

## Herstellung und Verwendung des Leichtmetalles Beryllium.

Von Dr. KURT ILLIG, Berlin-Wilmersdorf.

(Eingeg. 14. August 1927.)

Im nächsten Jahre wird ein Jahrhundert verflossen sein, seit Wöhler zuerst die Darstellung des Berylliums gelungen ist. Während jedoch das von dem gleichen Forscher im Jahre vorher (1827) erstmalig als Metall isolierte Aluminium heute zu einem der bedeutendsten Werkstoffe geworden ist, hat Beryllium bisher sehr wenig von sich reden gemacht. Tatsächlich hat die Darstellung dieses interessanten Leichtmetalles bis in die jüngste Zeit hinein derartige Schwierigkeiten bereitet, daß es sich erst jetzt, in dem Zeitalter vollkommener Metalltechnik, als neuer Werkstoff den jedermann bekannten Metallen zugesellt, und auf Grund seiner besonderen Eigenschaften noch in mancher Hinsicht Bedeutung erlangen wird und in beschränktem Umfange bereits erlangt hat.

Entdeckt wurde das Beryllium 1798 von Vauquelin in dem Mineral Beryll, von dem auch sein Name hergeleitet ist. Während der gemeine Rohberyll trotz seiner nicht unbedeutenden Vorkommen nur wenig bekannt ist, reicht die Kenntnis von dem grünen und blaugrünen Beryll, dem Smaragd und Aquamarin, in das früheste Altertum zurück. Diese Mineralien bestehen alle aus dem Aluminium-Beryllium-Doppelsilikat  $3\text{BeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ , das bei den gefärbten Modifikationen noch geringe Beimengungen von Chrom- oder Eisenoxyd aufweist. Der Chrysoberyll oder Alexandrit hingegen hat die Zusammensetzung  $(\text{AlO}_2)_2 \cdot \text{Be}$ , weist also einen wesentlich höheren Berylliumgehalt auf als die vorgenannten Edelsteine. Außerdem findet sich Beryllium noch im Phenakit ( $\text{Be}_2\text{SiO}_5$ ), im Euklas und Gadolinit.

Ermittlungen, welche während der letzten zwei Jahre angestellt wurden, haben ergeben, daß Rohberyll in verhältnismäßig großen Mengen auf der ganzen Welt gefunden wird. Die bedeutendsten, bisher bekannten Lagerstätten befinden sich in Canada, in den Vereinigten Staaten von Nordamerika, Brasilien, England, Norwegen, Spanien und im Ural. Auch in Deutschland und Tirol sind verschiedene Fundorte bekannt geworden, ohne daß bisher deren Mächtigkeit einwandfrei untersucht wurde. Vielfach findet sich das Mineral in großen, basaltähnlich gewachsenen, hexagonalen Säulen; überwiegend sind jedoch große Beryllnester in Feldspatlagern eingebettet. Letztere Vorkommen sind für die Berylliumgewinnung von bevorzugtem Interesse, weil sie nur geringe Mengen Eisen als Verunreinigung enthalten und daher einfacher und billiger für die eigentliche Berylliummetallgewinnung aufgeschlossen werden können.

Die Darstellung des Berylliums ist schon von sehr vielen Forschern versucht worden. Ehe mittels Elektrolyse an die Lösung des Problems herangegangen wurde, ist lediglich der von Wöhler<sup>1)</sup> eingeschlagene Weg der Reduktion von Berylliumverbindungen weiter verfolgt worden. Wöhler reduzierte das Berylliumchlorid mittels darüber geleiteter Kaliumdämpfe und erhielt hierbei das Metall in Form kleiner Flitterchen. Reynolds<sup>2)</sup> und später Nilson und Petterson<sup>3)</sup> ließen festes Natriummetall auf Berylliumchlorid einwirken, während Krüss und Morath<sup>4)</sup> anfäng-

lich Kalium-Berylliumfluorid mit Magnesiummetall erhitzten und dann dazu übergingen, Berylliumoxyd mit Magnesiummetall zu reduzieren, wobei sie auch kleine hexagonale Beryllkristalle fanden.

Mehrere Forscher versuchten auch auf aluminothermischem Wege zum Ziel zu gelangen, ohne daß ein Erfolg verzeichnet werden konnte. Es sind hier zu nennen die Arbeiten von Just und Meyer, welche das D. R. P. 208 402 erhielten, von Vautin (E. P. 8306/94) und der Firma E. Merck (D. R. P. 410 563), sowie die umfangreichen Arbeiten von A. Moormann<sup>5)</sup> und M. Engelhardt<sup>6)</sup>. Lebeau<sup>7)</sup> und später Liebmann<sup>8)</sup> glaubten auf verschiedenen Wegen mit Kohlenstoff als Reduktionsmittel zum Ziele zu gelangen, ohne jedoch einen greifbaren Erfolg erzielen zu können.

Auch die Reduktionsverfahren auf thermischem Wege, die von Warren<sup>9)</sup> und Kroll<sup>10)</sup> angegeben wurden, führen selbst bei sorgfältigster Arbeitsweise nur zu Metallflittern.

Während bis auf den heutigen Tag kein rein thermisches Verfahren bekannt wurde, das Aussichten auf einwandfreie technische Berylliumgewinnung bietet, führte die Schmelzflußelektrolyse geeigneter Berylliumverbindungen schließlich zum sicheren Erfolg. Die ersten diesbezüglichen Versuche sind bereits 1890 von Grätzel<sup>11)</sup> angestellt worden. Es folgten die Arbeiten von Warren<sup>12)</sup> und Borchers<sup>13)</sup>, die jedoch alle keinen Erfolg zeigten. Erst Lebeau<sup>14)</sup> gelang es, während seiner 1898 und 1899 ausgeführten Untersuchungen, reines Beryllium, wenn auch in äußerst kleinen Mengen, auf elektrolytischem Wege zu erhalten. Als Elektrolyt verwendete er ein Gemisch von Natrium- und Berylliumfluorid. Als Anode wurde Graphit verwendet, während der von ihm benutzte Nickeltiegel unmittelbar kathodisch geschaltet wurde<sup>15)</sup>.

Während alle bisher genannten Forscher Beryllium überhaupt nicht oder höchstens in Form kleiner Flitterchen bzw. mikroskopisch kleiner Kriställchen erhalten konnten, gelang es Fichter<sup>16)</sup> 1913 auf indirektem Wege, Reguli von nahezu 1 g Gewicht herzustellen, indem er kleine Berylliumkristalle zu Zylinderchen preßte und diese im Wasserstoffstrom zusammen-

<sup>5)</sup> A. Moormann: Darstellung von metallischem Beryllium, Diss. München 1913.

<sup>6)</sup> M. Engelhardt: Darstellung von metallischem Beryllium, Diss. München 1914.

<sup>7)</sup> Compt. rend. Acad. Sciences 125, 1172 [1897]; ebenda 126, 1203 [1898].

<sup>8)</sup> D. R. P. 94 102; D. R. P. 101 326; D. R. P. 94 507.

<sup>9)</sup> Chem. News 70, 102 [1894].

<sup>10)</sup> D. R. P. 381 049.

<sup>11)</sup> D. R. P. 58 600 [1890]; Ber. Dtsch. chem. Ges. 25, 225 [1892].

<sup>12)</sup> Chem. News 72, 310 [1895]; Jahrb. f. Fortsch. d. Chem. 1895, 750.

<sup>13)</sup> Ztschr. Elektrochem. 2, 32 [1895]; Jahrb. f. Fortsch. d. Chem. 750 [1895].

<sup>14)</sup> Ann. Physik Chem., Serie 7, 16, 495 [1899]; Compt. rend. Acad. Sciences 126, 744 [1898].

<sup>15)</sup> Eine zusammenfassende Beschreibung sämtlicher bisher erwähnten Arbeiten befindet sich in einem Aufsatz des Verfassers, Ztschr. Metallkunde 18, 159 [1926].

<sup>16)</sup> Ber. Dtsch. chem. Ges. 46, 1604 [1913]; Ztschr. anorgan. allg. Chem. 93, 84 [1915].

<sup>1)</sup> Pogg. Ann. 13, 577 [1828].

<sup>2)</sup> Phil. Mag. (5), 3, 8 [1877]; Chem. Ztrbl. 1877, 210.

<sup>3)</sup> Ber. Dtsch. chem. Ges. 11, 381, 1906 [1878].

<sup>4)</sup> Ber. Dtsch. chem. Ges. 23, 731 [1890]; Liebigs Ann. 260, 190 [1890].

schmolz. An solchen Reguli stellte Österheld<sup>17)</sup> verschiedene Untersuchungen an, die vor allem zur Ermittlung des Schmelzpunktes des Berylliums bei  $1278^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}$  führten.

Die Aufzählung dieser zahlreichen Arbeiten auf dem Gebiete der Berylliumherstellung legt deutlich Zeugnis dafür ab, wie besonders schwierig sich die Lösung dieses Problems gestaltete. Es ist daher ein besonderes Verdienst von Stock<sup>18)</sup> und Goldschmidt, daß es ihnen mit ihren Mitarbeitern Prieß und Praetorius als ersten Forschern gelungen ist, das Beryllium in Form großer Reguli auf elektrolytischem Wege unmittelbar herzustellen.

Das Stock-Goldschmidtsche Verfahren zur Berylliumherstellung ist ein Schulbeispiel dafür, wie durch streng folgerichtige wissenschaftliche Überlegung rein theoretisch der Ablauf eines Reaktionsmechanismus vor dem eigentlichen Experiment festgelegt werden kann. Die Hindernisse, die dann noch zu überwinden waren, wurden in erster Linie durch zahlreiche technische und Materialschwierigkeiten bedingt, während das Prinzip des Verfahrens unangetastet blieb. Die Erfinder gingen von der Überlegung aus, daß Beryllium mit seinem Schmelzpunkt von ca.  $1285^{\circ}$  erfolgreich nur aus einem solchen schmelzflüssigen Elektrolyten abgeschieden werden kann, der bei dieser Temperatur nicht oder wenigstens in nur geringem Maße verdampft, der aber gleichzeitig eine verhältnismäßig geringe Viscosität besitzt und dessen Anion leicht vernichtet werden kann, um eine Wiederauflösung des abgeschiedenen Metalls zu vermeiden. Ferner ist eine relativ kleine Affinität zwischen Anion und Kation bei möglichst leichter Dissozierbarkeit erforderlich. Diese Bedingungen erfüllen in idealer Weise die Doppelfluoride des Berylliums mit Barium und Natrium. Während die Barium-Berylliumfluoride bei der Temperatur der Elektrolyse nur wenig verdampfen, besitzen sie eine immerhin ziemlich große Viscosität und dissoziieren auch erst bei verhältnismäßig großen Hitzegraden in erwünschtem Maße. Das Natrium-Berylliumfluorid hingegen ist zwar schon bei ziemlich niederen Temperaturen stark dissoziiert, ergibt also eine gute Leitfähigkeit, verdampft jedoch sehr stark bei zunehmenden Temperaturen. Es wird daher die Elektrolyse mit dem Natrium-Doppelsalz begonnen, und mit steigender Temperatur ein immer höherer Zusatz von den Barium-Berylliumfluoriden zweckmäßig sein. Im Mittel wird also mit einem geeigneten Mischungsverhältnis beider Salzarten die Elektrolyse durchgeführt. Dieser Erfindungsgedanke ist in dem D. R. P. 375 824 und gleichartigen Auslandspatenten in zahlreichen Ländern unter Schutz gestellt worden.

Um diesen aussichtsreichen Weg zur Berylliumgewinnung mit den zur systematischen Durchbildung des Verfahrens erforderlichen Mitteln und Hilfsmitteln in großzügiger Weise fortsetzen zu können, wurde 1923 die Beryllium-Studiengesellschaft gegründet, der neben den beiden Erfindern namhafte Firmen angehörten, und die unter Führung der Siemens & Halske A.-G. stand, in deren Laboratorium auch die umfangreichen Versuchsarbeiten durchgeführt wurden. Nachdem in nahezu dreijähriger intensivster Tätigkeit die Entwicklungsarbeiten zur Be-

rylliumgewinnung soweit zum Abschluß gekommen waren, daß an eine Übertragung der Berylliumherstellung in den technischen Maßstab herangegangen werden konnte, hatte die Beryllium-Studiengesellschaft die s. Zt. gesteckten Ziele erreicht und die weiteren Arbeiten der Siemens & Halske A.-G. übertragen, woselbst in Vertragsgemeinschaft mit Prof. A. Stock und den Erben des inzwischen verstorbenen Prof. H. Goldschmidt neben der Ausbildung der technischen Arbeitsmethoden und der ständigen Verbesserung ihrer Wirtschaftlichkeit vor allen Dingen die Eigenschaften und Verwertbarkeit des Berylliums eingehend untersucht wurden und auch heute noch werden.

Im nachstehenden soll eine kurze Übersicht über das bisher noch nicht veröffentlichte Ergebnis dieser Arbeiten auf dem Gebiete der Berylliumgewinnung gegeben werden.

Um die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten einwandfrei durchführen zu können, mußten vor allem die bislang bekannten analytischen Methoden zur Berylliumbestimmung einer eingehenden Nachprüfung unterzogen werden. Es ergab sich hierbei, daß die Bestimmungsmethoden entweder ungenau oder zu umständlich und langwierig waren, um mit den Elektrolyseversuchen Schritt halten zu können. Es wurden daher neue Analysenmethoden ausgearbeitet, die es gestatten, sowohl den wahren Berylliumgehalt im Mineral, in den Salzen, Schlacken und Legierungen, wie die Reinheit des dargestellten Berylliummetalles in kürzester Zeit, teilweise sogar kolorimetrisch zu bestimmen. Aber auch die recht schwierige Bestimmung des Aluminiums neben dem Beryllium sowie die exakte Ermittlung auch kleinster Mengen als Verkleinerungen im Beryllium vorhandenen Eisens, Bariums und Kohlenstoffes gelingt heute in wenigen Stunden. Auf die einzelnen Bestimmungsmethoden kann jedoch in diesem Zusammenhange leider nicht näher eingegangen werden.

Nach diesen Vorarbeiten wurden die schmelzflußelektrolytischen Versuche in Angriff genommen. Gearbeitet wurde in Graphittiegeln, die in Kryptol eingebettet waren. Dies Kryptol wiederum befand sich in einem Eisenmantel. Die anodische Stromzuführung erfolgte durch eine Kohleplatte, auf die dieses Öfchen aufgesetzt wurde. In den anodisch geschalteten Graphittiegel wurde zentrisch eine wassergekühlte Eisenkathode eingeordnet. Die Elektrolyse wurde lange Zeit streng nach dem Stock-Goldschmidtschen Verfahren durchgeführt, und durch Variierung des Mischungsverhältnisses der Doppelfluoride die günstigste Arbeitsbedingung gesucht. Beträchtliche Schwierigkeiten bereitete die Erzielung schlackenfreier kathodischer Reguli, und erst langes, mühevollles Studium sämtlicher Einflüsse, wie Stromdichte, Spannung, Temperatur, geeignete Form der Kathoden usw. führte zum Erfolg und zur Ermittlung der immer wieder reproduzierbaren richtigen Arbeitsweise. Störend waren der recht beträchtliche Materialverlust durch Verdampfung und die verhältnismäßig schnelle Verarmung der Schmelze an Beryllium bei gleichzeitiger Anreicherung an Barium. Außerdem war die Herstellung der Doppelfluoride in wasserfreiem Zustande recht kostspielig. Es wurde daher allmählich der ursprüngliche Elektrolyt verlassen, und nach den mannigfachen Versuchen eine Arbeitsmethode gefunden, bei welcher unter teilweiser Verwendung anderer Berylliumverbindungen die vorgenannten Nachteile größtenteils vermieden wurden, ohne daß hierbei prinzipiell das Stock-Gold-

<sup>17)</sup> Ebenda 97, 1 [1916].

<sup>18)</sup> Ber. Dtsch. chem. Ges. 58, 157 [1925].

s c h m i d t s c h e Verfahren verlassen wurde. Die Elektrolysendauer ist jetzt praktisch nur noch durch den allmählichen Abbrand der Graphittiegel begrenzt. Eine verhältnismäßig geringe Menge an Elektrolyt verdampft zwar auch jetzt noch, läßt sich jedoch leicht niederschlagen und in vollem Umfange der Elektrolyse wieder zuführen. Auch die nach Beendigung einer Arbeitscharge zurückbleibende Restschmelze läßt sich ohne besondere Schwierigkeiten wieder aufarbeiten, um neuen Elektrolysen zugeführt zu werden.

Nachdem prinzipiell das Verfahren festgelegt war, wurde dazu übergegangen, alle diejenigen Fragen näher zu studieren, die noch für die Übertragung der elektrolitischen Berylliumgewinnung in den großtechnischen Maßstab geklärt werden mußten. Heute sind auch diese Untersuchungen soweit abgeschlossen, daß jederzeit bei eintretendem Bedarf zur Einrichtung einer Berylliumfabrikation in jedem erforderlichen Umfange geschritten werden kann.

Neben den rein elektrolytischen Versuchen wurde die Frage der Herstellung der für die Elektrolyse erforderlichen Berylliumverbindungen eingehend bearbeitet. Während ursprünglich von käuflichem Berylliumoxyd als Rohstoff ausgegangen wurde, machten es die Erfolge bei der Berylliummetallgewinnung erforderlich, daß im Falle der Notwendigkeit einer größeren Berylliumfabrikation direkt aus dem Rohberyll die notwendigen Elektrolyte hergestellt werden können. Es gelang auch ohne weiteres, mit geeigneten Aufschlußmethoden, das Beryllium in Form geeigneter Zwischenverbindungen von den Begleitern Aluminium und Kieselsäure sowie den Verunreinigungen zu befreien. Eine wirtschaftliche Betrachtung dieses Arbeitsganges ließ jedoch erkennen, daß eine ökonomische Berylliumgewinnung niemals möglich sein würde, wenn die von S t o c k und G o l d s c h m i d t ursprünglich angegebenen wasserfreien Berylliumdoppelfluoride weiterhin bei der Elektrolyse Verwendung finden müßten. Es kamen sich also die technischen Erfordernisse bei der Elektrolyse und hinsichtlich der Gewinnungskosten der erforderlichen Salze einander entgegen. Es war daher ein doppelter Erfolg zu buchen, als gefunden wurde, daß gerade diejenigen Berylliumverbindungen für die Elektrolyse am geeignetsten sind, deren Herstellung durch geeigneten Aufschluß des Rohberylls die geringsten Kosten verursacht. Auch das für die Gewinnung dieser billigeren Berylliumverbindungen geeignete Aufschluß- und Reinigungsverfahren des Rohberylls bis zur Darstellung der letzten Endes benötigten Berylliumsalze ist in allen Phasen inzwischen soweit durchgebildet worden, daß hierfür jederzeit eine technische Betriebsanlage errichtet werden kann.

Augenblicklich wird allerdings nur in vergrößertem Laboratoriumsmaßstab gearbeitet. Es sind zwei kleine Öfen in Betrieb, in deren jedem in achtstündiger Arbeitszeit 50–60 g Beryllium in Form kathodisch abgeschiedener Reguli gewonnen werden. Bei vorübergehend größerem Bedarf läßt sich jedoch in den gleichen Öfen in durchgehender vierundzwanzigstündiger Elektrolysendauer bequem die vierfache Menge erzeugen, weil die verhältnismäßig lange Anheiz- und Abkühldauer für die dreifache Arbeitszeit nur einmal in Abzug kommt.

Das abgeschiedene Beryllium ist meist von einem Schlackenmantel umgeben und enthält oft auch in geringem Umfang Schlackeneinschüsse. Durch ein besonders entwickeltes Umschmelzverfahren kann man jedoch ein Metall von 99, 95–99, 98% Reinheit erhalten.

Das Beryllium zeichnet sich durch eine bedeutende Härte aus (Glas läßt sich leicht ritzen). Leider ist es aber auch sehr spröde, was schon aus seiner grobkristallinen, scharf abgesetzten Struktur ersichtlich ist. Vielfach besteht die Auffassung, daß ein völlig reines 100%iges Beryllium diese Sprödigkeit nicht mehr besitzen dürfte und auch entsprechend weich sein müsse. Ehe es jedoch nicht gelungen sein wird, ein ideal reines Produkt herzustellen, kann diese Frage nicht geklärt werden. Soviel läßt sich jedenfalls sagen, daß ein härtender Einfluß von Barium oder Kohlenstoff (Carbid) nicht in Frage kommt, da es bei besonders sorgfältiger Elektrolyse unter Verwendung völlig reiner Elektrolyte mehrfach gelungen ist, ein Beryllium herzustellen, das als einzige Verunreinigung 0,02% Eisen enthielt. Auch dieses aus dem Kathodenprodukt fernzuhalten, erscheint augenblicklich noch aussichtslos, weil sämtliche bisher untersuchten Graphitsorten zum mindesten noch Spuren von Eisen enthalten, das als Eisenfluorid besonders leicht in Lösung geht und infolge seines weit unter dem des Berylliums liegenden Abscheidungspotentials sofort zur Kathode wandert.

Der Schmelzpunkt des Berylliums wurde wiederholt mit einem Präzisionsardometer zu 1285° C bestimmt. Das spezifische Gewicht beträgt 1,8. Die elektrische Leitfähigkeit ist verhältnismäßig schlecht; genaue Ergebnisse liegen noch nicht vor, weil bisher die Herstellung von Berylliumdrähten noch nicht gelungen ist. Die Beständigkeit des Metalles gegenüber den Einflüssen der Atmosphäre ist in jeder Beziehung gut.

Das reine Beryllium hat bisher nur sehr beschränkte Verwendungsmöglichkeiten gezeigt, was jedoch in erster Linie darauf zurückzuführen ist, daß bisher kein Weg gefunden wurde, der eine technische Formgebung dieses spröden Materials ermöglicht. Lediglich kleine runde Plättchen von 10–30 mm Durchmesser und 1–2 mm Dicke konnten bisher unter Beachtung besonderer Maßnahmen hergestellt werden. Diese Berylliumplättchen werden als Austrittsfenster für Röntgenstrahlen in Röntgenröhren verwendet, die zum Zwecke des Strahlenschutzes mit einer unummantelten Antikathode ausgerüstet sind und von der Siemens-Reiniger-Verfa, Gesellschaft für medizinische Technik, bereits in großer Zahl verbreitet wurden. Die niedere Ordnungszahl (4) des Berylliums ließ dieses Metall als besonders geeignet erscheinen, um es überall dort anzuwenden, wo in Röntgenröhren Elektronen auftreten, jedoch keine Röntgenstrahlen emittiert werden sollen, weil sonst bei der Röntgendiagnostik Nebenstrahlen auftreten, die Arzt und Personal schwer schädigen können<sup>10)</sup>. Zudem läßt Beryllium die Röntgenstrahlen etwa 17mal so stark hindurchtreten, als dies Aluminiumplättchen gleicher Schichtdicke tun.

Sein Hauptverwendungsgebiet wird das Beryllium jedoch als Legierungsmetall finden, da die bisher in dieser Richtung angestellten Untersuchungen ganz überraschende Ergebnisse gezeigt haben. Allerdings sind schon verschiedene Meldungen, meist amerikanischen Ursprungs, durch die Tagespresse gegangen, wonach in kurzer Zeit Flugzeuge und Luftschiffe aus Beryllium hergestellt werden dürften. Von einer solchen Möglichkeit sind wir jedoch weit entfernt, denn reines Beryllium kommt wegen der schon geschilderten Eigen-

<sup>10)</sup> K. W. Hausser, A. Bardehle, G. Heisen, „Über Strahlenschutz bei Röntgendiagnostik und Diagnostikröhren nebst Beiträgen über die Stielstrahlung, die Streustrahlung und das Metall Beryllium“, Fortschr. auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen 35, 636 [1926].

schaften, abgesehen von seinem geringen spezifischen Gewicht, hierfür nicht eher in Frage, bis es gewalzt und sonstwie mechanisch bearbeitet werden kann, und bis es gelingt, seine Sprödigkeit zu beseitigen. Zudem wird es, wie wir weiter unten sehen werden, als reines oder selbst in gewissem Umfang mit Aluminium legiertes Metall für solche Zwecke vorläufig zu teuer sein. Aus diesem Grunde sind bisher in der Abteilung des metallographischen Forschungslaboratoriums des Siemens-Konzerns überwiegend nur solche Legierungen hergestellt und systematisch untersucht worden, die nur geringe Mengen Berylliums enthalten. Soweit diese Arbeiten zu einem gewissen Abschluß gekommen sind, können darüber nachstehende Mitteilungen gemacht werden.

Die Erwartung, daß ein Zulegieren des Berylliums zum Aluminium eine Härtung des letzteren Metalles bewirkt, hat sich nicht erfüllt. Auch durch thermische Behandlung solcher Legierungen wurde kein Erfolg erzielt. Nähere Untersuchungen ergaben dann auch, daß Beryllium dem Aluminium in vieler Beziehung nahe verwandt ist, und somit Vergütungseffekte durch ein Legieren beider Metalle nicht erwartet werden dürfen.

Hingegen bewirkt ein Zusatz von wenigen Prozenten Beryllium zu Schwermetallen eine geradezu erstaunliche Veränderung derselben. Beryllium härtet Eisen sehr stark; durch einen Zusatz von nur 2% steigert sich die Härte von zirka 100 auf 300. Durch thermische Vergütung läßt sich diese Härte auf 500 bis 600 steigern, so daß sie der der C-Stähle nicht nachsteht. Beryllium-Eisenlegierungen mit mehr als 4% Berylliumgehalt lassen sich überhaupt nicht mehr kalt oder heiß walzen. Hingegen lassen sich derartige Legierungen vergüten, so daß man Härten erhält, die denjenigen des gehärteten Stahls nicht nennenswert nachstehen.

Besonderes Interesse verdienen die Legierungen des Berylliums mit Kupfer und Nickel. So ergibt z. B. ein Zusatz von 2,5% Beryllium zu Elektrolytkupfer eine Legierung, die in ausgeglühtem Zustande eine Festigkeit von ca. 750 kg/mm<sup>2</sup>, eine Dehnung von 50% und Kerbschlagfestigkeit über 10 m kg/cm<sup>2</sup> besitzt. Durch eine thermische Vergütung lassen sich Festigkeiten bis ca. 150 kg/mm<sup>2</sup> bei ca. 2% Dehnung und Brinellhärte 400 erreichen. Eine Kupferberylliumlegierung mit ca. 6,3% Berylliumgehalt besitzt sogar eine Härte von ca. 700 Brinell, ist also etwa ebenso hart wie gehärteter Stahl. Nickellegierungen des Berylliums verhalten sich ähnlich. Zusammenfassend läßt sich sagen, daß die Festigkeitseigenschaften solcher Legierungen mit 2–3% Berylliumgehalt im unvergüteten Zustande ungefähr denjenigen einer hochwertigen ausgeglühten Bronze gleichzusetzen sind. Durch eine geeignete Vergütung erhält man jedoch solche Festigkeiten, die weit über derjenigen einer doppel federharten gewalzten oder gezogenen Bronze liegen, wobei jedoch die Dehnungswerte ungefähr gleich sind. Eine besondere Überlegenheit der Berylliumkupfer- und -nickellegierungen gegenüber der Bronze besteht darin, daß sie in unvergütetem Zustand beliebig bearbeitet werden können und erst nach Fertigstellung durch entsprechende Vergütung gehärtet werden, während Bronze ihre hohe Härte und Festigkeit schon durch Kaltformung erhält und eine weitere Formgebung in diesem Zustande überhaupt nicht mehr möglich ist. Gegenüber den Kohlenstoff-Stählen weisen diese Legierungen außerdem eine große Korro-

sionsbeständigkeit auf. Sie werden also überall dort Eingang in die Technik finden, wo neben dieser fast überall bestehenden Forderung höchste mechanische Anforderungen, wie Schleifen, Stoßen, Federung usw. in Frage kommen.

Es sind auch noch die Legierungen des Berylliums mit anderen Schwermetallen untersucht worden oder werden derzeit studiert, ohne daß jetzt bereits ein abschließendes Ergebnis mitgeteilt werden kann. Jedenfalls ist diesen Legierungen durchweg die auffallende Härte zu eigen.

Interessant ist sicherlich auch eine Legierung zwischen Beryllium und Magnesium, da bei ihr neben der zu erwartenden Härtung vor allem das geringe spezifische Gewicht des Berylliums praktisch erhalten bliebe. Leider sind jedoch alle bisher in dieser Richtung aufgestellten Legierungsversuche völlig negativ verlaufen, da der Verdampfungspunkt des Magnesiums unterhalb des Schmelzpunktes des Berylliums liegt.

Ausschlaggebend für die Verwendbarkeit des Berylliums und seiner Legierungen ist natürlich die Preisfrage. Die ersten dargestellten Berylliummengen kosteten noch 200.— M. pro Gramm. Nach verhältnismäßig kurzer Entwicklungszeit sank dieser Herstellungspreis jedoch bereits auf 20.— M. pro Gramm herab und beträgt jetzt, bei den Arbeiten im erweiterten Laboratoriumsumfang 10.— bis 11.— M. für reines, hochprozentiges Beryllium und 6.— M. für ein Material, das zu Legierungen verwendet wird und noch 10–20% Aluminium enthalten darf, ohne daß eine nachteilige Beeinflussung eintritt. Ausführliche Kalkulationen der ausgearbeiteten Betriebsverfahren haben jedoch ergeben, daß der Preis des Berylliums etwa dem des Silbers gleichkommen wird also ca. 80.— M. pro Kilogramm, sobald bei eintretendem Bedarf in technischem Umfang fabriziert wird. Letzten Endes ist natürlich die Gestaltung des Rohberyllmarktes für die Preisgestaltung ausschlaggebend. Eine eingehende Untersuchung hat gezeigt, daß den Händlern und Minenbesitzern noch jeder Maßstab für die richtige Bewertung des Rohberylls fehlt. Es werden Preise gefordert, die sich für ungefähr gleichwertiges Material um 1000 und mehr Prozente unterscheiden. Es sollte den Beryllhändlern und -besitzern klar sein, daß eine allgemeine Senkung des Rohberyllpreises den Absatz dieses Minerals ungeheuer fördern wird. Denn, wenn jetzt die Berylliumkupfer- und -nickellegierungen bei großtechnischer Erzeugung ca. 5.— M. bzw. 6.— M. pro Kilogramm kosten werden, würde eine Senkung des Beryllpreises um 50% in der Lage sein, den Preis dieser Legierungen um ca. 20% zu erniedrigen, was im Hinblick auf die in Konkurrenz stehende Bronze von ausschlaggebender Bedeutung wäre. Zu berücksichtigen ist vor allem, daß ein guter Beryll nur etwa 10–12% Berylliumoxyd, also ca. 3–3,5% Beryllium enthält. Es muß also eine Riesenmenge Gangart umgesetzt werden, um diese geringen Berylliummengen nutzbar zu machen. Da jedoch Beryllium kein Schmuckgegenstand, sondern ein bedeutender technischer Werkstoff ist, darf es nicht mit Sammlerwerten, sondern es muß mit dem Maßstab des technisch Zulässigen bewertet werden. Wenn daher von recht vielen Seiten Eignungsversuche mit den hochwertigen Legierungen des Berylliums durchgeführt werden, wird bald die Übertragung des lisher Gefundenen in den großtechnischen Maßstab einsetzen, und hiermit auch der Beryllmarkt konsolidiert werden können. [A. 96.]