

6. Literatur über Nickelgewinnung.

- W. Borchers, Die Metallhüttenbetriebe Bd. 1, Nickel. Halle 1917, W. Knapp.
- E. H. Schulz in Ullmanns Enzyklopädie d. techn. Chemie Bd. 8. Berlin und Wien 1920, Urban & Schwarzenberg.
- F. B. Howard White, Nickel. London 1923, Pitman & Sons. — Behandelt vor allem die Anwendung des Nickels.
- A. T. Wilgress, Report of the Royal Ontario Nickel Commission. Toronto 1917. — Enthält eine große Menge von Einzelheiten über Vorkommen, Gewinnung und Anwendung des Nickels.
-

Kapitel XII.

Aluminium.

(Von P. Prior, Frankfurt a. M.)

1. Geschichtliches.

Mit beispielloser Schnelligkeit hat das Aluminium seit seiner Einführung in die Weltwirtschaft die größte Bedeutung gewonnen. Hundert Jahre sind erst vergangen, seitdem es zum ersten Male gelungen ist, Aluminiummetall, in allerdings nur ganz geringen Mengen, herzustellen. Die Jahreserzeugung an Aluminium steht heute gewichtsmäßig bereits an vierter Stelle unter denen der Nichteisenmetalle; sie übertrifft bereits die des seit alten Zeiten bekannten Zinns.

Nachdem die sog. Erden als Metalloxyde erkannt waren, gab wahrscheinlich Davy dem in der Alaunerde (Alunit) enthaltenen Metall den Namen Aluminium, noch lange bevor es gelungen war, dieses Metall darzustellen. Davy selbst hat sich bereits 1807 um die Darstellung des gesuchten Metalls vergeblich bemüht, wobei er als Reduktionsmittel sowohl Kaliumdämpfe als auch den elektrischen Strom zu Hilfe genommen haben soll.

Heute wird allgemein Wöhler das Verdienst zuerkannt, das erste metallische Aluminium gewonnen zu haben. Die Ergebnisse der Versuche, die der dänische Forscher Oerstedt im Jahre 1824 anstellte, werden angezweifelt und Oerstedt scheint später selbst Zweifel an ihrer Richtigkeit bekommen zu haben. Wöhler stand in freundschaftlichen Beziehungen zu Oerstedt und wurde von diesem zur Aufnahme von Versuchen zur Darstellung von Aluminium angeregt, es gelang ihm jedoch nicht, durch Wiederholung der Oerstedtschen Versuche Aluminium zu erhalten. Indessen ist es nicht ausgeschlossen, wie ähnliche Versuche in viel späterer Zeit gezeigt haben, daß der dänische Gelehrte zuerst metallisches Aluminium in Händen hatte. Wöhler übernahm jedenfalls von ihm das Verfahren zur Herstellung wasserfreien Aluminiumchlorids, dessen er sich bei seinen weiteren Versuchen bediente. Er berichtet dann 1827 in Poggendorfs Annalen zum erstenmal über die Eigenschaften des von ihm durch Reduktion des Aluminiumchlorids mit Kalium in kleinen Flittern erhaltenen Metalles. Er verbesserte seine Methode noch in den folgenden Jahren, so daß es ihm gelang, das Metall in kleinen geschmolzenen Kugeln zu erhalten, worüber er 1845 berichtet. Nun konnte er genauere Angaben über die Eigenschaften des Metalles machen und gab sein spezifisches Gewicht mit 2,67 an.

Eine Reihe von Jahren besaß dann das Aluminium lediglich eine wissenschaftliche Bedeutung. Die kleinen Mengen der seltenen Präparate in Laboratorien stellten die Produktion von Jahrzehnten dar.

Es blieb H. Sainte Claire Deville vorbehalten, die Gewinnung des Aluminiums zuerst in industriellem Maßstabe durchzuführen. Er verwendete dabei statt des wasserfreien Aluminiumchlorides das besser zu handhabende Aluminium-Natrium-Chlorid und statt des Kaliums das billigere Natrium. Er konnte die Kenntnisse über die physikalischen und chemischen Eigenschaften des Aluminiums erweitern, da ihm durch seine Versuche schon bald größere Mengen des Metalles zur Verfügung standen. Seine Bemühungen zur Errichtung eines industriellen Betriebes wurden durch die französische Akademie und durch Napoleon III. gefördert, der für diesen Zweck Mittel bereitstellen ließ, weil er dem spezifisch leichten Metall eine große Bedeutung für militärische Zwecke beilegte. Vom Jahre 1854 an, in dem Deville mit seinen Arbeiten begann, hatte sich bis zum Jahre 1863 die junge Aluminiumindustrie so weit entwickelt, daß sie bereits eine Jahresproduktion von 2000 kg aufweisen konnte. Der hohe Preis des Metalles war jedoch ein Hindernis für eine raschere Entwicklung seiner Verwendungsgebiete, weshalb im Jahre 1888 die Weltproduktion noch nicht mehr als 39200 kg betrug. In technischer Beziehung waren inzwischen natürlich verschiedene Fortschritte gemacht worden. Statt der Chloride hatte man als Ausgangsmaterial Fluoride, und zwar den beständigen natürlichen Kryolith, statt des Natriums als Reduktionsmittel das Magnesium vorgeschlagen. Von den Forschern, die sich mit dem Problem der Aluminiumgewinnung durch Reduktion seiner Salze durch ein Metall befaßten, seien nur Rose und Beckethoff genannt.

Inzwischen hatten sich andere Forscher, wie Bunsen, Bell und auch Deville, dem Studium der elektrolytischen Darstellung des Aluminiums zugewendet. Bei dem damaligen Stand der Elektrotechnik gelang es jedoch nicht, zu einem Verfahren von technischer Bedeutung zu kommen. Erst die Erfindung der Dynamomaschine gab neue Anregung, wieder nach einem Weg zur Gewinnung des Aluminiums mit Hilfe der Elektrizität zu suchen.

Der erste, dem es gelang, Aluminium betriebsmäßig durch Elektrolyse zu gewinnen, war P. Héroult. Er wandte seine Verfahren in der Praxis allerdings zunächst nur zur Erzeugung von Aluminiumlegierungen an, für die man einen besseren Markt zu finden hoffte. Er bediente sich zur Erwärmung des Schmelzbades des elektrischen Stromes, während Hall, der in Amerika die Erzeugung von Reinaluminium durch Elektrolyse aufgenommen hatte, zunächst noch eine äußere Beheizung der Schmelze anwandte. Lätzerem schreibt man gewöhnlich die Erfindung des geeigneten Elektrolyten zu. Héroult, der 1887 die Leitung der Aluminium Industrie A. G. übernommen hatte, ging dann 1888 zur Erzeugung von Reinaluminium über, wobei er von Kiliani in hervorragender Weise bei der fabrikatorischen Einrichtung unterstützt wurde.

2. Produktion.

Durch die Einführung der Schmelzflußelektrolyse wurde es möglich, das Aluminium zu einem Preise zu erzeugen, der eine weitgehende Verwendung dieses Metalles zuläßt. Dieses Verfahren ist von seiner Erfindung an bis heute im wesentlichen das gleiche geblieben. Die folgende Tabelle zeigt die Preisentwicklung, aus der die technischen Fortschritte in der Aluminium-erzeugung deutlich erkennbar sind, und die mit dieser verbundene Produktionssteigerung.

Jahr	Ungefährer Preis per kg M.	Produktion kg
1855	1000.—	—
1856	300.—	—
1857	240.—	—
1857 bis 1884	100.—	—
1885	100.—	13 292
1886	70.—	16 380
1888	47.50	39 295
1890	{ Februar 27.60 }	175 388
	{ September 15.20 }	
1891	{ Februar 12.— }	333 307
	{ Juli 8.— }	
	{ November 5.— }	
1892	5.—	487 030
1893	5.—	715 812
1894	4.—	1 240 372
1895	3.—	1 426 760
1896	2.60	1 789 676
1897	2.50	3 394 400
1898	2.20	6 048 381
1900	2.—	7 743 219

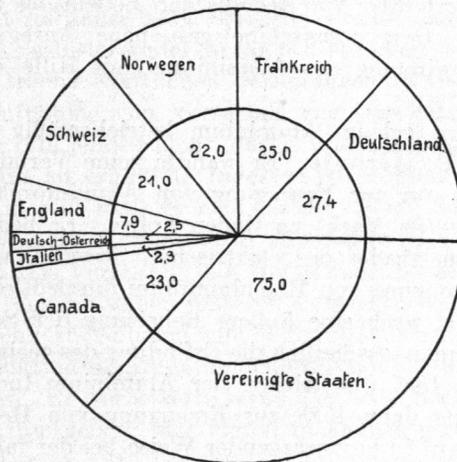


Fig. 174. Hüttenproduktion an Aluminium im Jahre 1927 in metr.-Tonnen.

Nach den statistischen Zusammenstellungen der Metallgesellschaft A. G. betrug die Weltproduktion an Aluminium im Jahre 1927 206100 metr. t mit einem Gesamtwert von 115,4 Millionen Dollars oder fast 500 Millionen Mark. Ihre Verteilung auf die einzelnen Länder ergibt sich aus dem beifolgenden Schaubild (Fig. 174).

3. Vorkommen.

Das Aluminium ist in den Gesteinen, die den äußeren Mantel der Erde, also den uns zur Ausbeutung zugänglichen Teil, bilden, das in größter Menge vorkommende Metall. Sein Anteil an der Bildung dieser Erdkruste beträgt etwa 7,3%, größer ist nur der Anteil des Sauerstoffes, der etwa die Hälfte, und der des Siliciums, der etwa ein Viertel der Gesamtmasse ausmacht. Selbst das Eisen ist in der Erdkruste nur mit ungefähr der halben Gewichtsmenge vorhanden wie das Aluminium. Nach ihm kommen der Menge nach das Calcium, Magnesium, Natrium, Kalium und das Titan, dessen Anteil nur noch 0,4% beträgt; die anderen industriell wichtigen Metalle sind höchstens in hundertstel Prozenten der Gesamtmasse vorhanden.

Die große Menge des Aluminiums in der Erdkruste verdankt ihre Anwesenheit aluminiumhaltigen Silikaten, die in älteren und jüngeren Eruptivgesteinen vorkommen. Natürlich enthalten auch die Sedimentgesteine, die aus den Verwitterungsprodukten der Eruptivgesteine hervorgegangen sind, unser Metall in reichlicher Menge, oft sogar in Form von Mineralien mit höherem Prozentgehalt an Aluminium, wenn durch den Verwitterungs- und Neubildungsprozeß eine Anreicherung herbeigeführt wurde.

Solche Anreicherungsprodukte dienen als Ausgangsmaterialien für die Gewinnung des Aluminiums.

4. Ausgangsmaterialien.

Bauxit: Das wichtigste Aluminiumerz — wenn man diesen Ausdruck gebrauchen will — ist der Bauxit. Die Zusammensetzung dieses Minerals ist recht veränderlich und läßt sich nicht durch eine genaue Formel angeben. Nach Rinne ist Bauxit „im wesentlichen Eisenoxydul enthaltendes Tonerdegel. Die Massen sind also kolloidal, zum Teil mit kristallinen Beimengungen, wie Hydrargillit ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3 \text{H}_2\text{O}$), Diaspor ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) und mannigfachen andern Stoffen“. Al_2O_3 und H_2O sind also die Hauptbestandteile, neben denen als Verunreinigungen fast immer SiO_2 , Fe_2O_3 und TiO_2 vorhanden sind. In den Tropen ist der Bauxit besonders häufig, da er den wesentlichen Bestandteil des für diese Gegenden charakteristischen Verwitterungsbodens, des Laterits, bildet, während außerhalb der Tropen die Gesteinszersetzung überwiegend kaolinisch ist, also Tonerdesilikate liefert. Je nach ihrer Entstehung können die einzelnen Vorkommen des Bauxits sehr verschiedenartig sein, da er sowohl durch Verwitterung von tonigen Kalken als auch durch Verwitterung von Eruptivgesteinen entstanden sein kann.

Auch auf sekundären Lagerstätten wird Bauxit gefunden, wo er in Form von Knollen in anderen Sedimenten eingebettet ist.

Die Bauxitvorkommen (s. Tafel XXVII) sind weit verbreitet. Seit die wachsende Aluminiumerzeugung die Aufmerksamkeit auf dieses Mineral gelenkt hat, ist eine große Anzahl bisher unbekannter Lagerstätten entdeckt worden. Allerdings sind diese Lagerstätten von recht verschiedenem Wert, dessen genauere Feststellung für viele derselben noch aussteht.

Die französischen Bauxitvorkommen sind immer noch die wichtigsten europäischen Lagerstätten, sowohl wegen ihrer Häufigkeit im südlichen Frankreich als auch wegen ihrer Mächtigkeit und der chemischen Qualität der einzelnen Lager. Übrigens erhielt das Mineral auch seinen Namen nach dem Vorkommen bei dem Städtchen Les Beaux bei Arles in Südfrankreich. Rumänien besitzt in den ehemals ungarischen Gebietsteilen am Bihargebirge bedeutende Bauxitlager. Neuerdings sind auch in Ungarn am Bakonywald Lager von großer Ausdehnung und beträchtlicher Mächtigkeit gefunden worden. Jugoslawien betreibt in Dalmatien und Italien in Istrien Bergbau auf Bauxit; beide Länder besitzen außerdem noch Bauxitvorkommen in anderen Gegenden. In Deutschland (Vogelsberg in Hessen) und Österreich sind bis jetzt noch keine Vorkommen aufgeschlossen worden, die eine größere Bedeutung erlangen könnten. In den übrigen europäischen Ländern sind noch zahlreiche Vorkommen aufgefunden worden, die aber noch nicht in größerem Maßstabe ausgebeutet werden konnten, zum Teil wohl nur deswegen, weil sie ungünstig zu den Stätten der heutigen Aluminiumindustrie gelegen sind.

Nordamerika, das Land mit der größten Aluminiumproduktion, verfügt über zahlreiche und große Lager hochwertiger Bauxits, von denen besonders die Vorkommen in Arkansas, Georgia, Alabama und Tennessee zu nennen sind. In Canada sind noch keine Lagerstätten aufgefunden worden, die für die Versorgung der Aluminiumindustrie herangezogen werden könnten. Die canadischen Werke sind infolgedessen auf den Bezug des Rohstoffes aus den Vereinigten Staaten angewiesen. In Südamerika wurden in Englisch- wie auch in Niederländisch-Guayana wertvolle Bauxitlager erschlossen. Auch in anderen Staaten Südamerikas hat man Bauxit gefunden, doch ist es bis jetzt noch zu keiner Ausbeutung dieser Lager gekommen.

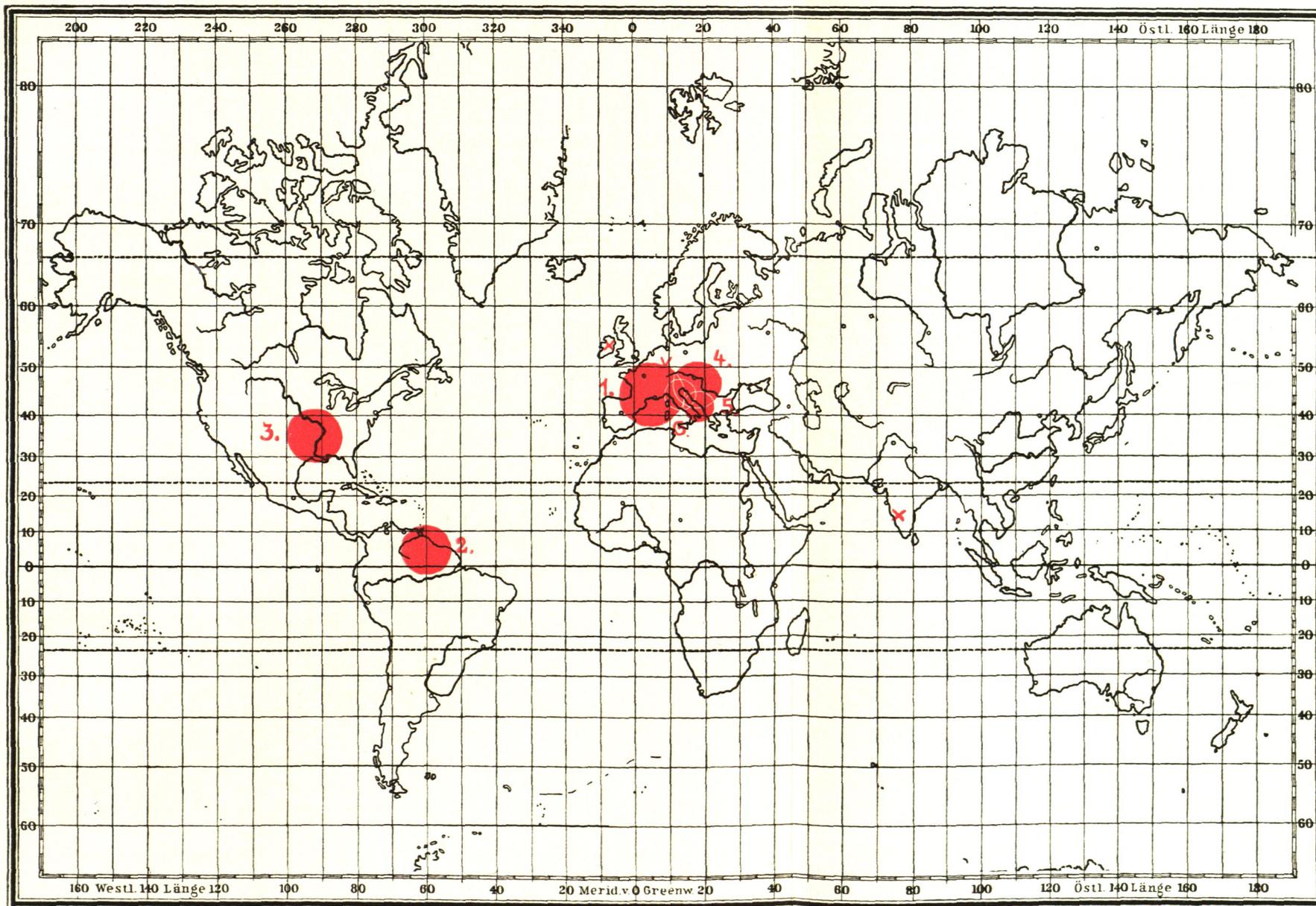
Indien gilt heute allgemein für das an Bauxit reichste Land der Erde. Die dort bereits nachgewiesenen Mengen werden auf viele Millionen Tonnen geschätzt. Im übrigen Asien wird man sicher noch viele Fundstätten ermitteln können, wenn erst ein Anreiz hierzu vorhanden ist; bisher sind in Korea und in der Mandchurei Bauxitlager nachgewiesen.

In Afrika und Australien sind ebenfalls an vielen Orten Bauxitvorkommen bekannt geworden; so wurde neuerdings z. B. auch über Funde von großen Lagern in Marokko berichtet, doch haben diese Lagerstätten noch keine praktische Bedeutung erlangen können, zum mindesten nicht für die Aluminiumindustrie.

Folgende Analysen mögen als Beispiele für die Verschiedenartigkeit der Bauxite verschiedener Herkunft dienen:

Geographische Verteilung der Gewinnungsstätten des Bauxits.

1. Frankreich. 2. Britisch- und Niederländisch-Guayana. 3. Vereinigte Staaten. 4. Ungarn und Rumänien. 5. Jugoslawien (Dalmatien). 6. Italien (Istrien).



× unter 1% der Weltproduktion.

● über 1% der Weltproduktion (die Flächeninhalte der Kreise sind den Metallinhalten der Produktion proportional).

	Al ₂ O ₃ %	SiO ₂ %	Fe ₂ O ₃ %	TiO ₂ %	H ₂ O %
Vogelsberg	48,29	2,69	18,38	2,82	27,81
Irland	51 bis 52	11 bis 12	4 bis 5	6 bis 7	23 bis 24
Dalmatien	56,36	0,85	22,01	2,92	17,87
Var, Frankreich	56,96	19,13	3,52	5,11	14,70
Bihar Gebirge	58,81	1,0	26,25	2,0	12
Afrika	61,10	1,17	21,64	1,64	13,00
Alabama	61,64	8,80	1,10	—	29,97
Les Beaux	64,35	5,03	2,96	—	27,64
Guayana	67,28	2,85	1,53	1,07	27,46

Indessen gibt es auch Bauxite, die noch reicher und solche, die noch ärmer an Al₂O₃ sind als die in der vorstehenden Zusammenstellung angegebenen äußersten Werte. Ähnlich verhält es sich mit den Gehalten an den anderen Bestandteilen.

Die Weltproduktion an Bauxit wird für 1927 zu 1684000 t angegeben, die sich folgendermaßen auf die einzelnen Länder verteilen:

Frankreich	530 000 t
U. S. A.	329 000 t
Ungarn	240 000 t
Niederländisch-Guayana	170 000 t
Britisch-Guayana	160 000 t
Jugoslawien	130 000 t
Italien	85 000 t
Übrige Länder	40 000 t

Ton: Ein anderes Verwitterungsprodukt der aluminiumhaltigen Eruptivgesteine ist der Ton. Tone sind Aluminiumsilikate von sehr verschiedener Reinheit. Ihr Vorkommen ist weit verbreitet, indessen dienen sie heute noch nicht in nennenswertem Umfange als Ausgangsmaterial für die Aluminiumerzeugung. Zu den Tönen zählt auch der Kaolin, der sich durch sehr geringen Gehalt an Eisen auszeichnet, dagegen außer der im Aluminiumsilikat vorhandenen gebundenen Kieselsäure meist noch Quarz enthält. Eine scharfe Unterscheidung zwischen Kaolin und Ton ist nicht möglich, da viele Übergänge zwischen Ton und eigentlichem Kaolin vorkommen.

Feldspat: Die Feldspate, die sehr wesentlich an der Zusammensetzung der älteren Eruptivgesteine beteiligt sind, bilden bei der Verwitterung dieser Gesteine das Ausgangsmaterial für die Entstehung von Ton und Bauxit. Die Nutzbarmachung reiner Feldspate für die Gewinnung des Aluminiums ist auch schon in Betracht gezogen worden. Sie kann in solchen Ländern Bedeutung haben, die sich durch das Vorhandensein großer Wasserkräfte für die Aluminiumindustrie eignen und die, wie z. B. Norwegen, wohl über gute Feldspatvorkommen, nicht aber über gute Bauxitvorkommen verfügen. Die gleichzeitige Gewinnung von Kalisalzen kann dabei die Wirtschaftlichkeit der Feldspatverarbeitung günstig beeinflussen.

Leucit: Ein anderes aluminiumhaltiges Mineral, dessen Verwendung zur Erzeugung reiner Tonerde in Betracht kommt, weil damit die Gewinnung

von Kalisalzen verbunden werden kann, ist der Leucit. Dieser ist ein Bestandteil jüngerer Eruptivgesteine, in denen er jedoch nicht in so wesentlichen Mengen auftritt, wie etwa die Feldspate in den älteren Eruptivgesteinen. Der Leucit ist ein Kalium-Aluminium-Silikat mit 23,4% Tonerde und 21,6% Kali.

Korund: Auch in der Form reiner Tonerde kommt das Aluminium in der Natur vor; dieses Mineral, der Korund, kommt allerdings nicht als Ausgangsmaterial für die Aluminiumgewinnung in Frage, ist aber in anderer Beziehung wertvoll, so die Varietät Smirgel als Schleifmittel, die Varietäten Rubin und Saphir als Edelsteine.

Alunit: Der Alunit oder Alaunstein, von dessen Bezeichnung der Name unseres Metalles abgeleitet wurde, ist ein wasserhaltiges Kalium-Aluminium-Sulfat. Er tritt meist als Zersetzungsprodukt jüngerer Eruptivgesteine durch Solfataren auf, doch hat man auch die Entstehung einzelner Vorkommen durch die Annahme zu erklären versucht, daß die Gesteinszersetzung durch verwitternde Pyrite zustande gekommen sei. Der Alunit tritt, entsprechend seiner Entstehung, meist stark mit Gangart verunreinigt auf. Seine technische Verwendung zur Alaungewinnung ist uralte, verliert jedoch ständig an Bedeutung, da sich die Industrie zur Erzeugung der Aluminiumsalze immer mehr des Bauxits bedient. Da der Alaun als Ausgangsprodukt zur Gewinnung reiner Tonerde dienen kann, hat man auch schon daran gedacht, dieses Mineral als Erz für die Aluminiumerzeugung zu verwerten. Ein wirtschaftlicher Erfolg ist aber auf diesem Wege kaum zu erwarten.

Kryolith: Ein für die Aluminiumgewinnung sehr wichtiges Mineral ist der Kryolith, ein Natrium-Aluminium-Fluorid von der Zusammensetzung $3\text{NaF} \cdot \text{AlF}_3$. Früher diente er wegen seines Aluminiumgehaltes als Ausgangsmaterial für die Gewinnung dieses Metalles. Bei dem heutigen Verfahren bleibt theoretisch der Aluminiumgehalt des Kryoliths unausgenutzt, da er im Elektrolyt lediglich als Lösungsmittel für die Tonerde dient. Praktisch entsteht jedoch ein geringer laufender Verbrauch an Kryolith, weil Verluste teils durch Verunreinigung, teils auf mechanischem Wege und auch durch Zersetzung entstehen. Infolgedessen beträgt der Verbrauch an Kryolith stets mehrere Prozente vom Gewicht des erzeugten Aluminiums. Nach der Tonerde und den Elektrodenkohlen ist der Kryolith der wichtigste Rohstoff in der Aluminiumindustrie.

Das einzige abbauwürdige Vorkommen dieses Minerals befindet sich bei Ivigtut an der Westküste Grönlands. Diese Lagerstätte bildet eine mächtige stockförmige Masse, die im Tagebau abgebaut wird. Der dort gewonnene rohe Kryolith enthält noch ziemlich viel Beimengungen, von denen er erst gereinigt werden muß. Diese Reinigung erfolgt aber nicht an Ort und Stelle, sondern teils in Dänemark, teils in Amerika. Die Kryolithproduktion betrug im Jahre 1925 über 30000 t, die jedoch nicht restlos von der Aluminiumindustrie verbraucht wird, da der Kryolith auch in verschiedenen anderen Industrien Verwendung findet, z. B. zur Trübung von Glasflüssen bei der Milchglas- und der Emailleerzeugung.

Um von dem einzigen natürlichen Vorkommen unabhängig zu werden, hat man sich mit Erfolg der synthetischen Darstellung des Kryoliths zu-

gewandt. Man ist dabei bisweilen dazu übergegangen, das Kunstprodukt in der Zusammensetzung des verwandten, ebenfalls als Mineral vorkommenden Chioliths zu erzeugen. Dieser hat die Zusammensetzung $5 \text{ NaF} \cdot 3 \text{ AlF}_3$. Er kommt in der Natur indessen nur so selten vor, daß sein Abbau für technische Zwecke nicht in Frage kommt.

Von den übrigen aluminiumreichen Mineralien werden noch einige nutzbar verwertet, sei es als Edelstein oder sonstwie, doch ist diese Verwertung dann unabhängig vom Aluminiumgehalt, weshalb diese Mineralien hier keiner Erwähnung bedürfen.

5. Die für die Gewinnung wichtigsten Eigenschaften des Aluminiums.

Reines Aluminium besitzt schönen Metallglanz, seine Farbe steht zwischen dem Reinweiß des Silbers und dem Bläulichweiß des Zinks.

Atomgewicht: 26,97.

Die physikalischen Eigenschaften des Aluminiums, wie Schmelzpunkt, spezifisches Gewicht, Leitfähigkeit usw., ändern sich etwas in ihren Zahlenwerten mit der mehr oder weniger großen Reinheit des Metalls. (Handelsaluminium enthält etwa 99% Al.)

Spez. Gewicht: festes Metall: 2,64 (gegossen), 2,70 (gewalzt oder gezogen), flüssiges Metall bei 800° : 2,343.

Volumenverminderung bei der Erstarrung: 6,6%.

Schmelzpunkt: Handelsaluminium etwa 658°C , absolut reines Aluminium 660°C . Kurz vor dem Schmelzpunkt geht das Aluminium in einen grießig-breiartigen Zustand über.

Siedepunkt bei atmosphärischem Druck: 1800°C .

Spezifische Wärme (sehr hoch gegenüber anderen Metallen) bei 100°C : 0,228; 300°C : 0,248; 600°C : 0,277; geschmolzen: 0,308.

Latente Schmelzwärme: (sehr hoch gegenüber anderen Metallen; z. B. Kupfer 41 cal./g): 92,4 cal./g.

Linearer Ausdehnungskoeffizient: $23,5 \cdot 10^{-6}$.

Wärmeleitfähigkeit (etwa halb so groß wie die des Kupfers, doppelt so groß wie die des Schmiedeeisens) für 99proz. Aluminium:

bei 18°C :	$0,504 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{sec}^{-1} \cdot \text{Grad}^{-1}$,
„ 100°C :	$0,49 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{sec}^{-1} \cdot \text{Grad}^{-1}$,
„ 200°C :	$0,56 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{sec}^{-1} \cdot \text{Grad}^{-1}$,
„ 600°C :	$1,01 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{sec}^{-1} \cdot \text{Grad}^{-1}$.

Elektrische Leitfähigkeit (etwa halb so groß wie die des Kupfers) bei 20°C :

98,8proz. Aluminium:	$32,3 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^{-1} \cdot \Omega^{-1}$,
99,6proz. Aluminium:	$34,3 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^{-1} \cdot \Omega^{-1}$.

Geschmolzenes Aluminium besitzt in starkem Maße die Fähigkeit, Gase zu lösen.

Legierbarkeit: Das Aluminium ist mit vielen Metallen in jedem Mengenverhältnis legierbar. Mit Natrium legiert sich das Aluminium nur in geringem Maße; es nimmt max. 0,2% Na auf. Dieser Umstand ist von besonderer Be-

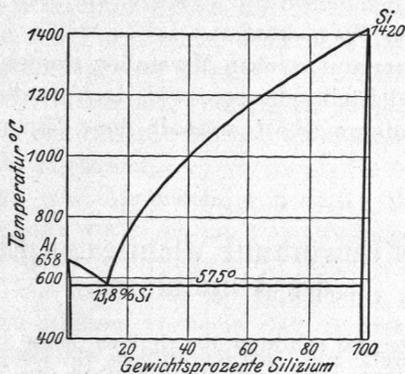


Fig. 175. Erstarrungsschaubild des Systems Aluminium-Silizium.
(Aus Landolt-Börnstein, Physikal.-chem. Tabellen, 5. Aufl., Ergänzungsbd.)

deutung, da bei der Aluminium-Schmelzflußelektrolyse so viel metallisches Natrium entsteht, daß dem Aluminium Gelegenheit geboten wäre, weit größere Mengen von Natrium aufzunehmen.

Besondere Beachtung verdient die Legierbarkeit des Aluminiums mit Silicium, über die das folgende Zustandsschaubild unterrichtet (Fig. 175).

6. Die Gewinnungsmethoden.

a) Allgemeine Gesichtspunkte.

Das Aluminium wird nicht durch einen einfachen reduzierenden Schmelzprozeß, wie man ihn beispielsweise bei der Gewinnung des Bleis oder Eisens ausführt, gewonnen. Ein derartiges Verfahren ist nicht durchführbar, weil das Aluminiumoxyd nur unter Aufwendung sehr großer Energiemengen reduziert werden kann. Außerdem wirkt die Neigung des Aluminiums zur Bildung von Carbid erschwerend auf die Ausführung solcher Verfahren, weil durch die Carbidbildung die Ausbeute an Aluminiummetall außerordentlich herabgesetzt wird. An diesen Schwierigkeiten sind seither auch die Versuche zur elektrothermischen Aluminiumgewinnung gescheitert. Alkalimetalle statt des Kohlenstoffs als Reduktionsmittel zu verwenden, verbietet deren hoher Preis.

So erklärt es sich, daß das Aluminium zur Zeit nur auf elektrolytischem Wege gewonnen wird.

Eine elektrolytische Abscheidung des Aluminiums aus wäßriger Lösung ist nicht möglich, da das Aluminium ein ziemlich stark elektronegatives Metall ist und daher in wäßriger Lösung an der Kathode kein Aluminium nach dem Vorgange $\text{Al}^{+++} \rightarrow \text{Al} + 3 \oplus$ abgeschieden wird, sondern Wasserstoffionen entladen werden. Bekanntlich wird ja bei einer Elektrolyse zuerst das Ion an der Kathode entladen, zu dessen Ausscheidung die geringste elek-

tromotorische Kraft erforderlich ist (Zink, das ebenfalls gegenüber dem Wasserstoff elektronegativer ist, läßt sich trotzdem aus wäßriger Lösung elektrolytisch abscheiden, weil der Wasserstoff an der Zinkkathode eine im Vergleich zur Zersetzungsspannung beträchtliche Überspannung besitzt).

Es bleibt somit für das Aluminium nur der Weg einer Elektrolyse in nicht-wäßriger Lösung übrig. Nun sind hierfür folgende Möglichkeiten denkbar:

1. Der Elektrolyt besteht aus einer Salzschmelze mit niedrigem Schmelzpunkt. Man erhält dann, da man bei Temperaturen unter dem Schmelzpunkt des Aluminiums arbeiten kann, festes Metall an der Kathode. Ein derartiges Verfahren hat sich die Aluminium-Industrie A.G. für Zwecke der Aluminiumraffination patentieren lassen. Ob dieses Verfahren praktischen Wert erhalten wird, steht noch dahin.

2. Der Elektrolyt besteht aus organischen Metallkomplexverbindungen, die bei gewöhnlicher oder nur wenig erhöhter Temperatur flüssig sind. Man kann dann an der Kathode ebenfalls festes Aluminiummetall abscheiden. Ein derartiges Verfahren soll angeblich bereits in einem Laboratorium ausgeführt worden sein. (Met. Ind., New York, 26, 383.)

3. Der Elektrolyt besteht aus einer Salzschmelze, deren Schmelzpunkt in der Nähe oder über demjenigen des Aluminiums liegt. Man elektrolysiert dann bei so hoher Temperatur, daß das abgeschiedene Metall in flüssiger Form erhalten wird. In dieser Weise arbeitet das heute wohl ausschließlich in Anwendung stehende Verfahren der Aluminiumgewinnung.

b) Roh- und Hilfsstoffe für die Elektrolyse.

A. Tonerde.

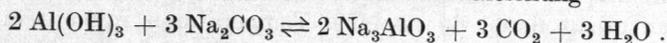
Die Aluminiumelektrolyse kann keines der natürlichen Mineralien direkt verwenden, sondern nur ein reines Tonerdeprodukt, das aus den Aluminiumerzen auf chemischem Wege gewonnen werden muß.

Die Gewinnung aus Bauxit.

Die größte Menge der zur Aluminiumerzeugung verwendeten Tonerde wird aus Bauxit gewonnen. Dieses Mineral läßt sich sowohl durch sauren als auch durch alkalischen Aufschluß verarbeiten. Der saure Aufschluß steht jedoch wohl nur dort in Anwendung, wo es sich um die Erzeugung von Aluminiumsalzen handelt, während die Gewinnung der Tonerde aus Bauxit für die Aluminiumgewinnung ausschließlich mit Hilfe des alkalischen Aufschlusses erfolgt. Auch bei diesem Aufschluß unterscheidet man zwei grundsätzlich verschiedene Wege, den trocknen und den nassen Weg.

Die Tonerde, die in der deutschen Aluminiumindustrie verarbeitet wird, ist in der weitaus größten Menge nach dem Verfahren des trocknen Aufschlusses gewonnen. Man verfährt dabei folgendermaßen: Der Bauxit, und zwar die kieselsäurearmen, infolge ihres Eisengehaltes meist roten Sorten, wird vorgebrochen und im Drehrohrofen getrocknet, um mahlfähig zu werden. Die nun folgende Zerkleinerung geschieht zweckmäßigerweise in Rohrmühlen mit Windsichtern. Der fein gemahlene Bauxit wird in Mischsilos mit Soda

gemischt, und diese Mischung den Aufschlußöfen zugeführt. Es sind dies Drehrohröfen von etwa 60 m Länge, in denen das Material einer Temperatur von 1200 bis 1400° ausgesetzt wird. Die Höhe der zum Aufschluß erforderlichen Temperatur wird durch die Art des Bauxits bedingt. Die genannte Temperatur ist z. B. für ungarischen Bauxit erforderlich. Der eigentliche Aufschlußvorgang besteht in einer Überführung der wasserunlöslichen Tonerde in lösliches Natriumaluminat nach der Gleichung



Nach Verlassen des Ofens durchläuft die Schmelze zu ihrer Abkühlung noch ein kleines Drehrohr, das mit Wasser außen berieselt wird. Die erstarrte Schmelze wird einer Mahlanlage zugeführt und von da in große Laugebottiche gebracht, die mit einem Rührwerk ausgerüstet sind. Zur Lösung des Natriumaluminats verwendet man einen Teil der in einem späteren Abschnitt des Verfahrens anfallenden Sodalauge, Heißwasser und Heißdampf. Man setzt etwas Kalk zu, um Kieselsäure als Calciumaluminiumsilikat abzuscheiden, das sich dann mit dem Eisenoxydhydrat in dem Rückstand, dem sog. Rotschlamm, findet.

Dieser Rotschlamm findet zum Teil als Gasmasse Verwendung, zum Teil wird er auf Anstrichfarben verarbeitet. Da der Titangehalt des Bauxits sich in dem Rotschlamm wiederfindet, kann dieses Nebenprodukt das Ausgangsmaterial für eine Titangewinnung bilden, ebenso kann man bei der Verarbeitung vanadiumhaltiger Bauxite die Gewinnung von Vanadium aus dem Rotschlamm vornehmen.

Der weitere Verlauf der Tonerdegewinnung ist der gleiche wie bei dem als Bayer-Verfahren bekannten Prozeß. Von diesem unterscheidet sich das oben skizzierte Verfahren durch den Aufschluß im Trommelofen, während nach Bayer der Bauxit nach erfolgter Röstung und Zerkleinerung im Autoklaven mit Natronlauge aufgeschlossen wird. Hierauf wird ebenfalls auf Filterpressen der Rotschlamm abfiltriert.

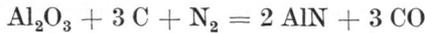
Das Filtrat, die Natriumaluminatlauge, bringt man in große Rührbottiche, in denen durch Rühren das Aluminat hydrolytisch gespalten wird unter Abscheidung von Tonerdehydrat.

Zur Einleitung dieser Reaktion ist es erforderlich, die Lösung durch Zusatz von etwas Tonerdehydrat aus einer vorangegangenen Fällung zu impfen. Auf diese Weise rührt man etwa 60% der in der Lösung vorhandenen Tonerde aus und erhält dabei ein Produkt von großer Reinheit. Das Tonerdehydrat wird meist auf Trommelfiltern abfiltriert, die sich für diesen Niederschlag besser eignen sollen als Filterpressen; letztere benutzt man dagegen, wie oben erwähnt, bei der Filtration des Rotschlammes. Das Filtrat von dem ausgerührten Aluminiumhydroxydniederschlag enthält noch 40% der Gesamtmenge der Tonerde. Um diese noch zu gewinnen, wird in die Lösung Kohlensäure eingeleitet. Hierdurch fällt der Rest als Aluminiumhydrat aus, während durch die Kohlensäure wieder Soda entsteht; es findet also Ablauf der zur Bildung von Na-Aluminat führenden Reaktion (s. oben) in umgekehrter Richtung statt. Das in dieser zweiten Fällung gewonnene Tonerdehydrat ist nicht ganz so rein wie das nur durch Ausrühren gewonnene Produkt, da die geringen Mengen an Kieselsäure, die in der Aluminatlauge in Lösung sind,

hier mit ausfallen. Die nach der Fällung mit Kohlensäure abfiltrierte Sodalaugue wird zur Rückgewinnung der Soda eingedampft. Hierbei kann es unter Umständen wirtschaftlicher sein, die regenerierte Soda nicht wieder in den Prozeß zum Aufschluß zurückzuführen, sondern sie in marktfähige Kristallsoda überzuführen und den Aufschluß mit frischer Rohsoda durchzuführen. Die von den beiden Fällungen herrührenden Filtrerrückstände werden schließlich im Drehrohrofen geglüht, um das für die Aluminiumerzeugung geeignete Tonerdeprodukt zu erhalten.

Eine ganze Anzahl von Verfahren zur Tonerdegewinnung aus Bauxit wurde in Vorschlag gebracht. Erwähnt sei das Verfahren von Peniakoff, bei dem der Aufschluß statt mit Soda mit Natriumsulfat und Kohle vorgenommen wird.

Noch ein anderes Verfahren sei hier genannt, da sich dieses in seinen ersten Operationen wesentlich von allen anderen unterscheidet, wenn es auch die großen Erwartungen, die man an seine Erfindung geknüpft hatte, nicht zu erfüllen vermochte. Es ist dies das Serpek-Verfahren, dessen Eigenart auf den Reaktionen



und



beruht. Die erste Reaktion ist stark endotherm, es ist also erforderlich, das Verfahren bei hohen Temperaturen durchzuführen, jedoch kann durch gewisse Zusätze die Nitridbildungstemperatur etwas herabgesetzt werden. Da zu diesen katalytisch wirkenden Zusätzen Eisenoxyd gehört, ist für die Durchführung des Verfahrens die Verwendung von rotem Bauxit besonders vorteilhaft. Immerhin liegen die Temperaturen so hoch, daß ein großer Teil der Verunreinigungen sich verflüchtigt, während Aluminiumnitrid selbst bei den Temperaturen des elektrischen Lichtbogens noch kaum flüchtig ist. Zur Überführung des Aluminiumnitrids in Tonerde unter gleichzeitiger Gewinnung des Ammoniaks kocht man zweckmäßigerweise mit Alkalilösung. Hierdurch erhält man das Aluminium als Aluminat, das man von dem noch vorhandenen Eisen durch Filtration trennen kann. Die Weiterverarbeitung der Aluminatlösung erfolgt dann wie bei dem Bayer-Verfahren. Für den basischen Aufschluß verwendet man, um keinen zu hohen Verbrauch an den teuren alkalischen Zuschlägen zu haben, möglichst kieselsäurearme Bauxite. Bei der

Gewinnung von Tonerde aus anderen Mineralien

liegen die Verhältnisse günstiger für den sauren Aufschluß, da der höhere Kieselsäuregehalt dieser Rohstoffe einen zu großen Aufwand an Alkalien bedingen würde. Um Ton auf Tonerde zu verarbeiten, wird man daher mit Säure aufschließen, wobei man je nach den örtlichen Verhältnissen der Schwefelsäure oder der Salzsäure den Vorzug geben wird. Die Entscheidung ist im wesentlichen von wirtschaftlichen Gesichtspunkten abhängig, technisch sind jedenfalls beide Verfahren durchführbar; das gilt auch von dem alkalischen Aufschluß des Tons, den man mit einem Gemisch von Kalk und Soda durch-

führen kann. Während der Kriegszeit sind in Deutschland Versuche zur Verarbeitung des Tons auf Tonerde auf verschiedenen Wegen, auch solche in größerem Maßstabe, durchgeführt worden, da man mit dem Eintritt eines Mangels an Bauxit rechnen mußte. Da ein solcher Mangel indes nicht eintrat, ist die Verwendung des an sich billigeren Tones an Stelle von Bauxit nicht in einen Dauerbetrieb übertragen worden.

Nur nach dem Aufschlußverfahren mit Salzsäure sind größere Mengen Tonerde aus Ton hergestellt worden, und das Verfahren ist dabei so entwickelt worden, daß es technisch und wirtschaftlich durchgeführt werden kann. Nach diesem Verfahren wird der durch Zerreißen grob zerkleinerte Ton einem Glühprozeß im Drehrohrofen unterworfen, wobei die richtige Durchführung des Glühens von wesentlichem Einfluß auf den folgenden Löseprozeß ist.

Der geglühte Ton wird in Salzsäure eingetragen, wobei die Reaktion so viel Wärme entwickelt, daß die Lösung in kurzer Zeit vollendet ist. Die anschließende Filtration von der Kieselsäure und dem unaufgeschlossenen Teil des Tons vollzieht sich leicht, leichter als bei dem Aufschluß mit Schwefelsäure; die Titansäure bleibt im Rückstand. Die Aluminiumchloridlösung enthält das Eisen als gelöstes Eisenchlorid. Durch Einengen der Lauge fällt das Aluminiumchlorid aus. Durch Auswaschen mit Salzsäure läßt sich das Eisen aus dem Salzbrei von Aluminiumchlorid weitgehend auswaschen. Das so gereinigte Salz wird in einem Drehrohr der thermischen Zersetzung unterworfen, wobei man reine Tonerde erhält und die Salzsäure in Kondensationstürmen zurückgewinnt. Die bei dieser Zersetzung entweichende Salzsäure soll praktisch vollständig wiedergewonnen werden; dagegen wird man die Salzsäure verlorengeden, die man mit der Lauge entfernen muß, die sich genügend an Eisen angereichert hat, sofern es nicht gelingt, auch diese Lauge noch aufzuarbeiten. Gegenüber dem Aufschluß mit Schwefelsäure hat das Verfahren mit Salzsäure den Nachteil, daß die Apparaturen aus Steinzeug oder mit Gummiüberzug hergestellt sein müssen, dagegen den Vorteil, daß die Zersetzung bei niedrigerer Temperatur vor sich geht und daß die Rückgewinnung der Säure sich einfacher gestaltet.

Zur Verarbeitung kalireicher Tone ist der Aufschluß mit Schwefelsäure in Vorschlag gebracht worden. Von dem bei diesem Verfahren entstehenden Kalialaun ausgehend, macht man auch das Kalium nutzbar, was für Länder, die an Kalisalzen arm sind, von Bedeutung sein kann.

Aus diesem Grunde hat man auch in Italien die Verarbeitung des Leucits auf Tonerde aufgenommen. Das leucitführende Gestein wird zu diesem Zwecke zunächst einer magnetischen Aufbereitung unterworfen, wodurch man ein ziemlich reines Leucitprodukt erhält, das man mit Salzsäure behandelt. Hierbei geht das Aluminium und das Kalium in Lösung. Bei der folgenden Abkühlung der Salzlösung scheidet sich zunächst das Chlorkalium aus und wird von der Aluminiumlösung getrennt. Um das Aluminiumchlorid abzuschneiden, wird gasförmige Salzsäure zugeführt; von diesem Augenblick an verläuft das Verfahren dann ebenso, wie es bei der Verarbeitung des Tones bereits geschildert wurde.

Auch die Verwendung von Salpetersäure zum Aufschluß ist vorgeschlagen worden, und zwar besonders im Hinblick auf die Nutzbarmachung von Feldspaten für die Tonerdegewinnung. Dieses Verfahren ist aber nicht zur Anwendung im Großbetrieb gekommen, ebensowenig eine große Anzahl anderer Vorschläge, die größtenteils nur Abänderungen der genannten Methoden darstellen. Für verschiedene dieser Verfahren hat man Versuchsbetriebe von immerhin ansehnlicher Größe gebaut.

Eine besondere Gruppe der Verfahren zur Tonerdegewinnung bilden diejenigen, die sich des elektrischen Ofens bedienen, wovon ihnen die Bezeichnung

elektrothermische Verfahren

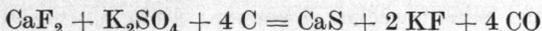
zuteil geworden ist. Ursprünglich verwendete man diese Methode zur Erzeugung von künstlichem Korund, d. h. also geschmolzener Tonerde in stückiger Form, der durch Mahlen in die entsprechende Körnung gebracht wurde, um als Schleifmittel Verwendung zu finden. Ausgehend von Bauxit schlug man beim Niederschmelzen im elektrischen Ofen so viel Kohle zu, daß fast alles Silicium und Eisen reduziert wurde. Das hierbei entstehende Ferrosilicium ließ sich leicht von der Tonerde trennen. Setzte man jedoch so viel Kohlenstoff zu, daß seine Menge theoretisch ausreichend war, um alles Silicium und Eisen zu reduzieren, so entstand Aluminiumcarbid. Dieses jedoch beeinträchtigte die Eigenschaft des erzielten Produktes. Es fehlte nicht an Versuchen, die auf solche Weise gewinnbare Tonerde für die Aluminiumerzeugung nutzbar zu machen, die aber noch zu keinem Ergebnis geführt haben, das Eingang in die Praxis gefunden hätte. Die Tonerde, wie sie auf diesem Wege für Schleifzwecke gewonnen wird, ist für die Aluminiumelektrolyse nicht verwendbar, denn es kommt bei dieser nur eine Tonerde in Betracht, die die Form eines feinen Pulvers besitzt, das leicht von dem geschmolzenen Kryolith gelöst wird. Das dichte geschmolzene Material entspricht diesen Bedingungen nicht, und eine Feinmahlung würde bei seiner großen Härte (Härte 9 der Mohsschen Skala) beträchtliche Kosten verursachen; auch könnte es dabei leicht so viel Eisen aufnehmen, daß es den Anforderungen an seine Reinheit nicht mehr genügen würde, selbst wenn es gelungen wäre, ein Material von der erforderlichen Reinheit im elektrischen Ofen zu erzeugen. Die Versuche zur Behebung dieser Schwierigkeiten haben zur Entwicklung eines Verfahrens geführt, das zur Zeit in betriebsmäßigen Großversuchen ein Produkt liefert, das den für die Aluminiumelektrolyse notwendigen Anforderungen entsprechen soll. Bei diesem, dem Haglund-Verfahren, wird dem Bauxit Schwefel in Form von Magnetkies zugeschlagen. Hierdurch erhält man neben Ferrosilicium eine Schmelze, die aus Aluminiumsulfid besteht, in dem Aluminiumoxyd gelöst ist. Diese Schmelze wird mit Wasser behandelt, wodurch auch das Aluminiumsulfid in Aluminiumhydroxyd übergeführt wird. Den dabei entweichenden Schwefelwasserstoff bringt man mit Rohbauxit zusammen, von dem er absorbiert und so wenigstens zum Teil dem Prozeß wieder zugeführt wird.

B. Kryolith.

Wie bereits bei Besprechung der aluminiumhaltigen Mineralien erwähnt wurde, dient der natürliche Kryolith von der Zusammensetzung $\text{AlF}_3 \cdot 3 \text{NaF}$ bei der Aluminiumelektrolyse als Lösungsmittel für Al_2O_3 . Der in Grönland vorkommende Kryolith besitzt, nachdem er einem magnetischen Aufbereitungsprozeß unterworfen wurde, genügende Reinheit, um ohne weiteres verwendet zu werden.

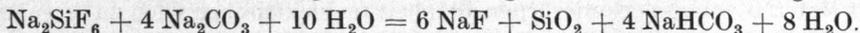
Bei der Erzeugung von künstlichem Kryolith gewinnt man zunächst Flußsäure in der bekannten Weise durch Zersetzen von Flußspat (CaF_2) mit Schwefelsäure. Die Flußsäure wird dann mit Soda und Tonerdehydrat in den entsprechenden Mengenverhältnissen abgesättigt, wobei das unlösliche Doppelsalz $\text{AlF}_3 \cdot 3 \text{NaF}$ ausfällt. Die Methoden, deren man sich dabei im großen bedient, sind mannigfaltig. Man kann sowohl durch Absättigen der Flußsäure mit Soda zunächst ein saures Natriumfluorid herstellen, dem man dann die entsprechende Menge Tonerdehydrat zusetzt, als auch mit Tonerdehydrat absättigen und den Kryolith durch Zusatz der entsprechenden Menge Chlornatrium fällen, oder auch ein in dem richtigen Mengenverhältnis hergestelltes Gemisch von Tonerdehydrat und Kochsalz mit Flußsäure behandeln. Es sind außer diesen Verfahren noch eine Reihe anderer Methoden in Vorschlag gebracht worden, so daß es den Anschein hat, daß jedes Werk, das sich mit der Herstellung von künstlichem Kryolith befaßt, sich in seiner Arbeitsmethode von den anderen unterscheidet.

Um die lästige Hantierung mit Flußsäure zu vermeiden, kann man den Flußspat auch durch Erhitzen mit Kaliumsulfat und Kohle nach der Formel



aufschließen. Durch Umsetzung mit Natriumsulfat kann man aus dem Fluorkalium dann Fluornatrium erhalten, und dieses ergibt dann, durch teilweises Umsetzen mit Aluminiumsulfat den gewünschten Kryolith.

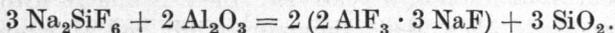
Ein anderes Verfahren benutzt zur Aufschließung kieselsäurehaltigen Flußspates Natriumbisulfat und Kohle. Hierbei entweicht Siliciumfluorid, das mit Natriumsulfat in Natriumsiliciumfluorid übergeführt wird. Dieses schließlich wird nach der folgenden Gleichung in Natriumfluorid übergeführt:



Vor der Umsetzung zu Kryolith wird dann die Kieselsäure entfernt, was quantitativ möglich sein soll. Dann gibt man Aluminatlösung zu und erhält Kryolith nach folgender Gleichung:



Auch nach folgender Gleichung ist eine Zersetzung des Na_2SiF_6 in Anwendung gekommen:



Hierbei erhält man allerdings eine Verbindung, die reicher an Aluminiumfluorid ist als der natürliche Kryolith. Da man aber bei der Elektrolyse, wie später ausgeführt werden wird, oft noch Aluminiumfluorid zusetzt, besteht auch die Möglichkeit einer Verwendung dieses aluminiumfluoridreicheren Produktes.

C. Aluminiumfluorid und andere Zuschläge.

In dem Betrieb der Aluminiumelektrolyse wird auch noch ein Zusatz von Aluminiumfluorid benötigt. Dieses Material wird entweder gewonnen, indem man wie bei der Kryolithherstellung Flußsäure aus Flußspat erzeugt und diese mit Aluminiumhydrat absättigt, oder man behandelt unreine Tonerde (geglühten Bauxit oder Ton) mit Flußsäure und fällt die Verunreinigungen mit Tonerde aus, bzw. man filtriert die Fluoridlösung von noch ungelöstem Ton und den Verunreinigungen ab.

Sollte die Zusammensetzung des Elektrolyten zu sauer, d. h. reicher an Aluminiumfluorid geworden sein, als der Zusammensetzung des Kryoliths entspricht, so ist es nicht erforderlich, das richtige Mengenverhältnis an Natriumfluorid dadurch herbeizuführen, daß man dieses teure Salz zufügt, sondern es genügt ein Zusatz von Soda. Der Verbrauch an diesem wohlbekannten Reagens ist gering und sei hier nur der Vollständigkeit halber unter den Rohstoffen für die Aluminiumgewinnung aufgeführt. Weitere Zusätze zum Elektrolyten sind vorgeschlagen und auch angewandt worden, wie bei Besprechung der Eigenschaften des Elektrolyten gezeigt werden soll. Da diese Zusätze für das Verfahren nicht erforderlich sind, braucht ihrer hier nicht weiter gedacht zu werden.

D. Die Elektrodenkohle.

Als Anode wie auch als Kathode verwendet man bei der Aluminiumelektrolyse Kohlenelektroden. Der Kohlenstoff der Anoden beteiligt sich an den im Ofen vorgehenden Reaktionen, so daß der Verbrauch an Anodenkohlen recht hoch ist. Bisher kennt man noch kein Material, das als Anode bei der Aluminiumelektrolyse verwendbar und gleichzeitig widerstandsfähig gegen die chemischen Angriffe ist.

Die chemische Zusammensetzung der Anodenkohlen ist von großer Wichtigkeit, da die Asche der abbrennenden Anoden in das Bad gelangt und daher die Reinheit des abgeschiedenen Aluminiums beeinträchtigen kann. Daß der Aschegehalt der Elektrodenkohle deshalb große Beachtung verdient, erhellt aus der Tatsache, daß der Elektrodenverbrauch $\frac{2}{3}$ bis $\frac{3}{4}$ vom Gewicht der gewonnenen Metallmenge beträgt.

Es sind also 2 Eigenschaften, welche die für die Aluminiumelektrolyse als Anoden zu verwendenden Kohlenelektroden besitzen sollen: möglichst niedriger Aschegehalt und möglichst hohe Festigkeit. Die hohe Festigkeit wird gefordert, um den Kohleverbrauch durch Abbrand bzw. Abrieseln so gering wie möglich zu machen. Diesen beiden Anforderungen gleichzeitig gerecht zu werden, bildet die Schwierigkeit der Fabrikation, und man hat früher manche Konzession an die Reinheit der Rohmaterialien gemacht. Neuerdings ist man von der Verwendung von Anthrazit und auch von Retortengraphit wohl ganz abgekommen und nimmt nur noch Petrolkoks oder auch Braunkohlenteerkoks. Dazu kommt dann Pech und Teer zur Verkittung der einzelnen Teilchen. Für die Herstellung der Kathoden kann man aschereicherer Material wählen, worauf bei der Beschreibung der Appa-

ratur zurückgekommen werden wird, ebenso wird dies in bezug auf die Gestaltung der Anodenkohlen dort geschehen.

Da einigen Aluminiumwerken Elektrodenfabriken angegliedert sind, soll hier kurz der Fabrikationsgang angegeben werden.

Die festen Bestandteile für die Elektrodenerzeugung müssen zunächst auf die geeignete Korngröße zerkleinert werden, also hier vorwiegend Petrolkoks und Elektrodenreste, die bei dem Elektrolysebetrieb in ziemlicher Menge anfallen und in die Elektrodenerzeugung zurückgehen. Eine zu weitgehende Zerkleinerung ist hier zu vermeiden, die Wahl der Korngrößen sowie des Verhältnisses der Mengen der verschiedenen Kornklassen zueinander ist von den jeweilig zu verarbeitenden Rohmaterialien abhängig. Das zerkleinerte Mate-

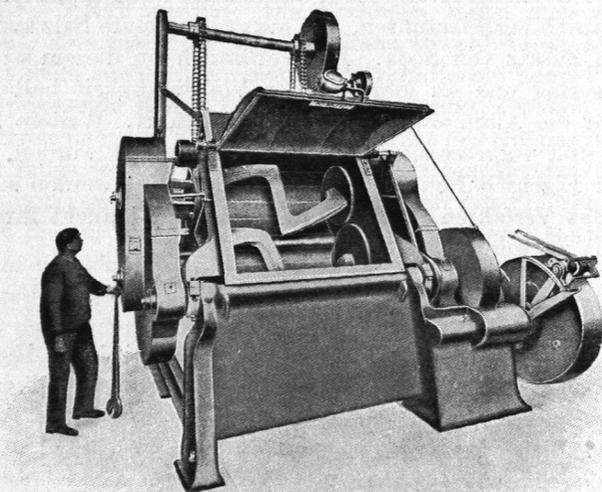


Fig. 176. Mischmaschine von Werner & Pfleiderer, Cannstatt.
(Aus Hugo Krause, Das Aluminium Bd. II.)

rial wird über Magnetscheider gegeben, um von den Zerkleinerungsmaschinen stammendes und sonstiges Eisen zu entfernen.

Die zerkleinerten Materialien müssen sowohl untereinander als auch mit dem Bindemittel gut durchmischt werden. Die Zusammenstellung des Mischungsverhältnisses der verschiedenen festen Rohmaterialien, von deren Kornklassen, des entwässerten Teers, dessen Viscosität usw., werden in den Betrieben als Erfahrungsgeheimnisse betrachtet.

Da die Mischungen, z. B. wenn sie Teerpech enthalten, bei gewöhnlicher Temperatur sehr steif sind, wird das Mischen in heizbaren Maschinen vorgenommen. Die Mischmaschinen (Fig. 176) sind ähnlicher Konstruktion wie sie in der Bäckerei im Gebrauch und durch die Konstruktionen von Werner & Pfleiderer allgemein bekannt sind.

Von der Mischmaschine wird die Masse auf einen Kollergang gebracht, auf dem sie, durch die Abkühlung erhärtend, zu flachen Fladen geformt wird. Diese werden dann zu Ballen gestampft* und in dieser Form der hydrau-

lischen Presse zugeführt, die ihnen schließlich die jeweils gewünschte Form gibt.

Nach dem Pressen werden die Elektroden dann noch einem Glühprozeß unter Luftabschluß unterworfen, bei dem die Kohlenwasserstoffe teils verflüchtigt, teils zersetzt werden.

Zum Brennen der Elektroden bedient man sich je nach der Größe des Betriebes der verschiedensten Ofensysteme. Für kleinere Betriebe können bereits Muffelöfen ausreichend sein, während in größeren Betrieben Kanal- und Ringöfen in Anwendung sind. In jedem Falle wird das Brennen so durchgeführt, daß man nach dem Beschicken des Ofens diesen langsam anwärmt und die Hitze erst im Verlauf einiger Tage auf die Höchsttemperatur von etwa 1100° steigert. Ein zu rasches Ansteigen der Temperatur würde die vorzeitige Bildung einer harten Außenschicht zur Folge haben, die der Entgasung der inneren Masse Widerstand bieten würde. Nachdem die Elektroden genügend lange der Brenntemperatur ausgesetzt waren, läßt man sie allmählich wieder abkühlen. Der gesamte Brennvorgang, vom Beschicken des Ofens bis zu seiner Entleerung, nimmt etwa 6 bis 8 Tage in Anspruch. Gutes Brennen der Elektroden ist unbedingt erforderlich, da hierdurch erst ihre gute Leitfähigkeit hervorgerufen wird, die ungebrannte Masse leitet den elektrischen Strom nur schwach. Die fertige Elektrode ist hart, von gleichmäßigem Korn, rissefrei und gibt beim Anschlagen einen hellen Ton.

c) Der Strombezug für die Elektrolyse.

Wie wir hörten, ist zur Zeit die einzige in Anwendung stehende Methode, metallisches Aluminium zu erzeugen, die Schmelzflußelektrolyse. Da diese Arbeitsweise mit einem großen Verbrauch an elektrischer Energie verbunden ist, wird sich die Aluminiumgewinnung nur dort wirtschaftlich gestalten lassen können, wo große Strommengen billig zu beschaffen sind. Erforderlich ist ferner, daß die Strommengen gleichmäßig zur Verfügung stehen, an eine Spitzenausnutzung durch Aluminiumerzeugung kann nicht gedacht werden. Es kommen also Wasserkräfte mit einer größeren konstanten Leistung in Betracht sowie die Ausnutzung geeigneter Braunkohlenlager. Liegen die Kraftquellen in unmittelbarer Nachbarschaft des Werkes, so kann man direkt mit Hilfe der Wasser- oder auch Dampfturbinen den benötigten Gleichstrom erzeugen, wie dies auch bei den Wasserkraftanlagen meistens geschieht. Bei den Dampfkraftanlagen dagegen erzeugt man Drehstrom und leitet ihn nach einer Umformanlage, die unmittelbar bei der Elektrolyse errichtet ist. Die Leitungsverluste bei Gleichstrom sind so groß, daß man diesen Umweg wählt, selbst wenn es sich nur um Entfernungen von einigen hundert Metern handelt. Ist die Entfernung größer, wird man sich einer Hochspannungsleitung bedienen, und der Strom wird dann erst in einem Umspannwerk auf die Spannung herabgesetzt, mit der er für die Umformanlage geeignet ist.

Für die Umwandlung des Drehstromes in Gleichstrom kommen 2 Maschinentypen in Frage, nämlich Einankerumformer und Motorgeneratoren.

Im Betrieb der Elektrolyse wird man stets eine gewisse Anzahl einzelner Elektrolysezellen, zu einem System vereinigt, hintereinander schalten.

Aus der Summe der für jede solche Zelle, Bad oder Ofen und der für die Zu- und Zwischenleitungen erforderlichen Spannung ergibt sich die Systemspannung, mit der die für die Anlage geforderte Amperezahl von dem Maschinenaggregat geliefert werden muß. Einankerumformer haben den Vorteil eines hohen Wirkungsgrades, dies ist für ihre Aufstellung meistens ausschlaggebend. Dagegen ist bei dem Einankerumformer der Bereich, in dem man die Spannung variieren kann, gering. Bei Aufstellung von Motorgeneratoren gestaltet sich jedoch der Betrieb einfacher. Mit diesen kann man z. B. bei Inbetriebnahme eines Systems die Spannung so weit herabsetzen, daß man mit einigen wenigen Öfen anfangen kann und entsprechend dem Zuschalten weiterer Öfen mit der Spannung herauffahren, bis man die volle Spannung bei Vollbetrieb des Systems erreicht hat. Bei Einankerumformern kann man dagegen unter Umständen gezwungen sein, die überschüssige Energie in Wasserwiderständen zu vernichten. Da die Vorteile des Motorgenerators sich am deutlichsten nur bei Inbetriebsetzungen zeigen, hat man meist den Einankerumformern den Vorzug gegeben und höchstens neben diesen Maschinen noch Motorgeneratoren als Reserveaggregate aufgestellt, wodurch man durch die verschiedenen möglichen Kombinationen die Vorzüge beider Maschinenarten ausnützen kann. So wurden bei Errichtung des Lautawerkes folgende Maschinensätze vorgesehen:

12 Einankerumformer von je 4000 kW Gleichstromleistung, 550 V.

2 Motorgeneratoren von je 4000 kW Gleichstromleistung, 550 V.

Die Anlage, die nur zur Hälfte ausgebaut wurde, war gedacht mit einer Einteilung in 6 Systeme, so daß je 2 Maschinen auf 1 System laufen und 2 Maschinen als Reserve dienen sollten.

Da die Motorgeneratoren im Betrieb leichter zu bedienen sind, und die Gesamtkosten einer damit ausgerüsteten Anlage eher etwas geringer sind, wird man ihnen, wenn es gelingt, bei neueren Konstruktionen den Wirkungsgrad zu verbessern, den Vorzug geben.

Die Stromstärke, mit der die verschiedenen Aluminiumwerke betrieben werden, ist recht verschieden; sie schwankt zwischen 8000 und 20000 Amp, wobei in einzelnen Fällen diese Zahlen in beiden Richtungen überschritten werden können. Die hierdurch gegebenen Einheiten produzieren immerhin noch recht bescheidene Mengen Metall, verglichen mit den Leistungen der Einheiten, deren man sich bei der hüttenmännischen Gewinnung anderer Metalle bedient. Eine wesentliche Vergrößerung über die jetzt üblichen Kapazitäten hinaus, scheint wenig wirtschaftliche Erfolge zu versprechen, wenn es nicht gelingt, grundlegende Änderungen im Aufbau der Apparatur zur Grundlage für solche Vergrößerungen zu schaffen.

d) Allgemeine Anlage und Apparatur.

Wegen der hohen Verluste, die Gleichstromleitungen mit sich bringen, ist das Elektrolysengebäude in unmittelbarer Nähe der Gleichstromerzeugung zu errichten. Wie schon erwähnt, schaltet man eine Reihe von Öfen zu einem System hintereinander; jedes System stellt man zweckmäßig so auf, daß es eine Schleife bildet, also in 2 Reihen, so daß beide Enden des Systems in

möglichste Nähe der Stromzuführungsstelle zu liegen kommen. Die Zahl der in einem System vereinigten Öfen hängt von der Spannung ab, die für die Anlage gewählt ist. Man kann rechnen, daß man je Ofen einschließlich der Zuführungs- und Zwischenleitungsverluste nicht ganz 7 V benötigt. Bei einer Spannung von 200 V kann man also ungefähr 30 Öfen in einem System vereinigen. Dabei kann berücksichtigt werden, daß die Stellen für 1 oder 2 Öfen als Reserve zum Auswechseln frei gehalten werden. Bei der Wahl der Maschinenspannung, aus der sich dann die Größe des Systems ergibt, ist zu bedenken, daß die Anwendung zu hoher Spannungen technisch etwas schwieriger und schließlich auch gefährlich wird. Für das neue große Aluminiumwerk in Arvida (Kanada) wird angegeben, daß der Gleichstrom mit 600 V der Elektrolyse zugeführt werden soll. Bei 600 V Klemmenspannung hat man an den Enden des Systems gegen Erde mit 300 V zu rechnen, während die Mitte des Systems mit 0 geerdet wird. Bei allen anderen Aluminiumwerken ist man wohl unter 600 V geblieben, da die Spannung von 300 V gegen Erde schon als bedenklich angesehen wird.

Vereinigt man mehrere Systeme in einem Gebäude, so muß für gute Lüftung gesorgt werden; man zieht daher vor, bei großen Anlagen mehrere Hallen zu errichten, die keine zu große Breite haben, um auch nach der Mitte frische Luft zu bekommen. In den engen Gebirgstälern, in denen ein Teil der an Wasserkraft gebundenen Aluminiumerzeugung liegt, ergibt sich der Bau schmaler Hallen von selbst. Bei den deutschen Werken, die Kohle als Kraftquelle benutzen, hat man die Elektrolyse höher gelegt, so daß die Unterkellerung ermöglicht, von unten frische Luft nach allen Teilen des Gebäudes zu führen; auch hat man die an sich schon ziemlich hohen Bauten mit Dachaufsätzen versehen, damit durch die aufsteigende warme Luft eine Zugwirkung entsteht.

e) Der Ofen (s. Fig. 177).

Das Elektrolysiergefäß, der „Ofen“, besitzt als charakteristischstes Merkmal nach den Seiten hin eine Auskleidung, die nur aus dem erstarrten Material des im Ofen befindlichen Reagensgemisches besteht, also des tonerdehaltigen Kryoliths. Gegen den Schmelzfluß dieses Gemisches ist kein Material widerstandsfähig. Man macht deshalb den Ofen so geräumig, daß die flüssige Schmelze nicht mit der Wandung in Berührung kommt, sondern eine Schicht ungeschmolzenen Materials die Wandung schützt. Man läßt diese Schicht so dick sein, daß auch bei eintretendem heißerem Ofengang die flüssige Schmelze noch nicht bis an die Wandung vordringt. Mindestens 25 cm Abstand von den Elektroden bis zum Ofenmantel ist hierzu erforderlich. Aus der jeweiligen Kapazität des Ofens und aus der Anzahl und dem Querschnitt der Elektroden, die durch die gewählte Stromdichte gegeben sind, lassen sich die Abmessungen des Ofenmantels errechnen.

Die Öfen sind teils rund, in den meisten Werken jedoch rechteckig. Als Grundplatte des Ofens dient meistens eine Gußeisenplatte, die mit Rippen, Bolzen oder sonstigen Einrichtungen versehen ist, um eine innige Verbindung mit der Kathodenmasse zu gewährleisten. Die Kathodenmasse ist Elek-

trodenkohle, die in ähnlicher Weise vorbereitet wird, wie es für die Anodenherstellung angegeben wurde; doch braucht man dabei nicht so ängstlich darauf bedacht zu sein, daß das Material absolut aschearm ist, weil der Verbrauch an der Kathode gering ist, somit das Metall auch von dieser Seite wenig Verunreinigungen aufnehmen kann. Man kann also z. B. den teuren Petrolkoks durch Gaskoks, Anthrazit u. dgl. ersetzen. Manche Werke mauern die Kathodenkohle als fertig gebrannte Elektrodenblöcke auf die Grundplatte auf, andere tragen die sog. grüne, d. h. ungebrannte Masse auf und unterwerfen die ganze Platte mit der Elektrodenmasse dem Brennprozeß wie bei

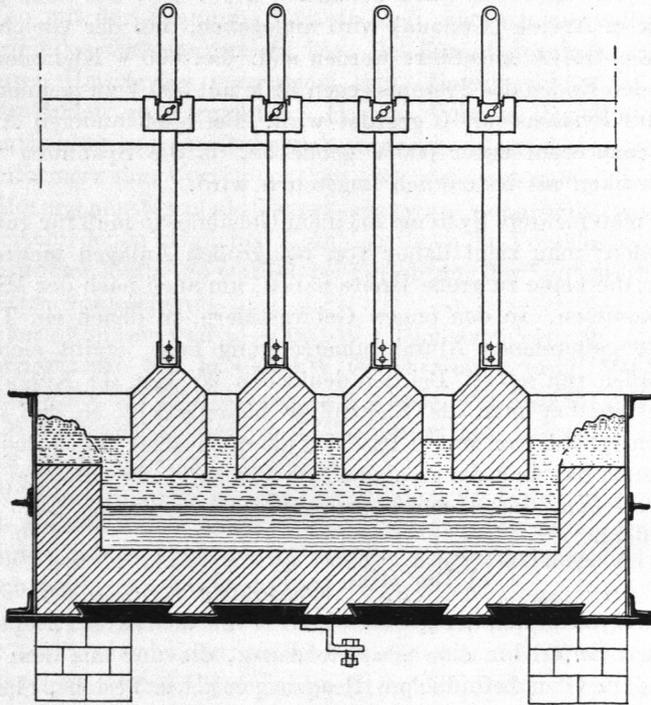


Fig. 177. Aluminium-Ofen.

der Anodenherstellung. Die Masse wird hierzu in erwärmtem Zustand auf die Platte aufgestampft unter Anwendung von Schablonen, um die gewünschte Form zu erzielen. Man gibt ihr meist die Form einer Wanne, damit das abgeschiedene Aluminium besser zusammengehalten wird. Statt zu stampfen kann man sich auch einer Rüttelmaschine bedienen, wie man sie in Gießereien zum Rütteln des Formsandes benutzt. Für das Brennen müssen die Böden mit Kohlenpulver abgedeckt werden, um ein Verbrennen zu verhindern, und auch, um die Eisenteile vor dem Verzundern zu bewahren. Das Brennen der ganzen Ofenböden erfordert die Anlage besonderer Brennöfen, die, wenn es sich nicht um größere Werke handelt, schlecht ausgenutzt sind. Man hat daher auch versucht, die Böden nach der Montage des Ofens an Ort und Stelle mittels elektrischen Stromes zu brennen.

Die Stromzuführung zu der die Kathode bildenden Elektrodenmasse kann durch die Grundplatte erfolgen, die dann mit Ansätzen für den Anschluß der Leitungsschienen versehen sein muß, oder man bettet in die Kohlenmasse besondere metallische Teile ein, durch die man den Strom der Masse zuführt. Wenn man die Stromzufuhr durch die Bodenplatte wählt, ist die bereits erwähnte unterkellerte Aufstellung günstig, weil man an die isoliert aufgestellten Böden auch von unten leicht beikommen kann und geringe Kurzschlußgefahr besteht.

Auf den Rand der Bodenplatte setzt sich der schmiedeeiserne Mantel des Ofens, der entweder senkrecht steht oder sich nach oben wenig erweitert. Oben und unten trägt er einen Rand von Winkeleisen, der untere dient zur Befestigung auf der Grundplatte, der obere zur Versteifung. Zu dem gleichen Zwecke können sich noch weitere Bandagen an dem Mantel befinden, weil sich das Schmiedeeisen sonst leicht verzieht. Wie schon erwähnt, bildet erstarrte Schmelze die eigentliche Innenwandung des Ofens gegen das Elektrolysebad. Im Betrieb wird die Kathode durch das auf ihr abgeschiedene Metall geschützt, das dann selbst die Rolle der Kathode übernimmt. Die Kohlenkathode ist erforderlich, da das Aluminium zuviel Eisen aufnehmen würde, wenn es unmittelbar mit der eisernen Bodenplatte in Berührung stünde.

Von dem bis jetzt beschriebenen Teil des Ofens elektrisch völlig isoliert ist der übrige Teil, der die Stromzuführung zu den Anoden und das Traggerüst für diese Elektroden bildet. Die Ausführung kann in verschiedenster Weise erfolgen, ohne dadurch Einfluß auf die Durchführung des Prozesses zu erlangen. Im allgemeinen wird man eine oder mehrere Tragschienen über dem Ofen anordnen zum Anklemmen der die Elektroden tragenden Stangen. Diese Tragschienen sind mit Kupferschienen belegt, die der Stromzuführung dienen. Zweckmäßigerweise ist die Tragschienenanordnung als Ganzes heb- und senkbar, damit man alle Elektroden des Ofens gemeinsam heben oder senken kann. Die Stromzuführung zu den Tragschienen muß durch Kabel oder Bänder erfolgen, die diese Bewegungen zulassen. Auf dem Traggerüst jedes Ofens ist ein Voltmeter montiert, das so angeschlossen ist, daß man die jeweilige Gesamtspannung des betreffenden Ofens ablesen kann. Häufig ist dieses Voltmeter noch mit einer Glühlampe versehen, die bei der normalen Spannung des Ofens nicht oder nur ganz schwach leuchtet. Bei Ansteigen der Spannung leuchtet diese Lampe hell auf, wodurch den Arbeitern diese Spannungsänderung deutlich angezeigt wird. Auf die Bedeutung dieses Signales wird später noch näher eingegangen werden.

An die Tragschienen werden die Elektrodenstangen angeklemt. Es sind dies Kupferschienen, die mit den als Anoden dienenden Kohlenelektroden fest verbunden sind. Das Anklemmen erfolgt derart, daß jede Elektrode für sich gehoben und gesenkt werden kann. Zu diesem Zwecke sind die Elektrodenstangen bisweilen als Zahnstangen ausgebildet, wobei dann die Klemmvorrichtung mit dem entsprechenden Getriebe ausgerüstet ist. Meistens jedoch verzichtet man auf diese Komplikation und hängt die Elektrode an einen Flaschenzug, der an einer Laufkatze über den Ofen hängt, je ein solcher genügt für mehrere Öfen.

f) Die Elektroden.

Die Elektroden (Anoden) sind in Form und Größe verschieden. Während man früher zylindrische Elektroden bevorzugte, findet man jetzt in den Betrieben meistens prismatische. Der Querschnitt der Elektroden schwankt ebenfalls und liegt etwa zwischen 600 und 800 qcm. Bei den zylindrischen waren die Querschnitte oft geringer. Das erhöhte Gewicht größerer Elektroden macht diese unhandlich. Die Länge der Elektroden ist verhältnismäßig gering, obwohl man annehmen soll, daß bei längeren Elektroden das Verhältnis der Elektrodenreste zu dem Gesamtverbrauch günstiger sein sollte. Die Länge beträgt häufig nur 35 cm. Bei längeren Elektroden steigt, namentlich bei unruhigem Ofengang, der Luftabbrand leicht, so daß der Vorteil des geringeren Restanfalles ausgeglichen wird. Um den Restanfall zu verringern, sind die oberen Kanten der Elektroden abgeschrägt.

Zur Verbindung der Elektroden mit den Elektrodenstangen (s. Fig. 178) braucht man meist ein Verbindungsstück. Dieses, als Nippel bezeichnete Stück kann sehr verschieden ausgebildet sein; je nach seiner Form wird der

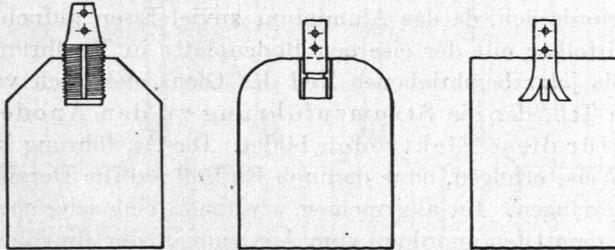


Fig. 178. Elektroden mit verschiedener Befestigung.

Nippel aus Guß- oder aus Schmiedeeisen hergestellt. Die eine Art Nippel ist ein ca. 20 cm langes Stück einer starken eisernen Stange, an dem einen Ende mit Löchern versehen zum Anschrauben der Elektrodenstange, am anderen Ende schwalbenschwanzförmig aufgebogen. Mit diesem Ende wird der Nippel in die grüne Masse bei der Elektrodenherstellung eingebettet und ist nach dem Brennen dann fest mit der Elektrode verbunden. Das herausragende Ende des Nippels macht die Elektroden beim Einsetzen in den Brennofen sperrig, ebenso beim Transport, wobei durch Anschlagen noch Bruch oder Lockerung des Kontaktes entstehen kann.

Einfacher für die Elektrodenherstellung ist es, die Elektroden mit einem Loch in der oberen Fläche zu liefern, das 80 bis 100 mm breit und ebenso tief ist. In dieses Loch werden dann runde Nippel, die mit Gewinde versehen sind, eingeschraubt, das obere Ende dieser Nippel ist mit einer Fläche zum Anschrauben der Stangen versehen.

Schließlich sind auch noch Nippel im Gebrauch, die aus Rundstangen gefertigt werden. Am oberen Ende ist natürlich wieder eine Fläche für den Kontakt mit der Elektrodenstange, am unteren Ende dagegen nur eine Rille oder sonstige Unebenheit. Dieser Nippel muß noch einen gewissen Spielraum in dem Loch der Elektrode haben, auch schlägt man in die Wandung dieses

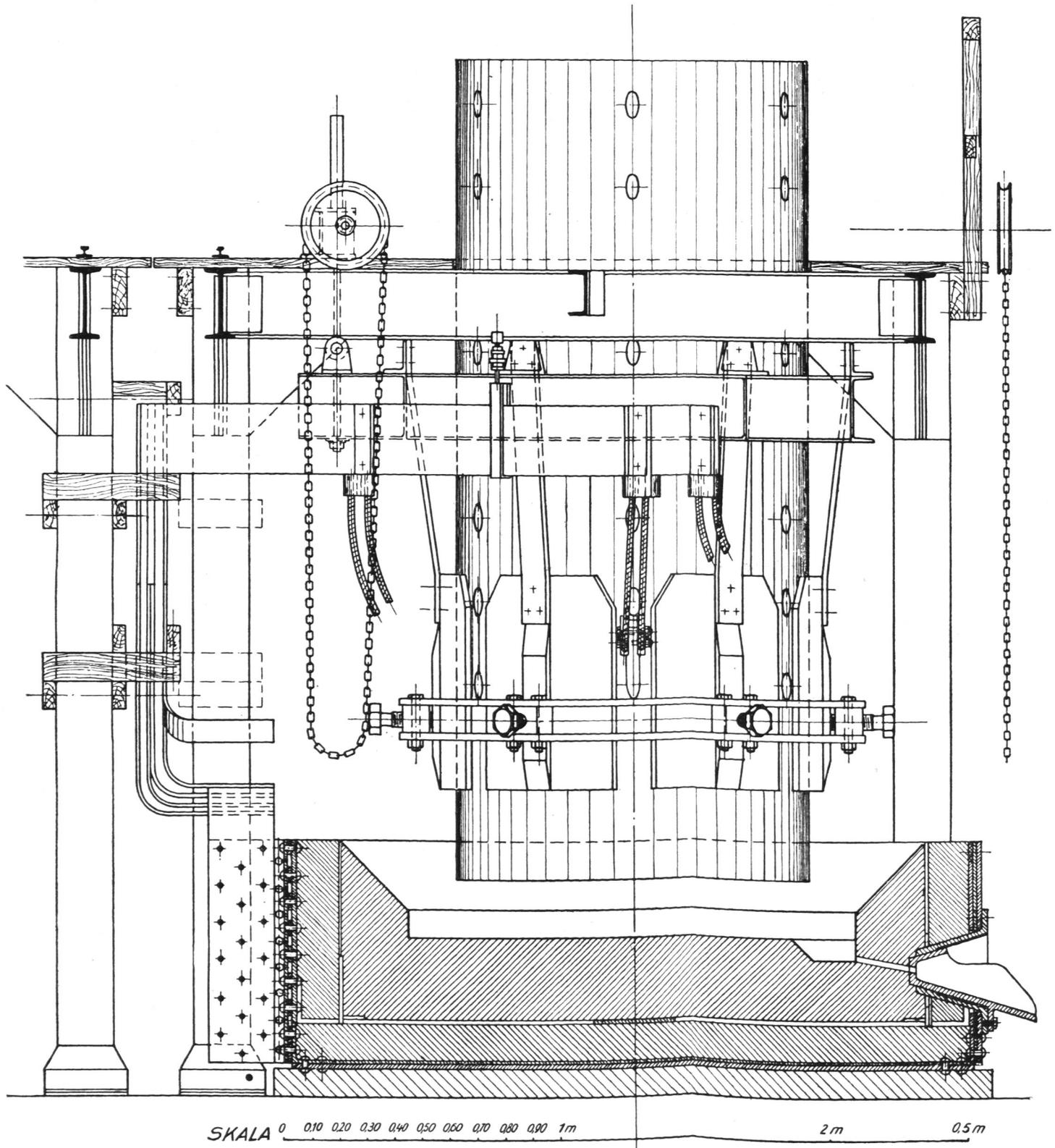


Fig. 179. Aluminium-Ofen mit Söderberg-Elektrode.

Loches noch ein paar Vertiefungen. Die Befestigung des lose in dem Elektrodenloch stehenden Nippels erfolgt dann durch Eingießen von Gußeisen oder auch Bronze. Nach dem Erkalten des beigegegossenen Metalls sitzt zwar der Nippel nicht sehr fest, und die Elektrode könnte ohne die vorgesehenen Unebenheiten leicht abfallen, allein der Ausdehnungskoeffizient des Metalls genügt, um bei der Temperatur des Elektrolysebades wieder einen ausreichenden Kontakt herzustellen. Auch die Elektrodenstangen hat man ohne Nippel mit ihrem leicht konischen kupfernen Ende in die ebenfalls konischen Löcher der Kohlen einfach eingekleimt. Bei leichten Elektroden genügt diese Befestigung, da durch die Ausdehnung des Kupfers im warmen Ofen die Festhaftung erhöht wird.

Man hat auch die bei der Erzeugung von Carbid, Eisenlegierungen usw. mit großem Erfolg eingeführte Söderberg-Elektrode bei der Aluminiumerzeugung zur Anwendung gebracht. Die Söderberg-Elektrode ist eine kontinuierliche Elektrode, d. h. entsprechend dem Abbrand wird die Elektrode oben verlängert, so daß keine Elektrodenreste oder Stumpfen entstehen. Eine solche Elektrode besteht aus einem weiten Rohr aus Blech, das den Mantel für die Elektrodenmasse bildet, die grüne Masse wird in den Mantel eingefüllt und festgestampft. In dem Maße, wie die Elektrode im Bad aufgebraucht wird, muß man die ganze Elektrode mit dem Mantel von Zeit zu Zeit nachrutschen lassen, ebenso wird neue Masse in den Mantel nachgefüllt und der Mantel verlängert, da dieser mit der Kohle im Bad verschwindet. Zur Vermeidung einer Verunreinigung des zu erzeugenden Metalls ist der Mantel aus Aluminium, ebenso die nach außen stehenden Rippen, an die man die Stromzuführungskabel anschließt. Die ganze Elektrode ist durch Klemmbacken gehalten, die durch Lockerung das erwähnte Nachrutschen gestatten. Die gesamte Aufhängevorrichtung ist heb- und senkbar, um die genaue Einstellung des Elektrodenabstandes vom Metall vornehmen zu können (s. Fig. 179, Tafel XXVIII).

Der schwierigste Teil des durch die Einführung der Söderberg-Elektrode in die Aluminiumelektrolyse geschaffenen Problems ist die Stromübertragung von dem Mantel nach der gebrannten Elektrodenmasse. Bei der anderweitigen Verwendung dieser Elektrode benutzt man hierzu radial nach innen gerichtete Eisenbleche; diese Anordnung hat man auch für die Aluminiumöfen angewandt, nur muß man diese Bleche möglichst kurz machen, da mit dem Abbrennen der Elektrode auch allmählich diese Bleche aufgezehrt werden und das Eisen restlos in das Aluminium übergeht. Man kann also diese Bleche nur so groß machen, als der statthafte Eisengehalt im Aluminium dies zuläßt. Andererseits ist zu berücksichtigen, daß die grüne Masse so gut wie keine Leitfähigkeit besitzt und die Brennzone, in der die Leitfähigkeit erst auftritt, dicht über dem Bad liegt, so daß nur wenige Zentimeter Schichthöhe für die Stromzuführung zur Verfügung sind. Die für die Stromabgabe in Betracht kommende Oberfläche jener Radialbleche ist also beschränkt. Diese ebenso wie den Mantel aus Aluminium zu machen, ist aber nicht zugänglich, da sie dann vorzeitig wegschmelzen würden und ihren Zweck nicht erfüllen könnten. Andere Wege zur Lösung dieses Problems sind noch im Versuchsstadium.

Die Vorteile der kontinuierlichen Elektrode sind einmal das bereits erwähnte Wegfallen der Elektrodenreste und dann die Ersparnis an Anlagekosten für die Errichtung einer Elektrodenpresserei und -brennerei. Demgegenüber hat man einen vermehrten Stromverbrauch, einmal, da man die Elektrodenmasse durch den elektrischen Strom brennt, und dann durch Spannungsverlust bei der erschwerten Stromzufuhr. Auch ist die Führung des Ofens etwas schwieriger, da man bei Anwendung einer Söderberg-Elektrode die Abmessungen so groß wählt, daß man nur eine einzige solche Elektrode je Ofen braucht. Wo durch billigen Strompreis der Mehraufwand an elektrischer Energie keine ausschlaggebende Rolle spielt gegenüber der Mechanisierung des Betriebes und der Kapitalinvestition für die Errichtung einer Elektrodenfabrik, kann der Söderberg-Elektrode der Vorzug gegeben werden. Es stehen neben einzelnen Öfen in Deutschland, in Norwegen, Amerika und Frankreich eine ganze Anzahl Aluminiumöfen mit Söderberg-Elektroden im Betrieb, und in Spanien ist man im Begriff, das in den Pyrenäen zu errichtende Werk nur mit diesen Elektroden auszurüsten.

g) Physikalische und chemische Grundlagen des Elektrolyseverfahrens.

Die Grundlagen des Verfahrens sind kurz zusammengefaßt die folgenden:

Zwischen Kohlenelektroden wird die in geschmolzenem Kryolith gelöste Tonerde elektrolytisch zersetzt, wobei sich das abgeschiedene Metall unter der Elektrolytschmelze auf der Kohlenkathode sammelt, während der freiwerdende Sauerstoff an die von oben in die Schmelze hängenden Kohlenanoden wandert und den Kohlenstoff der Anoden zu Kohlenoxyd oder Kohlen-säure oxydiert. Die Elektrolyse wird bei ungefähr 950°C ausgeführt. Man benutzt zur Heizung des Bades den elektrischen Strom und muß deshalb die Stromdichte so hoch wählen, daß das Bad auf der richtigen Temperatur gehalten wird.

Das Wesentlichste für die erfolgreiche Durchführung des Verfahrens ist die richtige Zusammensetzung des Elektrolyten. Man hat eine große Anzahl verschiedener Zusammenstellungen versucht, verschieden sowohl in bezug auf die Komponenten als auch auf deren Mischungsverhältnis. Um die Mannigfaltigkeit zu zeigen, seien einige dieser Zusammenstellungen angeführt:

1. Kryolith.
2. Kryolith und Tonerde.
3. Kryolith, Natriumfluorid und Tonerde.
4. Aluminiumfluorid, Kryolith und Tonerde.
5. Kryolith, Calciumfluorid und Tonerde.
6. Chiolith und Tonerde.
7. Natriumfluorid, Aluminiumfluorid und Tonerde.
8. Natriumfluorid, Lithiumfluorid, Aluminiumfluorid und Tonerde.
9. Kaliumfluorid, Aluminiumfluorid und Tonerde.
10. Kaliumfluorid, Lithiumfluorid, Aluminiumfluorid und Tonerde.
11. Calciumfluorid, Aluminiumfluorid und Tonerde.

12. Natriumfluorid, Calciumfluorid, Aluminiumfluorid und Tonerde.
13. Kryolith, Aluminiumfluorid, Calciumfluorid, Calciumchlorid und Tonerde.
14. Aluminiumfluorid und Natriumchlorid.
15. Kryolith und Natriumchlorid.

Der Schmelzpunkt des Elektrolyten darf nicht zu hoch liegen, da sich bei einer Überhitzung des abgeschiedenen Aluminiums an der Berührungsstelle mit der Kathodenkohle Aluminiumkarbid bildet.

Als weitere Folge zu hoher Temperaturen tritt Nebelbildung ein, d. h.: das Aluminium schlägt sich nicht vollständig als flüssiges Metall nieder, sondern bleibt in Form eigentümlicher feiner Nebel im Bad verteilt. Nach der Ansicht von Haber gehen diese Aluminiumnebel, wenn sie in die Nähe der Anode gelangen, unter Depolarisation der Anode, wieder in Tonerde über, so daß auf diese Weise die Ausnützung des chemischen Effektes des durch das Bad geschickten Stromes sehr vermindert wird. Mit steigender Temperatur wächst außerdem der Verlust an Fluoriden durch Verdampfen. Auch der Energiebedarf wächst mit steigender Temperatur; das Leitungsvermögen eines Elektrolyten wächst ebenfalls im allgemeinen mit steigender Temperatur, so daß bei höherer Temperatur eine geringere Spannung ausreichend sein könnte. Bei der Aluminiuelektrolyse muß jedoch das Bad ohne äußere Wärmezufuhr allein durch die vom Strom erzeugte Joulesche Wärme auf seiner Temperatur erhalten werden, wofür ein großer Teil der aufgewendeten elektrischen Energie verbraucht wird. Die Wärmezufuhr, die erforderlich ist, um das Bad auf konstanter Temperatur zu erhalten, wird sogar noch schneller wachsen als die Temperatur selbst, da es sich nicht nur um Wärmeverluste durch Leitung, sondern auch durch starke Ausstrahlung handelt. Ferner steigt mit der Temperatur auch die Lösungstension und die Diffusionsgeschwindigkeit im schmelzflüssigen Elektrolyten. Hand in Hand hiermit geht ein höheres Wiedervereinigungsbestreben der elektrolytisch entladene abgeschiedenen Stoffe. Es ergibt sich somit die Notwendigkeit, einen Elektrolyten mit möglichst niedrig liegendem Schmelzpunkt zu wählen, damit man bei möglichst niedrigen Temperaturen elektrolysieren kann.

Über die Löslichkeitsverhältnisse des Systems Kryolith-Tonerde geben die Arbeiten von Pascal und Jouniaux Aufschluß, wie aus dem wiedergegebenen Diagramm (Fig. 180) ersichtlich ist.

Auf der Ordinate sind die Temperaturen aufgetragen, während auf der Abszisse die Zusammensetzung des Gemisches derart zur Darstellung kommt, daß Punkt *A* 100 % Kryolith, Punkt *B* 100 % Tonerde bezeichnet; ein Punkt zwischen *A* und *B* entspricht demnach einem Gemisch, in dem beide Verbindungen in solchen Mengen vorhanden sind, die in umgekehrtem Verhältnis wie die Abstände dieses Punktes von *A* und *B* zueinander stehen. Aus dem Diagramm ist zunächst der Schmelzpunkt des reinen Kryoliths ersichtlich, der bei 977° C liegt, der Schmelzpunkt der reinen Tonerde liegt bei 2020° C. Der gestrichelte Teil der Linien ist nicht erforscht, stellt also nur den wahrscheinlichen Verlauf der Kurven dar. Oberhalb des Linienzuges *MRO* befindet sich das System überall in flüssigem Zustande, es findet bei allen Mischungsverhältnissen vollkommene gegenseitige Löslichkeit statt. Im festen Zustand dagegen ist die Löslichkeit beschränkt. In den durch

den Linienzug *MRP* begrenzten Gebieten befinden sich Mischkristalle mit einer flüssigen Phase im Gleichgewicht; dasselbe gilt von dem Gebiet *ORS*.

PS ist die eutektische Linie des Systems, unterhalb der Linie *MPSO* ist der Bereich der festen Lösungen.

Aus dem Diagramm ergibt sich, daß man, um bei einer möglichst niedrigen Temperatur eine flüssige Schmelze zu erzielen, suchen muß, nahe an den

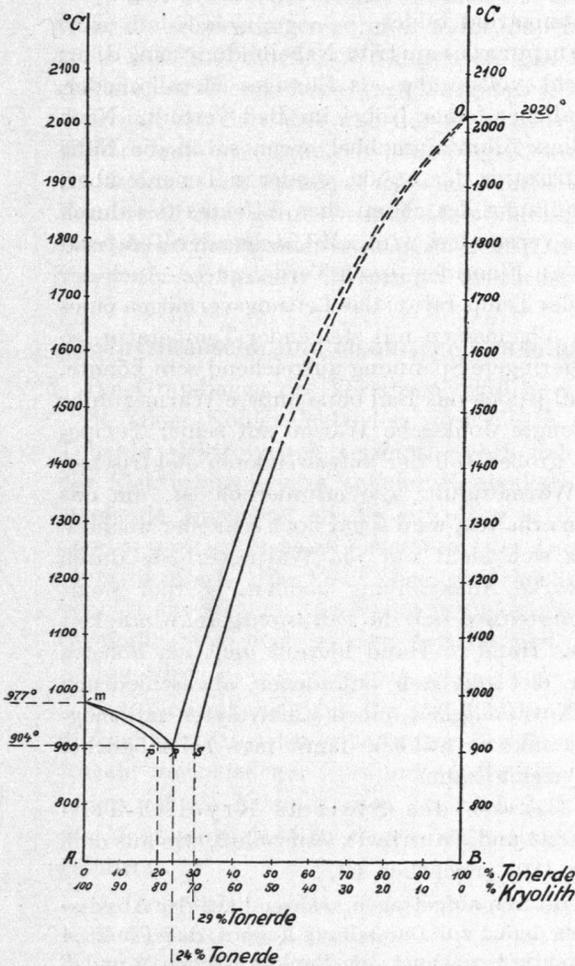


Fig. 180. Zustandsschaubild des Systems Tonerde-Kryolith. — (Nach Pascal u. Jouniaux, Z. f. Elektroch. 1913.)

eutektischen Punkt *R* heran zukommen. Die Erfahrungen der Praxis stehen hiermit im Einklang, da man Gehalte von 15 bis 20% Tonerde und eine Badtemperatur von etwa 950°C bei der Elektrolyse anwendet. Um bei noch niedrigeren Temperaturen flüssige Gemische zu erzielen, ist eine dritte Komponente erforderlich, z. B. Flußspat. Pascal und Jouniaux haben auch dieses ternäre System studiert und gefunden, daß der eutektische Punkt des Systems bei 868°C liegt. Die Zusammensetzung der Schmelze ist dann: 59,3% Kryolith, 23% Flußspat, 7% Tonerde. Der Zusatz von Flußspat hat auch Eingang in die Praxis gefunden.

Der Zusatz von Flußspat konnte jedoch in der Praxis keine allgemeine Verbreitung finden, da die Lösungsfähigkeit eines solchen Elektrolyten für Tonerde ziemlich gering ist und das spezifische Gewicht des flüssigen Aluminiums liegt. Fedotieff und Iljinsky haben festgestellt, daß ein Zusatz von

Fluornatrium zu Kryolith die Löslichkeit für Tonerde wesentlich erhöht. Übersteigt jedoch der Gehalt an Fluornatrium den des eutektischen Gemisches von Kryolith und Fluornatrium, so wird die Löslichkeit der Tonerde wieder geringer und bei reinem Fluornatrium besteht überhaupt keine Löslichkeit mehr. Trotzdem die Lösungen von Tonerde im eutektischen Gemisch von Kryolith

und Fluornatrium einen wesentlich tieferen Schmelzpunkt haben als die Elektrolytmischungen des Kryoliths mit Tonerde, erweisen sie sich doch für die Praxis als ungeeignet, wie die Versuche von Fedotieff und Iljinsky auch ergeben haben. Schuld daran sind verschiedene Umstände. Das Verhältnis zwischen den spezifischen Gewichten der Schmelze und dem des Metalles ist sehr ungünstig; die sehr erhebliche Löslichkeit des metallischen Aluminiums in dieser Schmelze verursacht eine starke Anodendepolarisation, womit wieder eine schlechte Stromausbeute in Zusammenhang steht. Etwas günstiger als der Zusatz von Fluornatrium wirkt dagegen der Zusatz von Fluoraluminium, das den Schmelzpunkt erniedrigt und auch gleichzeitig das spezifische Gewicht der Schmelze herabsetzt. Demgegenüber steht als



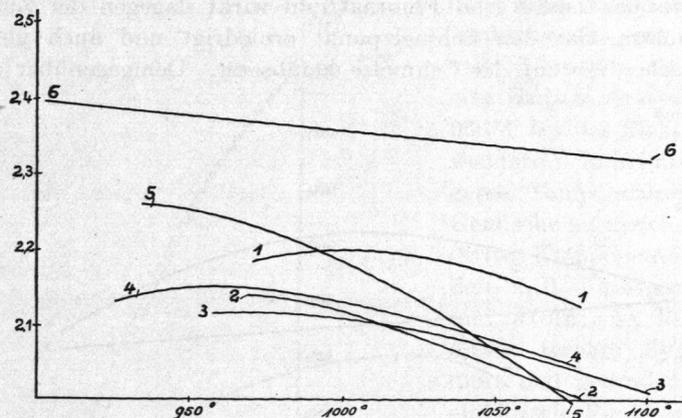
Fig. 181. Abhängigkeit der Dichte von der Temperatur nach Pascal u. Jouniaux.
 1 Kryolith; 2 Kryolith mit 3% SiO₂; 3 88% Kryolith, 12% Flußspat;
 4 74,6% Kryolith, 25,4% Flußspat; 5 Aluminium.

Nachteil aluminiumfluoridreicher Schmelzen die erhebliche Flüchtigkeit des Aluminiumfluorids, die, abgesehen von den Unannehmlichkeiten für den menschlichen Organismus, Entstehung von Flurschäden usw., auch zu empfindlichen Materialverlusten führen kann; auch verringert der Zusatz von Aluminiumfluorid zum Kryolith die Löslichkeit der Tonerde.

Da die Schmelze über dem Metallbad lagern soll, muß ihr spezifisches Gewicht um ein gewisses Maß geringer sein als das des flüssigen Aluminiums; ist der Unterschied zwischen den beiden spezifischen Gewichten nicht groß genug, dann „geht das Aluminium schlecht zusammen“, d. h. es steigt leicht, zumal das Bad meist mehr oder weniger stark in Bewegung ist, zur Oberfläche, wo es verbrennen kann. Die Dichte der einzelnen Schmelzgemische wurde ebenfalls von Pascal und Jouniaux untersucht.

Auf dem von ihnen gegebenen Diagramm (Fig. 181) ist die gerade, mit 5 bezeichnete Linie die Dichte-Temperaturkurve für das geschmolzene Aluminium. Die

Dichte des Aluminiums ist zwar nur bis zu einer Temperatur von 925° C ermittelt. Da die Kurve bis zu diesem Punkt jedoch geradlinig verläuft, besteht wohl Berechtigung zu der Annahme, daß die fehlenden Werte auf derselben Geraden liegen. Kurve 1 gilt für reinen Kryolith; wie an ihrem Verlauf erkennbar ist, zeigt dieser Körper, ähnlich wie Wasser, etwas oberhalb seines Schmelzpunktes ein Dichte-Maximum. Da der natürliche wie auch der künstliche Kryolith stets etwas kieselsäurehaltig ist, ist es interessant, den Einfluß der Kieselsäure auf die Dichte kennenzulernen. Aus der Lage von Kurve 2, die für Kryolith mit 3% Kieselsäure gilt, erkennt man, daß der Kieselsäuregehalt die Dichte erheblich



Dichte-Temperatur-Kurve nach Pascal und Jouniaux.

Kryolith %	Tonerde %	Schmelz- punkt °C	Temperatur bei Kurven- Maximum	Dichte bei Kurven- Maximum	Kurve Nr.
100	0	977	995	2,216	1
95	5	969	970	2,142	2
90	10	955	960	2,115	3
80	20	924	950	2,154	4
76	24	904	935	2,260	5

Fig. 182. Abhängigkeit der Dichte von der Temperatur nach Pascal u. Jouniaux.

1 Kryolith; 2 95% Kryolith, 5% Al_2O_3 ; 3 90% Kryolith, 10% Al_2O_3 ;
4 80% Kryolith, 20% Al_2O_3 ; 5 76% Kryolith, 24% Al_2O_3 ; 6 Aluminium.

herabsetzt. Kurve 3 und 4 zeigen den Einfluß eines Flußspatgehaltes. Bei 12% Flußspatzusatz zum Kryolith (Kurve 3) nähert sich die Dichte des Gemisches bei rd. 985° C sehr stark der Dichte des Aluminiums bei dieser Temperatur. Die Kurve für das Gemisch mit 25,4% Flußspat (Kurve 4) liegt bereits weit über der Kurve des Aluminiums.

Das folgende Diagramm (Fig. 182) zeigt die entsprechenden Kurven für Kryolith-Tonerde-Gemische, die bis zu etwa 20% Tonerdegehalt geringere Dichten aufweisen als der reine Kryolith.

Bei Gemischen von Kryolith, Flußspat und Tonerde wirkt der Tonerdegehalt dem die Dichte erhöhenden Flußspatgehalt entgegen, so daß Gemisch I und II nachstehender Tabelle praktisch in Frage kommen könnten, wenn-

gleich Gemische von Kryolith mit 10 bis 20% Tonerde, wie wir aus dem Diagramm (Fig. 182) eben gesehen haben, eine noch günstigere Dichte aufweisen.

	Kryolith %	Tonerde %	Flußspat %	Temper. °C bei Kurven- maximum	Dichte bei Kurven- maximum
I.	81,82	9,09	9,09	985	2,219
II.	71,00	17,75	11,25	1010	2,228
III.	67,50	7,50	25,00	985	2,275
IV.	64,30	11,90	25,70	1010	2,305
V.	59,30	17,70	23,00	1000	2,330
VI.	57,20	14,30	28,00	1000	2,385

An einen guten Elektrolyten sind allgemein folgende Anforderungen zu stellen:

1. der Schmelzpunkt darf nicht allzu hoch über dem des Aluminiums liegen.
2. Die Lösungsfähigkeit für Tonerde soll möglichst groß sein.
3. Die Dichte des Schmelzgemisches muß bei der Temperatur des Bades genügend kleiner sein als die des Aluminiums.

Ein Gemisch von Kryolith mit 10 bis 20% Tonerde erfüllt diese Bedingungen.

Die in der Praxis erzielten Verbrauchszahlen für Tonerde, Kryolith und Aluminiumfluorid zeigen, daß praktisch nur die Tonerde der Elektrolyse unterworfen ist, und daß der Kryolith bzw. das Aluminiumfluorid erst dann zersetzt wird, wenn das Bad an Tonerde verarmt ist. Die Zersetzungsspannung der Tonerde ist nämlich niedriger als die des Aluminiumfluorides und des Natriumfluorides. Die Zersetzungsspannung dieser Verbindung läßt sich angenähert nach der Thomsonschen Regel ermitteln:

Es bezeichne: E die Zersetzungsspannung der Verbindung,
 C die Wärmetönung der Verbindung, bezogen auf 1 Al,
 n die Wertigkeit.

Dann gilt nach Thomson:

$$E = \frac{C}{n \cdot 96\,500 \cdot 0,24} \text{ Volt.}$$

Errechnet man nach dieser Formel die Zersetzungsspannung der Tonerde, so erhält man:

$$\text{Wärmetönung der Tonerde: } C = \frac{375\,800}{2} = 187\,900 \text{ cal.}$$

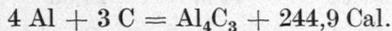
$$\text{Wertigkeit des Aluminiums: } n = 3,$$

$$E = \frac{187\,900}{3 \cdot 96\,500 \cdot 0,24} = 2,70 \text{ Volt.}$$

In gleicher Weise errechnet sich für das Aluminiumfluorid eine Zersetzungsspannung von 3,58 V und für das Natriumfluorid eine Zersetzungsspannung von 4,73 V.

Der bei der Zerlegung der Tonerde an der Anode sich entwickelnde Sauerstoff oxydiert den Kohlenstoff der Anode zu Kohlenoxyd oder Kohlensäure. Zieht man unter Berücksichtigung der Bildungsenergie des Kohlenoxydes

von der oben berechneten Zersetzungsspannung der Tonerde 0,6 V ab, so bleiben 2,2 V. Tatsächlich ist es auch J. W. Richards gelungen, den Vorgang der Elektrolyse mit einer Spannung von 2,2 V zu erzielen, ebenso gibt auch G. Gin als Mittelwert aus 4 Messungen 2,3 V an. Im Widerspruch hierzu will Langley 1,2 V gemessen haben. Fedotieff und Iljinsky haben feststellen können, daß bei dieser Spannung bereits eine gewisse elektrolytische Wirkung des Stromes möglich ist, falls die Temperatur hoch genug ist und als Kathode ein Kohleboden dient. Es bildet sich dann Aluminiumkarbid nach der Gleichung:



Es wäre von 2,2 V noch ein der Bildungsenergie des Aluminiumkarbides entsprechender Abzug vorzunehmen; auf diese Weise läßt sich wahrscheinlich der von Langley gefundene Wert von 1,2 V erklären. Jedenfalls scheint festzustehen, daß eine dauernde Zersetzung der Tonerde und die Abscheidung flüssigen Aluminiums erst von einer Spannung von 2,2 V an beginnt.

Bei der praktischen Durchführung des Verfahrens reicht diese Spannung jedoch nicht aus; da der Strom außer der chemischen Arbeit auch Wärme erzeugen muß, ist eine höhere Spannung aufzuwenden, wie sich aus folgender Überlegung ergibt:

Die zur Zersetzung der Tonerde vom Strom zu leistende Arbeit sei mit A_1 bezeichnet, die der Erwärmung des Bades dienende Arbeit sei A_2 , die gesamte vom Strom geleistete Arbeit ist dann $A_1 + A_2 = A$

$$A_1 = E_1 \cdot J \cdot Z,$$

$$A_2 = E_2 \cdot J \cdot Z,$$

$$A = A_1 + A_2 = (E_1 + E_2) \cdot J \cdot Z = E \cdot J \cdot Z.$$

Es bedeutet hierin:

E_1 die Zersetzungsspannung der Tonerde,

E_2 die zur Überwindung des Badwiderstandes erforderliche Spannung,

J die Stromstärke,

Z die Zeit.

Es sei bereits hier bemerkt, daß die Gesamtspannung E , d. h. der Spannungsabfall im Bad, gemessen zwischen den Elektroden, zu ungefähr 4,4 V angenommen werden kann; der Spannungsbedarf des gesamten Ofens beläuft sich auf 6 bis 7 V; diese Zahlen gelten für die augenblicklich in Deutschland übliche Betriebsweise.

Der theoretische Tonerdeverbrauch für 100 kg abgeschiedenes Aluminium ergibt sich aus folgender Rechnung:

$$\text{Atomgewicht des Aluminiums} = 26,97,$$

$$\text{Atomgewicht des Sauerstoffs} = 16,00.$$

$$\frac{\text{Al}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3} = \frac{53,94}{101,94} = \frac{100}{x}$$

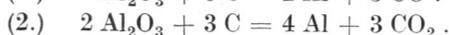
$$x = \text{rd. } 189 \text{ kg Tonerde.}$$

Der Verbrauch an Kryolith ist bei der normalen Badtemperatur von 950°C gering; er ist bedingt durch Verdampfungsverluste, und zwar ist die Flüchtigkeit des Aluminiumfluorides größer als die des Natriumfluorides. Angeblich ist die Flüchtigkeit des künstlichen Kryoliths größer als die des natürlichen. Eine Erklärung dieser Tatsache wird darin gesucht, daß das Kunstprodukt lediglich als Gemisch von Natriumfluorid und Aluminiumfluorid aufzufassen ist, während man dem natürlichen Kryolith vielleicht mehr den Charakter eines komplexen Fluorides zusprechen kann.

Das abgeschiedene Aluminium sammelt sich am Boden des Bades und übernimmt dann selbst die Funktion der Kathode. An der Berührungsfläche des flüssigen Metalles mit der Kohlenkathode kann Aluminiumkarbid entstehen. Versuche von Fedotieff und Iljinsky haben gezeigt, daß die Bildung dieses Karbids mit einer spezifischen Wirkung des elektrischen Stromes nichts zu tun hat, daß vielmehr bereits alle Bedingungen für Karbidbildung gegeben sind, wenn geschmolzenes Aluminium bei 1000 bis 1100°C mit Kohle in Berührung kommt. Schlechte Kohleböden oder solche, die schon lange in Betrieb sind, blättern zuweilen auf, so daß in die schmalen Zwischenräume Metall eindringen kann. An diesen Stellen ist vermutlich infolge von Lichtbogenbildung eine sehr hohe Temperatur die Veranlassung zur Karbidbildung. Man findet bisweilen solche Böden von zahlreichen dünnen Aluminiumkarbid-schichten durchsetzt.

Bei allen Metalldarstellungen durch Elektrolyse geschmolzener Salze oder feuerflüssiger Schmelzen entstehen Verluste des kathodisch abgeschiedenen Metalles durch Bildung von „Metallnebeln“ in der Schmelze. Lorenz kommt durch seine Versuche zur Untersuchung dieser Metallnebel zu der Anschauung, daß eine Suspension ähnlich wie in den Kolloidlösungen vorliegt. Obwohl die Menge des in dieser Form in der Schmelze verteilten Metalles sehr gering ist, so daß eigentlich eine nennenswerte Verminderung der Stromausbeute durch die Nebel nicht zu erwarten ist, ist doch die Möglichkeit gegeben, daß die Nebel durch Diffusion und durch die Bewegung des Bades an der Oberfläche verbrennen, oder in der Nähe der Anoden unter Depolarisation derselben wieder in Tonerde übergehen. Dieser Nebelbildung kann auch eine Verunreinigung des abgeschiedenen Aluminiums zugeschrieben werden, indem Metalloxyde und Kieselsäure, die aus den Elektrodenkohlen, der Tonerde oder dem Kryolith stammen, reduziert werden. Metalle, die elektropositiver sind als das Aluminium, können auch unmittelbar durch die elektrolytische Wirkung des Stromes in das abgeschiedene Aluminium gelangen. Hierfür kommt vor allem das Eisen in Betracht. Elektronegativere Metalle als das Aluminium, wie Calcium und Magnesium, werden sich im Laufe der Zeit in der Schmelze anreichern. Ein Teil des Siliciumgehaltes der Rohmaterialien wird auch in Form von Fluorsilicium verflüchtigt werden.

Der Kohlenstoff der Anode wird durch den bei der Zersetzung der Tonerde freiwerdenden Sauerstoff in Kohlenoxyd oder in Kohlensäure verwandelt nach folgenden Gleichungen:



Der theoretische Kohlenstoffverbrauch ergibt sich dann wie folgt:

$$\begin{aligned} \text{Atomgewicht des Aluminiums} &= 26,97, \\ \text{Atomgewicht des Kohlenstoffs} &= 12. \end{aligned}$$

Bei Annahme von Gleichung (1) ist dann:

$$\frac{2 \text{ Al}}{3 \text{ C}} = \frac{53,94}{36} = \frac{100}{x}$$

$$x = \text{rd. } 66,6 \text{ kg,}$$

d. h. auf 100 kg abgeschiedenes Aluminium kommen etwa 66,6 kg Kohlenstoff; bei Annahme von Gleichung (2) ist der Verbrauch an Kohlenstoff natürlich nur halb so groß. Die in der Praxis erzielten Verbrauchszahlen bei gutem Elektrodenmaterial zeigen, daß wohl beide Reaktionen nebeneinander stattfinden. Bei gutem Elektrodenmaterial und gutem Ofengang ist der Luftabbrand der Elektroden gering, da dann die Temperatur über dem Bad nicht sehr hoch ist.

h) Der Betrieb der Elektrolyse.

Um einen Ofen der Aluminiumelektrolyse in Betrieb zu nehmen, besetzt man ihn mit der entsprechenden Anzahl Anoden, so daß bei der zur Verfügung stehenden Stromstärke auf den Gesamtanodenquerschnitt 1 bis 2 Amp. je Quadratzentimeter kommen. Man setzt die Anoden auf die Kathode auf und schaltet den Strom ein. Nachdem man sich überzeugt hat, daß alle Stromübergänge in Ordnung sind, so daß sämtliche Anoden den Strom gleichmäßig übernehmen, gibt man aus den in Betrieb befindlichen Öfen so viel Metall in den neuen Ofen, daß die Kathode bedeckt ist. Hierauf gießt man ebenfalls aus den anderen Öfen des Betriebes soviel fertigen flüssigen Elektrolyt zu, daß dieser etwa 15 cm hoch im Ofen steht; gleichzeitig hebt man die Anoden einige Zentimeter an, so daß die Elektrolyse einsetzt.

Handelt es sich darum, eine größere Anzahl von Öfen, also etwa ein ganzes System, oder überhaupt eine Neuanlage in Betrieb zu nehmen, muß man natürlich anders verfahren, da weder geschmolzenes Metall noch geschmolzener Elektrolyt zur Verfügung steht. Man setzt in diesem Falle die Anoden nicht direkt auf die Kathode auf, sondern legt kleine Klötzchen aus Elektrodenkohle unter. Diese Klötzchen werden so bemessen, daß ihr Widerstand groß genug ist, um sie durch den Strom auf helle Glut zu erhitzen.

Eine der Zusammensetzung des Elektrolyten entsprechende Mischung von gemahlenem Kryolith und Tonerde wird in den Ofen gegeben und schmilzt durch die Hitze der Widerstandsklötzchen. Ist auf diese Weise eine genügende Menge Elektrolyt geschmolzen, werden die Kohleklötzchen entfernt und der Anodenabstand zur Elektrolyse eingestellt. Bei der Inbetriebsetzung einzelner Öfen könnte man natürlich in der gleichen Weise verfahren, doch erfordert dieses Verfahren mehrere Tage, bis der Ofen imstande ist, eine Produktion zu liefern; denn das Einschmelzen geht langsam vonstatten und erfordert gute Überwachung, ob die Stromverteilung auf den Anoden stets gleichmäßig ist. Zur Feststellung, daß die Anoden gleichmäßig belastet sind, kann man sich kleiner Stromzeiger bedienen, die entweder an den Anodenstangen be-

festigt sind, oder zur Prüfung zeitweise angehalten werden. Ein kleines Eisenstäbchen, drehbar aufgehängt, erfüllt diesen Zweck, indem seine Eigenschaft, sich mehr oder weniger schräg zur Stromrichtung zu stellen, Schlüsse auf die Strombelastung der betreffenden Schiene ermöglicht.

Ist die Elektrolyse in Gang gekommen, muß der Abstand der Anoden von dem als Kathode dienenden Aluminium so eingestellt werden, daß die Strombelastung aller Anoden gleichmäßig ist, und es muß Sorge getragen werden, daß der Elektrolyt die richtige Zusammensetzung hat. Hierzu ist es natürlich erforderlich, daß entsprechend der abgeschiedenen Metallmenge neue Tonerde nachgesetzt wird. Meistens bringt man für jeden Ofen die Menge von Tonerde zu, die innerhalb einer gewissen Zeit durch die Bedienung allmählich der Elektrolyse zuzuführen ist. Für das Tempo dieser Zugabe besteht keine einheitliche Arbeitsweise. Zur Aufgabe der Tonerde bedient man sich kleiner Schaufeln und zum Einrühren eiserner Stangen, bei deren Gebrauch man darauf achten muß, daß sie nicht zu heiß werden, weil sonst die Gefahr besteht, daß Eisen in Lösung geht und das abgeschiedene Aluminium verunreinigt.

Um einen regelrechten Verlauf der Elektrolyse zu erzielen, muß der Zusammensetzung des Elektrolyten große Aufmerksamkeit geschenkt werden: Der erfahrene Praktiker kann aus dem Aussehen Schlüsse auf die Zusammensetzung des Schmelzflusses ziehen, wodurch er in der Lage ist, rasch einzugreifen, während die analytische Untersuchung derartiger Schmelzproben ziemlich viel Zeit beansprucht. Der Elektrolyt, der vielfach nur aus Kryolith und Tonerde besteht, erleidet durch den Prozeß selbst Veränderungen, denn wenn auch der Theorie nach nur die im Kryolith gelöste Tonerde der Spaltung in Aluminium und Sauerstoff unterworfen werden soll, so treten doch auch Zersetzungen des Kryoliths auf, die man ausgleichen muß. Verarmt die Schmelze an Aluminiumfluorid, so fügt man solches zu. Dies wird auch nötig sein, wenn die zu verarbeitende Tonerde Soda enthält, was häufig der Fall ist. Sollte dagegen die Schmelze in ihrer Zusammensetzung einen zu geringen Gehalt an Natriumfluorid aufweisen, so genügt ein Zusatz von Soda, um diesem Übelstand abzuhelfen. Der Zusatz anderer Chemikalien, wie Flußspat u. dgl., wird von den einzelnen Werken ausgeführt, ohne daß eine einheitliche Beurteilung des Wertes dieser Zusätze bestünde.

Zur Herabsetzung der Schmelztemperatur bei Inbetriebnahme von Öfen ist der Zusatz von Chlornatrium empfohlen worden. Diese Herabsetzung der Temperatur ist nur vorübergehend, da das Salz bald wieder verflüchtigt wird, kann aber bei Inbetriebnahme neuer Bäder die Einschmelzdauer wirksam verkürzen. Auch um eingefrorene Bäder wieder in Gang zu setzen, kann ein derartiger Zusatz von Nutzen sein. Das Einfrieren der Öfen, hervorgerufen durch Unterbrechung der Stromzufuhr, ist für den Betrieb eine sehr unangenehme Erscheinung. Bei vollständigem Erstarren des Ofeninhaltes muß man diesen ausmeißeln; aber auch wenn die Stromzufuhr nicht so lange ausgeblieben ist, daß die Schmelze erstarrt ist, kann das Wiedereinschalten Schwierigkeiten bieten. Die Ausdehnungskoeffizienten des Aluminiums und des Elektrolyten sind derart verschieden, daß sich beim Abkühlen das Ver-

hältnis der spezifischen Gewichte umkehrt und das Metall versucht, nach oben zu kommen. Bei der inzwischen eingetretenen Zähflüssigkeit der Schmelze gelingt dies nur teilweise, und es kommt zu einer unregelmäßigen Verteilung des Metalles in der Schmelze. Es entstehen dabei Strombrücken, die sich bei der wiederhergestellten Stromzufuhr störend bemerkbar machen.

Wichtig für den Gang der Elektrolyse ist natürlich der Gehalt des Elektrolyten an Tonerde. Wird dem Bad zuviel Tonerde zugeführt, d. h. mehr als gelöst werden kann, so tritt zuweilen der Fall ein, daß Tonerde durch die Schmelze zu Boden sinkt und dort dem Stromdurchgang einen erhöhten Widerstand bietet. Hierdurch kann örtliche Temperatursteigerung stattfinden, und an solchen überhitzten Stellen kann bei der Berührung des abgeschiedenen Metalles mit der Kohlenmasse der Kathode die Bildung von Aluminiumkarbid auftreten, wodurch weitere Störungen hervorgerufen werden können. Verarmt dagegen der Elektrolyt an Tonerde, so tritt der sog. Anodeneffekt auf. Dieser zeigt sich durch plötzliches starkes Ansteigen der Spannung, so daß die früher erwähnten, mit dem Voltmeter in Verbindung stehenden Glühlampen hell aufleuchten. Außerdem treten an den Anoden kleine Lichtbogen auf. Die ganze Erscheinung läßt sich wohl so erklären, daß durch die Verarmung des Elektrolyten an Tonerde eine Veränderung seiner Oberflächenspannung eintritt. Hierdurch wird die Benetzungsfähigkeit zu den Elektrodenkohlen vermindert. Die Beseitigung des Anodeneffektes erfolgt sofort durch Einrühren frischer Tonerde. Bisweilen genügt sogar schon ein Umrühren des Bades, da auch eine örtliche Verarmung des Elektrolyten den Anodeneffekt herbeizuführen vermag.

Das Material für die Herstellung der Anoden ist Kohle und ist daher einem erheblichen Verbrauch ausgesetzt, da der an der Anode abgeschiedene Sauerstoff die Anode oxydiert. Die praktischen Zahlen lassen errechnen, daß sowohl Bildung von CO als auch die von CO₂ auftritt. Das genaue Verhältnis läßt sich nicht feststellen, da der Sauerstoff der umgebenden Luft sowohl das gebildete Kohlenoxyd als auch die heiße Elektrode zu verbrennen vermag. Der Abstand der Anoden voneinander ist von wesentlichem Einfluß auf die Größe des Luftabbrandes. Bei zu eng stehenden Elektroden wird über dem Badspiegel eine zu starke Erhitzung eintreten, die zu einem Abbrand der Kohle führt, wodurch die Form einer solchen Elektrode eine Einschnürung zeigen wird, die dazu führen kann, daß der untere Teil der Elektrode abfällt. Bei zu heißem Ofengang wird die gleiche Erscheinung auftreten, ebenso bei schlecht gebrannten oder unrichtig zusammengesetzten Elektrodenmassen.

Beispiele solch schlecht abgenutzter Kohlen zeigt Fig. 183.

Durch den starken Verschleiß der Anoden müßte sich der Abstand von der Kathode vergrößern, doch wird dies zum Teil ausgeglichen durch die wachsende Metallmenge, die durch die Elektrolyse abgeschieden wird. Immerhin ist es erforderlich, den Elektrodenabstand zeitweilig zu kontrollieren und zu korrigieren, auch ist darauf zu achten, daß der Abstand der verschiedenen Anoden der gleiche ist. Bis zu einem gewissen Grade tritt hierin auch eine

Selbstregulierung ein, denn wenn der Abstand einer Anode von der Kathode geringer ist als derjenige der anderen, so ist dort in der geringeren Schmelzschicht auch ein geringerer Widerstand zu überwinden. Diese Elektrode wird daher mehr Strom aufnehmen und durch die stärker einsetzende Elektrolyse wird mehr Sauerstoff an ihr abgeschieden, d. h. sie wird rascher abbrennen als die anderen Elektroden.

Bei dem starken Verbrauch an Elektroden ist das Auswechseln der restlichen Stümpfe gegen neue Elektroden häufig vorzunehmen. Man muß deshalb immer einen gewissen Bestand an Elektroden, die schon betriebsfertig mit den Elektrodenstangen verbunden sind, zur Hand haben. Um bei dem Einsetzen ein Zerspringen der Kohleblöcke durch schroffen Temperaturwechsel zu vermeiden, empfiehlt sich ein vorheriges Anwärmen.

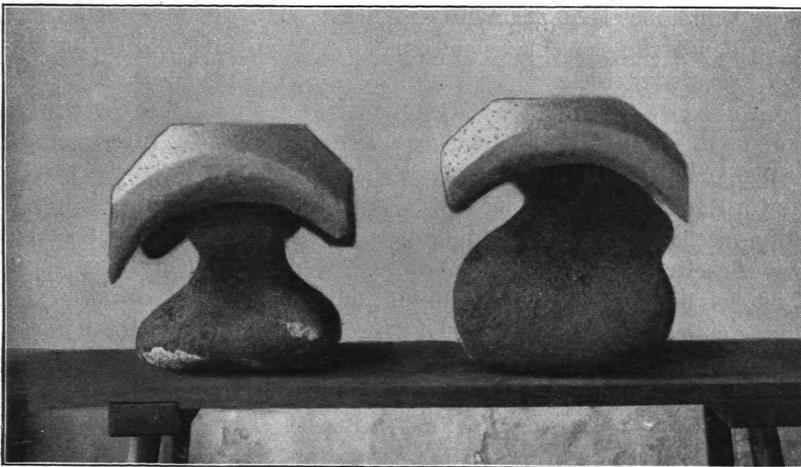


Fig. 183. Beispiele schlecht abgenutzter Elektroden.

Das abgeschiedene Aluminium wird in Abständen von ein, zwei oder mehreren Tagen dem Ofen entnommen. Wo es sich um die Entnahme kleiner Metallmengen handelt, also bei kleinen Einheiten und häufiger Entnahme, wird meist so verfahren, daß man das Metall ausschöpft. Man entfernt dazu eine Elektrode und setzt an deren Stelle einen gußeisernen Tiegel in das Bad, der in seinem Boden eine Öffnung hat. Durch diese Öffnung steigt das Metall in den Tiegel, aus dem es ausgekellt werden kann, ohne wesentliche Beimengung von Schmelze. Man hat auch zur Entnahme des Metalles die Öfen kippbar gemacht und wendet natürlich auch die Methode des Abstechens an. Da das Öffnen eines Stiches immer mit einem gewissen Arbeitsaufwand verbunden ist, kommt das Abstechen namentlich dort in Betracht, wo die Arbeitsweise auf gleichzeitige Entnahme größerer Metallmengen eingestellt ist.

Die Erzeugung eines Kilogrammes Rohaluminium erfordert in modernen Anlagen einen Stromaufwand von 25 kWstd.

i) Die Behandlung des Rohmetalls.

Wie auch das Metall dem Ofen entnommen wird, es ist in keinem Falle geeignet, direkt zu Barren od. dgl. vergossen zu werden, die für die mechanische Weiterverarbeitung in Betracht kommen. Das aus der Elektrolyse kommende Metall enthält immer noch kleine Mengen des Elektrolyten als Einschlüsse. Außerdem ist der Reinheitsgrad des Aluminiums aus den einzelnen Öfen verschieden, und man muß das Ausbringen aus einer Anzahl Öfen zusammenfassen, um eine gleichmäßige Qualität zu erzeugen. Man gießt daher meist das Metall zunächst als Rohaluminium in Form von Masseln und wartet die Fertigstellung der Analyse ab, um auf Grund von deren Ergebnis die Beschikung für die Umschmelzöfen zu gattieren. In manchen Werken wird auch das Rohmaterial aus mehreren Elektrolyseöfen flüssig vereinigt und den gleichen Umschmelzöfen zugeführt, in denen man die Masseln einschmilzt und aus denen die verschiedenen Barren, Platten und Blöckchen für den Handel gegossen werden.

Die Verarbeitung des Rohaluminiums auf Reinaluminium besteht im wesentlichen in der Trennung von mechanischen Verunreinigungen und in einer neuen Formgebung. Daß man durch Gattieren eine gleichmäßige Qualität herstellt, ist bereits erwähnt. Um die mechanischen Verunreinigungen abzuscheiden, ist ein sehr sorgfältiges Arbeiten notwendig. Da diese Verunreinigungen im spezifischen Gewicht sich nicht sehr vom Aluminium unterscheiden, ist es nötig, der Abscheidung eine gewisse Zeit zu lassen und das geschmolzene Metall vor überflüssigem Umrühren und vor sonstigen Erschütterungen zu bewahren. Da das Metall die Neigung hat, Gase zu absorbieren, ist auch darauf zu achten, daß die Gelegenheit zur Gasaufnahme gering ist. Die Zusammensetzung der Heizgase ist hierbei von Einfluß. 100 g flüssiges Aluminium lösen z. B. bei 700° 2,3 ccm Wasserstoff, bei 900° 17,3 ccm. Auch die durch Abbrand entstehende Krätzeschicht bildet einen Schutz des Metalles sowohl gegen Gasaufnahme als auch gegen weiteren Abbrand.

Bei der hüttenmännischen Erzeugung anderer Metalle gewinnt man meist zunächst aus den Rohstoffen ein Rohmetall, das einem Raffinationsverfahren unterworfen wird, um das gewünschte Reinmetall zu erzielen. Anders muß man bei der Gewinnung von Aluminium verfahren. Wie erwähnt, kann es sich bei dem Umschmelzen des Rohaluminiums auf Reinaluminium nur um die Entfernung mechanischer Verunreinigungen handeln. Die gelösten Fremdstoffe, vor allem Eisen und Silicium, können dabei nicht entfernt werden, es muß sich im Gegenteil durch den entstehenden Abbrand an Aluminium der prozentuale Gehalt an diesen Stoffen sogar erhöhen. Die Verwendung reiner Rohstoffe ist also für die Erzeugung guten Aluminiums unerläßlich.

k) Raffination.

Es gibt allerdings auch Vorschläge zu einer richtigen Raffination des Aluminiums; so ist in Amerika das Verfahren von Hoopes zur Anwendung

gekommen. Dieses Verfahren arbeitet mit einem Elektrolyten, der ebenfalls aus Fluoriden zusammengesetzt ist, wobei den Salzen des Bariums und Natriums besondere Bedeutung zukommt. Durch ihre Zufügung ist es möglich, dem Elektrolyten ein so hohes spezifisches Gewicht zu erteilen, daß das abzuschiedende Reinaluminium sich über den Elektrolyten lagert. Um das zu raffinierende Rohaluminium am Boden unter dem schweren Elektrolyten zu halten, wird es mit einem schwereren Metall legiert, und zwar mit Kupfer. Bei fortschreitendem Prozeß wird die Legierung an Aluminium verarmen und der Erstarrungspunkt des übrigbleibenden, aluminumarmen Kupfers schließlich über die im Ofen herrschende Temperatur ansteigen. Um dies zu vermeiden, fügt man der Legierung noch Silicium zu.

Die Kosten dieses Verfahrens sind gegenüber der Verbesserung der Eigenschaften des Metalles beträchtlich, es wird sich deshalb nur in seltenen Fällen lohnen, ein derart raffiniertes Metall zu verwenden.

Der Aluminiumindustrie Akt. Ges. Neuhausen ist ein Verfahren zur Raffination von Aluminium geschützt worden, bei dem das zu raffinierende Material als feste Anode einer Kathode ebenfalls in fester Form in senkrechter Anordnung gegenübersteht. Als Elektrolyt dient ein Salzgemisch aus Halogeniden der Alkalien, Erdalkalien und des Aluminiums, das bei einer Temperatur flüssig ist, die unter dem Schmelzpunkt des Aluminiums liegt.

Eine größere Bedeutung und Verbreitung haben die Aluminium-Raffinationsverfahren allerdings bis heute nicht finden können.

1) Herstellung von Handelsaluminium.

Die handelsüblichen Qualitäten des Aluminiums bezeichnet man durch Angabe des reinen Aluminiumgehaltes und bezeichnet als „Hüttenaluminium“ ein Metall mit 98 bis 99% Al. Die reineren Sorten werden garantiert mit 99 bis 99,4%, mit 99,5%, 99,6%, 99,7% und 99,85%, wobei von dem Preis für Hüttenaluminium mit 98 bis 99% Al ausgehend für die einzelnen Sorten kleine Aufpreise erzielt werden, je nach dem Al-Gehalt. Dabei wird der Al-Gehalt bestimmt, indem man Fe und Si analytisch feststellt und die Summe der beiden Werte von 100 abzieht, andere Verunreinigungen bleiben unberücksichtigt. Der hierdurch entstehende Fehler ist gering.

Da in den Aluminium erzeugenden Werken durch Gattieren größere Metallmengen zu einzelnen Chargen vereinigt werden, kommen dort nur Flammöfen od. dgl. als Umschmelzöfen in Betracht. Wo es sich um die Verarbeitung kleinerer Mengen handelt, z. B. bei der Schmelzung von Abfällen in den Aluminium verarbeitenden Werken, stehen auch Tiegelöfen in Anwendung.

Allgemein gültige Vorschriften für den Bau der geeignetsten Umschmelzöfen lassen sich nicht aufstellen, da die mannigfachsten Konstruktionen im Betrieb zu finden sind, feststehende und drehbare, mit Vorherd ausgestattete und auch ohne diesen. Der Fassungsraum schwankt von 1 t Einsatz bis 3 t und mehr. Feuerungen für jedes Brennmaterial und in jeder Form sind für die Beheizung der Öfen in Anwendung gekommen, und da die Anlagen dort stehen, wo die elektrische Energie verhältnismäßig billig zu haben ist, kommt auch für die Umschmelzöfen die elektrische Beheizung in Frage. Diese Be-

triebsweise läßt auch am leichtesten die obenerwähnte Bedingung erfüllen, daß die Atmosphäre über dem flüssigen Metall arm an Wasserstoff sei.

Die Öfen, in denen das Rohmetall in Barrenform eingesetzt wird, sind so eingerichtet, daß man die Abhitze zur Vorwärmung der Barren ausnützt. Die Wirtschaftlichkeit dieser Maßnahme wird durch die hohe spezifische Wärme des Aluminiums gewährleistet.

Durch Ausschöpfen mit der Kelle oder durch Kippen der Öfen bringt man das flüssige Metall in Gießtiegel, aus denen es entweder sofort vergossen wird, oder erst nach einer gewissen Wartezeit, während der der Tiegel mit seinem Inhalt auf gleicher Temperatur gehalten wird.

Das Aluminium wird je nach seinem Verwendungszweck in verschiedenen Formen von den Hütten in den Handel gebracht. Soweit es für Guß- und Legierungszwecke gebraucht wird, gießt man das Metall in Barren von $\frac{1}{5}$ bis 5 kg Einzelgewicht. Diese Barren sind durch Kerben in 2 bis 14 Teile unterteilt, so daß der Verbraucher durch Zerschlagen leicht jede gewünschte Gewichtsmenge abtrennen kann.

Für die Draht und Blech erzeugende Industrie wird das Aluminium von den Hütten in Barren von entsprechender Form geliefert. Die Drahtbarren sind meist etwa 1 m lang bei 10 cm Durchmesser, der Querschnitt ist quadratisch oder kreisförmig. Für die Blechwalzwerke werden Barren verschiedener Abmessungen und große Platten bis zu 1000 kg Einzelgewicht geliefert. Die kleinsten Barren haben ein Gewicht von etwa 12 kg.

Für die Erzeugung von Blechen ist es unbedingt erforderlich, daß keine Hohlräume oder Gasblasen in dem zu verwalzenden Werkstück enthalten sind. Gaseinschlüsse, die bei der Neigung des flüssigen Metalles, Gase zu lösen, häufig auftreten, zeigen sich beim Weichglühen der Feinbleche durch Blasenbildung auf der Oberfläche des Bleches.

Da das Aluminium bei der Erstarrung eine sehr große Volumenverminderung erleidet, zeigt es natürlich auch eine entsprechend starke Lunkerbildung, die beim Gießen der Walzbarren und Platten besondere Aufmerksamkeit erfordert. Beim Guß anderer Metalle arbeitet man mit dem sog. verlorenen Kopf, aus dessen Metallvorrat sich die Lunkerhöhlungen des eigentlichen Gußstückes durch Nachsaugen ausfüllen können, so daß die einzige zuletzt entstehende Lunkerstelle in den Teil des Gusses zu liegen kommt, der verlorene gegeben wird.

Beim Gießen der Aluminiumbarren bedient man sich dieses Verfahrens nicht, sondern man füllt die Lunkerung durch Nachgießen auf. Dieses Nachgießen erfordert ziemliche Übung, da man dabei vermeiden muß, daß Oxydhäute und andere Verunreinigungen mit in die auszufüllende Stelle im Innern des Barrens gerissen werden. Häufig hat man auch an den Barren seitliche Angüsse, aus denen durch einen Längsschnitt der Zufluß des Metalles in die Barrenform erfolgt. Diese Angüsse werden ebenfalls nach dem Erstarren abgeschnitten, sie sind in ihrer Wirkungsweise nicht mit dem verlorenen Kopf zu vergleichen, sondern sollen nur den Zustrom des Metalles in die Form regeln.

Eine weitere formgebende Verarbeitung des Aluminiums erfolgt nicht auf den Aluminium erzeugenden Werken, doch werden auch auf einigen dieser