

# Zwei Entwicklungslinien einer Forschungstechnologie: Zur Geschichte der Analytischen Ultrazentrifugen und Gasultrazentrifugen

Bernd Helmbold und Christian Forstner

---

Splitting into two lines: The historical development of the analytical and the gas ultracentrifuge

In a historical perspective the ultracentrifuge is often taken as perfect example of a research technology according to Shinn and Joerges (Shinn and Joerges 2000, 2002). Research technologies are defined by a generic device, its own metrology and the interstitiality of the historical actors connected with the device. In our paper we give a detailed analysis of the development of the ultracentrifuge and thereby reveal two different lines of development: analytical ultracentrifuges and gas ultracentrifuges used for isotope separation. Surprisingly, we could not find any interstitial and transversal connections for these two lines. The lines end up with two different devices based on two different technical concepts. Moreover, the great majority of the actors stick to one line. These results are in accordance with other authors, who developed the concept of research technologies further and tried to sharpen their definition.

*Keywords:* Ultracentrifuge, analytical ultracentrifuge, gaseous ultracentrifuge, research technology

---

*Schlüsselwörter:* Ultrazentrifuge, Analytische Ultrazentrifuge, Gasultrazentrifuge, Forschungstechnologie

---

Die Ultrazentrifuge ist heute aus Industrie und Wissenschaft nicht mehr wegzudenken. Einmal als analytische Ultrazentrifuge mit einem breitgefächerten Einsatzgebiet in Biologie, Medizin und Chemie, und zum anderen als Gasultrazentrifuge, die nahezu ausschließlich zur Anreicherung von Uran eingesetzt wird und mit der heute der weltweit größte Anteil an Uran 235 produziert wird, das sowohl für friedliche als auch für militärische Zwecke genutzt wird.

Aus einer wissenschaftshistorischen Perspektive erscheint die Ultrazentrifuge als Forschungstechnologie par excellence im Sinne des von Terry Shinn und Bernward Joerges 2001 erstmals vorgestellten Konzepts der „research

technologies“ (Joerges und Shinn 2001). Forschungstechnologien unterscheiden sich von normalen Instrumenten durch ihre „Generizität“. Sie werden im Gegensatz zu diesen nicht nur für einen spezifischen Anwendungszweck entwickelt, sondern vom Anwendungsbereich unabhängig. Solch ein generischer Apparat wird dann in den jeweiligen Anwendungskontext eingebettet und angepasst, wieder aus diesem herausgelöst und wieder in einem neuen Kontext eingebettet. Dieser Prozess des kontinuierlichen *disembedding* und *reembedding* ist charakteristisch für zahlreiche Forschungstechnologien. Forschungstechnologien weisen nicht nur die Generizität als spezifisches Kriterium auf, sondern auch die Entwicklung einer eigenen an den jeweiligen generischen Apparat gebundenen Metrologie. Für die den Forschungstechnologien zugeordneten historischen Akteure ergibt sich damit zwingend, dass sie nicht nur einem spezifischen Funktionssystem — akademische Wissenschaft, Industrie oder Regierung — zugehörig sind, sondern sich in den Grenzbereichen zwischen diesen Systemen bewegen. Sie bilden eine lose Gemeinschaft mit einer eigenen lingua franca, die sich keinem der Funktionssysteme zuordnen lässt. Shinn und Joerges bezeichneten dieses Kriterium als „Institialität“. Forschungstechnologien stellen damit ein transversales Verbindungselement (Shinn 2008) in einer sich stetig weiter differenzierenden Gesellschaft dar und haben sich in den letzten Jahren zu einem der zentralen Forschungsgebiete der Wissenschaftsgeschichte entwickelt.<sup>1</sup>

Die von Shinn 2001/2002 formulierten Kriterien zur Identifikation von Forschungstechnologien wurden in der darauffolgenden wissenschaftshistorischen Forschung weiter spezifiziert und kritisiert. Insbesondere Klaus Hentschel hat in einer Untersuchung zur Generizität von Forschungstechnologien gezeigt, dass diese nicht a priori gegeben ist, sondern in einem stufenweisen Entwicklungsprozess geschaffen wird (Hentschel 2012: 113–139). Den Begriff der Institialität hat eine Arbeitsgruppe der Stuttgarter Abteilung für Geschichte der Naturwissenschaften und Technik in einer quantitativen prosopographischen Studie untersucht. Bernd Kröger gelang es dabei zu zeigen, dass Shinns Kriterium der Interstitialität sich nicht immer als trennscharf zur Identifikation oder Selektion von Forschungstechnologien erweist. Dieser Befund wird insbesondere auch durch die vorliegende Untersuchung gestützt (Kröger 2012: 187–205).

Auf den ersten Blick weist die Ultrazentrifuge alle wesentlichen Charakteristika einer Forschungstechnologie auf: Generizität — das Hervorbringen spezifischer, nach Anwendungsbereich differenzierter Instrumente aus einer generischen Apparatur, Interstitialität — die Grenzüberschreitungen der historischen Akteure und Träger dieser Technologien zwischen einzelnen gesellschaftlichen Funktionensystemen, und eine spezifische Metrologie (Joerges und Shinn 2001).

Nicht nur als Forschungstechnologie, sondern auch in der allgemeinen Instrumentengeschichte nahm die Ultrazentrifuge einen breiten Raum ein.<sup>2</sup>

Charakteristisch für eine Vielzahl der Publikationen ist, dass zumeist keine Unterscheidung zwischen zwei wesentlichen Entwicklungslinien getroffen wird: der analytischen Ultrazentrifuge und der Gasultrazentrifuge zur Isotopen-trennung. Trotz der Namensähnlichkeit handelt es sich um technisch unterschiedliche Konzepte, die den jeweiligen Instrumenten zugrunde liegen. Ein genauerer Blick auf diese beiden Entwicklungslinien greift Fragen aus den oben angesprochenen Beiträgen von Hentschel und Kröger zum theoretischen Konzept der Forschungstechnologien auf und trägt zu dessen Spezifizierung bei: Handelt es sich um Diffusion und Implementierung einer generischen Apparatur in unterschiedliche Forschungs- und Anwendungskontexte oder um eine Aufspaltung in zwei getrennte Entwicklungslinien? Welche Verbindungen existierten zwischen diesen beiden Linien? Wie ist es um die Interstitialität der Akteure bestellt?

Um diese Fragen zu diskutieren, werden nach einer kurzen Darstellung ihrer Vorgeschichte die beiden Entwicklungslinien in ihrem historischen Kontext dargelegt. Insbesondere für die im Zusammenhang der Isotopen-trennung entwickelte Gasultrazentrifuge ergaben sich unterschiedliche Formen des Wissenstransfers bzw. der Geheimhaltung sowohl während des Zweiten Weltkriegs als auch im Kalten Krieg, war doch die UdSSR gerade hier dem Westbündnis voraus. Der Impetus, der von der Rückkehr der an dieser Entwicklung beteiligten deutschen Physiker ausging, soll auf seine Wirkung hin betrachtet werden. Die Phasen der Entwicklung verlaufen auf beiden Seiten des „Eisernen Vorhanges“ divergent und der Transfer des jeweils aktuellen Wissens mit den sich daraus ergebenden Folgen gibt Aufschluss über den Sonderstatus des Aggregates.

## Von der Zentrifuge zur Ultrazentrifuge

Zu Beginn des 19. Jahrhunderts befassten sich vor allem Chemiker und auch Physiker mit Fragen des Ausfällens gelöster Substanzen oder des Konzentrationsgefälles in Lösungen unter dem Einfluss der Erdgravitation (Gay-Lussac 1819). Naturwissenschaftler verstehen unter Zentrifugation gemeinhin ein Verfahren zur Trennung von Partikeln in einem Schwerkraftfeld, welches in einem Rotor bei sehr hohen Umdrehungsgeschwindigkeiten erzeugt wird. In diesen Gravitationszonen verhalten sich Substanzen, Moleküle, Teilchen oder ihre Erscheinungsformen aufgrund unterschiedlicher Eigenschaften auch teilweise sehr unterschiedlich. Bei dem Zentrifugieren befindet sich das Target in einem Rotor, welcher zentral auf eine Antriebswelle montiert ist. Die Geschwindigkeit des Trennvorganges hängt von der relativen Zentrifugalkraft ab, welche als Vielfaches der Erd- bzw. Fallbeschleunigung ausgedrückt und durch entsprechend hohe Drehzahlen erreicht wird. Einfache Zentrifugie-

rungsvorgänge, wie etwa das Waschen von Gold aus Flusssand, werden bei sehr niedrigen „Drehzahlen“ manuell vollzogen, während das Schleudern von Wäsche standardgemäß bei bis zu 1600 rpm (revolutions per minute/Umdrehungen pro Minute) stattfindet. Das Entsaften von Früchten fordert demgegenüber schon eine Drehzahl bis 20.000 rpm, was bei einem Rotor-durchmesser von 100 mm an der Peripherie das ca. 45.000-fache der Erdanziehungskraft  $g$  erzeugt. Der Übergang zu Ultra-Zentrifugen, also Hochgeschwindigkeitszentrifugen, ist definitorisch nicht erfasst. Es handelt sich in jedem Falle aber um sehr schnelldrehende Aggregate, bei denen es nach oben hin keine Grenzen zu geben scheint. Heute stellen Rotorgeschwindigkeiten von bis zu 3.500 rps (revolutions per second/Umdrehungen pro Sekunde) den Standard analytischer Laborausstattung dar und Spitzenwerte liegen bei bis zu 70.000 rps. Die Einführung des Zentrifugierens in den chemisch-physikalischen Analyseprozess ist wohl dem Physiker Theodor des Coudres (1862–1926) zuzuschreiben, welcher auch zu Fragen der Ionenbeweglichkeit in Bezug auf „elektrolytische Momente“ arbeitete (des Coudres 1893). Der Physikochemiker Georg Bredig (1868–1944) führte diese Arbeiten mit gasförmigen Mixturen fort und konnte um 1895 in einem Hydrogen/Hydrogenjodid-Gemisch nach anderthalb Stunden handgetriebener Zentrifugenarbeit mit ca. 2.500 rpm immerhin einen Konzentrationsanstieg von drei Prozent an den äußeren Enden des Probenkörpers nachweisen (Bredig 1895). In der Folge beschäftigten sich etliche Wissenschaftler mit Fragen der Sedimentationsgeschwindigkeit und der Berechnung von Teilchengröße und -verteilung in Flüssigkeiten. Thematisch griffen Albert Einstein (1879–1955) und Marian von Smulochowski (1872–1917) die Frage der Brown'schen Molekularbewegung auf und lieferten eine theoretische Erklärung (Einstein 1906; Smoluchowski 1906). Dies passte zum wachsenden Interesse für die Chemie der Kolloide, deren Struktur und Verhalten hinterfragt wurden. Hierbei spielten neue Untersuchungs- und Analysemethoden im wissenschaftlichen Alltag eine zunehmende Rolle, insbesondere weil die herkömmlichen Methoden keinen genügenden Erkenntniszuwachs mehr versprachen und zunehmend neue technische und technologische Möglichkeiten zur Verfügung standen. So wurden die natürlichen Beschränkungen des Gravitationsfeldes der Erde durch den Einsatz und die Entwicklung von Zentrifugen kompensiert. Einer der ersten Ansätze hierzu wurde von Anton Vlamidirovic Dumanski und Kollegen vorgenommen, als sie Silberhydrosol für ca. 30 Sekunden bei 2000 rpm zentrifugierten und aus den Ergebnissen die Größe der Partikel berechneten (Dumanski, Zabotinski und Ewsejew 1913). Ihre Ergebnisse wichen — vermutlich aufgrund von Wärmeströmungen — stark von den mikroskopischen Messungen ab. Aus wissenschaftshistorischer Sicht sind vor allem zwei Entwicklungslinien auszumachen: Die Line der Analytischen ab hier Ultrazentrifugen und die der Gasultrazentrifugen (Elzen 1986).

## Die Linie der Analytischen Ultrazentrifugen (AUC)

Die Gruppe um den schwedischen Chemiker Theodor „The“ Svedberg (1884–1971) führte die Vorarbeiten Anfang der 1920er Jahre erfolgreich fort, wobei grundlegende Bedingungen für das konvektionsfreie analytische Zentrifugieren zur Sedimentation von Suspensionen postuliert wurden. Es scheint, dass die Zeit der Gastvorlesungen Svedbergs in Madison an der University of Wisconsin besonders stimulierend war, denn Svedberg gelang es gemeinsam mit dortigen Kollegen eine Ultrazentrifuge zu bauen, welche eine Beschleunigung von bis zu 150g erreichte und bei der der Sedimentationsprozess fotografisch dokumentiert werden konnte (Svedberg und Nichols 1927). Neben der weitgehenden Konvektionsfreiheit trugen folgende Kriterien zur Durchführbarkeit, Effektivierung und Genauigkeit des Analytischen Ultrazentrifugierens bei: die Limitierung der Dimensionen, die Umschlossenheit der Proben, die Minimalisierung der Reibung des Umgebungsgases und das sektorförmige Design. Zentrale Fragen, die erfolgreich bearbeitet wurden waren zum Beispiel die Wärmeableitung und Vibrationsverminderung der Lager durch die Nutzung ölasierte Elemente, die Reibungsoptimierung durch das Aggregatdesign und eine Hydrogenatmosphäre unter 20 Torr Druck, der hochwertige Materialeinsatz insbesondere am Rotor oder Quarzfenster zur Dokumentation. Svedberg entwickelte mit seinen Mitstreitern zwei Antriebstypen für die Ultrazentrifuge: einen elektrischen und einen ölturbinengetriebenen. Die Entwicklung führte zur „Disk-Type“ oder Teller-Zentrifuge und löste recht schnell in geeigneten Feldern die „Atterberg-Methode“ der traditionellen Schwerkraftsedimentation ab. Die Teller-Ultrazentrifuge ist durch ein Sektorendesign für die Aufnahme der Proben gekennzeichnet und war mit Hydrogen befüllt. Trotz der nunmehr erreichbaren 400.000g (1934) und mehr blieben Einsatzmöglichkeiten limitiert, da die Probengrößen bei einem Behältnis mit ca. 20 mm Länge und 5 mm Durchmesser sehr klein blieben. Das Nobelkomitee würdigte unter anderem Svedbergs Arbeiten zur Ultrazentrifuge schon 1926 mit dem Preis für Chemie (Abb. 1).

Svedberg und Kollegen untersuchten hauptsächlich Sedimentationskoeffizienten, aber auch makromolekulare Substanzen tierischer und pflanzlicher Eiweiße oder den Globulinanteil des Blutes. Dies erfolgte in der „Proteinperiode“ Svedbergs zwischen 1925 und 1940, in welcher vorrangig auch Polysaccharide und Cellulose untersucht wurden (Beneke 1999). Der Nachweis verschiedener Krankheitszusammenhänge konnte durch Zentrifugieren erstmals auf molekularer Ebene geführt werden, so etwa für den Krankheitsverlauf des Scharlachs oder für Fragen von Zellläsionen. Nach Svedberg wurde die Einheit des Sedimentationskoeffizienten als Svedberg-Einheit (S) benannt.

Nov. 8, 1927

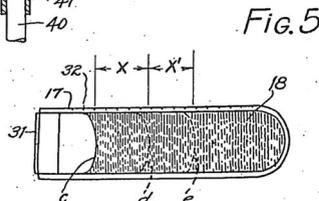
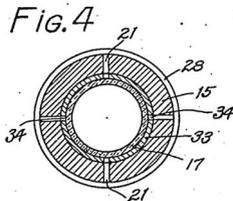
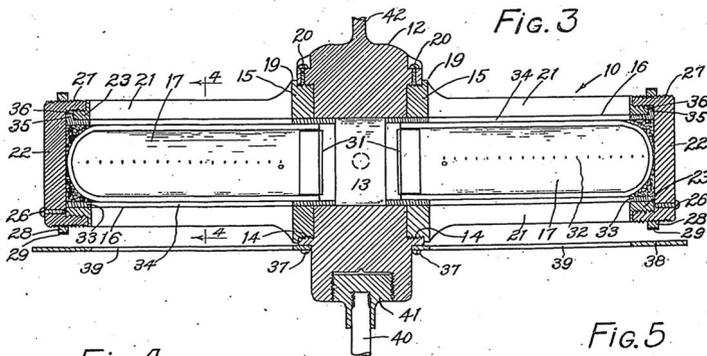
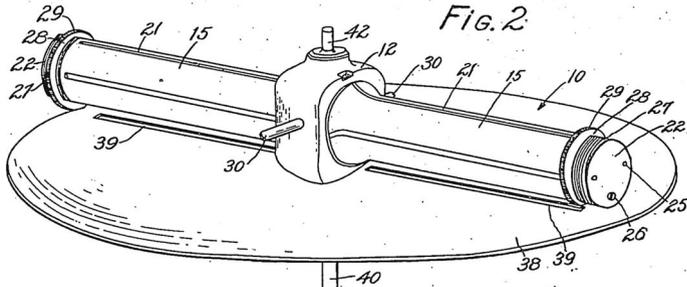
T. SVEDBERG ET AL

1,648,369

ANALYTICAL CENTRIFUGE

Filed Sept. 10, 1923

2 Sheets-Sheet 2



Inventors  
The' Svedberg  
J. Burton Nichols  
By Chindell Parker Carlson  
attorneys

Abb. 1 „Analytical Centrifuge“ US-Patent Nr.: 1.648.369 vom 8. November 1927 erteilt für Theodor Svedberg und James B. Nichols

Svedbergs Zentrifugenentwicklungen im Überblick (in Anlehnung an Elzen 1986) veranschaulicht Tabelle 1.

Svedberg hat zwei experimentelle Methoden des Ultrazentrifugierens herausgearbeitet: die „Sedimentation Velocity Method“ und die „Sedimentation Equilibrium Method“. Mit ersterer konnten durch die Bewegungsgeschwindigkeit der Moleküle in der Analytischen Ultrazentrifuge Aussagen

Tabelle 1 .

Zentrifugalkraft in g	Merkmale des Aggregats	Jahr
500	Röhrenförmiges Rotordesign, Elektromotor	1923
5000	Zylindrisches Rotordesign, Sektorengleiderung, Hydrogenfüllung	1924
1,00,000	Hydrogenfüllung unter Druck, Ölturbinenantrieb	1926
3,00,000	Neuartiges Rotordesign (Disk-type)	1932
4,00,000	Cr-Ni-Stahl	1933/34
5,00,000	Verkleinertes design (30 mm auf 20 mm)	1935

zur molekularen Masse und zur Form der Partikel gemacht werden, während die zweite Methode vor allem Aussagen zu Teilcheninteraktionen erlaubte. Trotz vielfältiger Modifikationen blieb das Konzeptdesign der Svedberg'schen Zentrifuge weitestgehend erhalten und es wird für die Mitte der 1940er Jahre ein ungefähre Bestand von etwa 300 Ultrazentrifugen weltweit vermutet, wovon die Mehrzahl elektrisch angetrieben war (Schachman 1959: 1).

Der erste Schritt des amerikanischen Physikers Jesse Wakefield Beams (1898–1979) und seines Teams führte über eine angetriebene Achse (meist elektrisch, später auch ölgetrieben) mit einem auf ihr montierten Rotor. Dabei bestanden große Herausforderungen durch die Unwucht entstehend aus der Differenz der Achsen von Rotor und Antriebswelle. Beams Arbeiten waren nicht so zielgerichtet wie die von Svedberg und so beschäftigte er sich mit langsam bis hochdrehenden rotierenden Systemen. Hierbei setzte er die Artefakte von der Materialprüfung über die Analytik bis späterhin zur Uranisotopentrennung ein. Nachher griff er die Idee einer luftgetriebenen Turbine der belgischen Forscher Émile Henriot (1885–1961) und Eugène Huguenard (Henriot und Huguenard 1925) auf und entwickelte ein „spinning top artefact“, mit dem kleinen Objekten hohe Rotationsgeschwindigkeiten verliehen wurden (Beams und Weed 1931). Aus diesem Artefakt entwickelte Beams mit seinen Mitarbeitern verschiedenartige „Ultrazentrifugen“, die generell einsetzbar waren und mit denen alles zentrifugiert wurde, was schleuderbar war (Beams und Pickles 1935).<sup>3</sup> Der große Vorteil lag in der Selbstnivellierung zur axialen Rotation und den erreichten Geschwindigkeiten von bis zu 4.000 rps. Dennoch wurden durch mechanische Faktoren wie Material, Lagerung, und Luftwiderstand Grenzen erreicht, die mit dieser Bauweise nicht überschritten werden konnten. In der weiteren Entwicklung, vor allem mit seinem Promovenden Edward G. Pickles, entstanden Rotoren, welche durch einen Stahlfaden in einer Vakuumkammer angetrieben und am unteren Ende durch Kuppelungen arretiert wurden. Dieses Design erlaubte eine wesentliche Verbesserung der Rotorstabilisierung war aber auch nicht reibungsfrei und wurde folgend antriebsseitig durch den Einsatz elektromagnetischer Felder verändert. Damit wurden bisher unerreichte 1,5 Mio. rps mit einem kleinen

Rotordesign möglich. Das eigentliche Ziel von Beams Arbeiten, ableitbar aus seiner Dissertation (Beams 1925), bestand aus dem akkuraten Messen sehr kurzer Zeitintervalle. Das Interesse an Vielseitigkeit und hoher Gebrauchsfähigkeit des technischen Aggregates schien in Beams Fokus zu liegen (Shinn 2000: 8).

Ein Aufsatz von Howard K. Schachmann stellt das Fortschreiten der Entwicklung der Ultrazentrifugentechnik im Bereich der Biochemie und Medizin zwischen 1947 und 1959 dezidiert dar und es wird darauf verzichtet, diese Verbesserungsinnovationen hier im Einzelnen zu schildern (Schachman 1959). Die Analytische Ultrazentrifuge in ihrer bisherigen Erscheinungsform war ausgereift und in Bezug zum Probenbehälterdesign und verwendeten Werkstoffen, zu den Beobachtungstechniken und zu den verfügbaren analytischen Verfahren in den Möglichkeiten ausgereizt. Dennoch blieben als nicht ausgleichbare Nachteile der Zentrifugen die nur unter unverhältnismäßigem Aufwand bis gar nicht mögliche Rückführung der separierten Fraktionen und die Limitierung der Probengrößen bestehen. Ersteres machte eine nachfolgende Analyse unmöglich und letzteres schloss Einsatzbereiche jenseits der Analyse per se aus. Gerade diese Unzulänglichkeiten setzten eine durch den Zweiten Weltkrieg verspätete Weiterentwicklung in Gang, um aufkommende Fragestellungen unter anderem auch der Virus- und Impfstoffforschung weiter bearbeiten zu können.

Von der Zellforschung aus wurde diese Herausforderung aufgegriffen und in der Folge die „Zonen-Zentrifuge“ entwickelt, gestützt von der Annahme, dass die meisten menschlichen Krankheiten auf molekularer Ebene verstanden werden würden (Anderson 1966). Dieser Zentrifugentypus ist gekennzeichnet von einem hohlen zylindrischen Rotor, welcher während der Drehbewegung von einem zugehörigen Apparat gefüllt und entleert werden kann. Die Zentrifuge wird vorbefüllt mit beispielsweise  $C_{12}H_{22}O_{11}$  (Saccharose als Dichtegradient) in abnehmender Konzentration, um ein störungsfreies Erreichen der Umdrehungsgeschwindigkeit (Stabilisierung) zu gewährleisten und Konvektionseinflüsse zu minimieren. Im Kern des Rotors finden sich Flügel, um Turbulenzen während der Geschwindigkeitsänderungen zu vermeiden. Die Schwerkraft sorgt für eine geordnete Führung der Untersuchungssubstanz in vertikaler Ausrichtung, wobei die schwereren Bestandteile am äußeren Rand und die leichteren im Zentrum zu finden sind. Die Probe wird je nach verwendeter Methode vor Erreichen des Gleichgewichts oder erst danach eingebracht und späterhin durch Kompressionsinjektion von der Peripherie aus nahe der Achse entnommen. So entwickelten sich zwei Hauptmethoden des Analytischen-Zonen-Zentrifugierens: Das *rate-zonal* und das *isopycnic-zonal* Verfahren. Bei beiden findet das Zentrifugieren in einem Dichtegradienten (s.o.) statt, der im ersten Fall eine geringere Dichte als die des am wenigsten dichten zu sedimentierenden Materials aufweist und im zweiten übersteigt die maximale Dichte des Gradientenmaterials die der

Partikel. So wurden die Methoden und das Aggregat entsprechend der Teilcheneigenschaften und dem Untersuchungsziel vor allem in den 1960er Jahren weiterentwickelt, denn Partikel unterschiedlicher Größe und sehr enger Dichte lassen sich im Rate-Zonal-Verfahren trennen, während sich das isopyknische Zentrifugieren für Partikel unterschiedlicher Dichte geeignet erwies (Abb. 2).

## Die Linie der Gasultrazentrifuge zur Isotopentrennung

Bredig war einer der ersten, der im schon geschilderten Versuch daran ging, auch gasförmige Substanzen durch Gravitationskraft zu trennen und der damit Vorreiterfunktion übernahm. Bald nach der Entdeckung der Isotope 1910 durch den englischen Chemiker Frederick Soddy (1877–1956) dachten Lindemann und Aston das Trennen von Isotopen in Gas- oder Dampfform und bezogen sich hierbei auf die Zentrifugalkräfte (Lindemann und Aston 1919). Isotope kennzeichnen das Erscheinen ein und desselben chemischen Elements mit verschiedenen Massezahlen, das heißt mit mehr oder weniger verschiedenen Eigenschaften, welche unter der Wirkung der Gravitation zum Tragen kämen. Dieser Ansatz wird dem allgemeinen Interesse folgend aufgegriffen und theoretisch weiterentwickelt, während die experimentellen Umsetzungen hierzu zunächst erfolglos blieben (vergleiche hierzu etwa Chapman 1919; Mulliken 1922). Die Theorie einer Gaszentrifuge folgt in Bezug zu Isotopen zwei wichtigen Determinanten: Zum einen hängt die Konzentrationsverteilung im Schwerkraftfeld ausschließlich von der absoluten Massendifferenz ab und zum anderen lassen sich einige Isotope nur im gasförmigen Zustand wirkungsvoll trennen, so insbesondere auch Uranisotope des  $^{235}\text{U}$  von  $^{238}\text{U}$ . Beams an der University of Virginia gelang es im Rahmen seiner breit gestreuten Versuche erstmals 1937 Isotope des Chlorgases mittels Zentrifuge zu separieren (Beams und Haynes 1936). In Karbontetrachlorid ( $\text{CCl}_4$ ) konnte er mit seinen Teamkollegen eine Konzentrationsverschiebung in  $^{35}\text{Cl}$  und  $^{37}\text{Cl}$  mit Hilfe einer Evaporationszentrifuge nachweisen. Dabei arbeitete das Team an der University of Virginia mit einem Aggregatdesign unter Vakuum und mittlerer Antriebswelle, Lagerung außerhalb der Vakuumzone und Schwerölabdichtung. Kurze Zeit später wurden auch Bromisotope separiert (Humphreys 1939), jedoch führte insbesondere das Problem der Konvektionswärme zu einer raschen Ablösung dieser durch R. S. Mullikan zeitig vorgeschlagenen Methode des Zentrifugierens (Mulliken und Harkins 1922).

Mit Entdeckung der Kernspaltung in Uran im Winter 1938/9 wurde die Macht dieser Energien nicht nur für zivile Zwecke, sondern vor allem auch für militärische Anwendungen denk- und greifbar (Hahn und Strassmann 1938).

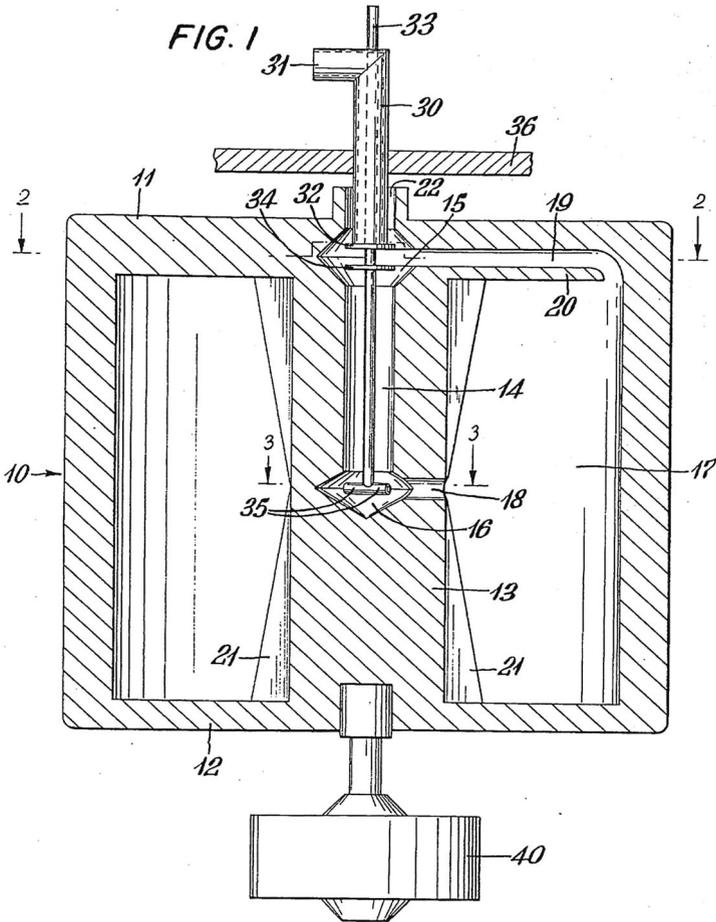
March 1, 1966

N. G. ANDERSON  
CENTRIFUGE APPARATUS

3,237,855

Filed June 24, 1963

2 Sheets-Sheet 1



INVENTOR.  
NORMAN G. ANDERSON.  
BY *Richard S. Miller*

ATTORNEY

Abb. 2 „Centrifuge Apparatus“ US Patent Nr.: 3.237.855 vom 1. März 1966 erteilt für N. G. Anderson

Eines der dabei auf der Agenda stehenden Hauptprobleme war die Bereitstellung des mit nur 0,71 Prozent im Natururan vorkommenden Isotops <sup>235</sup>U in ausreichender Reinheit. Bei den geringen Gewichtsunterschieden zwischen

diesen Isotopen ist eine wirksame Trennung nur in der Gasphase möglich. Die Herstellung von Uranhexafluorid ( $UF_6$ ) war seit langem bekannt und bot einen passenden Versuchsansatz für die Anreicherungsproblematik (Ruff 1909). Hierdurch wurde auch das Rotordesign der Ultrazentrifuge maßgeblich beeinflusst und entwickelte sich durch die Arbeiten von Beams und Kollegen zu röhrenförmigen Behältern (Beams 1938). Dieses Design erlaubte nach verschiedenen Methoden das permanente Zuführen und Entnehmen der Isotope und entwickelte die Anreicherung somit zu einem ununterbrochenen Prozess, was einen wesentlichen Schritt zur industriellen Verwertung darstellt. Die Concurrent-Methode, welche zuerst genutzt wurde, wies neben dem geringen Anreicherungsgrad vor allem ein exponentielles Druckgefälle im Rotor auf, wodurch die Entnahme erheblich erschwert war. Weiterhin war der Apparat durch die Lagerung und Dichtung erheblicher Reibungswärme ausgesetzt, was zu Wärmekonvektion im Inneren und letztlich zu einer Verringerung sowie der Trennleistung als auch der Lebensdauer des Aggregats und damit zur Kostensteigerung führte.

Dem Interesse und den ersten praktischen Anwendungen folgend entstand nahezu zeitgleich die theoretische Untersetzung der Phänomene und Möglichkeiten, die die Anreicherung von Uranisotopen im gasförmigen Zustand mit sich brachte. Hierzu trugen vor allem auch die einfachen Verteilungsrechnungen der Isotope unter Schwerkraftbedingungen von Paul A.M. Dirac und Hans Martin mit Werner Kuhn bei und führten zu neuen Konstruktionsbedingungen: der Countercurrent-Methode (Dirac 1995; Martin 1950). Diese stellt ein Gegenstromverfahren dar, bei welchem ein isotopischer Konzentrationsgradient entlang der Achse entsteht, sodass das an  $^{235}U$  angereicherte Gas an der einen Seite und das schwerere  $^{238}U$  angereicherte an der anderen entnommen werden kann. In der Weiterentwicklung wurde von Harold C. Urey vorgeschlagen, eine achsennahe Probenzuführung und -entnahme zu realisieren, die konvektionsverursachende Wärmeverteilung im Rotor zu Hilfe zu nehmen (Temperaturgradient) und U-förmige Enden zu verwenden, um den Staudruck zur Gasentnahme zu nutzen (Urey 1939: 48–77). Karl Cohen arbeitete erste theoretische Grundlagen auf breiterer Basis aus (Cohen und Murphy 1951), während die Beams-Gruppe in den USA und Wilhelm Groth (1904–1977) in der Hamburger Forschergruppe um Paul Harteck (1902–1985) während des Zweiten Weltkrieges das Funktionieren des neuen Aggregates unter Beweis stellten (Beyerle et al. 1949). Für beide Gruppen war das Ergebnis von militärischem Interesse: In den USA im Rahmen des *Manhattan Engineer District* sehr zielgerichtet als mögliche Grundlage zur Herstellung des Bombensprengstoffes (Stoff und Fanton 1991), in Deutschland ebenfalls für Bomben, allerdings im Ringen rivalisierender Gruppen mit unterschiedlichen Ausrichtungen (Hentschel 1996; Walker 1990) (Abb. 3).<sup>4</sup>

Jan. 2, 1951

K. COHEN ET AL

2,536,423

CENTRIFUGE FOR SEPARATING GAS MIXTURES

Filed Jan. 31, 1945

4 Sheets-Sheet 1

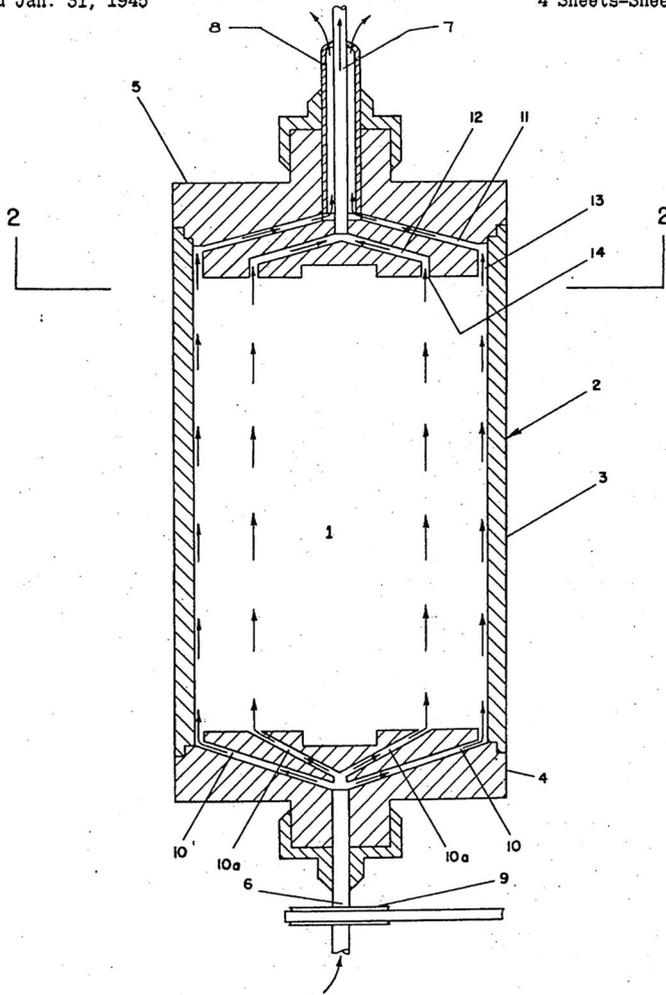


Fig. 1

INVENTOR  
HAROLD C. UREY  
KARL COHEN

BY  
*Robert A. Schneider*  
ATTORNEY

Abb. 3 „Centrifuge for separating gas mixtures“ US Patent Nr.: 2,536,423 vom 2. Januar 1951 erteilt für Karl Cohen und Harold C. Urey (eingereicht 31. Januar 1945)

Sowohl Entstehung als auch Ausrichtung auf militärische Nutzbarkeit der Gasultrazentrifuge waren informationsseitig für alle Interessengruppen greif- und nachvollziehbar. Dies lag möglicherweise daran, dass Geheimhaltung einer wissenschaftlich-technischen Priorität untergeordnet war und durchgängig in anerkannten Journalen publiziert oder als Patent angemeldet wurde.

Die Aussicht auf nukleare Waffen, genauer die Atombombe, generierte in den USA Ressourcen, Geld und Manpower in einem bis dato unbekanntem Ausmaß, ebenso wie eine neue Qualität der Geheimhaltung. Im Rahmen des als Manhattan-Projekt bekanntgewordenen Großforschungsprojektes fand auch die Gasultrazentrifuge zur Anreicherung des Urans ihren Platz. Entsprechend der inneren Struktur wurde eine streng arbeitsteilige Aufgabenstellung leitend: Harold C. Urey (1893–1981) als Projektleiter aller Anreicherungsgruppen und Jesse W. Beams als Leiter und Berater des Zentrifugenbereiches. Es bestanden vertragliche Bindungen für die Koordination und theoretische Entwicklung mit der Columbia University, für den Ultrazentrifugenbau eines Pilotwerk mit Westinghouse Electric Co., für den Bau des Werkes selbst mit der Standard Oil Co. sowie für die experimentelle Begleitung und Entwicklung mit der University of Virginia (Stoff und Fanton 1991). In diesem Rahmen wurde von amerikanischer Seite auch die mathematische Fundierung durch Urey, Cohen, Dirac und Skarstrom geliefert. Entsprechend der Berechnungen wurde sowohl an unterkritischen *short bowl* als auch an überkritischen *long bowl* Ultrazentrifugen gearbeitet und auch wenn letztere nie richtig zum Laufen kamen, liefen erstere über 93 Versuchstage, bis zu einem Unfall bei 215 mps im Dezember 1943.<sup>5</sup> Die Anreicherungsquote der Probe lag bei 5 Prozent. Im Januar 1944 wurden jedoch die Diffusionsmethode und die Calutron-Separation favorisiert, die Arbeiten zur Ultrazentrifuge wurden im Rahmen des Manhattan-Projekts beendet (Smyth 1989). Die militärische Zielsetzung und daraus folgend auch die kleinteilige Organisation des gesamten Projektes unterlag höchsten Geheimhaltungs- oder Klassifikationsstufen. Gleichzeitig waren Geheimdienste — insbesondere die der jeweiligen anderen Weltmacht — äußerst aktiv und versuchten entweder eigene Nachteile durch Spionage zu egalisieren oder auch nur den Stand der Arbeiten zu erkunden.

Zentrifugen boten zwar eine Möglichkeit zur industriellen Urananreicherung, waren jedoch nach dem Ende des Zweiten Weltkrieges wirtschaftlich uninteressant. Insbesondere die Anstrengungen an überkritischen Zentrifugen wären interessant gewesen, da im Countercurrent-Verfahren die Anreicherungsquote direkt abhängig von Rotorlänge und der Umdrehungsgeschwindigkeit an der Peripherie ist, sodass unter diesen Voraussetzungen die Wettbewerbsfähigkeit mit dem Diffusionsverfahren am ehesten erreichbar schien. Während der bisherigen Arbeiten war es insbesondere aufgrund von Problemen mit der Lagerung, der Konvektion, der Limitierung der Umdrehungsgeschwindigkeit, der Zuführung und Entnahme und der

Materialbelastung nicht gelungen, überkritische Gasultrazentrifugen zu bauen. Diese Situation spiegelt sich im US-amerikanischen Programm der Atomic Energy Commission (AEC) wieder, welche im Dezember 1951 die Zentrifugentechnik aus dem Bereich der Isotopenanreicherung vor allem aus Gründen der Wirtschaftlichkeit ausschloss. Einige Jahre später, im September 1954, wurde das Programm wiederbelebt, um insbesondere den deutschen Bemühungen (Groth und Beyerle) und niederländischen Aktivitäten (Jacob Kistemaker) nicht hinterherzuhinken. Dies untermauerte sowohl hegemoniale Ansprüche als auch Stellung der USA, welche autonome Entwicklungen im Bereich der angewandten Forschung nicht oder nur schwer zuließ, jedoch beschränkte man sich auf Kontrolle und Einzeluntersuchungen.

Einen Innovationschub gab es infolge der Parallelentwicklung zur Anreicherung von Uran in der Sowjetunion, welche vor allem von deutschen Wissenschaftlern durchgeführt wurden. Deutsche Spezialisten arbeiteten im Rahmen des sowjetischen Atomprogrammes nach kriegsrechtlicher Vereinbarung vor allem an Trennverfahren für Uran: So arbeitete Nikolaus Riehl (1901–1990) mittels fraktionierter Kristallisation, einem chemischen Verfahren zur Reinigung von Uran, während die Arbeitsgruppen um Gustav Hertz (1887–1975), Manfred von Ardenne (1907–1997), Peter Adolf Thiessen (1899–1990) und später auch von Max Steenbeck (1904–1981) sich den verschiedenen isotonenbasierten Anreicherungsverfahren zuwendete. Steenbeck, erst spät aus einem Kriegsgefangenenlager zu den Spezialisten am Schwarzen Meer verbracht, widmete sich zuerst einem Trenndüsenverfahren, um sich dann dem Zentrifugenansatz zuzuwenden (Steenbeck 1978: 196). Die Problemstellungen aus den Vorarbeiten waren bekannt, ebenso die Ergebnisse aus den Versuchen im Rahmen des Manhattan-Projekts, weil erstere inzwischen zum grundlegenden physikalischen Wissen gehörten und in den einschlägigen Fachblättern veröffentlicht waren und letztere durch die unmittelbare Verfügbarkeit insbesondere des Smyth-Reports in der UdSSR gegeben war (Albrecht, Heinemann-Grüder und Wellmann 1992).

Die Arbeitsgruppe Steenbeck brachte unter anderem mit Gernot Zippe (1917–2008) und Rudolf Scheffel einen dünnwandigen Rotor zum Laufen, welcher auf einem dünnen, flexiblen Drahtstift rotierte. Dieser wiederum wurde in einer Ölwanne eines elastisch zentrierten Auflagers gehalten — beide Neuerungen reduzierten die Reibung erheblich und dämpften drehzahlbedingte Schwingungen. Der Rotor wurde von einem Synchronmotor angetrieben und die obere Zentrierung der nicht durchgängigen Achse wurde kontaktfrei, damit auch reibungsfrei magnetisch gelagert. Nichtrotierende Zuführung und Entnahme im axialen Zentrum bewirkten einen axialen Temperaturgradienten und damit eine Konvektionsströmung innerhalb des Rotors. Molekularpumpen, gebildet aus den Bauteilen des Aggregats, verhinderten den Gaseintritt in den Vakuummantel. Das Einbringen eines neuen Rotorinnendesigns unterstützte die Gaszirkulation, wird jedoch späterhin wie

auch der Einsatz der Vakuumpumpen sowjetischen Wissenschaftlern zugesprochen (Bukharin 2004c). Im Labor bauten Steenbeck und Zippe ca. drei Meter lange überkritische Ultrazentrifugen, bei denen die Rotoren aus bis zu 0,3 Meter langen, mit flexiblem Schlauchmaterial verbundenen Rohrstücken bestanden, die jedoch technologisch nicht in die Produktion zu überführen waren. Hierzu wurden dann unterkritische Zentrifugen von ca. 30 Zentimeter Länge und 58 Millimeter Durchmesser mit ungefähr 1800 rps beschleunigt und diese erzeugten somit an der Peripherie fast 850.000g. Der erreichte Trennfaktor lag bei 1,08 (Zippe 2008: 169). An dieser Stelle wurde die Zentrifugenentwicklung von den sowjetischen Wissenschaftlern und Technologen in einer Arbeitsgruppe unter Leitung von Isaac K. Kikoin (1908–1984) aufgegriffen und weitergeführt. An der Kaskadierung wurde von russischer Seite aus ohne deutsche Beteiligung weitergearbeitet (Bukharin 2004a: 9). Im Dezember 1953 wurde in den Leningrader Kirov-Werken ein technologisch ausgereiftes Modell präsentiert, welches später als Kamenev-Zentrifuge, nach dem Gruppenleiter Evgeni Kamenev, in der Sowjetunion bekannt geworden ist. Der Prioritätenstreit um die erste brauchbare Ultrazentrifuge bleibt wohl ungelöst, da Zippe schon kurz vorher eine Versuchsversion kleinerer Ausführung, aber mit allen wesentlichen, als innovativ bezeichneten Elementen, am selben Ort laufen ließ, jedoch dies von russischer Seite nicht bestätigt wird.

Ungeachtet dessen wurde die Ultrazentrifuge ab 1957 in mehreren Generationen das Erfolgsmodell zur Anreicherung von spaltfähigem Material in der UdSSR und ist es bis heute für Russland geblieben (Bukharin 2004b).

Seit Beginn des Rennens in den Atom- und Bombenprogrammen der Supermächte wurden Geheimdienste aktiviert. Dies führte dazu, dass die entsprechenden Kräfte in den USA schon im Januar 1955 einen ungeprüften Geheimbericht zur Arbeit des Department 3 in der mechanischen Abteilung des Nuklearinstituts in Sinop zur „Entwicklung der Ultrazentrifuge unter Dr. Steenbeck“ mit Zeichnung zur Verfügung hatten. Neben Mitarbeiterdaten wurden auch technische Details, wie beispielsweise die Nadellagerung, kolportiert (CIA Information Report 1955).<sup>6</sup> Dies ist besonders interessant, da die deutschen Mitarbeiter am Projekt erst Mitte 1956 „entlassen“ wurden und somit der Informationsfluss nicht mehr als personengebunden angenommen werden kann. Die Dichte und Tiefe der zur Verfügung stehenden Daten und Informationen nahm sehr schnell zu. So stand im Mai 1957 ein weiteres, 61 Seiten starkes Dokument bereit, in welchem die sowjetische Isotopentrennung auf großer Breite beleuchtet wurde. Schwerpunkt war zwar die Ultrazentrifuge, aber der beherrschende Tenor in dem Dokument ist:

[T]here exists no absolute necessity for the Soviets to build the centrifuge cascade as a competitor to the gaseous diffusion plant. They have a process by means of which they can separate as much as they want. [...] They no longer were interested in the centrifuge at a certain date in 1951 [...]. (CIA Information Report 1957).<sup>7</sup>

In Zentraleuropa wurde vor allem in den Niederlanden, Großbritannien und der Bundesrepublik Deutschland zu dem Problem der Gasultrazentrifuge geforscht. In Deutschland waren es die schon bekannten Konrad Beyerle, Wilhelm Groth und Hans Martin an den Standorten Hamburg, Göttingen und Kiel. Dabei ging es hauptsächlich um die Bestätigung des theoretisch vorhergesagten maximalen Trennvermögens, somit also um Fragen der Wettbewerbsfähigkeit zur Diffusionsmethode, und um Material- und Reibungsfragen. In den Niederlanden war es vor allem Jacob Kistemaker (1917–2010), welcher vormals am Niels-Bohr-Institut in Kopenhagen assistiert hatte und am Institut für Grundlagenforschung der Materie mit Unterstützung des Reaktorzentrums der Niederlande tätig war. Kistemaker waren alle westlichen Arbeiten bekannt und er knüpfte an Beams und Groth an. Dabei versuchte er dem Zentrifugenproblem auf der Ebene der Lagerung beizukommen und führte grundlegende Untersuchungen zum Isotopenverhalten durch (Heer, Huizenga & Kistemaker 1956). Über die frühen Zentrifugarbeiten Hans Kronenbergers im britischen Capenhurst ist wenig öffentlich bekannt, nur dass sie in kleinem Maßstab neben dem Bau der Diffusionsanlage stattfanden und 1954 eingestellt wurden.

Im Sommer 1956 erfolgte die Rückkehr der Zentrifugenspezialisten aus der Sowjetunion: Steenbeck ging in den Osten, Zippe und Scheffel wandten sich dem Westen zu. Etwas später, im Juni 1958, schlossen die drei einen privatrechtlichen Vertrag über die Nutzungsrechte bezüglich der Erfahrungen zur Gasultrazentrifuge im Herrschaftsbereich der jeweiligen Supermacht — Steenbeck für den Ostblock und die anderen beiden für alle anderen Staaten. Beide Vertragsparteien begründeten ihre Unterschrift damit, dass ausdrücklich keine Geheimhaltungsverpflichtung aus den Entwicklungszeiten in der UdSSR bestünde und beide bemühen dafür unterschiedliche Quellen (Steenbeck 1978: 359; Zippe 2008: 193).

Dem hohen Entwicklungsstand geschuldet waren insbesondere die Verbreitungsaktivitäten von Gernot Zippe, welcher auch geheimdienstlichen Kontaktversuchen seitens des U.S. Office of Naval Intelligence ausgesetzt war. Hierzu wurde er sogar in geheimdienstlicher Manier in die USA verbracht, wo er zuerst „ausgequetscht“ und dann den einschlägigen Spezialisten „vorgeführt“ wurde, namentlich J. W. Beams (Zippe 2008: 191). Im Ergebnis kehrte Zippe knapp ein Jahr später in die USA zurück, diesmal vertraglich gebunden, um die Ultrazentrifuge aus Leningrad nachzubauen (Kemp 2009: 3). Dass dies vorzüglich gelang, bezeugen die *Progress Reports* von 1958 und 1959 sowie der USAEC-Report ORO 315, in denen Zippe gemeinsam mit Beams und A.R. Kuhlthau detaillierte Informationen lieferte.<sup>8</sup>

Nunmehr erfolgte eine Diffusionsphase für die Gasultrazentrifuge im Sinne von Generizität im Untersuchungsansatz der Forschungstechnologien von Joerges und Shinn (Hentschel 2012). Diese Phase wurde vor allem mit der ausgedehnten Patentierung durch Zippe auf zwei Ebenen eingeleitet: Zum

einen in verschiedenen nationalen Räumen und zum anderen mit der Ergänzung der zentralen Technologie, der Gasultrazentrifuge, durch vielfältiges Zubehör und periphere Aggregate. Das erste Patent wurde mit der Nummer 1.071.593 für die Deutsche Gold- und Silber-Scheideanstalt vormals Roessler, Frankfurt am Main am 14. November 1957 auf die Erfinder Zippe, Scheffel und Steenbeck eingereicht und am 9. Juni 1960 ausgegeben. Es wurden zahlreiche weitere Patente etwa in den USA, Österreich und Großbritannien eingereicht und durch Auslegung öffentlich zugänglich gemacht.<sup>9</sup> Durch dieses publik machen und auch durch die Tätigkeit vor allem von Zippe, beispielsweise in den USA bei Beams an der University of Virginia, wurde die Wahrnehmung politischer Kreise auf die Problematik der Ultrazentrifuge gelenkt. Da sich die USA gerade im Wahlkampf Nixon vs. Kennedy und damit in einem politischen Umbruch nach der Eisenhower-Ära und dem Start des „Atoms for Peace“ Programms befand, wurde die Gasultrazentrifuge schnell zum Instrument politischer Interessen (Kornberg 1960).<sup>10</sup> So wurde dann auch die billigere Technologie der Ultrazentrifuge zur Anreicherung von Uran und somit der Schlüssel zu Energie und Bombe mit dem Rüstungskontrollargument vereinnahmt und es gelang der Weltmacht USA späterhin die Erfindungen der Geheimhaltung zu unterwerfen: Alle Forschungen zum Thema wurden nachträglich klassifiziert.<sup>11</sup> Die UdSSR wahrte Schweigen in Bezug auf die Turbulenzen, welche die Gasultrazentrifuge weltweit verursachte. Entsprechend interner Geheimhaltungsstrategien hatte

the Soviet atomic management decided not to react to this information — to keep quiet in order not to give any indication that the USSR was working on a new, progressive method of uranium enrichment. Let them think that the USSR [...] continued using the inefficient gaseous diffusion method. Indeed, that was the price of the concealment for over 30 years of the industrial deployment of a new economic uranium enrichment technology in the USSR. (Bukharin 2004a).

Somit spielte die Sowjetunion im Machtkampf um den technologischen Vorlauf keine Rolle. Auf diesem Niveau waren alle technischen Voraussetzungen für eine zukünftige Effektivierung der Urananreicherung mittels Gasultrazentrifuge geschaffen und in der Folgezeit reifte die Technologie aus. Hinzu kam der Umstand, dass die Grenzen der Entwicklung der gebräuchlichen Diffusionsverfahren durchaus erkannt waren und Wettbewerbsfähigkeit erreichbar schien. Dazu wurde bis Mitte der 1970er Jahre die Weiterentwicklung des Aggregates Gasultrazentrifuge zur industriellen Großproduktion von angereichertem Uran realisiert, wobei hauptsächlich zu Materialfragen, zu Fragen der Kaskadierung und zu Länge und Durchmesser als Determinanten der Anreicherungsquote gearbeitet wurde. Im amerikanischen Zentrifugenprogramm werden heute beispielsweise Längen von bis zu 12 Meter verwendet, Steenbeck und Zippe arbeiteten im Vergleich dazu mit bis zu 30 Zentimeter langen Segmenten, Beams und Zippe mit bis zu 3,3 Meter.

In den einzelnen Staaten spielten die atomaren Entwicklungspläne, die Atomprogramme, eine zunehmende Rolle, was die staatliche Vereinnahmung erklärt. Es gab hierbei keine kontinuierliche Entwicklung, einzelne Staaten verfolgten sowohl individuelle, parallele und auch kollaborative Lösungen, auch mit Phasen unterschiedlicher Intensität (Krieger 2012). In diesem Rahmen wurden, nach Absehbarkeit der Leistungsfähigkeit der Zentrifugen, Ende der 1960er Jahre in Europa Gespräche auf Regierungsebene aufgenommen und es kam zum Abschluss eines trilateralen Vertrages zur Nutzung der Gasultrazentrifuge als Anreicherungsverfahren. Großbritannien, die Niederlande und die Bundesrepublik Deutschland gründeten unter Beteiligung der in Frage kommenden Industrien zwei Gesellschaften: Eine zur Herstellung der Ultrazentrifugen und den Bau der Anreicherungsanlagen, eine zweite zu deren Betrieb. Letztere, die URENCO Ltd., ist bis heute in komplexer Unternehmensstruktur am Markt zu finden und arbeitet immer noch ausschließlich mit Zentrifugentechnik.

Einen interessanten Schlusspunkt der Ära der grundlegenden Entwicklung der Urananreicherung mittels Gasultrazentrifuge setzt die Verleihung des „Alfried Krupp zu Bohlen und Halbach-Preises für Energieforschung“ 1977. Dies wird insbesondere dadurch deutlich, dass hier die meisten, noch lebenden, an dem Entwicklungsprozess beteiligten Wissenschaftler aus Ost und West gemeinsam ausgezeichnet wurden. Den Preis erhielten Konrad Beyerle (BRD), Karl Cohen (USA), Paul Harteck (inzwischen USA), Jakob Kistemaker (Niederlande), Hans Martin (BRD), Max Steenbeck (DDR), Stanley Whitley (GB) und Gernot Zippe (Österreich). Die Urkundeninschrift zur Begründung der Preisverleihung gibt auch einen Teil der Geschichte des Entstehens wieder:

Im Rahmen der Energievorsorge für die Zukunft wird die Kernenergie eine gewichtige Rolle spielen. Dabei haben die Verfahren zur Anreicherung des Brennstoffes Uran besondere Bedeutung. Das Ultrazentrifugenverfahren stellt eine Technologie zur Anreicherung von Uranisotopen dar, die besonders energiesparend, wirtschaftlich und umweltfreundlich ist. Der internationale Kreis der Träger des Alfred Krupp von Bohlen und Halbach-Preises für Energieforschung 1977 hat in den vergangenen Jahrzehnten zum Teil in Zusammenarbeit, zum Teil einzeln wissenschaftlich-technische Pionierarbeit bei der Entwicklung dieses zukunftsweisenden Verfahrens bis zur industriellen Reife geleistet.<sup>12</sup>

Max Steenbeck war der Auffassung, Zippe sollte „im Namen aller Preisträger ein paar Worte sagen“, weil „Dr. Zippe mit praktisch allen Preisträgern mehr oder weniger eng bei der Entwicklung der Zentrifuge zusammengearbeitet hat.“<sup>13</sup> Womit Steenbeck recht hatte, denn Zippe war wohl der „Wanderer zwischen den Welten“ (ebd.). Heute stellt die Gasultrazentrifuge das heute weltweit führende Verfahren zur Anreicherung von Uran dar (Tabelle 2).<sup>14</sup>

**Tabelle 2 .**

Quelle	2000 (%)	2010 (%)	Plan 2017 (%)
Diffusion	50	25	0
Ultrazentrifugation	40	65	93
Lasertechnologie	0	0	3
Hochangereichertes Uran aus Waffen	10	10	4

## Resümee

Überblickend ergibt sich ein inkonsistentes Bild zur Entwicklung der Ultrazentrifuge mit einem stark eingeschränkten Kreis von Beteiligten. Je eine Hauptantriebsrichtung für Entwicklung aus der Chemie und eine aus der Physik scheint auch heute noch für verschiedene Nutzungsbereiche zuständig. Somit stellt sich die Gasultrazentrifuge mit ihren konstruktiven und funktionalen Besonderheiten isoliert dar. Es sind dennoch in jüngster Zeit beginnende partielle Überlagerungen zwischen den Disziplinen auszumachen — ein Beispiel ist das „Human Virome Project“ (Anderson, Gerin und Anderson 2003). Direkte Wechselwirkungen zwischen den beiden Entwicklungslinien konnten dagegen nach der Entwicklung der Gasultrazentrifuge nicht konstatiert werden.

Das Wissen auf dem jeweiligen Stand der Technik war für die Analytische Ultrazentrifuge den damaligen Gepflogenheiten entsprechend für jedermann verfügbar, während dies für die Gasultrazentrifuge nicht galt. Verfügbarkeit entstand hier einerseits durch frühe Forschungsinteressen, andererseits durch Datentransfer, wahrscheinlich auch im Rahmen von Spionage, aber auch durch Bewegung beteiligter Wissenschaftler. Insbesondere Letzteres ist auf die Rückkehr deutscher Physiker aus sowjetischer Vereinnahmung und den dadurch ausgelösten Durchbruch bei der Entwicklung der Gaszentrifugentechnologie zurückzuführen. Hierbei wird der Rückstand amerikanischer und westeuropäischer Entwicklungen deutlich, was die Zurückhaltung Moskaus in Bezug auf die öffentliche Auseinandersetzung erklärt. Einerseits finden wir einen extremen Distributionsgrad vor, denn Analytische Ultrazentrifugen sind milliardenfach als Standardausstattung von Laboratorien in Benutzung, andererseits sind die Gasultrazentrifugen als hochspezielle Aggregate der Anreicherung radioaktiver Isotope gedacht und nur isoliert und unter starker Kontrolle im Einsatz.

Technologisch gesehen ist bei der Analytischen Ultrazentrifuge die horizontale Rotationsbewegung vorherrschend, bei der, bestimmt durch die Dauer und Geschwindigkeit des Zentrifugierens des jeweiligen Untersuchungsobjektes, unterschiedlich kleine Probengrößen in zeitlich abgeschlossenen Prozessen materiell konzentriert und späterhin entnommen werden. Die Anforderungen an das Aggregat sind weder im Material noch im Betrieb mit denen der Gasultrazentrifuge vergleichbar. Letztere zielt auf vertikale Rotation mit möglichst langen, überkritischen Rotoren ab, welche erst in

Verbindung mit hochkomplexen Kaskadierungsverfahren in einem permanenten, möglichst über Jahre andauernden Prozess einen interessanten Trennfaktor erzielen. Dabei sind auch die exakte Einhaltung der Drehzahl und die Austauschmenge des Uranhexafluorids bestimmend. Es konnte auch gezeigt werden, dass insbesondere die Eigenschaften der zu zentrifugierenden Substanzen, Moleküle, Teilchen oder ihrer Erscheinungsformen notwendigerweise zu völlig verschiedenen technologischen Ansätzen und Lösungen führen mussten.

Werfen wir abschließend einen Blick auf die Entwicklungsrichtungen der beiden Linien unter dem Blickwinkel der Forschungstechnologien: Die Entwicklung eigener Metrologien bildet auch die Parallelität der Technologien ab: Während für den Bereich der analytischen Ultrazentrifuge die Einheit „Svedberg“ (S) für den Sedimentationskoeffizienten steht, setzte sich für die Gasultrazentrifuge die durch den Zweck der Anreicherung bestimmte Einheit der „Separative Work Unit“ (SWU) durch. Im Gegensatz dazu lässt sich Interstitialität im Sinne Shinns nur für Jesse Beams nachweisen (Joerges und Shinn 2000). Bei Beams handelt es sich zudem um einen der wenigen Akteure, die sowohl an der Entwicklung der Analytischen Ultrazentrifuge und der Gasultrazentrifuge beteiligt waren, was ihm tatsächlich eine Sonderstellung verschafft. Andere Handelnde waren Svedberg, Steenbeck oder Zippe. Während Svedberg sich ausschließlich mit der Entwicklung des analytischen Aggregates an der Universität von Uppsala (Schweden) beschäftigte, kamen Steenbeck und Zippe eher unfreiwillig zur Entwicklung der Gasultrazentrifugentechnik. Nach ihrer Rückkehr aus der sowjetischen Vereinnahmung verließ Steenbeck das Forschungsfeld vollständig, Zippe jedoch scheint im Sinne der Forschungstechnologien interessant, da er das Arbeitsfeld bis zu seinem Lebensende vehement verfolgte. Er arbeitete ab 1957 auch in den USA und auch mit Beams. Späterhin hatte er in diversen Funktionen maßgeblichen Anteil an der „Reifung“ der Technologie für die DEGUSSA und dann im trilateralen Konsortium der URENCO. Zippe jedoch ist in keiner Weise an einem *dis-* oder *reembedding* interessiert — Generizität spielt für ihn keine Rolle, da er ausschließlich an der Optimierung des Gasultrazentrifugenverfahrens zur Anreicherung von Isotopen arbeitet und sich Wettbewerbsvorteile innerhalb des Anwendungsfeldes verspricht. Auch sein Publikationsverhalten spiegelt dies wieder: Von Gernot Zippe werden fast ausschließlich Patente zur Sicherung der Verwertungsrechte angemeldet und geheime Fortschrittsberichte für die Geldgeber der Entwicklung geschrieben, was charakteristisch für die Linie der Gasultrazentrifugen zu sein scheint. Unsere Feststellungen bestätigen die Befunde der Stuttgarter Arbeitsgruppe, in denen sich Institialität nach der Definition von Shinn als nicht hinreichend trennscharf für die Identifikation von Forschungstechnologien erweist.

Das Kriterium der Generizität betrachten wir kritisch. Für die Entwicklungslinie der Analytischen Ultrazentrifuge ist dies sicherlich zutreffend. Der

Prozess des *reembedding* der Ultrazentrifuge in den neuen Anwendungskontext der Isotopentrennung führte allerdings zu signifikanten technischen Änderungen des ursprünglichen Instruments mit einem Verlust an Generizität, sodass zwei voneinander unabhängige Entwicklungslinien, nahezu berührungsfrei ohne Verbindungen entstanden (Shinn 2008). Somit gingen aus einem generischen Apparat, der Ultrazentrifuge, zwei eigenständige Forschungstechnologien hervor, die sich insbesondere durch ihre individuelle Generizität unterscheiden.

## Danksagung

Wir danken Olaf Breibach (1957–2014) für zahlreiche Diskussionen und Anregungen, der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung des Projektes „Forschungstechnologien und Wissenschaftspolitik in der Biografie des Physikers Max Steenbeck (1904 bis 81)“, aus dem dieser Aufsatz hervorging, und den anonymen Referees für den förderlichen Umgang mit dem Manuskript.

---

## Anmerkungen

- 1 Vgl. -93. Jahrestagung der DGGMNT zum Thema „Research Technologies — Forschungstechnologien“ im Jahr 2011 und den daraus hervorgegangenen Sammelband: Hentschel 2012.
- 2 Beispielhaft hier neben Joerges und Shinn: Beams, Jesse W. (1975); Groth, Wilhelm (1973); Kemp, R. Scott (2009); Krige, John (2012); Oleynikov, Pavel V. (2000); Elzen, Boelie (1986).
- 3 So zum Beispiel auch verschiedene Grünalgen (*Fucus Serratus*; *Fucus Veliculosus*; *Fucus Platicarpus*).
- 4 Siehe etwa Hentschel (1996) oder Walker (1990) sowie dort angeführte weiterführende Literatur.
- 5 *Short bowl*: mit einem Rotor von 42 Zoll Länge, 7,2 Zoll Durchmesser und ca. 1,2 cm starker Duraluminium-Wandung. *Long Bowl*: dieser Rotor muss bis zur Arbeitsdrehzahl eine oder mehrere (biege)kritische Drehzahlphasen durchlaufen, ist 11 Fuß 4 Zoll lang und weist ansonsten sehr ähnliche Parameter auf.
- 6 CIA Information Report „The Development of an Ultracentrifuge at the Nuclear Institute of Manfred von Ardenne in Sinop“, 10 June 1955. (Response on Authors Request to Central Intelligence Agency from 3 September 2014 based on Freedom of Information Act).
- 7 CIA Information Report „The Problem of Uranium Isotope Separation by Means of Ultracentrifuge in the USSR“, October 8, 1957. (Response on Authors Request to Central Intelligence Agency of September 3, 2014 based on Freedom of Information Act).
- 8 Progress Report from December 1, 1958 and July 1, 1959 submitted to the Physics Branch; Division of Research; USA Atomic Energy Commission; USAEC-Report ORO 315 steht für United States Atomic Energy Commission Report Oak Ridge Operations Office No. 315.
- 9 Die Bekanntmachung und die Ausgabe der Auslegeschrift des deutschen Patents erfolgte am 17. Dezember 1959.
- 10 Der Artikel „New device may expand nuclear club“ in der Washington Post vom 11. Oktober 1960 macht diese Inanspruchnahme evident.

- 11 So die Bundesregierung via Informationsfunk der Bundesregierung, Tagesdienst vom 13. Oktober 1960, Meldung Nr. 1310101, Nr. 236/60, Politisches Archiv des Auswärtigen Amtes, B22, Bd. 294.
- 12 Archiv der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften. Nachlass Max Steenbeck. Nr. 26. Urkunde. Großschrift.
- 13 Archiv der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften. Nachlass Max Steenbeck. Nr. 27. Handschriftliche Notiz.
- 14 URL: <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Conversion-E22nrichment-and-Fabrication/Uranium-Enrichment/>. Stand: 25.08.2015.

---

## Literatur

- Albrecht, Ulrich, Andreas Heinemann-Grüder und Arend Wellmann, 1992. *Die Spezialisten: Deutsche Naturwissenschaftler und Techniker in der Sowjetunion nach 1945*. Berlin: Dietz.
- Anderson, Norman G., 1966. *Centrifuge Apparatus*. US Patent 3,237,855 vom 1. März 1966.
- Anderson, Norman G., John L. Gerin und N. L. Anderson, 2003. Global Screening for Human Viral Pathogens. *Emerg. Infect. Dis.* 9(7), 768–773.
- Anderson, Norman G. (Hg), 1966. *The Development of Zonal Centrifuges and Ancillary Systems for Tissue Fractionation and Analysis*. US Dept. of Health, Education, and Welfare, Public Health Service, National Cancer Institute Monograph 21.
- Beams, Jesse W., 1938. High Speed Centrifuging. *Rev. Mod. Phys.* 10(4), 245–263.
- Beams, Jesse W. und F. Haynes, 1936. The Separation of Isotopes by Centrifuging. *Phys. Rev.* 50(5), 491–492.
- Beams, Jesse W., 1925. *A method for measurement of time intervals of the order of magnitude  $10^{-8}$  seconds and its applications (1) to the measurement of time interval between excitation and emission in fluorescent solution, and (2) to the determination of the relative times of first appearance of spectrum lines*. Charlottesville: University of Virginia, Doctoral Dissertation.
- Beams, Jesse W. und E. G. Pickels, 1935. The Production of High Rotational Speeds. *Rev. Sci. Instrum.* 6(10), 299.
- Beams, J. W. und A. J. Weed, 1931. A simple Ultra-Centrifuge. *Science* 74(1906), 44–46.
- Beams, Jesse W., 1975. *Early History of the Gas Centrifuge Work in the USA*. Charlottesville: University of Virginia, Dept. of Physics.
- Beneke, Klaus, 1999. *Biographien und wissenschaftliche Lebensläufe von Kolloidwissenschaftlern, deren Lebensdaten mit 1996 in Verbindung stehen: Eugen Angulescu ... Thomas Wedgwood*. Nehnten: Knof. (Mitteilungen der Kolloid-Gesellschaft, 1999).
- Beyerle, K., W. Groth, P. Harteck, H. J. D. Jensen, G. Beggerow, V. Faltings et al., 1949: Über Gaszentrifugen (Auszug). Anreicherung der Xenon-, Krypton- und der Selen-Isotope nach dem Zentrifugenverfahren. In: *Chemie Ing. Techn.* 21 (17–18), S. 331–334.
- Bredig, Georg, 1895. Der Einfluß der Centrifugalkraft auf chemische Systeme. *Zeitschrift für physikalische Chemie*(17), 459–472.
- Bukharin, Oleg, 2004(a). Russia's Gaseous Centrifuge Technology and Uranium Enrichment Complex. *Program on Science and Global Security, Woodrow Wilson School of Public and International Affairs, Princeton University*, [URL: [http://www.partnershipforglobalsecurityarchive.org/Documents/bukharinrussianenrichmentcomplexjan\\_2004.pdf](http://www.partnershipforglobalsecurityarchive.org/Documents/bukharinrussianenrichmentcomplexjan_2004.pdf) (last accessed 18.08.2015)].
- Bukharin, Oleg, 2004(b). Understanding Russia's Uranium Enrichment Complex. *Science & Global Security* 12(3), 193–214.
- Bukharin, Oleg, 2004(c). US Atomic Energy Intelligence Against the Soviet Target, 1945–1970. *Intelligence and National Security* 19(4), 655–679.
- Bundesregierung, 1960. *Meldung Nr. 1310101. Informationsfunk der Bundesregierung, Tagesdienst vom 13. Oktober 1960, Meldung Nr. 1310101, Nr. 236/60*.
- Chapman, S., 1919. XIII. The Possibility of Separating Isotopes. *Philosophical Magazine Series 6* 38(223), 182–186.

- CIA Information Report 1955. *The Development of an Ultracentrifuge at the Nuclear Institute of Manfried von Ardenne in Sinop*. CIA-RDP80-00810A006600620005-9.
- CIA Information Report 1957. *The Problem of Uranium Isotope Separation by Means of Ultracentrifuge in the USSR*. DH-G-3,633,414.
- Cohen, Karl und George M. Murphy, 1951. *The Theory of Isotope Separation as Applied to the Large Scale Production of U<sup>235</sup>*. 1st ed. New York: McGraw-Hill (National Nuclear Energy Series. Manhattan Project Technical Section. Division III [Special Separations Project], v. 1 B).
- Coudres, Theodor des, 1893. Unpolarisierbare electrolytische Zellen unter dem Einflusse der Centrifugalkraft. *Annalen der Physik (Wiedemanns Annalen der Physik und Chemie)*(Volume 285 Issue 6), 284–294.
- Dirac, Paul A. M., 1995. The Motion in a Self-Fractioning Centrifuge. In Dalitz, R. H., 1995. *The Collected Works of P.A.M. Dirac, 1924-1948*. Cambridge, New York: Cambridge University Press. S. 1063 bis 1074.
- Dumanski, A., E. Zabotinski und M. Ewsejew, 1913. Eine Methode zur Bestimmung der Größe kolloider Teilchen. *Zeitschrift für Chemie und Industrie der Kolloide* 12(1), 6–11.
- Einstein, Albert, 1906. Zur Theorie der Brownschen Bewegung. *Annalen der Physik*(324), 371–381.
- Elzen, Boelie, 1986. Two Ultracentrifuges: A Comparative Study of the Social Construction of Artefacts. *Social Studies of Science* 16(4), 621–662.
- Gay-Lussac, Joseph L., 1819. Premier Mémoire sur la Dissolubilité des Sels dans l'eau. *Annales de Chimie et de Physique*(11), 296–315.
- Groth, Wilhelm (Hg.), 1958. *Anreicherung der Uran-Isotope nach dem Gaszentrifugenverfahren*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Groth, Wilhelm, 1973. Gaszentrifugenanlagen zur Anreicherung von Uran-235. *Naturwissenschaften* 60(2), 57–64.
- Hahn, Otto und Fritz Strassmann, 1938. Über die Entstehung von Radiumisotopen aus Uran durch Bestrahlen mit schnellen und verlangsamen Neutronen. *Naturwissenschaften* 26(46), 755–756.
- Heer, F. J. de, W. Huizenga und J. Kistemaker, 1956. Charge Exchange and Ionization Cross-Section Determination for Positive Ions and Atoms in the Energy Region 2.5 to 25 keV. *Applied Scientific Research, Section B* 5(1), 337–339.
- Henriot, Émile und Eugène Huguenard, 1925. Sur la Réalisation de très grand Vitesses de Rotation. *Comptes Rendus des Séances de l'Académie des Sciences*(180), 1389–1392.
- Hentschel, Klaus (Hg.), 2012. *Zur Geschichte von Forschungstechnologien: Generizität, Interstitialität, Transfer*. 1. Aufl. Diepholz: GNT-Verl. 113–139.
- Hentschel, Klaus (Hg.), 1996. *Physics and National Socialism: An Anthology of Primary Sources*. Basel, Boston: Birkhäuser Verlag. (Science networks historical studies, Bd.18).
- Humphreys, Richard, 1939. Separation of Bromine Isotopes by Centrifugation. *Phys. Rev.* 56(7), 684–691.
- Joerges, Bernhard und Terry Shinn, 2000. *Research Technology: Instrumentation between Science, State and Industry*. Berlin: Schriftenreihe der Forschungsgruppe Metropolenforschung des Forschungsschwerpunkts Technik – Arbeit–Umwelt Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung (WZB).
- Joerges, Bernhard und Terry Shinn, 2001. *Instrumentation: Between science, state and industry*. Dordrecht, Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Kemp, R. Scott, 2009. Gas Centrifuge Theory and Development: A Review of U.S. Programs. *Science & Global Security* 17(1), 1–19.
- Kornberg, Warren, 1960. New Device may expand the nuclear Club: Centrifuge offers cheaper process to refine Uranium. *The Washington Post; Times Herald* (11.October1960).
- Kröger, Bernd, 2012. Phänomenologie des „Forschungstechnologen“ – Typologie oder Bandbreite. In Hentschel, Klaus (Hg), 2012. *Zur Geschichte von Forschungstechnologien: Generizität, Interstitialität, Transfer*. 1. Aufl. Diepholz: GNT-Verl. 187–205.
- Krige, John, 2012. Hybrid Knowledge: The Transnational Co-Production of the Gas Centrifuge for Uranium Enrichment in the 1960s. *Brit. J. Hist. Sci* 45(03), 337–357.
- Lindemann, F. A. und F. W. Aston, 1919. XLVIII. The Possibility of Separating Isotopes. *Philosophical Magazine Series* 6 37(221), 523–534.
- Martin, Hans, 1950. Konvektionsvorgänge in der Gaszentrifuge Thermokonvektion im starken Gravitationsfeld. *Zeitschrift für Elektrochemie und angewandte physikalische Chemie* 54(2), 120–129.

- Mulliken, Robert S., 1922. The Separation of Isotopes by Thermal and Pressure Diffusion. *J. Am. Chem. Soc.* 44(5), 1033–1051.
- Mulliken, Robert S. und William D. Harkins, 1922. The Separation of Isotopes. Theory of Resolution of Isotopic Mixtures by Diffusion and similar Processes. Experimental Separation of Mercury by Evaporation in a Vacuum. *J. Am. Chem. Soc.* 44(1), 37–65.
- Oleynikov, Pavel V., 2000. German Scientist in the Soviet Atomic Project. *The Nonproliferation Review* 7(2), 1–30.
- Progress Report 1958 und 1959. *The Development of Short Bowl Ultracentrifuges 1 = UVA/ORL-2400-59; 2 = UVA/ORL-2400-58. submitted to the Physics Branch; Division of Research; U.S. Atomic Energy Commission by G. Zippe (1 + 2) und J.W.Beams und A.R. Kuhltau (nur 2; University of Virginia) USA.*
- Ruff, Otto, 1909. Über einige neue Fluoride. *Ber. Dtsch. Chem. Ges.* 42(1), 492–497.
- Schachman, Howard K., 1959. *Ultracentrifugation in Biochemistry*. New York, NY: Academic Press.
- Shinn, Terry und Bernward Joerges, 2002. The Transverse Science and Technology Culture: Dynamics and Roles of Research-Technology. *Social Science Information* 41(2), 207–251.
- Shinn, Terry, 2008. *Research-Technology and Cultural Change: Instrumentation, Genericity Transversality*. Oxford: Bardwell. (GEMAS studies in social analysis).
- Smoluchowski, Marian von, 1906. Zur kinetischen Theorie der Brownschen Molekularbewegung und der Suspensionen. *Annalen der Physik*(326), 756–780.
- Smyth, Henry De Wolf, 1989. *Atomic Energy for Military Purposes: The Official Report on the Development of the Atomic Bomb under the Auspices of the United States Government, 1940-1945*: Stanford University Press. (Stanford Nuclear Age Series).
- Steenbeck, Max, 1978. *Impulse und Wirkungen: Schritte auf meinem Lebensweg*. 2. Aufl. Berlin: Verlag der Nation.
- Stoff, Michael B. und Jonathan F. Fanton (Hg.), 1991. *The Manhattan Project: A Documentary Introduction to the Atomic Age*. Philadelphia: Temple Univ. Pr.
- Svedberg, Theodor und James B. Nichols, 1927. *Analytical Centrifuge*. US Patent 1,648,369 vom 8. November 1927.
- Urey, Harold C. 1939. Separation of Isotopes. *Reports on Progress in Physics* 6(1), 48.
- Urey, Harold C. und Karl Cohen, 1951: *Centrifuge for Separating Gas Mixtures*. US Patent 2,536,423 vom 2. Januar 1951.
- Walker, Mark, 1990: *Die Uranmaschine*. Mythos und Wirklichkeit der deutschen Atombombe, Berlin: Siedler Verlag.
- World Nuclear Association 2014. *Uranium Enrichment: Conversion-Enrichment-and-Fabrication*. [URL: <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Conversion-Enrichment-and-Fabrication/Uranium-Enrichment/> (last accessed 25.08.2015)].
- Zippe, Gernot, Max Steenbeck und Rudolf Scheffel, *Schnellaufende Gaszentrifuge*. DBP 1 071 593 für die Deutsche Gold- und Silber-Scheideanstalt vormals Roessler, Frankfurt/M. vom 9. Juni 1960.
- Zippe, Gernot, 2008. *Rasende Ofenrohre in stürmischen Zeiten*: ein Erfinderschicksal aus der Geschichte der Uranisotopentrennung im heißen und im Kalten Krieg des 20. Jahrhunderts. Eigenverlag E. Kubasta.

Bernd Helmbold  
 Friedrich-Schiller-Universität Jena  
 Institut für Geschichte der Medizin  
 Naturwissenschaft und Technik  
 Ernst-Haeckel-Haus, Berggasse 7  
 07745 Jena  
 Germany  
 E-Mail: Bernd.Helmbold@uni-jena.de

Christian Forstner  
Friedrich-Schiller-Universität Jena  
Institut für Geschichte der Medizin  
Naturwissenschaft und Technik  
Ernst-Haeckel-Haus, Berggasse 7  
07745 Jena  
Germany  
E-Mail: [Christian.Forstner@uni-jena.de](mailto:Christian.Forstner@uni-jena.de)

