in die Anwendung der Indikatortechnik über. Zum wesentlichen Moment der akademisch-industriellen Zusammenarbeit mit der Genetischen Abteilung in Berlin-Buch entwickelte sich die Inkorporation von Strahlern, die nicht zuletzt durch die Arbeit der Strahlenforscher seit einigen Jahren als haftungsrechtliches und risikopolitisches Problem markiert war. Dazu beigetragen hatte der Frankfurter Biophysiker Boris Rajewsky, der in seiner Funktion als messender Wissenschaftler gewerblichen Radiumvergiftungen nachging und in Zusammenarbeit mit der Deutschen Arbeitsfront Strahlenmessungen in den radioaktiven Gruben des Erzgebirges durchführte (Friedrich 1997). Die Vergiftungsfälle von Radiumarbeitern und die anschließenden Haftungsstreitigkeiten hatten auch die Auergesellschaft aufgeschreckt. Insbesondere Rajewskys 1938 bekannt gewordene Ergebnisse, nach denen die bisher angenommene Toleranzgrenze für die Inkorporation von radioaktiven Stoffen weit zu hoch angesetzt worden war und schon kleine Mengen langlebiger Substanzen äußerst gesundheitsschädlich waren, sorgten für eine deutliche

Zuspitzung der Bedrohungslage (ebd.: 85). In den Zeitungen wurde schon getitelt: „Ein Millionstel Gramm Radium kann den Tod bringen.“¹⁷ Auf die medizinischen Präparate der Radiumindustrie fiel zunächst kein Verdacht, da diesen in der Regel nicht das – mit einer Halbwertszeit von 1.600 Jahren – langlebige Radium, sondern kurzlebige radioaktive Stoffe hinzugefügt waren. Die Auergesellschaft benutzte etwa für die Herstellung von Röntgenkontrastmitteln oder Präparaten, die speziell für die therapeutische „innere Strahlenapplikation“ gedacht waren, kurzlebige Zerfallsprodukte des Thoriums: Thorium X, Thorium B und Uran X (Wolf/Born 1941c).

Dass die zur medizinischen Therapie gedachten Präparate ebenso gefährlich sein konnten, legte indes ein Todesfall nahe, der bei klinischen Tests mit einem „neuen Thor-X-haltigen organischen Präparat“ im Oktober 1937 aufgetreten war, wie der Auer-Forschungsleiter Max Wolf bekannte.¹⁸ In die Schadensanalyse bezog er nicht nur Rajewsky, sondern auch den in Messungen geübten Hahn-Schüler Hans-Joachim Born ein. Born, zu diesem Zeitpunkt noch Mitarbeiter in einem chemischen Laboratorium in Berlin-Kreuzberg, führte Anfang 1938 im Auftrag der Auergesellschaft Kontrollmessungen zur Reinheit der möglicherweise mit langlebigen Substanzen verunreinigten Auerpräparate durch.¹⁹ Born bewährte sich und wurde noch im selben Jahr Mitarbeiter der Gesellschaft. Der Fall des tödlich verlaufenen und offenbar vertuschten Menschenversuchs belegt auf zynische Weise, wie durch radioaktive Stoffe – oder vielmehr durch das untrennbar zu ihren Konstitutionsbedingungen gehörige Moment ihrer Prekarität – neue Verknüpfungen hergestellt wurden. Die Leitung der in Berlin-Buch errichteten Neutronenanlage übernahm fortan Born (Schmaltz 2005: 262).

Neben der kriegsbedingten Bewirtschaftung der Radiumvorräte lösten also auch derartige Schwierigkeiten mit den natürlichen Strahlern ein gesteigertes industrielles Interesse an künstlich radioaktiven Isotopen aus. Es wurde vermutet, sie würden sich möglicherweise als Ersatzstoffe in der Strahlentherapie eignen.²⁰ Sobald die ersten künstlichen radioaktiven Präparate zur Verfügung standen, begann Born zusammen mit Mitarbeitern der Genetischen Abteilung, Modellversuche über die Stoffwechselwege bestimmter Substanzen bei Mäusen und Ratten durchzuführen (vgl. Abb. 5, Gausemeier 2005: 181). Das bisherige Hauptziel der Abteilung – die mutagene Wirkung von Strahlen zu erforschen – verschob sich um ein entscheidendes Moment. Für die Genetiker war sicher die Frage interessant, ob sich bestimmte Isotope – oder mit ihnen markierte Giftsubstanzen – in den Keimdrüsen ansammelten und dadurch zu einer eugenischen Gefahr werden konnten.²¹ Im Grunde handelte es sich aber nur um ein Teilproblem der langfristigen Aufgabe, die Zirkulation strahlender Elemente im Organismus systematisch zu erforschen. Die Versuche mit injiziertem oder inhaliertem radioaktiven Phosphor, Chlor oder Arsen ähnelten damit denen von Hevesy: Auch er studierte akribisch die Verteilung, Ablagerung, Verweildauer und Ausschei-



Abb. 5: Injektion von radioaktiven Stoffen in eine Maus durch Mitarbeiter der Genetischen Abteilung des KWI für Hirnforschung in Berlin-Buch (Timoféeff-Ressovsky 1941: 439).

dung der unterschiedlichen radioaktiven Stoffe, indem er die Radioaktivität in verschiedenen Gewebeproben registrierte (Hevesy 1935, Levi 1985: 87).²² Der Unterschied lag in der Rolle der Radiumindustrie, welche die Arbeiten im Wesentlichen initiierte.

Parallel zu den Arbeiten mit künstlichen Radioisotopen liefen auch Untersuchungen mit natürlich radioaktiven Stoffen, die Born zusammen mit Mitarbeitern der Auergesellschaft und verschiedentlich unterstützt durch die Biologen der Genetischen Abteilung und Radiochemiker vom KWI für Chemie unternahm (Gausemeier 2005: 182f.). Das besondere Augenmerk galt dem Thorium, dessen Verwertung zum Kerngeschäft der Auergesellschaft gehörte. Auf seiner Verarbeitung basierte die Produktion von Gasglühkörpern (Klauer 1962: 4). Darüber hinaus, so lautete die Preisaufgabe der Auerforschungsstiftung im Jahr 1940, sollten aber weitere Anwendungsmöglichkeiten für Thorium erschlossen werden (Hoernes/Riehl 1940).

Vor dem Hintergrund der jüngsten Erfahrungen und Publikationen des KWI für Biophysik unter Rajewsky sah die Auergesellschaft die Notwendigkeit, einerseits die Wege der Präparatsubstanzen sowie die ihrer ebenfalls strahlenden Zerfallsprodukte im Organismus genauer zu verfolgen und andererseits im Interesse der Produktreinheit die im eigenen Werk angewandten Trennungverfahren zu verbessern (Wolf/Born 1941a, 1941b: 349). Aktuell

war die Forschungsabteilung der Auergesellschaft bemüht zu verhindern, dass die unter Radiologen entbrannte Diskussion über die gesundheitlichen Risiken des von der Chemischen Fabrik von Heyden in Dresden-Radebeul produzierten und ebenfalls thoriumhaltigen Röntgenkontrastmittels Thorotrast nicht negativ auf ihre eigenen Präparate abfärbte (Abbatt 1979: 7). Nach einigen Versuchen kam die Forschergruppe zum Schluss:

Die Frage, ob eine Schädigung des Organismus durch die dauernde Ablagerung von Thorium nach der Injektion von Thorotrast auftreten kann, soll nicht entschieden werden. Für die von uns verfolgten therapeutischen Ziele mit dem gewichtslosen Thoriumisotop Uran X ist jedenfalls die verzögerte Ausscheidung sehr günstig. (Wolf/Radu/Catsch/Born 1944: 455f.)

Damit stand für die Forscher der Auergesellschaft fest, dass sich das neu entwickelte Präparat grundsätzlich eignete, bestimmte Gewebe im Innern des Körpers gezielt zu bestrahlen, ohne irgendeinen „Kumulationsschaden“ befürchten zu müssen (ebd.).

Um die radioaktiven Substanzen auch am Menschen zu testen, führte das Forschungsteam in Berlin-Buch Selbstversuche durch. Der angehende Neurologe Joachim Gerlach übernahm die Injektionen der radioaktiven Lösungen, die „sehr geringe, unschädliche Thorium X-Mengen“ mit einer Halbwertszeit von 3,6 Tagen enthielten (Wolf/Born 1941a: 346).²³ Die radioaktiven Stoffe ebneten den Wissenschaftlern in Berlin-Buch dann auch den Weg vom Labor in die Klinik.²⁴ Vergleichende Versuche mit Patienten erforderten die Kooperation mit Medizinern, die an einer Klinik arbeiteten. Eine solche Verbindung bestand bereits zur Berliner Universitätsklinik für Geschwulstkranken unter dem Radiologen Hans Auler, in der insbesondere „als inkurabel zu bezeichnende“ Krebskranke behandelt wurden (Oeser 1942: 62). Auler hatte erstmals in den frühen 1930er Jahren für die Auergesellschaft – vor dem Hintergrund haftungsrechtlicher Fragen – Strahlungsmessungen an einer verstorbenen Radiumarbeiterin unternommen (Friedrich 1997: 79). Nun assistierte er auch fachmännisch bei den Tierversuchen des Berlin-Bucher Forschungsteams (Wolf/Born 1941c). Derweil gingen der Auermitarbeiter Born und Mitarbeiter der Genetischen Abteilung daran, die Verteilung der Radioaktivität in Proben menschlichen Gewebes zu messen, die die Mitarbeiter der Charité Leichnamen entnommen und nach Buch geschickt hatten (Wolf/Born 1941a: 343).²⁵ Der Strahlenmediziner Heinz Oeser, Oberarzt im Institut für Röntgenologie und Radiologie, der umgewandelten Strahlungsabteilung der Geschwulstklinik, nutzte die Gelegenheit, die Kooperation auch auf neue Fragestellungen auszudehnen. Oeser war an der Rolle des Phosphors bei der Pathogenese von bestimmten Krankheiten interessiert und erhoffte sich insbesondere Aufschluss über die Verteilung des radioaktiven Phosphors im Körper und seine Rolle bei Schilddrüsenerkrankungen und beim Blutschwamm.²⁶ Born lieferte die Proben und unternahm anschließend die voraussetzungsvollen Strahlungsmessungen. Dieses letzte

Beispiel zeigt, wie engmaschig die Verbindung von Risikoepisteme und Radioindikator-technik war.

Das Zyklotron in Paris und die Geographie materiellen Austauschs

In den biologischen Indikatorstudien wurde mit einem generellen Problem der Radioaktivitätsforschung gekämpft. Immer wieder entstand Bedarf nach höher konzentrierten Proben. Wie andere Radiochemiker beteiligte sich auch Born als gelernter Radiochemiker an Versuchen des KWI für Chemie, die radiochemischen Anreicherungsverfahren zu verbessern.²⁷ Ein anderer Ausweg bestand darin, die Bestrahlungsenergie weiter zu steigern und leistungsfähigere Beschleuniger zu bauen. Das Prinzip für eine Generation neuer Beschleuniger war spätestens bekannt, nachdem Ende 1937 ein Zyklotron mit 8 Mega-Elektronenvolt Leistung in Berkeley in Betrieb gegangen war, dem schnell noch leistungskräftigere folgten (Heilbron/Seidel 1989). Die Realisierung eines solchen Apparates war allerdings anspruchsvoll, da die zu beschleunigenden Teilchen mit Hilfe eines Magneten auf einer Kreisbahn bewegt werden mussten. Auch deshalb kamen die in Nazideutschland verfolgten Projekte nur schleppend voran (Osietzki 1993, Weiss 1996, Karlsch 2007).

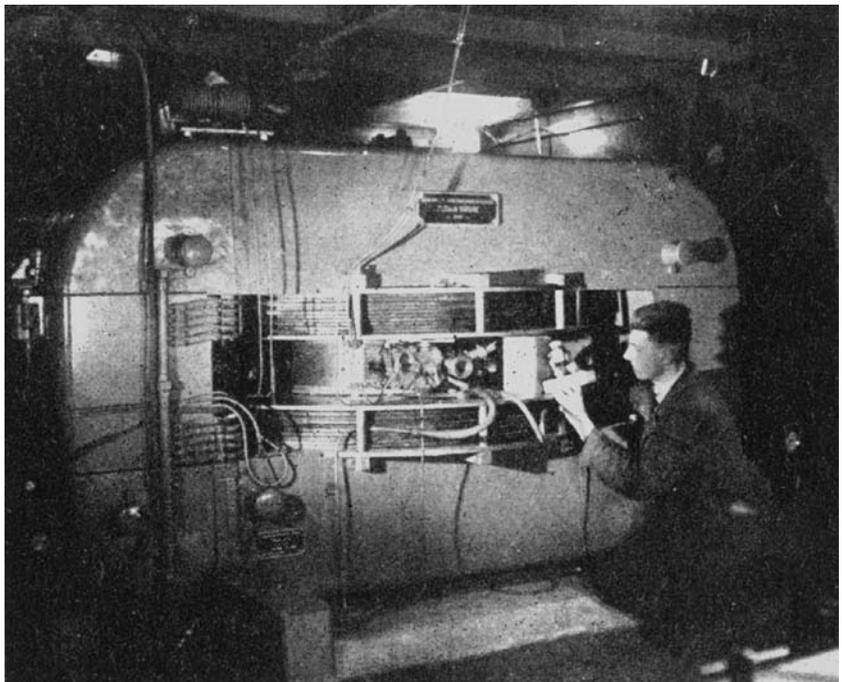


Abb. 6: Frédéric Joliot kniend vor dem im Keller des Pariser Institut de Chimie Nucléaire installierten Zyklotron (Schubert 1947a: 393).

Weiter gediehen war der Bau eines Zyklotrons am Institut de Chimie Nucléaire in Paris unter der Regie von Frédéric Joliot (vgl. Abb. 6, Weart 1979). Es sollte mit 12 Mega-Elektronenvolt einen dreifach so energiereichen Teilchenstrahl wie der Neutronengenerator in Berlin-Buch erzeugen, was einer unglaublichen Menge von mehreren Kilogramm Radium entsprach (Gentner 1980, Born/Timoféeff-Ressovsky/Zimmer 1941: 83, Bothe 1943: 331f.). Als die deutschen Truppen im Mai 1940 in Paris einmarschierten, besetzten sie auf Befehl des Heereswaffenamtes auch Joliot's Institut. Als Forschungsleiter wurde der Atomphysiker Wolfgang Gentner eingesetzt (Hoffmann/Schmidt-Rohr 2006: 7–9). Ziel der deutschen Vereinnahmung des Instituts war, das Pariser Zyklotron fertig zu stellen und für die Zwecke der deutschen Atomforschung zu nutzen. Tatsächlich ging das Zyklotron im Winter 1941 in Betrieb und die deutschen Physiker konnten mit eigenen Experimenten beginnen. Die Apparatur arbeitete dreieinhalb Jahre bis zur Befreiung von Paris im August 1944 relativ störungsfrei, unterbrochen nur durch kleinere Sabotageakte (Gentner 1980, Pinault 2000: 210, Hoffmann/Schmidt-Rohr 2006: 19–22).

In der Folge ergab sich zwischen Paris und dem Forschungsteam in Berlin-Buch eine Zusammenarbeit, die auf dem Austausch von Ressourcen und den schon bestehenden organisatorischen Verknüpfungen aufbaute (vgl. Abb. 4). Deutlich wird insbesondere, dass die Stoffe die Beziehungen verschiedener Institutionen über weite Wege hinweg beeinflussen konnten. Im Verlauf des Kriegs wurden die Arbeitsbedingungen in Berlin-Buch nicht nur durch alliierte Luftangriffe gestört. Zunehmend stieß auch der Berliner Neutronengenerator an seine Grenzen. Seine Leistungsfähigkeit überstieg zwar die Energie einfacher Radiumproben um ein Vielfaches, es war damit aber nicht möglich, die Konzentration der Radioaktivität in einer bestrahlten Probe beliebig zu erhöhen. Unter dieser Einschränkung litten die laufenden Versuche von Born und Oeser an der Berliner Strahlenklinik: Sie konnten nur mit hochkonzentrierten Radiophosphorproben fortgesetzt werden, wie Born nach Paris schrieb.²⁸

Im besetzten Paris hingegen gingen die an Joliot's Institut stationierten deutschen Wissenschaftler ungestört ihrer Arbeit nach und besaßen alle Möglichkeiten, hochkonzentrierte radioaktive Präparate herzustellen. Das schloss die biologischen Strahlenforscher ein, denen die Einbindung der Biowissenschaften in die Strukturen des deutschen Atomprogramms den Weg nach Paris ebnete. Während das Heereswaffenamt in den ersten Jahren des Krieges die Finanzierung der Atomforschung in den Händen hielt, fiel diese im Dezember 1943 in die Zuständigkeit des Reichsforschungsrates und dort in den Aufgabenbereich des neuen Fachspartenleiters für Physik und Bevollmächtigten für Kernphysik Walther Gerlach. Gerlach übernahm damit auch die Aufsicht über die Entwicklung an der Pariser Forschungsstelle. Für die Biowissenschaftler brachte sein Amtsantritt Vorteile, da er die Anwendung

von radioaktiven Isotopen in der Forschung gezielt förderte. So wurden neben atomphysikalischen Experimenten auch medizinische Indikatorversuche am Pariser Zyclotron „im Auftrage“ des Bevollmächtigten und mit Mitteln des Reichsforschungsrats durchgeführt.²⁹ Beauftragt war damit der Mediziner Gerhard Schubert. Zwischen 1942 und 1944 führte Schubert Indikatorversuche an Hunden, Ratten, Meerschweinchen und Menschen durch (Schubert 1947a: 402f.). Er orientierte sich dabei an der experimentellen Methodik des Berliner Neutronenlaboratoriums, die er zuvor als Gastwissenschaftler an der Genetischen Abteilung kennengelernt hatte.³⁰ Zuletzt hatte er 1942 über die dort laufenden Experimente ausführlich in der bedeutendsten deutschen radiologischen Zeitschrift berichtet (Tab. 1, Nr. 19).

Die „Überformung der zivilen durch militärische Strukturen“, von der Schmuhl im Zusammenhang des KWI für Hirnforschung schon gesprochen hat (2000: 40), erleichterte Kooperationsbeziehungen zwischen Paris und Berlin und insbesondere den Austausch von radioaktiven Stoffen. Die Phosphornöte, die Born und Oeser bei ihren gemeinsamen Versuchen in Berlin bremsen, beschäftigten bald nicht nur Schubert, der regelmäßig mit Born in Berlin-Buch korrespondierte, sondern das gesamte Pariser Forschungsteam.³¹ Die direkte Verbindung zu Gerlach als dem formalen Auftraggeber der Forschung in Paris und Berlin machte es schließlich möglich, dass Born im April 1944 das Pariser Laboratorium besuchen konnte.³² Zwei Monate später erhielten die Berliner per Kurier hochkonzentrierten Phosphor aus Paris.³³ Mit den Pariser Proben konnten Born und Oeser die Indikatorexperimente fortsetzen, die sie ein halbes Jahr zuvor hatten abbrechen müssen.³⁴

Die Episode macht deutlich, dass nicht nur die militarisierten Forschungsstrukturen zu wichtigen Bedingungen der Indikatorforschung in Berlin geworden waren, sondern dass diese auch durch die materiellen Eigenschaften des Radiophosphors definiert wurden. Augenfällig wird dies an einem weiteren Detail. Die Halbwertszeit von Phosphor-32 betrug vierzehn Tage und damit deutlich länger als die vieler anderer radioaktiver Isotope, die aus diesem Grund schon auf der Reise nach Berlin zerfallen wären. Die spezifischen Eigenschaften des radioaktiven Stoffs waren also eine entscheidende Bedingung in der Kooperation zwischen den geographisch weit auseinander liegenden Orten. Nicht nur die Verbindung der Wissenschaftler Born und Schubert, die erwähnte Schwäche Gerlachs für die Indikatortechnik und die deutsche Armee bestimmten, welche Verbindungen und Kooperationen möglich waren, sondern auch die materielle Ressource selbst.

Im Netzwerk prekärer Beschleunigung

Das Beispiel der Radioisotopenforschung an der Genetischen Abteilung des KWI für Hirnforschung macht deutlich, wie die stoffliche Materialität die

Forschung auf verschiedenen Ebenen beeinflusste: als Waren, Forschungsgegenstand und -mittel und schließlich als Gefahrstoff. Der Austausch von Materialien, die soziotechnischen Voraussetzungen dieses Austausches und die Teilhabe an Techniken bestimmten mithin die experimentellen Probleme, die in einem Labor bearbeitet werden konnten. Das Interesse der Wissenschaftler an der Steigerung der Zirkulationsfähigkeit strahlender Stoffe und Techniken teilte die Industrie. Gerade die Einbindung der Radiumindustrie zeigt, dass die Geschichte der Radioindikatoren und der künstlichen Radioaktivität in mehrfacher Hinsicht mit der materiellen Kultur und Ökonomie natürlich radioaktiver Stoffe verknüpft war. Die Gründe hierfür waren nicht nur ökonomischer und wissenschaftlicher Art, sondern lagen auch in der prekären Konstellation aus Steigerung und gleichzeitiger Eindämmung der leistungsstarken radioaktiven Stoffe. Das Ziel, die vagabundierende Radioaktivität, das heißt die gefährliche Streuung und die zunehmenden Entweichungsmöglichkeiten radioaktiver Stoffe zu kontrollieren, wurde zum konkreten Beweggrund für die wechselseitige Beziehung zwischen Industrie und akademischer Forschung. Wie im Fall der Emaniermethode erwies sich damit die materielle Kultur und Ökonomie natürlich radioaktiver Stoffe als ein wichtiges Moment in der Geschichte der künstlichen Radioindikatoren und ihrer Einführung als biologisches beziehungsweise biomedizinisches Forschungsinstrument. Die Gefahren der inneren Zirkulation der Radioaktivität mobilisierten die bereits alarmierten Radio- und Biophysiker, machten die innere Zirkulation radioaktiver Stoffe zu einem besonderen risikoepistemischen Anliegen und – das zeigt das Beispiel der Genetischen Abteilung des KWI für Hirnforschung – förderten damit die Anwendung der Radioindikatorenmethode in der biomedizinischen Forschung. Eine direkte Brückenfunktion erfüllte dabei die biophysikalische Messkunst, die die Radio- und Biophysiker für die Zwecke der Radiologie und des Strahlenschutzes entwickelt hatten.

In der beschriebenen Übersetzungsfunktion der risikoepistemischen Forschung spiegelte sich nicht zuletzt die Organisation der Radiumökonomie. Die Spuren der radioaktiven Stoffe zeichnen ein Netz von Verbindungen quer zu Wissenschaft, industrieller Produktion, Rüstungspolitik und Kriegsführung. Die Indikatorrentechnik war ein technologisches Projekt, das in erheblichem Maß auf das Zusammenspiel verschiedener Akteure und den wechselseitigen Austausch von Ressourcen und radioaktiven Stoffen angewiesen war (vgl. Abb. 4). Die Eigenschaften der radioaktiven Stoffe, Strahlenstärke, Mengen, Reinheit und Halbwertszeit bestimmten dabei die Verbindungen in dem sich ausbildenden Beziehungsgeflecht. Die Etablierungsphase der Indikatorrentechnik war dadurch gekennzeichnet, dass es in diesem Netzwerk keine zentrale Position gab, von der aus sich die materielle Kultur der Isotopenökonomie entfaltete. In der Expansionsphase, die von der massenhaften Produktion von Radioisotopen in den ersten funktionsfähigen Atommeilern angetrieben wurde, änderte sich das soziotechnische System der künst-

lichen Radioaktivität einschneidend. Wie verschiedentlich gezeigt wurde, etablierten die neuen Produktionsbedingungen nun ein zentral organisiertes System der Isotopenzirkulation (Creager 2002, 2006).

Danksagung:

Den anonymen Gutachterinnen und Gutachtern danke ich für wertvolle Hinweise sowie konstruktive Kritik, der Redaktion für ihre ausgesprochen umsichtige Textarbeit.

Anmerkungen

- 1 Zur frühen Radiumwirtschaft in Frankreich siehe Roqué 2001 und Boudia 2001, zu Strukturen des Radiummarktes vor dem Ersten Weltkrieg siehe Ceranski 2008.
- 2 Risikopolitik wird hier nicht im Sinne einer Risikosoziologie verstanden, wie sie etwa Ulrich Beck oder Anthony Giddens geprägt haben (vgl. z.B. Münch 1996), sondern als eine Analytik der Regierung, die auf einem nominalistischen Wissensbegriff aufbaut (Lemke 1997: 341, 2007: 51–53, Schwerin 2009: 192–195). Für einen Überblick siehe Lengwiler 1996: 12–17.
- 3 Die Ambivalenz prekärer Stoffe gründet letztlich in dem mächtigen modernen Interesse an Instrumenten, deren Wirkmächtigkeit Naturgesetze garantieren, wie es etwa Canguilhem (1991) für die Statistik beschrieben hat. Doch gerade die den Strahlen zugeschriebene Naturhaftigkeit und ihre zugleich begründete Autonomie sicherte nicht nur ihre beeindruckende Leistungsfähigkeit, sondern machte sie unvermeidlich zu gefährlichen Agenzien.
- 4 Dazu siehe u.a. Rheinberger 2001, Creager 2002, 2006, Kraft 2006, Gaudillière 2006, Herran 2006.
- 5 Reichsarbeitsminister an Reichsversicherungsamt, 21. November 1938, Bundesarchiv Berlin (im Folgenden abgekürzt als BAB), R 89, 13914.
- 6 Rajewsky an DFG, 25. Februar 1939, Bundesarchiv Koblenz (im Folgenden abgekürzt als BAK), R 73, 13774.
- 7 Siehe dazu die Studie *Biologie und Risikopolitik der Strahlen* des Verfassers, die im Rahmen der Reihe „Geschichte der Deutschen Forschungsgemeinschaft, 1920–1970“ in Vorbereitung ist.
- 8 Beide Geschlechtsformen werden hier benutzt, um in einem konkreten Zusammenhang die belegte Beteiligung von Frauen und Männern zu benennen.
- 9 Für eine Übersicht über Arbeiten und Arbeitsgruppen siehe Anm. 7.
- 10 Auch Hevesy benutzte seit 1934 schweres Wasser in seinen physiologischen Experimenten (Kohler 1977: 271). In Deutschland war es nur der physikalische Chemiker Karl-Friedrich Bonhoeffer, der Versuchsreihen über den Einbau von Deuterium in Pflanzen durchführte.
- 11 Born an Wolf, 7. Dezember 1943, Zentrum für die Aufbewahrung historisch-dokumentarischer Sammlungen (ehemals Sonderarchiv Moskau) (im Folgenden abgekürzt als SAM), Fond 1520, Verz. 1, Nr. 7, Bl. 5f.
- 12 Vernehmung Zimmer, Berlin, 15. Oktober 1945, Archiv der Beauftragten für die Unterlagen des Staatssicherheitsdienstes der ehemaligen DDR (im Folgenden abgekürzt als BStU), MfS-HA IX/11, RHE 25/87 SU, Nr. 2a, Bl. 37.
- 13 SAM, Fond 1520, Verz. 1, Nr. 7, Bl. 102f.; ebd., Nr. 8, Bl. 17.
- 14 SAM, Fond 1520, Verz. 1, Nr. 7, Bl. 102E, 109, 111; Vernehmung Zimmer, Berlin, 24. Oktober 1945, BStU, MfS-HA IX/11, RHE 25/87 SU, Nr. 2a, Bl. 143–145.
- 15 Die Hauptthemen waren die Neutronendosimetrie und der Neutronenschutz. Zur Sprache

- kamen aber auch die Arbeitsbedingungen in der Uranverarbeitung und im Uranbergbau (Gausemeier 2005: 184f., Karlsch 2007) sowie die kriegsbedingte Steigerung der Zirkulation radioaktiver Stoffe durch die massenhafte Verwendung von radioaktiven Leuchtstoffen (Rajewsky an DFG, 13. März 1940, BAK, R 73, 13774, vgl. Anm. 7).
- 16 Zum gesamten Spektrum der militärischen Auftragsforschung an der Genetischen Abteilung und am KWI für Biophysik sowie zum Stand der Forschung siehe Gausemeier 2005, Schmaltz 2005, Karlsch 2007.
 - 17 Zeitungsausschnitt, Archiv zur Geschichte der Max-Planck-Gesellschaft (im Folgenden abgekürzt als MPG-Archiv), X. Abt., Rep. 21, 90.
 - 18 Wolf an Born, 21. Februar 1938, SAM, Fond 1520, Verz. 1, Nr. 7, Bl. 207.
 - 19 Ebd.
 - 20 Vernehmung Zimmer, Berlin, 15. Oktober 1945, BStU, MfS-HA IX/11, RHE 25/87 SU, Nr. 2a, Bl. 39, sowie ausführlicher zu den Folgen der Bewirtschaft des Radiums vgl. Anm. 7.
 - 21 Wolf an Born, 21. Februar 1938, SAM, Fond 1520, Verz. 1, Nr. 7, Bl. 207, Aussage Zimmer, 6. November 1945, MPG-Archiv, KWI für Physik, (Atomministerium der GUS) Nr. 19208.
 - 22 Bericht Born: Biologische Forschungen mit Hilfe von radioaktiven Stoffen (außer Pflanzen), o.D., BStU, MfS-HA IX/11, RHE 25/87 SU, Nr. 2a, Bl. 116.
 - 23 Die hier erwähnten Versuche sind anders als in der Literatur (Gausemeier 2005: 183) im Kontext der von Auer angeregten Verteilungsstudien zu sehen. Dass sie auch einen Vergleich mit Versuchen ausländischer Wissenschaftler nahelegten, die die Radium-Präparate und die Indikatormethode in der Diagnostik von Kreislauferkrankungen austesteten (Gerlach/Wolf/Born 1942: 84f.), war ein Nebenprodukt der systematischen Verteilungsstudien.
 - 24 Zu Versuchen mit radioaktiven Stoffen am Menschen in den USA siehe Jones/Martensen 2003, Whittemore/Boleyn-Fitzgerald 2003.
 - 25 Bei den Leichnamen handelte es sich neben verstorbenen Patienten der Strahlenklinik möglicherweise auch um Leichname von Hingerichteten, denen Thorium X injiziert worden war (siehe Anm. 22, Bl. 115 sowie Gausemeier 2005: 183). Nachgewiesen sind darüber hinaus Versuche zur Bestimmung des Stoffaustausches zwischen Hirnflüssigkeit und Blut an zwei Patienten eines Berlin-Bucher „Hospitals“ (BStU, ebd., Bl. 114).
 - 26 Wolf an Born, 13. März 1942, SAM, Fond 1520, Verz. 1, Nr. 7, Bl. 98; Born an Oeser, 11. Juni 1943, ebd., Nr. 9, Bl. 66.
 - 27 Vorgang Patentanmeldung, ebd., Nr. 7, Bl. 67-69; Korrespondenz mit Starke, ebd., Nr. 9, Bl. 271b, Born an Wolf, 7. Dezember 1943, ebd., Nr. 7, Bl. 5f.
 - 28 Born in: Starke an Born, 25. März 1944, ebd., Nr. 9, Bl. 258f.
 - 29 Schubert an DFG, 23. Februar 1945, BAK, R 73, 14544.
 - 30 Schubert: Lebenslauf, 25. Mai 1943, BAB, R 21, 10083. Ich danke Martina Schlünder für die Überlassung dieser Archivalien.
 - 31 Starke an Born, 25. März 1944, SAM, Fond 1520, Verz. 1, Nr. 9, Bl. 258f.
 - 32 Born an Schubert, 15. Mai 1944, ebd., Bl. 185; Schubert an Born, 5. März 1944, ebd., Bl. 190, Schubert an Born, 23. Februar 1944, ebd., Bl. 192f.
 - 33 Born an Riezler, 13. Juni 1944, ebd., Bl. 99; Born an Schubert, 15. Mai 1944, ebd., Bl. 185.
 - 34 Born an Oeser, 11. Juni 1943, ebd., Bl. 66.

Literatur

- Abbatt, John D., 1979. History of the Use and Toxicity of Thorotrast. *Environmental Research*, 18, 6–12.
- Ardenne, Manfred v., 1944. *Die physikalischen Grundlagen der Anwendung radioaktiver oder stabiler Isotope als Indikatoren*. Berlin: Springer.
- Baader, Gerhard, 2001. Heilen und Vernichten. Die Mentalität der NS-Ärzte. In: Angelika Ebbinghaus und Klaus Dörner, Hg., *Vernichten und Heilen. Der Nürnberger Ärzteprozess und seine Folgen*. Berlin: Aufbau-Verlag, 275-294.

- Born, Hans-Joachim/Timoféeff-Ressovsky, Nikolaj V./Zimmer, Karl G., 1941. Anwendungen der Neutronen und der künstlich radioaktiven Stoffe in Chemie und Biologie. *Die Umschau*, 45, 83–87.
- Bothe, Walther, 1943. Das Zyklotron. *Stahl und Eisen*, 63, 329–332.
- Boudia, Soraya, 2001. *Marie Curie et son laboratoire. Sciences et industrie de la radioactivité en France*. Paris: Éditions des archives contemporaines.
- Broda, Engelbert, 1960. *Radioactive Isotopes in Biochemistry*. Amsterdam u.a.: Elsevier Publishing Company.
- Canguilhem, Georges, 1991. *The Normal and the Pathological*. New York: Zone Books.
- Ceranski, Beate, 2008. Tauschwirtschaft, Reputationsökonomie, Bürokratie. Strukturen des Radiummarktes vor dem Ersten Weltkrieg. *NTM. Zeitschrift für Geschichte der Wissenschaften, Technik, Medizin*, 16, 413–443.
- Creager, Angela N. H., 2002. The Industrialisation of Radioisotopes by the U.S. Atomic Energy Commission. In: Karl Grandin, Nina Wormbs und Sven Widmalm, Hg., *The Science-Industry Nexus. History, Policy, Implications*. Sagamore Beach: Science History Publications, 141–167.
- Creager, Angela N. H., 2006. Nuclear Energy in the Service of Biomedicine. The U.S. Atomic Energy Commission's Radioisotope Program, 1946–1950. *Journal of the History of Biology*, 39, 649–684.
- Deichmann, Ute, 2001. *Flüchten, Mitmachen, Vergessen. Chemiker und Biochemiker in der NS-Zeit*. Weinheim: Wiley-VCH.
- Elsner, Gine/Karbe, Karl-Heinz, 1999. *Von Jáchymov nach Haigerloch. Der Weg des Urans für die Bombe. Zugleich eine Geschichte des Joachimsthaler Lungenkrebses*. Hamburg: VSA-Verlag.
- Erbacher, Otto/Philipp, Kurt, 1932. Die Radioaktivität auf der Bunsentagung in Münster. *Die Naturwissenschaften*, 20, 586–589.
- Erbacher, Otto/Philipp, Kurt, 1936. Trennung der radioaktiven Atome von den isotopen stabilen Atomen. *Zeitschrift für physikalische Chemie A*, 176, 169–181.
- Erbacher, Otto/Käding, Hans, 1930. Über den Reaktionsmechanismus bei der Fällung hochemanierender Radiumpräparate. *Zeitschrift für physikalische Chemie A*, 149, 439–448.
- Ernst, Heinrich Wilhelm, 1942. Über die Unfallverhütungsvorschriften für nichtmedizinische Röntgenbetriebe. *Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen*, 65, 101–126.
- Ernst, Heinrich Wilhelm/Jäger, Robert/Zeiller, O., 1944. Ein optisches Strahlenschutz-Meßgerät (Dosiskop). *Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen*, 70, 386–127.
- Fischer, Peter, 1985. *Licht und Leben. Ein Bericht über Max Delbrück, den Wegbereiter der Molekularbiologie*. Konstanz: Universitätsverlag Konstanz GmbH.
- Friedrich, Ulrike, 1997. *Die Außenstelle des KWI für Biophysik (Frankfurt/Main) im Radonbad Oberschlema (Sachsen)*. Dissertation, FU Berlin.
- Friedrich, Walter/Noethling, Werner, 1936. Die Verhütung von Strahlenschädigungen bei Werkstoffprüfungen mit Mesothor und Radium. *Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure*, 80, 437–440.
- Gaudillière, Jean-Paul, 2006. Normal Pathways. Controlling Isotopes and Building Biomedical Research in Postwar France. *Journal of the History of Biology*, 39, 737–764.
- Gausemeier, Bernd, 2005. *Natürliche Ordnungen und politische Allianzen. Biologische und biochemische Forschung an Kaiser-Wilhelm-Instituten 1933–1945*. Göttingen: Wallstein (=Geschichte der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft im Nationalsozialismus 12).
- Gentner, Wolfgang, 1980. *Gespräche mit Frédéric Joliot-Curie im besetzten Paris 1940–1942*. Heidelberg: Max-Planck-Institut für Kernphysik.
- Gerlach, Joachim/Wolf, Paul Max/Born, Hans-Joachim, 1942. Zur Methodik der Kreislaufzeitbestimmung beim Menschen. *Naunyn-Schmiedebergs Archiv für experimentelle Pathologie und Pharmakologie*, 199, 83–88.
- Hayes, Peter, 2004. *Die Degussa im Dritten Reich. Von der Zusammenarbeit zur Mittäterschaft*. München: C. H. Beck.
- Heilbron, John L./Seidel, Robert W., 1989. *Lawrence and His Laboratory. A History of the Lawrence Berkeley Laboratory*. Berkeley: University of California Press.
- Helmstädter, Axel, 2005. Die Radiumschwachtherapie. Strahlende Arznei-, Lebens- und Kör-

- perpflegemittel in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts. *Medizinhistorisches Journal*, 40, 347–368.
- Herran, Néstor, 2006. Spreading Nucleonics. The Isotope School at the Atomic Energy Research Establishment, 1951–67. *The British Journal for the History of Science*, 39, 569–586.
- Hevesy, George de, 1935. Radioactive Indicators in the Study of Phosphorus Metabolism in Rats. *Nature*, 13, 754.
- Hevesy, George de, 1948. Historical Sketch of the Biological Application of Tracer Elements. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*, XIII, 129–150.
- Hoernes, Philipp/Riehl, Nikolaus, 1940. Über Anwendungsmöglichkeiten von Thorium. Zur diesjährigen Preisaufgabe der Auerforschungsstiftung. *Angewandte Chemie*, 53, 417f.
- Hoffmann, Dieter/Schmidt-Rohr, Ulrich, 2006. Wolfgang Gentner. Ein Physiker als Naturalist. In: Dieter Hoffmann und Ulrich Schmidt-Rohr, Hg., *Wolfgang Gentner. Festschrift zum 100. Geburtstag*. Heidelberg: Springer, 1–60.
- Holstein, Ernst, 1942. Wesen und Wirkung von Röntgenstrahlen und radioaktiven Substanzen und die Grundlagen zur Schadensverhütung. *Zentralblatt für Gewerbehygiene und Unfallverhütung*, 19, 25–33, 44–53.
- Hughes, Jeffrey, 1993. *The Radioactivists. Community, Controversy, and the Rise of Nuclear Physics*. Dissertation, University of Cambridge.
- Jones, David S./Martensen, Robert L., 2003. Human Radiation Experiments and the Formation of Medical Physics at the University of California, San Francisco and Berkeley, 1937–1962. In: Jordan Goodman, Anthony McElligott und Lara Marks, Hg., *Useful Bodies. Humans in the Service of Medical Science in the Twentieth Century*. Baltimore/London: The Johns Hopkins University Press, 81–108.
- Käding, Hans/Riehl, Nikolaus, 1934. Radioaktive Methoden im Dienste chemischer und technischer Probleme. *Angewandte Chemie*, 47, 263–270.
- Kant, Horst, 2005. Forschungen über Radioaktivität am Kaiser-Wilhelm-Institut für Chemie: Die Abteilung(en) Hahn/Meitner und ihre internationalen Kontakte. In: Horst Kant und Annette Vogt, Hg., *Aus Wissenschaftsgeschichte und -theorie. Hubert Laitko zum 70. Geburtstag*. Berlin: Verlag für Wissenschafts- und Regionalgeschichte Dr. Michael Engel, 289–320.
- Karlsch, Rainer, 2007. Boris Rajewsky und das Kaiser-Wilhelm-Institut für Biophysik in der Zeit des Nationalsozialismus. In: Helmut Maier, Hg., *Gemeinschaftsforschung, Bevollmächtigte und der Wissenstransfer*. Göttingen: Wallstein, 395–452.
- Klauer, Friedrich, Hg., 1962. *Geschichte der Auergesellschaft von der Gründung im Jahre 1892 bis zum Jahre 1958*. Berlin: Eigendruck Auergesellschaft.
- Klein, Ursula/Lefèvre, Wolfgang, 2007. *Materials in Eighteenth-Century Science. A Historical Ontology*. Cambridge, Mass./London: MIT Press.
- Knödler, Ulrich, 1991. Von der Reform zum Raubbau. Arbeitsmedizin, Leistungsmedizin, Kontrollmedizin. In: Norbert Frei, Hg., *Medizin und Gesundheitspolitik im Nationalsozialismus*. München: R. Oldenbourg Verlag, 113–136.
- Koelsch, Franz, 1942. Der Gesundheitsschutz gegen Röntgenstrahlen und radioaktive Strahlungen. *Jahreskurse für ärztliche Fortbildung*, 33, Heft IX, 11–22.
- Köhler, Robert E., 1977. Rudolf Schoenheimer, Isotopic Tracers, and Biochemistry in the 1930s. *Historical Studies in the Physical Sciences*, 8, 257–298.
- Kraft, Alison, 2006. Between Medicine and Industry. Medical Physics and the Rise of the Radioisotope 1945–65. *Contemporary British History*, 20, 1–35.
- Latour, Bruno, 2000. *Die Hoffnung der Pandora. Untersuchungen zur Wirklichkeit der Wissenschaft*. Frankfurt a. M.: Suhrkamp.
- Lavine, Matthew, 2002. *A Cultural History of Radiation and Radioactivity in the U.S., 1895–1945*. Dissertation, University of Wisconsin-Madison.
- Lemke, Thomas, 1997. *Eine Kritik der politischen Vernunft. Foucaults Analyse der modernen Gouvernementalität*. Berlin: Argument-Verlag.
- Lemke, Thomas, 2007. *Gouvernementalität und Biopolitik. Beiträge zu einer Kontextualisierung, Konkretisierung und Konturierung der Machtanalytik Michel Foucaults*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.

- Lengwiler, Martin, 2006. *Risikopolitik im Sozialstaat. Die schweizerische Unfallversicherung 1870–1970*. Köln: Böhlau.
- Lenoir, Timothy/Hays, Marguerite, 2000. The Manhattan Project for Biomedicine. In: Phillip R. Sloan, Hg., *Controlling Our Destinies. Historical, Philosophical, Ethical, and Theological Perspectives on the Human Genome Project*. Notre Dame, In.: University of Notre Dame Press, 29–62.
- Levi, Hilde, 1985. *George de Hevesy. Life and Work*. Bristol: Adam Hilger Ltd.
- Maier, Helmut, 2007. *Forschung als Waffe. Rüstungsforschung der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft und des Kaiser-Wilhelm-Instituts für Metallforschung 1900–1945/48*. Göttingen: Wallstein (=Geschichte der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft im Nationalsozialismus 16).
- Meyerhof, Otto, 1939. L'emploi du phosphore radioactif dans la glycolyse et la fermentation. *Bulletin de la Societe de Chimie Biologique*, 21, 1094–1101.
- Meyerhof, Otto/Ohlmeyer, Paul/Gentner, Wolfgang/Maier-Leibnitz, Heinz, 1938. Studium der Zwischenreaktionen der Glykolyse mit Hilfe von radioaktivem Phosphor. *Biochemische Zeitschrift*, 298, 396–411.
- Münch, Richard, 1996. *Risikopolitik*. Frankfurt: Suhrkamp.
- Niese, Siegfried, 2005. *Georg von Hevesy, 1885–1966. Wissenschaftler ohne Grenzen*. Dresden: Eigenverlag Forschungszentrum Rossendorf.
- Oeser, Heinz, 1942. Jahresbericht 1940 der Strahlentherapeutischen Klinik. *Strahlentherapie*, 71, 61–79.
- Osietzki, Maria, 1993. Die Technisierung der Strahlenforschung und Hochenergiephysik als Durchsetzungsstrategie. *Berichte zur Wissenschaftsgeschichte*, 16, 203–215.
- Pickhan, Artur/Zimmer, Karl G., 1937. Die Herabsetzung der Strahlendosen bei gynäkologischen Röntgenuntersuchungen. *Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen*, 55, 86–89.
- Pinault, Michel, 2000. *Frédéric Joliot-Curie*. Paris: Éditions Odile Jacob.
- Rentetzi, Maria, 2004. The Woman Radium Dial Painters as Experimentals Subjects (1920–1990). Or What Counts as Human Experimentation. *NTM. Internationale Zeitschrift für Geschichte und Ethik der Naturwissenschaften, Technik und Medizin*, 12, 233–248.
- Rentetzi, Maria, 2009. *Trafficking Materials and Gendered Experimental Practices. Radium Research in Early 20th Century Vienna*. New York: Columbia University Press.
- Rheinberger, Hans-Jörg, 2001. Putting Isotopes to Work. Liquid Scintillation Counters, 1950–1970. In: Bernward Joerges und Terry Shinn, Hg., *Instrumentation between Science, State and Industry*. Dordrecht/Boston/London: Kluwer, 143–174.
- Riehl, Nikolaus/Zimmer, Karl G., 1937. Untersuchungen über die Zeichenschärfe von Verstärkerfolien aus verschiedenen Materialien. *Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen*, 55, 386–390.
- Riehl, Nikolaus, 1981. Erinnerungen an den Beginn der Gammaradiografie. *Materialprüfung*, 23, 309–313.
- Riezler, Wolfgang, 1941. *Einführung in die Kernphysik*. Leipzig: Bibliographisches Institut.
- Roqué, Xavier, 2001. Displacing Radioactivity. In: Bernward Joerges und Terry Shinn, Hg., *Instrumentation Between Science, State and Industry*. Dordrecht/Boston/London: Kluwer, 51–86.
- Rürup, Reinhard/unter Mitwirkung von Michael Schüring, 2008. *Schicksale und Karrieren. Gedankenbuch für die von den Nationalsozialisten aus der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft vertriebenen Forscherinnen und Forscher*. Göttingen: Wallstein (=Geschichte der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft im Nationalsozialismus 14).
- Satzinger, Helga/Vogt, Annette, 2001. Elena Aleksandrovna Timoféeff-Ressovsky (1898–1973) und Nikolaj Vladimirovich Timoféeff-Ressovsky (1900–1981). In: Ilse Jahn und Michael Schmitt, Hg., *Darwin & Co. Eine Geschichte der Biologie in Porträts*. Bd. 2. München: Verlag C. H. Beck, 442–470.
- Schmaltz, Florian, 2005. *Kampfstoff-Forschung im Nationalsozialismus. Zur Kooperation von Kaiser-Wilhelm-Instituten, Militär und Industrie*. Göttingen: Wallstein (=Geschichte der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft im Nationalsozialismus 11).
- Schmuhl, Hans-Walter, 2000. Hirnforschung und Krankenmord. *Vierteljahreshefte für Zeitgeschichte*, 50, 559–609.

- Schubert, Gerhard, 1947a. Erfahrungen und Ergebnisse von Untersuchungen mit künstlich radioaktiven Indikatoren. *Strahlentherapie*, 76, 389–416.
- Schubert, Gerhard, 1947b. *Kernphysik und Medizin*. Göttingen: Verlag Muster-Schmidt.
- Schwerin, Alexander v., 2009. Der gefährdete Organismus. Biologie und Regierung der Gefahren am Übergang vom „Atomzeitalter“ zur Umweltpolitik (1950–1970). In: Florence Vienne und Christina Brandt, Hg., *Wissensobjekt Mensch. Humanwissenschaftliche Praktiken im 20. Jahrhundert*. Berlin: Kadmos, 187–214.
- Sime, Ruth L., 2007. „Die ‚Urspaltung‘ hat die ganze Situation gerettet“. Otto Hahn und das Kaiser-Wilhelm-Institut für Chemie während des Zweiten Weltkriegs. In: Helmut Maier, Hg., *Gemeinschaftsforschung, Bevollmächtigte und der Wissenstransfer. Die Rolle der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft im System kriegsrelevanter Forschung des Nationalsozialismus*. Göttingen: Wallstein, 268–304.
- Timoféeff-Ressovsky, Nikolaj V., 1941. Einige chemisch-biologische Anwendungen der schnellen Neutronen und der künstlich radioaktiven Stoffe. *Angewandte Chemie*, 54, 437–443.
- Wahrig, Bettina/Stoff, Heiko/Schwerin, Alexander v./Balz, Viola, 2008. Precarious Matters. An Introduction. In: Dies., Hg., *Precarious Matters / Prekäre Stoffe, The History of Dangerous and Endangered Substances in the 19th and 20th Centuries*. Berlin (=Preprint des Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte 356).
- Walker, Mark, 1989. *German National Socialism and the Quest for Nuclear Power 1939–1949*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Weart, Spencer R., 1979. *Scientists in Power*. Cambridge, Mass. u.a.: Harvard University Press.
- Weiss, Burghard, 1996. Harnack-Prinzip und Wissenschaftswandel. Die Einführung kernphysikalischer Großgeräte (Beschleuniger) an den Instituten der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft. In: Bernhard vom Brocke und Hubert Laitko, Hg., *Die Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft und ihre Institute. Studien zu ihrer Geschichte: das Harnack-Prinzip*. Berlin: Walter de Gruyter, 541–560.
- Whittemore, Gilbert/Boleyn-Fitzgerald, Miriam, 2003. Injecting Comatose Patients with Uranium. America's Wars against Communism and Cancer in the 1950s. In: Jordan Goodman, Anthony McElligott und Lara Marks, Hg., *Useful Bodies. Humans in the Service of Medical Science in the Twentieth Century*. Baltimore/London: The Johns Hopkins University Press, 165–189.
- Wolf, Paul Max/Born, Hans-Joachim, 1941a. Über die Verteilung natürlich-radioaktiver Substanzen im Organismus nach parenteraler Zufuhr. *Strahlentherapie*, 70, 342–348.
- Wolf, Paul Max/Born, Hans-Joachim, 1941b. Über den Reinheitsgrad von Thorium X-Präparaten. *Strahlentherapie*, 70, 349–351.
- Wolf, Paul Max/Born, Hans-Joachim, 1941c. Darstellung und Anwendung künstlich radioaktiver Stoffe. *Chemiker-Zeitung*, 65, 405–411.
- Wolf, Paul Max/Radu, Gheorghe/Catsch, Alexander/Born, Hans-Joachim, 1944. Über die Verteilung natürlich-radioaktiver Substanzen im Organismus nach parenteraler Zufuhr. IV. Versuche mit Uran X an Kaninchen. *Strahlentherapie*, 75, 452–456.
- Wolf, Paul Max/Riehl, Nikolaus, 1931. Über einen neuen, sehr einfachen Apparat zur Erzeugung von Radiumemanation (Radon). *Strahlentherapie*, 40, 386–390.
- Zimmer, Karl G., 1936. *Radiumdosimetrie. Verfahren und bisherige Ergebnisse*. Leipzig: Georg Thieme.

Alexander von Schwerin

Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

Abteilung für Geschichte der Naturwissenschaften/Pharmaziegeschichte

Beethovenstraße 55

38106 Braunschweig

E-Mail: a.schwerin@tu-bs.de