

Erdmagnetismus

Von Pol zu Pol: das Erdmagnetfeld

Wir sehen es nicht, wir spüren es nicht – und doch ist es unverzichtbar für Leben auf der Erde: das Erdmagnetfeld. Es umschließt die Erde und wirkt als Schutzschild gegen hochenergetische Teilchen, die als Sonnenwind auf die Erde treffen.

Und es dient uns als Orientierungshilfe. Bereits die Chinesen versuchten vor 2000 Jahren, das Erdmagnetfeld zu messen, aber erst im Laufe der Jahrhunderte verfeinerten sich die Methoden und Ergebnisse. Auch Mathematiker wie Descartes, Leibniz oder das Akademiemitglied Gauß leisteten dazu wichtige Beiträge. Heute sind Messdaten zum Erdmagnetfeld für die Geo- und Welt- raumwissenschaften äußerst wichtig, ebenso für medizinische oder biologische Untersuchungen, in der Kartographie oder der Navigation.

VON HEINRICH SOFFEL

DIE ERDE UMGIBT ein magnetisches Feld. Man kann es sich näherungsweise als magnetisches Dipolfeld mit einem Nord- und einem Südpol, wie das Feld eines Stabmagneten, vorstellen. Die Pole des Erdmagnetfelds fallen allerdings nicht mit den geographischen Polen zusammen: Die Achse des magnetischen Dipolfeldes ist derzeit um etwa 11,4 Grad gegenüber der Erdrotationsachse geneigt. Die Richtung dieses Vektorfeldes lässt sich an der Erdoberfläche mathematisch mit zwei Winkeln beschreiben: der Deklination D , also der Abweichung einer Kompassnadel von der geographischen Nordrichtung, und der Inklination I , d. h. dem Winkel, mit dem die gedachten Linien des Erdmagnetfelds auf die Erdoberfläche treffen. Hinzu kommt eine Angabe über die Stärke des Feldes.

Frühgeschichte der Erforschung des Erdmagnetfeldes

In China wurden Geräte zur Messung der Deklination schon vor mehr als 2.000 Jahren sowohl zur Richtungsbestimmung als auch für magische Zwecke (Geomantie) verwendet. Es gab solche Richtungsweiser in der Form einer Schildkröte, eines chinesischen Löffels oder eines Fisches. Der Enzyklopädist Shên Kuò (1031–1095) beschrieb im Jahr 1088 ein Instrument, das bereits die wichtigsten Eigenschaften eines modernen Kompasses besaß. Es bestand aus einer aufmagnetisierten Nadel aus Eisen, die an einem dünnen Seidenfaden hing oder auf einer Spitze gelagert war. Er erwähnte auch, dass die Nadel nicht genau in die geographische Nordrichtung zeigte und erkannte damit bereits die so genannte Missweisung oder Deklination.

Die erste Beschreibung eines Kompasses in Europa gab Alexander Neckam (1157–1217) von St. Albans bei London im Jahr 1187. Auch er empfahl, die Kompassnadel auf einer Spitze zu lagern, um die Reibung zu minimieren, und wies auf die Abweichung der Kompassnadel von der wahren Nordrichtung hin. Die erste wissenschaftliche Abhandlung über den Erdmagnetismus schrieb Pierre de Maricourt, genannt Petrus Peregrinus, im Jahr 1269 in Form eines Briefes an den Ritter

Syger de Foucaucourt. Darin schilderte er seine Experimente mit Kugeln aus Magnetit (Fe_3O_4) und befasste sich mit dem Bau von Kompassen. Er beschrieb, dass Magnete zwei Pole haben und dass sich gleichartige Pole abstoßen, ungleichnamige anziehen.

Dass sich die Missweisung eines Kompasses je nach Standort ändert, fiel Christoph Kolumbus bei seiner ersten Reise auf: Er bestimmte $D = 6^\circ\text{E}$ in Spanien und $D = 5,5^\circ\text{W}$ bei seiner Landung in Mittelamerika. Mitten im Ozean, westlich der Azoren, war $D = 0^\circ$ und wechselte weiter westlich sogar das Vorzeichen. Kurz nach Kolumbus' Rückkehr erhielt die Region im Atlantik mit $D = 0^\circ$ eine große politische Bedeutung: Im Vertrag von Tordesillas vom 7. Juni 1494 verwendete Papst Alexander VI. (1431–1503) die Deklination von 0° , um bei $46,5^\circ\text{W}$ die Welt in eine portugiesische und eine spanische Einflussphäre aufzuteilen.

Der Mythos vom Magnetberg

Lange Zeit war man im Glauben, dass die Kompassnadel von einem riesigen Magnetberg im Nordmeer angezogen würde. Schiffe, die sich diesem Berg näherten, würden die Nägel verlieren, die sie zusammen hielten, und sinken. Der holländische Geograph Gerhard Kremer, genannt Mercator (1512–1594), konstruierte die Lage dieses Magnetberges aus den Deklinationswerten der Insel Hierro auf den Kanarischen Inseln ($D = 0^\circ$) und dem Wert in Regensburg ($D = 8^\circ\text{E}$) und kam so auf einen Ort im nördlichen Pazifik.

Georg Hartmann aus Nürnberg (1489–1564), Mathematiker und Vikar an der Sebalduskirche, entdeckte 1544 die Inklination, also die Tatsache, dass eine Magnetonadel auch nach unten gezogen wird. Der Engländer Robert Norman baute 1581 ein Gerät, mit dem dieses Phänomen genau gemessen werden konnte. Sein Landsmann William Gilbert (1544–1603) wiederholte aufgrund dieser Erkenntnisse die Experimente von Peregrinus mit Kugeln aus Magneteisenstein (Magnetit, Fe_3O_4) und kam zu dem Schluss, dass das Erdmagnetfeld aus dem Erdinnern stammen müsse. Im Jahr 1600 veröffentlichte er das Buch „De Magnete“. Daraus stammt der Leitsatz: „*Magnus magnes ipse est globus terrestris*“ (Die Erde selbst ist ein großer Magnet). Seither war klar, dass die Kompassnadel nicht vom Polarstern oder von magnetischen Felsen am Nordpol orientiert wird, sondern durch das Magnetfeld der Erde selbst.

Abb. 1: Das Magnetfeld setzt sich im Inneren eines magnetisierbaren Körpers fort: Feldlinienbild von René Descartes.

Descartes und der Magnetismus im Erdinnern

René Descartes (1596–1650) war der erste große Mathematiker, der sich mit Fragen des Erdmagnetismus beschäftigte. Zu seiner Zeit war das Buch „De Magnete“ von Gilbert bereits bekannt. Man wusste auch, dass man mit kleinen Magnetitteilchen oder Eisenfeilspänen Magnetfelder sichtbar machen konnte. Zur Erklärung des Magnetismus nahm er kleine schraubenförmige Partikel an, die sich sowohl im Außenraum eines Magneten als auch im Innern der Erde durch den Raum hindurchwinden können (Abb. 1). Seine Ideen zur Fortsetzung des Magnetfeldes im Erdinnern kommen den heutigen Vorstellungen über Felder im Innern magnetisierbarer Körper recht nahe. Descartes meinte auch, dass die zu Beginn des 17. Jahrhunderts entdeckten Sonnenflecken mit örtlichen Magnetfeldern auf der Sonne in Zusammenhang stehen würden. Erst George Ellery Hale (1868–1938) konnte dies 1908 bestätigen und die Stärke dieser Magnetfelder mit Hilfe des Zeeman-Effekts messen.

Halleys Deklinationskarte für den Atlantik

Der englische Theologe, Mathematiker und Astronom Henry Gellibrand (1597–1636) entdeckte 1634, dass sich die Deklination in London zwischen 1580 und 1634, also innerhalb von 54 Jahren, von $D = 11,3^\circ W$ bis zum Wert $D = 4,1^\circ W$ verändert hatte. Daraus folgerte er, dass D nicht nur regional unterschiedliche Werte besitzt, sondern sich auch an einem Ort zeitlich ändern kann. Er veröffentlichte seine Ergebnisse 1635 und gilt damit als Entdecker der Säkularvariation.

Abb. 2: Die Vermessung des Atlantiks durch Edmund Halley: Deklinationskarte von 1701. Da es für das Innere der Kontinente kaum verlässliche Daten gab, enden die meisten Linien an den Küsten.

Ab dem 13. Jahrhundert hatte sich der Kompass zur Messung der Nordrichtung durchgesetzt und war zu einem unverzichtbaren Navigationsinstrument geworden. Es war aber auch notwendig, die örtliche Missweisung oder Deklination zu kennen. Die erste Vermessung der Deklination in einem großen Gebiet führte der englische Mathematiker und Astronom Edmund Halley (1656–1742) von 1698 bis 1700 auf einem unmagnetischen Forschungsschiff an 115 Punkten im Atlantik durch. Seine Deklinationskarte für den Atlantik wurde 1701 publiziert (Abb. 2). Die meisten Linien gleicher Deklinationswerte enden an den Küsten, weil es für das Innere der Kontinente kaum zuverlässige Daten gab.

Auf der Grundlage von 48 Magnetfelddaten hatte Halley schon 1683 ein Modell des Erdmagnetfeldes mit zwei Nordpolen bei $75^\circ N, 115^\circ W$ bzw. $83^\circ N, 6^\circ W$ und zwei Südpolen an den Positionen $70^\circ S, 120^\circ E$ bzw. $74^\circ S, 95^\circ W$ vorgeschlagen. Diese Idee der vier Pole sollte sich fast 150 Jahre lang

halten, bis sie Carl Friedrich Gauß (1777–1855) 1839 durch seine Kugelfunktionsanalyse widerlegen konnte.

Geomagnetische Messungen in Russland

Der nächste große Mathematiker, der sich mit dem Erdmagnetfeld zu beschäftigen begann, war Gottfried Wilhelm Leibniz (1646–1716). Durch gute Kontakte zur Royal Society in London kannte er nicht nur seinen Konkurrenten Isaac Newton (1643–1727), sondern war auch mit den erdmagnetischen Arbeiten von Edmund Halley und dessen Karte von 1701 vertraut. Als Peter der Große 1711 das sächsische Torgau besuchte, schlug er





schen Akademie war Leonhard Euler (1707–1783). 31 Jahre lang in Russland tätig, war er der erste Mathematiker, der den Versuch unternahm, Erdmagnetismus mit Mathematik in Verbindung zu bringen. Ihm verdanken wir eine globale Deklinationkarte für das Jahr 1760.

Ende des 18. Jahrhunderts entwickelte der französische Mathematiker Adrien-Marie Legendre (1752–1833) eine Methode, die Gauß einige Jahrzehnte später zur Analyse von erdmagnetischen Daten mit Hilfe von Kugelfunktionen aufgriff. Im Grunde geht es dabei um die Darstellung der Magnetfeldwerte an der Erdoberfläche in Form räumlicher Ableitungen einer Potentialfunktion, die in eine Reihe zu entwickeln war. Die Koeffizienten g und h dieser Reihe ergeben die Approximation des Erdmagnetfeldes durch die Felder axialer und äquatorialer Multipole (Dipole, Quadrupole, Oktupole usw.).

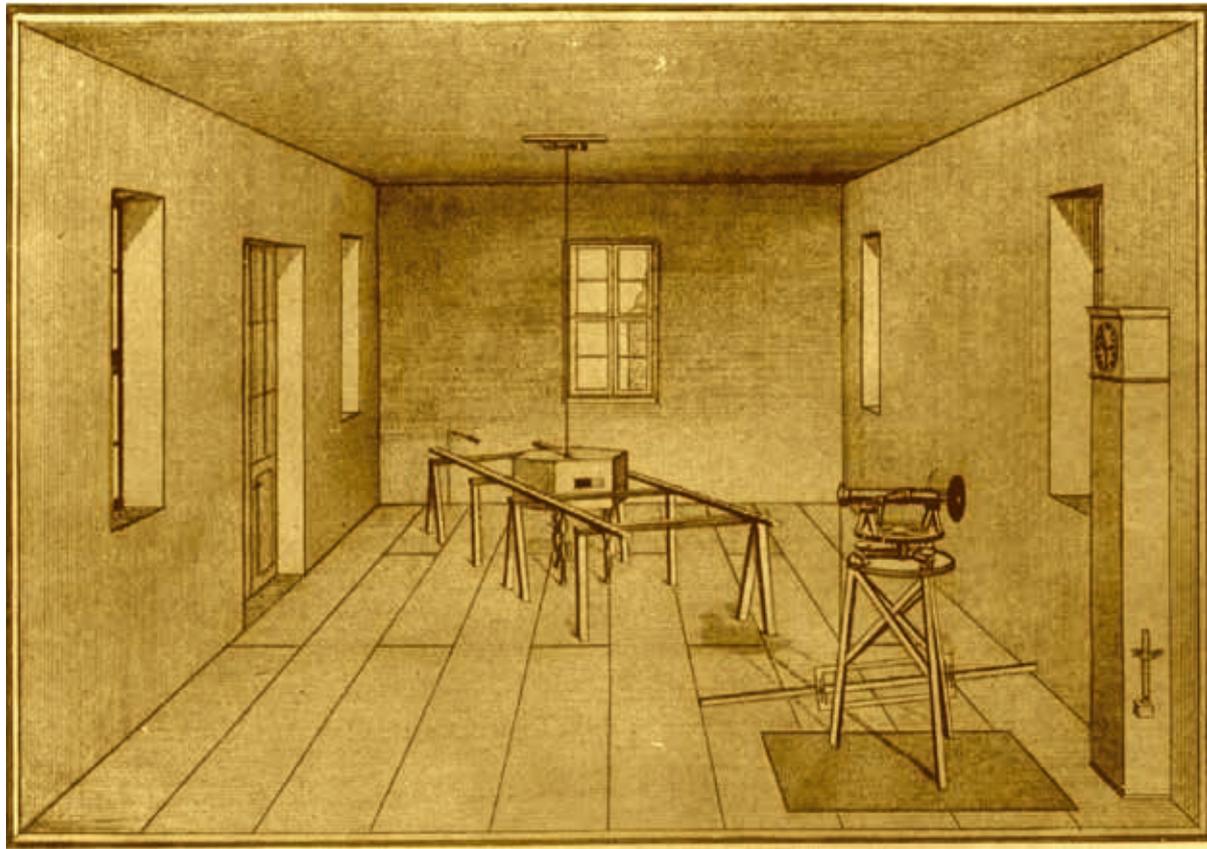
Humboldts Reise nach Südamerika

Eine wichtige Größe des Erdmagnetfeldes konnte damals jedoch noch nicht bestimmt werden: seine Intensität. Diese Möglichkeit bot sich Alexander von Humboldt (1769–1859) bei seiner Reise nach Südamerika. Er konnte sich mit magnetischen Messungen aus, weil er schon als junger Mann mehrfach Deklinations- und Inklinationsbestimmungen gemacht hatte. In Paris traf er Jean-Charles Borda (1733–1799), der ihm zeigte, wie man auch Informationen über relative Feldintensitäten gewinnen konnte. Borda, einer der Initiatoren der geodätischen Gradmessung von 1792 bis 1799 zur Definition der neuen Längeneinheit „Meter“, war ein genialer Instrumentenbauer. Er schlug Humboldt vor, die Schwingungsdauer T einer in der magnetischen Meridianebene schwingenden Magnetnadel als Funktion der Breite zu bestimmen. Dabei ist die Magnetfeldstärke F umgekehrt proportional zum Quadrat der Schwingungsdauer T . Je länger die Schwingungsdauer T , desto kleiner ist die Feldintensität. Mit dem Gerät war es allerdings nur möglich, relative Feldstärken zu messen, indem man die Zahl der Schwingungen der Magnetnadel innerhalb von zehn Minuten mit dem entsprechenden Wert in Paris verglich. Dort hatte er 245 Schwingungen in zehn Minuten bestimmt. Mit den Messungen in niedrigen Breiten hoffte er, mehr über das Erdmagnetfeld und seine Variation mit der Breite zu erfahren. Das Instrument zeigte in Peru am magnetischen Äquator ($I = 0^\circ$) nur noch ca. 211 Schwingungen.

ihm vor, in Russland ein Netzwerk von Stationen (Observatorien) für meteorologische und geomagnetische Messungen einzurichten. Der Zar war gerade dabei, eine russische Marine aufzubauen und wusste, dass für die Schifffahrt sowohl meteorologische als auch erdmagnetische Daten unverzichtbar waren. Bei den zahlreichen russischen Expeditionen nach Sibirien im 18. Jahrhundert wurden später stets, den Anregungen von Leibniz folgend, geomagnetische Messungen (Deklinationsbestimmungen) durchgeführt.

Während dieser Jahre war der berühmte Schweizer Mathematiker Daniel Bernoulli (1700–1782) Mitglied der Russischen Akademie der Wissenschaften und förderte dort die Expeditionen nach Sibirien und die Durchführung magnetischer Messungen. Ein anderer berühmter Mathematiker aus der Schweiz in Diensten der Russi-

Abb. 3: Klassischer Versuchsaufbau von Gauß aus dem Jahre 1832: Uhr zur Zeitmessung und Teleskop zur Beobachtung und Messung der Bewegungen des Magneten, der in einem Gehäuse, vor Luftturbulenzen geschützt, aufgehängt ist (v. r. n. l.).



DER AUTOR

Prof. Dr. Heinrich Soffel hatte bis zu seinem Ruhestand den Lehrstuhl für Angewandte Geophysik an der LMU München inne, verbunden mit der Leitung des Geophysikalischen Observatoriums Fürstfeldbruck. Er ist Mitglied der Kommission für Erdmessung und Glaziologie sowie der Kommission für Geowissenschaftliche Hochdruckforschung der Bayerischen Akademie der Wissenschaften. Seine Forschungsgebiete sind u. a. Gesteinsmagnetismus, Paläomagnetismus, Geodynamik (Rekonstruktion der Kontinentaldrift), Angewandte Geophysik (Magnetik, Gravimetrie), Gesteinsphysik sowie ozeanische und kontinentale Tiefbohrungen.

Weiter südlich nahm die Zahl der Schwingungen in zehn Minuten wieder zu. Damit konnte er zeigen, dass das Magnetfeld am magnetischen Äquator die geringste Intensität aufweist. Nach der Rückkehr von seiner Südamerikaexpedition schlug Humboldt 1804 vor, die Magnetfeldstärke am Äquator als Feldeinheit einzuführen. Sie sollte 1.000 Humboldt-Einheiten entsprechen. In den folgenden Jahrzehnten wurde an zahlreichen Orten auf dem Globus die Feldstärke in solchen Humboldt-Einheiten bestimmt. Auch Gauß verwendete sie 1839 noch für seine Feldanalysen.

Gauß treibt die globale Erforschung des Erdmagnetfeldes voran

Carl Friedrich Gauß war fast 50 Jahre alt, als er 1828 in Berlin bei einer Tagung der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte mit Humboldt zusammentraf. Dieser überredete Gauß dazu, sich mit Hilfe mathematischer Methoden den Problemen des Erdmagnetismus zuzuwenden. Zur Erfassung aktueller und möglichst genauer geomagnetischer Daten aus allen Teilen der Welt gründeten Gauß und Humboldt 1834 den „Göttinger Magnetischen Verein“. Sie glaubten, dass mit der damit verbundenen Datensammlung und der Gründung neuer Beobachtungsstationen, so genannter geomagnetischer Observatorien, die offenen Fragen des Erdmagnetismus innerhalb weniger Jahre beantwortet werden könnten.

Der erste Beitrag von Gauß bestand in einer neuen Versuchsanordnung zur Messung der Intensität des Erdmagnetfeldes, um die so genannte Humboldt-Einheit durch eine physikalisch begründete Einheit für ein Magnetfeld abzulösen. Die Messungen fanden 1832 in einem speziellen unmagnetischen Laboratorium in Göttingen statt (Abb. 3), das später an anderer Stelle außerhalb Göttingens wieder aufgebaut wurde und seitdem als Museum dient. Die Veröffentlichung erschien 1833 und war, wie damals üblich, in lateinischer Sprache verfasst.

Die Messung bestand aus einem Schwingversuch und einem Ablenkversuch. Beim Schwingversuch wird die Schwingungsdauer T des Magnetsystems gemessen. Sie wird von der Torsionssteifigkeit τ des Fadens, dem Trägheitsmoment Q des Systems und dem Produkt aus dem magnetischen Moment M des Magneten und der Horizontalkomponente H des Magnetfeldes bestimmt. Beim Ablenkversuch wird der Magnet des Schwingversuchs benutzt, um senkrecht zur Horizontalkomponente H des Erdmagnetfeldes ein Zusatzfeld zu erzeugen. Eine Kompassnadel wird dann um den Winkel α abgelenkt. Aus dem Schwingversuch erhielt Gauß das Produkt $m \times H$, aus dem Ablenkversuch den Quotienten m/H . Aus der Kombination beider Größen konnten

das magnetische Moment des Magneten und die Horizontalkomponente des Feldes separat gewonnen und in Einheiten der Länge, der Masse und der Zeit beschrieben werden. Das war für die Physik ein wichtiger Schritt, weil es damit möglich wurde, Größen des Magnetismus und der Elektrizitätslehre mit den Einheiten der Mechanik auszudrücken. Daraus entstand später das metrische, auf den Einheiten Zentimeter, Gramm und Sekunde basierende „cgs-Maßsystem“ (aus dem Englischen „centimetre gram second“).

Für eine globale Analyse der geomagnetischen Daten mit Hilfe der von Gauß verwendeten Kugelfunktionen standen Daten von 123 Messorten zur Verfügung, von denen 93 genutzt werden konnten (Abb. 4). Die Daten für Magnetfeldintensitäten (in Humboldt-Einheiten) stammten weitgehend von neuen Messungen im Rahmen des Göttinger Magnetischen Vereins. Die Kugelfunktionsanalyse erlaubte die Berechnung des Erdmagnetfeldes an allen Orten der Erdoberfläche. Zusammen mit seinem Assistenten Wilhelm Weber (1804–1891) veröffentlichte Gauß 1840 globale Karten für die „erdmagnetischen Elemente“ wie zum Beispiel die Deklination (Abb. 4), die Inklination, die Vertikal-, die Horizontal- sowie die Totalintensität. Dies waren die ersten genauen globalen Karten des Erdmagnetfeldes. Aus ihnen ergab sich eindeutig, dass die Erde nur einen Nord- und einen Südpol besitzt und keine vier Pole, wie Halley und andere Wissenschaftler angenommen hatten.

Erste geomagnetische Observatorien entstehen

Die Gründung des Göttinger Magnetischen Vereins durch Humboldt und Gauß im Jahr 1834 führte auch zur Entstehung neuer geomagnetischer Observatorien. In München errichtete Johann von Lamont (1805–1879) mit Zustimmung der Akademie und der finanziellen Unterstützung durch das Königshaus 1840 ein erdmagnetisches Observatorium auf dem Gelände der Sternwarte in München-Bogenhausen. Es befindet sich seit 1939 in Fürstenfeldbruck und zählt zu den wenigen Observatorien aus der Pionierzeit des Erdmagnetismus, die heute noch in Betrieb sind.

Literatur

- H. Balmer, Beiträge zur Geschichte der Erkenntnis des Erdmagnetismus, Aarau 1956.
- C. F. Gauß, Intensitas vis magneticae terrestres ad mensuram absolutam revocata. Sumtibus Dieterichianis, Göttingen 1833.
- C. F. Gauß und W. Weber, Resultate aus den Beobachtungen des Magnetischen Vereins im Jahre 1838, Leipzig 1839.
- C. F. Gauß und W. Weber, Atlas des Erdmagnetismus, Leipzig 1840.
- W. Kertz, Geschichte der Geophysik, hrsg. v. R. Kertz und K.-H. Glassmeier, Hildesheim/Zürich/New York 1999.

ABB. AUS: C. F. GAUSS UND W. WEBER, RESULTATE AUS DEN BEOBSACHTUNGEN DES MAGNETISCHEN VEREINS IM JAHRE 1838, LEIPZIG 1839

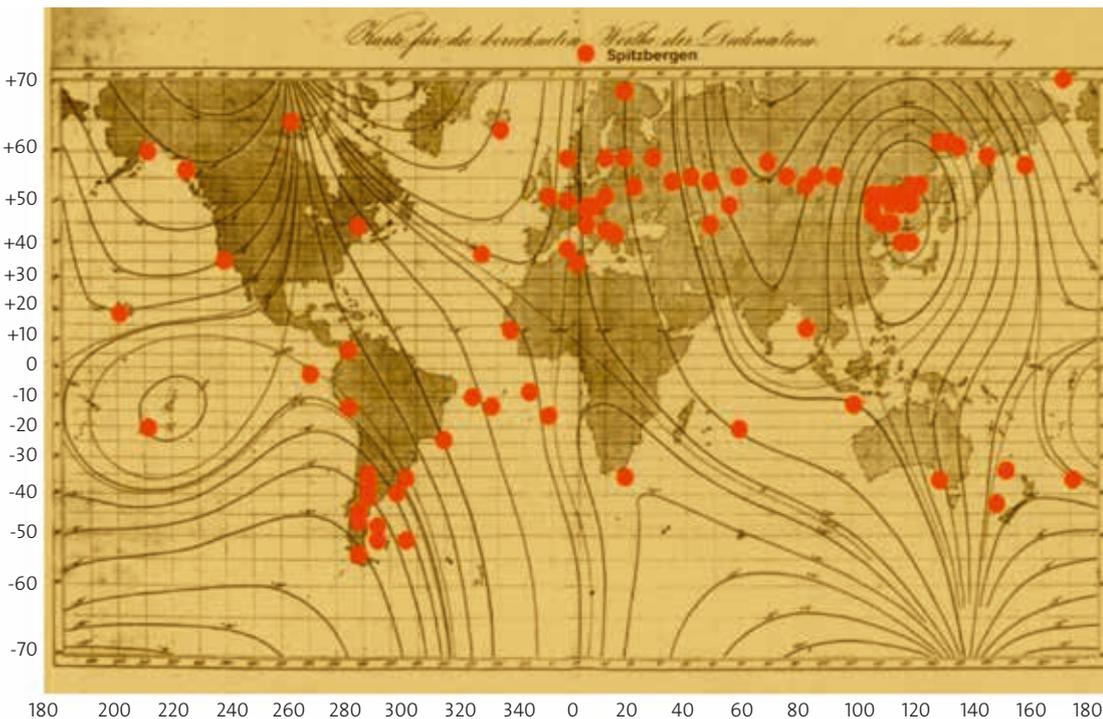


Abb. 4: Globale Verteilung der 93 Messpunkte der Analyse von Gauß von 1839 vor dem Hintergrund seiner Deklinationskarte. Man erkennt den Magnetpol im Norden Kanadas und den Pol südlich von Australien sowie die große Bedeutung der Daten aus Russland für diese Analyse.