

Kontinentalverschiebung und Erdmagnetismus

Von Otto Schneider *)

Resumen

Tal como la formuló Wegener, la teoría de la deriva continental no contaba sino con un apoyo geofísico limitado; pocos y poco convincentes eran, en particular, los argumentos geomagnéticos que pudo aducir. Hoy, esta ciencia aporta algunas de las consideraciones más sólidas a los fundamentos de esa hipótesis. Son tres fenómenos geomagnéticos los que la favorecen, o por lo menos, ponen en evidencia, los movimientos horizontales en gran escala: el lento corrimiento longitudinal de la parte no dipolar de la variación secular; la impronta que las inversiones de polaridad del campo dipolar han grabado en las rocas del fondo del mar; y los ángulos de inclinación y declinación paleomagnéticas que revelan las rocas, tanto terrestres como abismáticas, eruptivas y sedimentarias, cuando se las somete a un tratamiento térmico o electromagnético adecuado. En este artículo se resumen los conceptos básicos de estos fenómenos y de su significancia en cuanto a la hipótesis de la deriva continental, citándose algunas conclusiones respecto del Atlántico Norte y Sur.

Summary

The theory of continental drift, as it was stated by Wegener, had only a limited geophysical support at that time; in particular, Wegener's arguments drawn from geomagnetism were scarce and not too convincing. To-day, geomagnetism furnishes some of the most powerful foundations of that hypothesis. Three geomagnetic phenomena are mainly invoked as giving support to it, or at least proving large scale horizontal movements, viz., the slow longitudinal drift of the non-dipole part of the secular variation; the record left in the sea floor of polarity reversals of the dipole field; and the paleomagnetic dip and declination angles revealed after a suitable thermic or electromagnetic treatment in sedimentary and igneous rocks, both of continental and oceanic origin. The basic concepts of these phenomena and their bearing on the hypothesis of continental drift are reviewed, and some conclusions concerning the North and South Atlantic Ocean are quoted.

Der Geophysiker Alfred Wegener stützte sich zur Begründung der Hypothese von der Verschiebung der Erdteile auf geodätische, geophysikalische und — im weitesten Sinne des Wortes — geologische Erwägungen. Aber obwohl er von der Geophysik erwartete, daß sie eines Tages eine Entscheidung über die Gültigkeit dieser Hypothese ermöglichen würde, spielte sie, gemäß dem Stand der Kenntnisse zu seiner Zeit, qualitativ und quantitativ eine verhältnismäßig geringere Rolle in der Argumentation als die anderen Wissenszweige. In der 4. Ausgabe seiner Darlegung der Verschiebungstheorie (Wegener 1929) ist nur eins der elf Kapitel den eigentlich geophysikalischen Argumenten gewidmet. Im übrigen liefert vieles in diesem Werk Gesagte streng genommen nur hinreichende, aber keine notwendigen Bedingungen, — Tatsachen und Hypothesen, welche, wenn zutreffend, mit der Vorstellung der Kontinentalverschiebung verträglich wären, ohne sie indessen zwingend zu fordern.

Insbesondere ist in dem genannten Werk gerade jenes Teilgebiet der Geophysik nur streifend behandelt, das in den letzten Jahrzehnten so gewichtige Befunde zugunsten der Verschiebungstheorie beigebracht hat, nämlich die Lehre vom Erdmagnetismus. Als einziges erdmagnetisches Argument wird, unter Berufung auf A. Nippoldt, angeführt, daß die Tiefseeböden stärker magnetisierbar sein sollen als die Kontinentalschollen. Dabei wird auf Modellversuche aus dem vorigen Jahrhundert hingewiesen, welche dies angeblich beweisen sollen: einem gleichförmig magnetisierten Erdmodell müsse man oberflächennahe Eisenbelegungen bevorzugt unter den Ozeanen begeben, um den nicht dipolaren Teil des Gesamtfeldes darstellen zu können. Dies Modell beschreibt jedoch die Wirklichkeit sehr unvollkommen und läßt zudem die Säkularvariation außer Acht, die langsame Verschiebung der erdmagnetischen Elemente in Zeiträumen der Größenordnung von Jahrhunderten. Auch hier handelt es sich wieder um ein Argument, das, selbst wenn es zuträfe, wohl für eine unterschiedliche Zusammensetzung der Tiefseeböden gegenüber den Kontinenten spräche, aber damit doch noch längst nicht zwingend zu dem Schluß der Kontinentalverschiebung führt. So

*) Prof. Dr. Otto Schneider, Observatorio Astronómico, Paseo de Bosque, La Plata, Argentina.

wenig konnte bis zu Wegeners Tode die Lehre vom Erdmagnetismus zur Stützung seiner Theorie beitragen.

Heute liegen die Dinge wesentlich günstiger: aus dem Bereich der erdmagnetischen Forschung sind mit die stärksten Impulse hervorgegangen, welche zu jener Neubelebung der Diskussion über dieses Thema geführt haben, die in den letzten 15 Jahren zu verzeichnen ist. Es sind drei Problemkreise des Erdmagnetismus, die mit großen Horizontalverschiebungen in Zusammenhang gebracht werden: das weltweite Verhalten der Säkularvariation, die Feinstruktur gewisser magnetischer Anomalien auf den Ozeanböden und, als Wichtigstes, der fossile Magnetismus der Gesteine, um dessen Erforschung und Deutung sich die rasch aufblühende Wissenschaft vom Paläomagnetismus bemüht. Auch hier liegt es aber wieder so, daß manches, was aus diesen Teilgebieten der Geophysik an neuen Erkenntnissen gewonnen wurde, nicht zwingend die Verschiebung der Kontinente just in der Weise verlangt, wie sie an Hand von morphologischen, paläontologischen und paläoklimatischen Tatsachen gefordert wird. Dies gilt insbesondere von den ersten beiden der drei erwähnten Problemkreise. Betrachten wir nun etwas ausführlicher, was sie zur Frage der Kontinentalverschiebung zu sagen haben.

Daß unter dem annähernd starren, in Wirklichkeit jedoch sehr zähflüssigen Erdmantel ein echt flüssiger Erdkern liegt, wissen wir aus der Erdbebenkunde. Daß in beiden, entsprechend ihrer sehr unterschiedlichen Zähigkeit, Zirkulation stattfinden kann, darf man aufgrund thermischer und anderer physikalischer Erwägungen annehmen, aber erst geomagnetische Befunde und Überlegungen machen diese Vorstellungen fast denknotwendig. Diese Befunde gehören nicht in erster Linie dem Problemkreis des Gesteinsmagnetismus an, — der uns ja zunächst nur etwas über die Erdkruste sagt —, sondern betreffen das planetarische Verhalten des Gesamtfeldes und derjenigen seiner Schwankungen, welche charakteristische Zeiten von Jahrhunderten bis Jahrtausenden haben und die Säkularvariation ausmachen. Das Gesamtfeld, auch Hauptfeld genannt oder, — weniger präzise —, permanentes Feld, ist überwiegend dipolar und axial, das der Säkularvariation dagegen nur zum geringeren Teil. Dies will besagen, daß man sich das Hauptfeld, abgesehen von weniger intensiven regionalen Sekundärfeldern, erzeugt denken kann durch einen starken magnetischen Dipol, der im Erdmittelpunkt unter nur geringer Neigung ($11,5^\circ$) gegen die Drehachse der Erde angeordnet ist. Das relative Überwiegen des so darstellbaren Anteils gegenüber den sekundären („nicht-dipolaren“) Anteilen ist es, was die Charakterisierung des Erdmagnetfeldes als hauptsächlich dipolar rechtfertigt. Nicht so bei der Säkularvariation: unterwirft man die Feldänderung pro Zeiteinheit (etwa pro Jahr) einer Kugelfunktionsanalyse ganz ähnlich wie vorher das Hauptfeld selber, so findet man diesmal, daß sich verschiedene Erscheinungen in weniger einfacher Weise übereinander schieben, nämlich (1) während der letzten etwa 2000 Jahre eine Abnahme des Gesamtmomentes der Erde, also des dipolaren Feldes; (2) eine ziemlich stetige und die ganze Erde betreffende Drift des nicht-dipolaren Anteils des Hauptfeldes nach Westen; (3) eine hier nicht weiter interessierende und vielleicht durch Verfahrensmängel vorgetäuschte Drift des magnetischen Zentrums der Erde nach Norden, und schließlich (4) nicht driftende regionale Variationsfelder, die mit Schwankungsweiten bis zu $100\gamma/\text{Jahr}$ unabhängig voneinander anwachsen und abklingen.

Die Dynamik des tieferen Erdinneren muß mit allen erwähnten Eigenschaften des Hauptfeldes und der Säkularvariation in Einklang gebracht werden; insbesondere die Existenz des dipolaren Anteils des Hauptfeldes und die Westdrift seines nicht-dipolaren Anteils (in der Größenordnung von $0,2^\circ$ Länge/Jahr) können aus elementaren

Gründen nicht an die relativ dünne Kruste geknüpft sein. Nach sehr mühsamen theoretischen Überlegungen der letzten drei Jahrzehnte hält man es heute für möglich, daß ein sich selbst erhaltender Dynamo im Erdkern die Ursache des dipolaren Hauptfeldes ist, während man die Westdrift des nicht-dipolaren Anteils glaubt aus einem langsamen Gleiten des Kerns gegenüber dem Mantel erklären zu können. Es gibt mehrere plausible Dynamo-Modelle; eine Übersicht findet sich bei Rikitake (1967). Wesentlich für alle ist das Bestehen einer Zirkulation im Erdkern; ein Teil derselben wird von Konvektionszellen gebildet, die bei einigen Modellen stationär gedacht werden und bei anderen statistisch verteilt anwachsen und abklingen. In der Theorie spielt außerdem der Begriff der poloidalen Magnetfelder eine Rolle, bei welchen die Kraftlinien die Körperoberfläche durchsetzen (wie beim Hauptfeld der Erde), im Gegensatz zu toroidalen Feldern, deren Kraftlinien ganz im Körperinneren verlaufen, so daß im Außenraum kein Feld herrscht.

Ein solches Modell könnte etwa folgendermaßen aussehen: Es besteht ein anfängliches schwaches poloidales Feld (z. B. kosmischen Ursprungs); zwischen dem Erdkern und -mantel, beide elektrisch leitend und relativ zueinander gleitend, besteht ein guter elektrischer Kontakt; in dem flüssigen Kern herrscht eine bestimmte Zirkulation; eine im Mantel wesentlich radial verlaufende Kraftlinie wird im Kern gedehnt; aus vielen solcher Linien entsteht im Kern ein toroidales, ganz auf diesen beschränktes Feld; durch Kernkonvektion werden Kraftlinien des toroidalen Feldes gehoben, und durch Coriolis-Ablenkung entsteht eine Drillung und eine Nord-Südkomponente dieses Feldes. Diese verstärkt das ursprünglich poloidale Feld, womit ein Rückkopplungsprozeß eingeleitet ist, der unter geeigneten Bedingungen zu Feldschwankungen und Feldumkehr führen kann.

Das Gleiten des Kerns gegenüber dem Mantel findet unter elektromagnetischer Kopplung statt und nicht rein mechanisch durch Wirkung der Zähigkeit; bestünde nur der letztere Effekt, etwa infolge von Zurückbleiben des Mantels unter Gezeiteneinfluß, so müßte ja der Kern relativ voreilen, also das Feld, welches an die in ihm herrschende Konvektionsstruktur gebunden ist, müßte nach Osten driften statt nach Westen.

Es ist nun nach diesen Vorstellungen nur noch ein Schritt, der dazu führt, daß man sich die erdmagnetisch an der Oberfläche sichtbar werdenden Kernkonvektionsvorgänge auf den, freilich ungleich zähflüssigeren Mantel wirkend denkt, in welchem sie in der Tat sich nach außen in Form von Horizontalkräften fortsetzen. Neuere Modellrechnungen haben unter Berücksichtigung der tatsächlichen Verteilung des Hauptfeldes und der Säkularvariation zu dem Ergebnis geführt, daß auf die gesamte Erdkruste ein Schub nach Westen ausgeübt wird, der aber nach Längsbereichen so differenziert ist, daß zum Beispiel Afrika gegenüber Südamerika zurückbleibt, und zwar gerade um einen jährlichen Betrag von der richtigen Größenordnung, nämlich 1 cm/Jahr.

Der zweite und dritte der anfangs erwähnten Problemkreise bezieht sich auf den Gesteinsmagnetismus, ein Gebiet, dessen intensive Durchforschung in den letzten drei Jahrzehnten sehr bedeutende Aufschlüsse über das Verhalten des Erdmagnetismus in der geologischen Vergangenheit zutage gefördert hat. Sowohl Sediment- wie Eruptivgesteine können in gewissem Sinne das Erdmagnetfeld im Zeitpunkt ihrer Bildung „einfrieren“, das heißt, eine Magnetisierung annehmen, deren Stärke und Richtung (also auch: Polarität) durch das gerade herrschende Feld gegeben sind. Bei den Sedimentgesteinen beruht dieses Phänomen darauf, daß diejenigen der konstituierenden Teilchen, welche eine wenn auch noch so schwache Magnetisierung aus ihrer Vorgeschichte mitbringen, während des Absetzens durch das vorhandene Erdfeld eine gewisse Tendenz bekommen, sich in dessen Richtung abzulagern. Es werden natürlich,

ceteris paribus, umso mehr Teilchen dieser Tendenz folgen und dies um so genauer tun, je stärker das herrschende Feld ist.

Im Falle der Eruptivgesteine liegen die Dinge so, daß die Temperatur, bei der sie noch fließen können, höher ist als der Curie-Punkt, oberhalb dessen sie nicht mehr magnetisierbar sind. Haben sie sich aber nach dem Erstarren erst einmal unter den Curie-Punkt abgekühlt, so nehmen sie eine Magnetisierung an, die wiederum nach dem herrschenden Feld ausgerichtet ist und deren Stärke außer von der Intensität des Erdfeldes natürlich auch von der Konzentration, der Magnetisierbarkeit und der mineralogischen Zusammensetzung abhängt. Daß diese Vorstellung im Prinzip richtig ist, kann man durch Messung der Magnetisierung von Lavaprobe bestätigen, die genau datierbar und historisch so jung sind, daß die Feldrichtung zur Zeit ihres Entstehens bekannt ist. Die so eingefangene Information über den Zustand des Erdfeldes am Ort und zur Zeit der Gesteinsbildung ist jedoch vielerlei störenden Einflüssen und möglichen Entstellungen ausgesetzt, die teils schon bei der Entstehung, teils in der weiteren geologischen Lebensgeschichte des Gesteins wirken können, die man aber glücklicherweise heute zu einem guten Teil unter Kontrolle hat und damit entweder korrigieren oder bei der Sichtung des Materials zum Ausmerzen unbrauchbarer Proben benutzen kann. Wir wollen uns darauf beschränken, nur einige dieser Störungen aufzuzählen, — die Einzelheiten füllen eine umfangreiche Literatur —: Richtungsabweichungen schon beim Ablagern von Sedimentpartikeln (z. B. wegen Überwiegens von Formeinflüssen gegenüber der Magnetkraft; Rollen der Partikel auf geneigtem Grund); nicht oder unvollkommen erkannte Neigungs- und Drehbewegungen des Gesteins im Verlauf seiner weiteren Geschichte; sekundäre Magnetisierung als Folge von Verspannung während der Verfestigung, oder als Folge mineralogischer Veränderungen („chemische“ Magnetisierung) oder von Blitzeinschlägen in der Nähe; langsame Einwirkung des Erdfeldes („viskose“ Magnetisierung) lange nach der Abkühlung, unter vielleicht schon ganz veränderten Bedingungen. Die sekundären Magnetisierungen sind meist weniger stabil und lassen sich „herauswaschen“; zu den häufig benutzten Verfahren gehört die Anwendung bestimmter Erhitzungs- und Abkühlungsprozesse, sowie die Anwendung magnetischer Wechselfelder (Näheres über Gesteinsmagnetismus im allgemeinen bei Nagata, 1961; über Paläomagnetismus zum Beispiel bei Irving, 1964, und Petrova, 1967).

Analysen des Gesteinsmagnetismus mit Hilfe solcher Reinigungsverfahren erlauben es im allgemeinen, zumindest die Richtung der primären Magnetisierung mit einer Genauigkeit von wenigen Graden zu bestimmen, in günstigen Fällen durch Mittelung mehrerer Proben derselben Fundstätte bis auf 1° genau. Die Stärke des remanenten Magnetismus wird seltener bestimmt; sie ist auch für die hier interessierenden Folgerungen entbehrlich. Zur Festlegung der Richtung werden zwei Anfangsrichtungen (Horizontale und Norden) sowie zwei auf diese bezogene Winkel gebraucht, welche der Inklination und Deklination des primären Feldes entsprächen, wenn das Gestein keine späteren Drehungen und Neigungen erfahren hätte. Diese müssen also stratigraphisch ermittelt werden, und die Proben müssen bei der Entnahme zwecks Orientierung in Bezug auf den Horizont und die Nordrichtung markiert werden.

Von den Weltmeeren, die in allen Zweigen der Geophysik allein schon wegen ihres großen Anteils an der Gesamtoberfläche der Erde, aber ganz besonders bei den Erwägungen über die Kontinentalverschiebung so wichtig sind, ist es nicht leicht, Bodenproben in großer Anzahl zu entnehmen, die den gestellten Bedingungen genügen. Aber auch schon mit Profilvermessungen des erdmagnetischen Feldes auf dem Meere, also ohne direkte gesteinsmagnetische Analyse war es möglich, eine bemerkenswerte Eigen-

schaft des Ozeanbodens zu entdecken und mit der Theorie der Meeresgrundausbreitung zu erklären (Vine und Matthews, 1963), nämlich die streifenförmige Anordnung magnetischer Anomalien parallel zu den Kammlinien der unterseeischen Gebirge, die man seit dem Internationalen Geophysikalischen Jahr mit vielen Einzelheiten in allen Ozeanen vermessen und als weltumspannendes System erkannt hat.

Derartige Streifenmuster enthält man, wenn man Bereiche positiver Abweichung des Totalfeldes und solche mit negativer Abweichung kartiert. Es findet sich dann, daß sich in vielen Gebieten aller Weltmeere die Bereiche des einen und anderen Vorzeichens in Richtung der Kammlinie der ozeanischen Gebirgskette hinziehen, und zwar nicht nur recht genau parallel zu ihr, sondern auch spiegelbildlich in der Weise, daß Abstände und Breiten der Streifen beiderseits beachtenswert ähnlich sind. Ein schönes Beispiel lieferten im Seegebiet südwestlich von Island aeromagnetische Vermessungen, die im Rahmen des Projektes „Magnet“ gemeinsam vom Lamont Geological Laboratory und dem U.S. Naval Oceanographic Office ausgeführt worden sind (Heirtzler, LePichon und Baron, 1966).

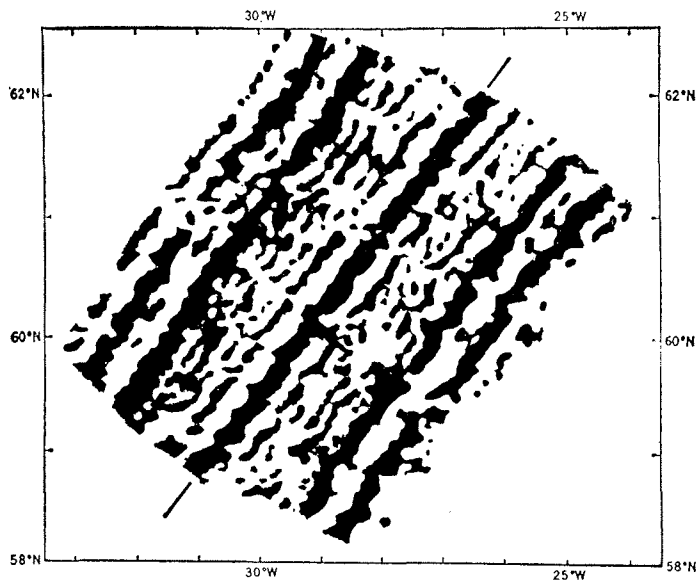


Abb. 1 Positive und negative magnetische Anomalien in spiegelbildlicher Streifenanordnung beiderseits des mittelatlantischen Rückens (Nach Heirtzler, LePichon und Baron, 1966).

Zur Deutung dieser magnetischen Markierungen des Meeresbodens helfen drei Tatsachen: die Ähnlichkeit der Muster, wenn man die verschiedenen Ozeane untereinander vergleicht; das Auftreten weltweit nachgewiesener Umkehrungen des Erdmagnetfeldes in der Vergangenheit, und schließlich das geologische Alter von Inselvulkanen. Die Verifizierung der Ähnlichkeit der Muster über große Teile der Weltmeere wird erleichtert durch den Umstand, daß die einzelnen Streifen im allgemeinen leicht identifiziert werden können, da ihre Breite und ihr gegenseitiger Abstand von Fall zu Fall zwischen wenigen Kilometern und mehr als 100 km verschieden ist. Die Polaritätsumkehrungen des Erdmagnetfeldes, die wir oben bei der Schilderung des Dynamo-Modells als möglich erwähnten, sind in der Tat während der geologischen Vorzeit oft vorgekommen. Man kann sie an Hunderten von gesteinsmagnetischen Bestimmungen aus allen Kontinenten

und Ozeanen ablesen und die Gleichzeitigkeit der Perioden mit normaler (jetziger) und umgekehrter Polarität durch unabhängige Altersbestimmungen nachweisen, die sich radiometrischer Verfahren bedienen. Solche Befunde sind gut gesichert bis zurück etwa ins Miozän; in älteren geologischen Zeiten (vielleicht mit Ausnahme des Oberkarbons und eines großen Teiles des Perm) sind sie zweifellos auch vorgekommen, nur war damals die Lage der Pole oder die der Kontinente oder beider, so verschieden von der heutigen, daß die Zuordnung Normal-Verkehrt ihre Bedeutung verliert. Die Größenordnung der Andauer eines Vorzeichens ist etwa 10^6 Jahre, die der Übergangsperioden etwa 10^4 Jahre. Manche Perioden sind durch kürzere Intervalle entgegengesetzter Polarität („Ereignisse“ oder „events“) vorübergehend unterbrochen, die natürlich immer nur als bestätigt gelten, wenn sie weltweit nachweisbar sind. (Näheres zum Beispiel bei Doell und Cox, 1967). Das Phänomen an sich ist schon zu Anfang unseres Jahrhunderts bekannt gewesen (Brunhes, 1906), und auch zu Wegeners Zeit erschienen einige Arbeiten darüber (Mercanton 1926a; 1926b; 1931; 1932; Matuyama 1929); Mercanton hat sogar ausdrücklich bemerkt, daß paläomagnetische Befunde zur Klärung der Hypothesen über Polwanderung und Kontinentalverschiebung würden beitragen können.

Die durch umpolarisierten Magnetismus der Krusten- oder Meeresbodengesteine erzeugten Felder sind natürlich bei magnetischen Profilvermessungen nicht in Form einer Umkehr des beobachteten Gesamtfeldes zu erkennen, sind aber in diesem als Beiträge enthalten; man untersucht daher, wie schon erläutert, die Anomalien positiven und negativen Vorzeichens.

Den Schlüssel zur Erklärung der Streifenmuster längs der subozeanischen Gebigskette liefert das Phänomen der *Ausbreitung der Ozeanböden*: nimmt man ein gleichförmiges Auseinanderfließen beiderseits der Gebirge (zum Beispiel des mittelatlantischen Rückens) an, bei stetigem Nachschub heißen Materials aus der Tiefe in der Zentralachse des Gebirges selbst, und eine beständige Magnetisierung der jeweils neu emporquellenden Lava, sobald sie unter ihren Curie-Punkt abgekühlt ist, so müssen sich offenbar Streifen der gerade herrschenden Polarität bilden, die bei der Ausbreitung des Meeresbodens davongetragen werden. Ihre Breite ist dann — gleichmäßige Fließgeschwindigkeit vorausgesetzt — der Andauer der Periode gleicher Polarität proportional und ihr Abstand von der Gebirgsachse ihrem Alter. Damit ist auch sogleich eine Möglichkeit gegeben, die Fließgeschwindigkeit zu berechnen, da ja die Epochen der Polaritätsumkehrungen, wie oben bemerkt, gut datiert sind. Die Geschwindigkeiten haben die Größenordnung weniger Zentimeter pro Jahr; insbesondere im östlichen Stillen Ozean erhält man 4,4 cm/Jahr, im Nordatlantik 1 cm/Jahr. Eine unabhängige Bestätigung erfahren diese Befunde durch die Feststellung von Wilson (1965), daß Inseln und einzelne unterseeische Berge des Atlantischen Ozeans im allgemeinen umso älter sind, je weiter sie vom Mittelatlantischen Rücken entfernt liegen; die Beziehung ist allerdings nicht völlig scharf.

Die Bänderung der Anomalien ist übrigens nicht der einzige geomagnetische Beweis für große Bewegungen des Meeresbodens. Eine andere Art solcher Verschiebungen von erstaunlichen Ausmaßen sind im Stillen Ozean vor der Westküste von Nordamerika zu erkennen. Man findet dort Ost-West-Verwerfungen des Musters nord-südlich verlaufender magnetischer Anomalien, welche auf Bewegungen über stellenweise 1500 km deuten.

Man muß bei all diesen Befunden einräumen, daß sie noch nicht die spezifische Aussage der Kontinentalverschiebungs-Hypothese beweisen und auch in anderer Hinsicht auf Widerspruch gestoßen sind (Belousov 1970). Hier kommt man erst weiter mit Er-

wägungen aus dem dritten Problemkreis, nämlich über die Richtung des remanenten Gesteinsmagnetismus in Proben aus allen Erdgegenden und über sehr lange geologische Zeiten.

In einem zentrierten Dipolfeld verteilen sich die Neigungswinkel (Inklination I) auf der Oberfläche der Erdkugel in solcher Weise, daß für einen Ort der geomagnetischen Breite Φ die Beziehung $\tan I = 2 \tan \Phi$ gilt. Schon Gilbert, der Anfang des 17. Jahrhunderts das erste große Werk über den Erdmagnetismus schrieb, rühmte sich, diesen Zusammenhang nautisch ausnutzen zu können, und Humboldt sagt im „Kosmos“ (Band 2, S. 321): „Ich habe, auf eigene Beobachtungen in der Südsee gestützt, gleich nach meiner Rückkehr nach Europa gezeigt, wie unter gewissen Localverhältnissen, z. B. an den Küsten von Peru in der Jahreszeit der beständigen Nebel (garúa) aus der Inklination die Breite mit einer für die Bedürfnisse der Schifffahrt hinreichenden Genauigkeit bestimmt werden kann“.

Findet man nun in einer Gesteinsprobe bekannten geologischen Alters eine Inklination, die von der gegenwärtigen verschieden ist, so muß entweder zur Zeit der Gesteinsbildung der Pol an einer anderen Stelle gelegen haben als in der Gegenwart, oder der Fundort; drittens kann auch eine nicht dipolare Struktur des Feldes vorgelegen haben, welche ja die Voraussetzung für die Gültigkeit obiger Beziehung zwischen I und Φ ist. Es können auch zwei oder alle drei dieser Tatbestände gleichzeitig erfüllt gewesen sein. Man schränkt diese Vieldeutigkeit zunächst dadurch ein, daß man die Feldstruktur als dipolar annimmt, nachdem sich an Hand vieler paläomagnetischer Proben aus allen Weltteilen erwiesen hat, daß dies in der Tat zutrifft für eine kürzere geologische Zeitspanne, etwa bis zurück ins obere Tertiär, während der die Kontinentalverschiebungen nicht groß gewesen sein können.

Unter dieser Annahme kann man für Gesteinsproben gleichen Alters, die von einem und demselben Kontinent stammen, einen Pol rekonstruieren und auf dem gegenwärtigen Globus auftragen. Bestimmungen gleicher Art aus verschiedenen geologischen Epochen liefern dann eine Polwanderungskurve, auf der jeder Punkt einem bestimmten Alter entspricht und die bei der heutigen Pol-Lage endet. Die für unsere Frage entscheidende Forderung ist nun die, daß solche Polwanderungskurven, wenn sie für Gesteine aus verschiedenen Kontinenten gezeichnet werden, identisch sein müßten, falls die Erdteile ihre Lage zueinander beibehalten hätten. Die Befunde sprechen dagegen: man findet zum Beispiel, daß die aus nordamerikanischen Gesteinen bestimmte Kurve mindestens seit dem Mesozoikum um etwa 20° bis 30° westlich von derjenigen verläuft, die sich für Europa ergibt. Beide liegen im nördlichen Stillen Ozean, während andererseits Australien eine Polwanderungskurve liefert, die in den Atlantischen Ozean fällt. Ähnliche Kurven sind für die übrigen Weltgegenden gezeichnet worden. Man könnte natürlich versuchen, die Diskrepanzen auf ein Minimum zu reduzieren, indem man die Kurven so gut wie möglich zur Deckung bringt und dabei nachsieht, um wieviel man die Kontinente für jede geologische Zeit verschieben muß. Dieses Verfahren ist aber trügerisch; denn die paläomagnetisch gemessene Breite läßt die Länge unbestimmt. Ist auch noch die Paläodeklination bekannt, so kann die Unbestimmtheit etwas vermindert werden, indem man den Kontinent auch noch entsprechend rotiert; man braucht aber auch dann noch eine dritte Angabe, die man aus der Geometrie der Kontinentalmassen (am besten einschließlich ihrer Schelfgebiete) oder aus paläoklimatischen Befunden entnimmt.

Eine solche geometrische Zusammenfügung ist für die Kontinente beiderseits des Atlantischen Ozeans unter anderen von Bullard und Mitarbeitern (1965) vorgenommen wor-

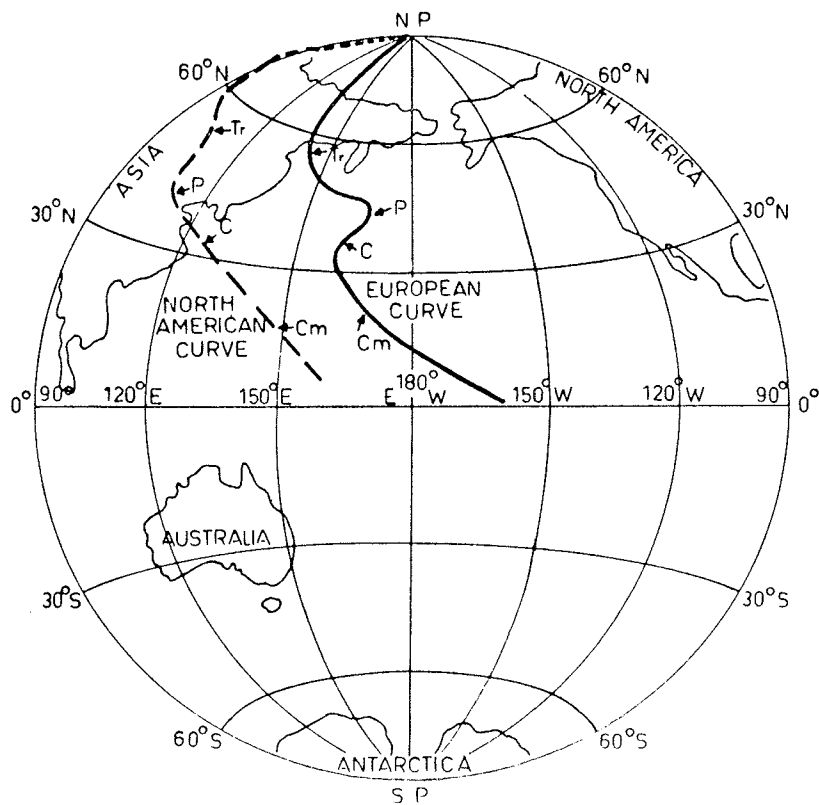


Abb. 2 Stark ausgeglichene paläomagnetisch konstruierte Polwanderungskurven seit dem Erdaltertum, für Nordamerika (gestrichelt) und Europa (ausgezogen); aus Hospers und van Andel (1968), nach Runcorn (1965).

den. Sie fanden, daß man für den nördlichen Atlantischen Ozean die beste Anpassung erreicht, wenn man statt der Küstenlinie die Isobathe von 500 Faden als Kontinentalumgrenzung wählt; unter dieser Voraussetzung müssen Nordamerika und Europa um 38° aufeinander zugeschwenkt werden, um das Quadrat der verbleibenden Fehler zu einem Minimum zu machen; dabei muß man als Drehpunkt einen Ort in $88^\circ 5' N$, $27^\circ 7' E$ wählen, also recht nahe dem Nordpol. Für die Anpassung von Südamerika an Afrika wird ein größerer Schwenkungswinkel, nämlich etwa 50° bis 60° , benötigt und ein in mittleren nördlichen Breiten gelegener Drehpunkt.

Der von Bullard und Mitarbeitern gefundene Schwenkungswinkel von 38° stimmt nun recht gut mit paläomagnetischen Ergebnissen überein, die Hospers und van Andel (1968) zusammengestellt haben; diese Forscher haben die zu stark geglätteten und daher zu optimistischen Polwanderungskurven von Runcorn (unsere Abb. 2) nochmals unter strengen Auswahlkriterien überprüft, und zwar insbesondere angesichts der Tatsache, daß Irving (1964) ein weniger klares Bild gefunden hatte. Bei diesem sind die Europa- und die Nordamerika-Kurve, sofern man das von Hospers und van Andel (1968) angewendete Kriterium des 95%-Fehlerkreises zugrunde legt, erst vom Karbon aufwärts systematisch getrennt, um sich oberhalb der Trias erneut zu verschlingen. Hospers und van Andel haben aber dann nach Ausmerzung unzuverlässiger Beobachtungen und mit Einschluß neuerer Daten, die auch Eruptivgesteine stärker berücksich-

tigen, dennoch das Ergebnis von Runcorn bestätigen können, daß beide Polwanderungskurven im großen und ganzen signifikant verschieden sind, allerdings nach wie vor in der Kreidezeit ost-westlich verschlungen, ein Schönheitsfehler, welcher in Runcorns idealisierten Kurven ausgeglichen ist. Für die Epochen aber, in denen die Kurven gut gesichert und ost-westlich „richtig“ angeordnet sind, paßt ihre Lage ausgezeichnet zu dem von Bullard und Mitarbeitern geforderten Schwenkungswinkel von etwa 40°. Dennoch kann man über den Zeitpunkt, zu dem sich der Nordatlantische Ozean zu öffnen begann, aufgrund dieser immer noch unzureichenden Daten nicht viel mehr sagen, als daß er etwa um die Wende zum Mesozoikum gelegen haben dürfte. Für den Südatlantischen Ozean, wo zweifellos andere Prozesse im Spiel waren (Creer et al., 1969), hat sich gezeigt (Valencio und Vilas, 1969; Valencio und Vilas, 1970), daß man die Trennung zwischen Afrika und Südamerika aufgrund paläomagnetischer Messungen im unteren Jura annehmen muß.

Literatur:

- Belousov, V. V. (1970): About the hypothesis of ocean-floor spreading. *Conferencia sobre Problemas de la Tierra Sólida, Buenos Aires 1970*.
- Brunhes, B., (1906): Recherches sur la direction d'aimantation des roches volcaniques. *Journal de Physique*, 4e Série, 5, 705—724.
- Bullard, E. C., Everett, J. E. und Smith, A. G. (1965): The fit of the continents around the Atlantic. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A*, 258, 41—51.
- Creer, K. M., Embleton, B. J. J. und Valencio, D. A. (1969): Comparison between the upper Paleozoic and Mesozoic paleomagnetic poles for South America, Africa and Australia. *Earth and Planetary Science Letters*, 7, 288—292.
- Doell, R. R. und Cox, A. (1967): Polarity reversals of the geomagnetic field. *International Dictionary of Geophysics* (Ed. S. K. Runcorn), 1207—1209.
- Heirtzler, J. R., LePichon, X. und Baron, J. G. (1966): Magnetic anomalies over the Reykjanes Ridge. *Deep Sea Research*, 13, 427—443.
- Hospers, J. und van Andel, S. I. (1968): Paleomagnetic data from Europe and North America and their bearing on the origin of the North Atlantic Ocean. *Tectonophysics*, 6, 475—490.
- Irving, E. (1964): *Paleomagnetism and its application to geological and geophysical problems*. (New York, London, Sydney).
- Matuyama, M. (1929): On the direction of magnetization of basalt in Japan, Työsen and Manchuria. *Proceedings, Imperial Academy of Japan*, 5, 203—205.
- Mercanton, P. L. (1926a): Inversion de l'inclinaison magnétique terrestre aux âges géologiques. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*, 31, 187—190.
- Mercanton, P. L. (1926b): Aimantation de basaltes groenlandais. *Comptes Rendus Académie des Sciences, Paris*, 180, 859—860.
- Mercanton, P. L. (1931): Inversion de l'inclinaison magnétique aux âges géologiques. *Comptes Rendus Académie des Sciences, Paris*, 192, 978.
- Mercanton, P. L. (1932): Inversion de l'inclinaison magnétique aux âges géologiques. *Comptes Rendus Académie des Sciences, Paris*, 194, 1371.
- Nagata, T. (1961): *Rock Magnetism*.
- Petrova, G. N. (1967): Paleomagnetism. *International Dictionary of Geophysics* (Ed. S. K. Runcorn), 1131—1134.
- Rikitake, T. (1967): Main theory of geomagnetic field. *International Dictionary of Geophysics* (Ed. S. K. Runcorn), 617.
- Runcorn, S. K. (1965): Paleomagnetic comparisons between Europa and North America. *Philosophical Transactions, Royal Society of London, Serie A, No. 1088, vol. 258* (A Symposium on Continental Drift), 1—11.
- Valencio, D. A. und Vilas, J. F. (1969): Age of the separation of South America and Africa. *Nature*, 223, No. 5213, 1353—1354.
- Valencio, D. A. und Vilas, J. F. (1970): Paleomagnetism of some Middle Jurassic Lavas from South-east Argentina. *Nature*, 225, No. 5229, 262—264.
- Vine, F. J. und Matthews, D. H. (1963): Magnetic Anomalies over Ocean Ridges. *Nature*, 199, 947—949.
- Wegener, A. (1929): *Die Entstehung der Kontinente und Ozeane*. Vierte Auflage. Braunschweig.
- Wilson, J. T. (1965): Evidence from ocean islands suggesting movement in the Earth. *Philosophical Transactions, Royal Society of London, Serie A, No. 1088, vol. 258* (A Symposium on Continental Drift), 145—167.