

## Werk

**Titel:** Die Ursachen der Differentiation in silikatischen Schmelzflüssen

**Autor:** Eitel , W.

**Ort:** Berlin

**Jahr:** 1918

**PURL:** [https://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?34557155X\\_0006](https://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?34557155X_0006) | LOG\_0237

## Kontakt/Contact

[Digizeitschriften e.V.](#)  
SUB Göttingen  
Platz der Göttinger Sieben 1  
37073 Göttingen

✉ [info@digizeitschriften.de](mailto:info@digizeitschriften.de)

ihrem Wege in der Erdatmosphäre in 100—150 km Höhe zur Emission bringen. Auf Grund meiner Erfahrungen über die Lichtemission der Kanalstrahlen kann ich folgendes sagen: Würde der Teildruck des Wasserstoffs oder des Heliums in diesen Höhen 30 % des Teildruckes des Stickstoffes betragen, so müßten die intensivsten Serienlinien jener zwei Gase in einem angenähert konstanten Intensitätsverhältnis im Nordlicht neben den in diesem auftretenden Stickstofflinien erscheinen. Dies ist aber in Wirklichkeit nicht der Fall; die bis jetzt zuverlässig beobachteten und einigermaßen genau gemessenen Nordlichtlinien sind nämlich, wie ich in meiner Annalen-Mitteilung gezeigt habe, abgesehen von den nur hin und wieder auftretenden Wasserstofflinien  $H\gamma$  und  $H\delta$ , ausschließlich **Stickstofflinien**.

Man kann der Beweiskraft dieser Feststellung auch nicht mit dem unbestimmten Einwand sich entziehen, daß die Intensität der Linien eines Gases in einer elektrischen Entladung sehr empfindlich sei gegen die Anwesenheit anderer Gase, Wasserstoff und Helium in großen Höhen also wohl einen größeren Teildruck als Stickstoff besitzen könnten, ohne spektral sich bemerkbar zu machen. Der Hinweis auf die Empfindlichkeit von Spektrallinien eines Gases gegen Beimischungen trifft nämlich nur für die positive Lichtsäule (Geißleröhre), nicht für schnelle Kathoden- und Kanalstrahlen zu. Diese regen die Moleküle eines Gases, sowie sie auf sie stoßen, zu Lichtemission unabhängig von der Nachbarschaft der Moleküle eines anderen Gases an.

Die Spektralanalyse des Nordlichts läßt somit feststellen, daß der Teildruck des Wasserstoffs und derjenige des Heliums in 100—150 km Höhe über dem Erdboden kleiner als 30 % des Teildruckes des Stickstoffs in dieser Höhe sind.

## Die Ursachen der Differentiation in silikatischen Schmelzflüssen.

Von Privatdozent Dr. W. Eitel, Frankfurt a. M.  
(Schluß.)

### 4. Theorie der magmatischen Differentiationen durch Entmischungen.

Seit den Tagen *R. Bunsens* hat eine ganze Anzahl von Petrographen versucht, die Differentiationsercheinungen in der Gesteinwelt darauf zurückzuführen, daß ein homogenes Urmagma bei der Abkühlung sich spontan in eine Reihe von Teilmagmen aufspaltete. Ein jedes dieser Spaltungsprodukte bestimmte alsdann bei seiner Erstarrung den Charakter der aus ihnen jeweils entstehenden Gesteinstypen. *Bunsen* hatte seinerzeit angenommen, daß primär vorhandene „normaltrachytische“, d. h. saure Magmenherde mit ebensolchen von „normalbasischer“ Zusammensetzung sich in allen Verhältnissen zu „intermediären“ Magmen mischen könnten. Späterhin hatte *J. Durocher* und *H. Bäckström* die Ansicht vertreten, daß ein jedes Magma an sich in

saure oder basische Teilmagmen zerfallen könnte; damit ist also das Prinzip der magmatischen Differentiation durch Entmischungen in klarer Form ausgesprochen. Diese Hypothese wurde dann von *H. Rosenbusch* weiter ausgebaut und zu seiner berühmten Kerntheorie verwertet. Nach dieser hat man die in den durch Zerfall entstandenen Teilmagmen vorhandenen bzw. gelösten Verbindungen als Metallatomgruppen aufzufassen; diese stellen bestimmte Typen dar, welche mit den Kernen in der organischen Chemie Ähnlichkeit besitzen. Die typischen Kerne sind nach *Rosenbusch* die folgenden:

(Na, K)AlSi<sub>2</sub>, vorherrschender Kern in den foyaitischen Magmen  $\phi$ ; in den theralithischen Magmen  $\theta$  sind neben diesem Kerne auch noch die Kerne  $R^{II}Si$  und  $R^{II}_2Si$  enthalten, ferner NaAlSi<sub>3</sub> (Nephelin-Kern) und CaAl<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> (Anorthitkern).

(Na, K)AlSi<sub>2</sub> und CaAl<sub>2</sub>Si<sub>4</sub> in den granitodioritischen Magmen  $\gamma\delta$  gemischt.

CaAl<sub>2</sub>Si<sub>4</sub> vorherrschend neben  $R^{II}Si$  und  $R^{II}_2Si$  in den gabbro-peridotitischen Magmen  $\psi$ , in welchen der alkalihaltige Kern (Na, K)AlSi<sub>2</sub> vollständig zurücktritt.

Die Differentiation wird also nach dem *Rosenbusch'schen* Prinzip stets dahin streben, die Magmentypen in möglichst reinem Zustande zur Entwicklung zu bringen. *Rosenbusch* und seine Schüler haben die Annahme der hypothetischen Kerne mit großem Nachdruck verteidigt; es macht aber dem Physikochemiker nicht geringe Schwierigkeiten, die Notwendigkeit der Einführung derartiger komplizierter Begriffe einzusehen. Es hat deshalb weithin Anklang gefunden, als *W. C. Brögger* die Ansicht aussprach, daß die *Rosenbusch'schen* Kerne mit den mineralischen Hauptbestandteilen der Gesteine sich decken, daß also die Feldspäte, die Augite, Olivine usw. in diesen Atomgruppen darzustellen seien. Es wäre also bei der Annahme einer magmatischen Aufspaltung in differentielle Teilmagmen eine Tendenz zur Ausbildung einzelner bestimmter Mineralaggregate vorhanden, eine Anschauung, die auf dem Gebiete der Differentiation durch Kristallisation (s. u.) von *J. H. L. Vogt* unterstützt worden ist.

Alles bislang in der Literatur Bekannte scheint indessen eher gegen das Vorkommen derartiger spontaner Spaltungsvorgänge zu sprechen als für dieses. Man kennt freilich z. B. binäre- bei höherer Temperatur homogene Flüssigkeitsgemenge wie von Äther und Wasser, die bei der Abkühlung zwei gesonderte Flüssigkeitsschichten bilden. Es wird alsdann eine bestimmte „kritische Entmischungstemperatur“ angegeben werden können, welche die Höchsttemperatur angibt, bei der ein heterogenes Flüssigkeitsgemenge beständig ist, bzw. ein solches gerade in die homogene flüssige Mischung übergeht. Man erkennt dies im Zustandsdiagramm (s. Fig. 1) also daran, daß ein Gebiet für die heterogenen flüssigen Phasen

unterhalb des kritischen Entmischungspunktes  $t_k$  gelegen ist. Für eine jede Temperatur unterhalb von  $t_k$  finden wir eine bestimmte Sättigungsgrenze der beiden flüssigen Phasen, so die Kurven  $t_k L_1 L_2 \dots$  und  $t_k L'_1 L'_2 \dots$ , welche die Änderung der Zusammensetzung der beiden im Gleichgewicht befindlichen Flüssigkeiten mit der Temperatur angeben. Diese Sättigungsgrenzen können schließlich die Ausscheidungskurve für eine feste Kom-

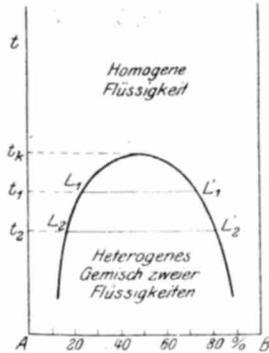


Fig. 1.

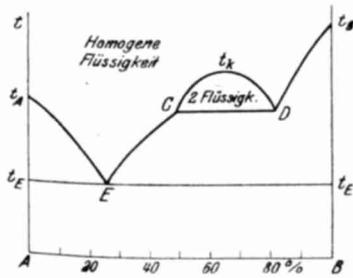


Fig. 2.

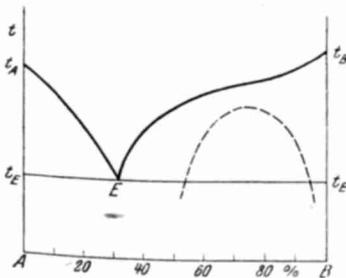


Fig. 3.

ponente, z. B. von B, in C und D treffen (Fig. 2). Bei der Temperatur des Punktes D sind drei Phasen miteinander im Gleichgewicht, nämlich die Schmelzen C, D und das feste B, es werden neue Kristalle von B abgeschieden werden können, indem die Flüssigkeit D zu den Phasen C und B zerfällt. Erst wenn die Schmelze D verbraucht ist, wird also die Temperatur unter weiterer Ausscheidung von B längs der Kurve CE bis zum Eutektikum E sinken. Das horizontale Stück CD in der Schmelzkurve ist besonders charakteristisch für derartige Zerfalls- und Entmischungsreaktionen; wir müßten in entsprechen-

den Fällen bei den silikatischen Schmelzgleichgewichten Analoges unfehlbar beobachten, wenn wirklich eine Tendenz zu derartigen Vorgängen in ihnen vorhanden wäre. Bei den Boraten sind derartige Fälle nach den Untersuchungen Gürtlers (Zeitschr. f. anorg. Ch. 40, 1904, S. 225) allerdings bekannt geworden und auch in den Systemen aus Sulfiden und Silikaten sind ähnliche Verhältnisse nach J. H. L. Vogt (Silikatschmelzlösungen, I, 1903, S. 96) zu vermuten. Das letztere Beispiel ist sicherlich von petrogenetischer Bedeutung, weil dadurch die differentielle Entstehung der sulfidischen Lagerstätten in ein neues Licht gesetzt worden ist. Dagegen haben wir bis jetzt noch kein einziges rein silikatisches System angetroffen, in dessen Zustandsdiagramm eine horizontale Linie nach Art der oben genannten CD auf einen Entmischungsprozeß im flüssigen Zustande schließen ließe. Selbst in dem Falle, daß im unterkühlten Zustande Entmischungen eintreten, müßten wir dies in dem Zustandsdiagramm an einer eigentümlich S-förmig geschwungenen Kristallisationskurve für eine Kristallart erkennen. In Fig. 3 ist dies schematisch angedeutet, und man erkennt in der Nähe der Ausscheidungskurve für die Komponente B ein instabiles Entmischungsgebiet. Derartige Verhältnisse sind übrigens im System Fe-FeS bekannt geworden, welches bei der Erklärung der Entstehung der merkwürdigen Troilitropfen im meteorischen Eisen Bedeutung besitzt. Wahrscheinlich war das Schwefeleisen in einer Art von Emulsionszustand in dem flüssigen Metalle suspendiert und ist in diesem Zustande erstarrt. Von Emulsionsbildungen ähnlicher Art etwa in den Gesteinsgläsern ist indessen bis jetzt noch nichts bekannt geworden. Eine langandauernde thermische Exposition eines silikatischen Schmelzflusses sollte unterhalb seiner kritischen Entmischungstemperatur unter allen Umständen die Entwicklung der typischen Entmischungsstrukturen begünstigen. In dem Laboratorium der Carnegie-Institution in Washington sind bekanntlich unzählige Expositionsversuche zur Festlegung der Gleichgewichte nach der statischen Methode angestellt worden; trotzdem ist uns kein einziger Fall erinnerlich, daß nachweislich Entmischungen in den homogenen Schmelzen stattgefunden hätten. Es ist deshalb zum mindesten unwahrscheinlich, daß der Beweis für das Vorkommen einer magmatischen Entmischungsdifferentiation erbracht werde. Wir dürfen wohl annehmen, daß die silikatischen Schmelzlösungen der natürlichen Magmen im flüssigen Zustande homogen bleiben und erst bei der Kristallisation eine heterogene Beschaffenheit erhalten.

##### 5. Elektrochemische Gründe für die Möglichkeit einer magmatischen Differentiation.

Übertragen wir die bei der Elektrolyse der geschmolzenen Salze gefundenen Gesetzmäßig-

keiten auf silikatische Schmelzlösungen, so können wir uns ein Bild davon machen, wie die Wirkung von elektrischen Strömen innerhalb eines homogenen Magmas den chemischen Charakter desselben beeinflussen wird. Wir dürfen in diesem Sinne also von der Möglichkeit einer Art elektrolytischer magmatischer Differentiation reden. Alle Tatsachen, welche in den wässrigen Lösungen zur Aufstellung der Ionentheorie geführt haben, sind auch in den geschmolzenen Salzen wiederzufinden worden (vgl. Elektroch. geschm. Salze, von R. Lorenz und L. Kaufler, Leipzig 1909, S. 57 ff.); wir dürfen also den Begriff der elektrolytischen Dissoziation, der Überführung, der Komplexionen usw. ohne weiteres auch auf ein Magma ausdehnen. Bei einer genügend langen Einwirkung eines wenn auch schwachen Stromes in diesem ist die Möglichkeit zur Ausbildung von galvanischen Polarisationen begründet, und durch Überführungen bestimmter Ionengattungen können auch sehr wesentliche Konzentrationsverschiebungen Platz greifen. Es ist zwar in Anbetracht der immer noch sehr geringen Kenntnisse über den Ionisationszustand in einem silikatischen Schmelzfluß jetzt noch nicht möglich, in allen Einzelheiten einen derartigen Vorgang zu verfolgen; wir müssen es weiterer Forschungsarbeit überlassen, zu entscheiden, inwieweit die elektrolytische magmatische Differentiation einen geologisch bedeutsamen Faktor darstellen könnte. Ein Wort über die vermutliche Herkunft von elektrischen Potentialdifferenzen innerhalb eines silikatischen Magmas sei noch verstatet. Im Sinne einer elektrolytischen Differentiation könnten wohl thermoelektrische Potentialdifferenzen eine Rolle spielen; z. B. die magmatischen Frühausscheidungen sulfidischer Natur, so besonders die Lamprite (Pyrit, Kobaltglanz) dürften die Veranlassung zu solchen geben. Wir wollen ferner bedenken, daß die Bewegung der irdischen Magmen im elektrischen Felde der Sonne im Laufe langer Zeiträume ebenfalls einen großen Einfluß auf die Ausbildung der intratellurischen Ströme haben können. Sicherlich ist die Annahme elektrolytischer magmatischer Differentiationen zu erwägen, auf Einzelheiten jetzt schon einzugehen, dürfte allerdings in Hinsicht auf unsere sehr geringen Erfahrungen in diesem schwierigen Gebiete und die unsicheren hypothetischen Grundlagen noch verfrüht erscheinen.

#### 6. Theorie der sekundären Differentiation in heterogenen magmatischen Systemen durch gravitative Kristallisationsdifferentiation.

Im Gegensatz zu den im Vorhergehenden besprochenen Anschauungen nimmt eine große Anzahl von Forschern an, daß eine Differentiation überhaupt nur dann in einem Magma merklich werden könne, wenn bei dessen Abkühlung durch den Beginn der Kristallisation eine Heterogenität entsteht. Sobald aus der Schmelze Kristalle sich ausscheiden, wird eine Trennung derselben von der Flüssigkeit nach dem spezifischen Gewichte

eintreten, d. h. eine Kristallisationsdifferentiation durch Schwerkraft vor sich gehen. Eine solche Erscheinung wird auch als fraktionierte Kristallisation bzw. in Anlehnung an gewisse in der Metallurgie beobachtete Vorgänge als Saigerung bezeichnet. Sie wird eine weitgehende Scheidung des Gesteinscharakters herbeiführen, so daß die schwereren Teile des erstarrenden Magmas im Liegenden der leichteren angetroffen werden müssen. An Vesuvlaven hat man dementsprechend beobachtet, daß die Leuzitkristalle stets an der Oberfläche angereichert sind, ja im feurigflüssigen Lavaström direkt schwimmend angetroffen werden können, während an den unteren Teilen der Ströme eine Ansammlung der schwereren Augitkristalle zu bemerken ist. Es sind also offenbar während der Verfestigung des Schmelzflusses die zuerst ausgeschiedenen Augite abgesunken, die späterfolgenden und leichteren Leuzite aber in die Höhe gestiegen, wie dies Löwinson-Lessing (C. r. du congr. internat. geol., St. Petersburg, 1897, p. 347) im einzelnen verfolgt hat. Ähnliche Erscheinungen beschreibt A. Daly (Rosenbusch-Festschrift, Stuttgart, 1906, S. 203—233) an den interessanten Lagergängen des Meyie-Sill, in denen ein Gabbro-Gestein im Liegenden, im Hangenden aber ein saurer Biotitgranit beobachtet wurde.

Ehe wir auf die mannigfaltigen Wirkungen eingehen, welche in Verbindung mit einer Kristallisationsdifferentiation in einem erstarrenden Magma durch Auspressungen, Diffusionen, Konvektionen usw. denkbar sind, wollen wir ganz allgemein ein homogenes schmelzflüssiges Silikatgemenge bei langsamer Verfestigung verfolgen. Es werden sich z. B. zuerst die Orthosilikate der Olivingruppe ausscheiden, einzelne Kristallkerne und dann kleine Kristallindividuen entstehen und diese nunmehr unter den Einfluß der Gravitation gelangen. Durch das Absinken der schweren Kristallkörner findet so eine langsame Anreicherung der gebildeten Kriställchen in den unteren Teilen des Magmenbassins statt. So hat z. B. N. Bowen (Am. Journ. of Sc. 39, 1915, p. 175) Schmelzen des Systemes Diopsid-Forsterit-Kieselsäureanhydrid längere Zeit auf Temperaturen, bei welchen sich nur eine Kristallart bildet, exponiert und dann abgeschreckt. Olivin reicherte sich alsdann am Boden des Tiegels innerhalb einer Stunde bei 1430 ° C bereits deutlich an. Pyroxenkristalle aus einem kieselsäurereichen Schmelzflusse sinken ebenfalls ab, allerdings etwas langsamer als die Olivine infolge der größeren Zähigkeit der Schmelzen, dagegen bewegen sich die leichteren Tridymitkristalle deutlich nach oben. Die Anreicherung des Olivines im tieferen Teile des bekannten Pallisadendiabases von Neu-Jersey zeigt eine große Ähnlichkeit mit den Ergebnissen der Bowenschen Experimentaluntersuchungen.

Sind die ausgeschiedenen Kristalle von sehr geringer Größe, so kann es unter Umständen vorkommen, daß in den stark viskosen Schmelzen das

Untersinken auch schwererer Körner, wie z. B. von Erzen, ungemein lange Zeit in Anspruch nähme. Es kann also in sehr sauren Differentiationsprodukten die Viskosität den Charakter der gravitativen Scheidungsvorgänge weitgehend verwischen. Von derartigen Störungen abgesehen, kann man demgegenüber selbst die Ausbildung von Zonarstrukturen z. B. an den Mischkristallen der Plagioklasreihe mit der gravitativen Differentiation in einem kristallisierenden Magma in Zusammenhang bringen. Man kann aus dem Vorhandensein einer solchen Struktur bekanntlich schließen, daß diejenigen Schmelzflüsse, aus welchen der innere Kern kristallisierte, eine andere und zwar basischere Zusammensetzung gehabt haben müssen als diejenigen, welche die Substanz zu den äußeren Schichten lieferten. *Bowen* zeigte nun z. B. an dem System Albit-Anorthit-Diopside (*Journ. of Geol.* 23, 1915, Suppl., p. 1—11), daß beim Absinken der spezifisch schwereren Mineralgemengteile im unteren Teil des durch Erstarrung entstandenen Gesteines bytownitische Plagioklase, im oberen aber stark saure Kaltnatronfeldspäte auftreten werden. Zusammenvorkommnisse von entgegengesetzten Gesteinscharakteren, wie z. B. von Melaphyren oder Diabasen neben Mikropegmatiten bzw. von Gabbroen neben Graniten müssen uns in ähnlichem Sinne ein Anzeichen dafür sein, daß nur die langsame Kristallisation bei der Abkühlung die gravitative Differentiation so weitgehend möglich gemacht hat. Bei einer rascheren Abkühlung wären einheitliche Gesteinskörper z. B. vom Habitus eines Diabases gebildet worden. In der Natur braucht auch nicht immer nur Olivin als frühe silikatische Ausscheidung gravitativ angereichert zu sein, wir sahen oben schon Pyroxene dieselbe Rolle spielen, und auch die Silikate der Glimmerfamilie könnten bei ihrem hohen Gehalte an Eisen und Magnesia dieselbe übernehmen. Die Tatsache, daß die Glimmer ganz besonders häufig in den sauren granitischen Magmen auftreten, beruht auf einer Komplikation der Differentiationsvorgänge, nämlich auf Einwirkungen der flüchtigen Magmenbestandteile, in erster Linie des Wasserdampfes auf die in der Schmelzlösung vorhandenen Alumosilikate. Wir sehen also, daß die Kristallisationsdifferentiation notwendigerweise auch zur Berücksichtigung der flüchtigen Bestandteile des Magmas Anlaß gibt, ein Umstand, auf den insbesondere *P. Niggli* aufmerksam gemacht hat. Ein ganz ausgezeichnetes Beispiel eines hierher gehörigen Naturvorkommnisses beschreibt *P. Niggli* (*Geol. Rundschau*, 3, 1912, S. 479) vom Electric Peak, an welchem man in tieferen Regionen die Mineralvergesellschaftung von Biotit mit Quarz als typisch erkennt, während oben ein ganz gewöhnlicher Diorit den durch magmatische Dämpfe kaum beeinflussten Gesteinscharakter darstellt.

Stellen wir uns auf den Standpunkt, daß die basischen, und zwar am wahrscheinlichsten die

basaltischen Schmelzflüsse den silikatischen Urmagmen unseres Planeten entsprechen, so muß bei einer langsamen Abkühlung eine gravitative Differentiation dieser Magmenarten derart stattfinden, daß peridotitische Gesteine zu unterst, saure granitische usw. zu oberst gelagert sich finden sollten. Im Gebiete des Keweenaw-Massivs ist in der Tat ein diabasischer Gesteinskörper mit sehr deutlichen hellen Differentiaten nach oben hin ausgebildet, ähnliche Verhältnisse trifft man in den berühmten Gesteinskomplexen des Sudbury-Distriktes usw. Wenn man an den großen finnischen Bezirken nach *Sederholm* dagegen nur granitische Gesteine mit gelegentlichen stark basischen Ergüssen antrifft, so beruht diese Erscheinung vom Standpunkte der Lehre von der gravitativen Kristallisationsdifferentiation lediglich darauf, daß die Vorkommnisse der Tiefe, d. h. die basischen Differentiate unter der granitischen Haube noch nicht aufgeschlossen sind. Demgegenüber ist an den paläozoischen Batholithen von Saugus (Mass.) tatsächlich durch eine fortgeschrittene Tiefenerosion eine ständige Zunahme der Basizität mit zunehmender Tiefe bekannt geworden; es folgen dort auf die oberen granitischen Typen nach unten hin dioritische Magmen. Aus dem Mineralbestande erkennen wir übrigens schon, daß aus granitischen Stammagmen gar keine basaltisch zusammengesetzten Differentiationsprodukte entstehen könnten. Das Vorkommen von gleichmäßig zusammengesetzten Ganggesteinen basischen Charakters aber belehrt uns, daß in dieser Form auch undifferenzierte Magmen zum Durchbruch gelangt sein können. Die Theorie der basaltischen Zusammensetzung der einheitlichen Urmagmen scheint zwar den Berechnungen *F. W. Clarke*s über die durchschnittliche Zusammensetzung der Eruptivgesteine zu widersprechen; man müßte aus diesen auf ein dioritisch-tonalitisches Urmagma schließen. Wir wollen aber nicht vergessen, daß *Clarke* die Annahme gemacht hat, daß bis in gewisse Tiefen der Erdkruste hinein immer noch dieselben chemischen Verhältnisse in der Zusammensetzung des Gesteinmantels angetroffen werden sollen, wie sie uns von der äußersten Rinde her eben bekannt geworden sind. Diese Annahme ist im Sinne der Theorie der gravitativen Kristallisationsdifferentiation unhaltbar geworden, da wir, wie schon oben erwähnt, bereits in verhältnismäßig geringen Tiefen eine Zunahme der schwereren Bestandteile im Magma bemerken. Das von *Clarke* entworfene Bild der durchschnittlichen Zusammensetzung der eruptiv entstandenen Erdkruste wird alsdann wesentlich zugunsten der basaltischen Magmen verschoben werden müssen. Es ließe sich noch eine ganze Anzahl von weiteren Gründen für diese Anschauung anführen, deren ausführliche Darlegung bei *Bowen* einzusehen ist.

Hochinteressant sind die Nutzanwendungen der Bowenschen Kristallisationstheorie der Differentiation auf die von *Rosenbusch* angeregten Probleme des sogenannten Sippencharakters der