

Einstein und der Kreiselkompass

Was brachte den Physiker 1915 dazu, sich von der Ausarbeitung seiner Allgemeinen Relativitätstheorie kurz abzuwenden, um den Magnetismus in einem Eisenstab zu untersuchen?

Von Peter Galison

Anfang 1915 begann für Einstein ein ereignisreiches Jahr, das zugleich einen entscheidenden Wendepunkt auf dem langen Weg seines wissenschaftlichen Lebens brachte. Mit Hilfe seines Freundes, des Mathematikers Marcel Grossmann, bemühte sich der Physiker, so viel wie möglich über eine neue Art von Geometrie zu lernen, die bis dahin unter seinesgleichen nahezu unbekannt war. Er hoffte, damit die Krümmung der Raumzeit beschreiben zu können. Viel stand für ihn auf dem Spiel, wie er bald erkannte: Ließ sich die Spezielle Relativitätstheorie zu einer Theorie der Gravitation verallgemeinern? Konnte der Newton'sche Kosmos, in dem die Schwerkraft mit dem Quadrat der Entfernung abnimmt, ersetzt werden durch eine Theorie, die auf der Äquivalenz von Masse und Energie beruht und in der Raum und Zeit gekrümmt sind? Im November 1915, nach dem härtesten intellektuellen Kampf seines Lebens, präsentierte Einstein schließlich die Allgemeine Relativitätstheorie – ein Triumph von Theorie, Verstand und Abstraktion.

Trotz aller Beanspruchung kehrte Einstein gerade in den ersten Monaten des Jahres immer wieder aus den abstrakten Gefilden von Tensoren und Koordinatentransformationen zur praktischen Arbeit ins Labor zurück. Sie beinhaltete so trivial erscheinende Dinge, wie Glasfasern an Spiegelchen zu kleben und Strompulse durch Elektromagneten zu schicken. Seinem besten Freund Michele Besso schrieb er hierzu am 12. Februar: »Die Versuche werden bald beendet sein. ... Ein wundervolles Experiment, schade, dass du's nicht siehst. Und wie heimtückisch die Natur ist, wenn man ihr experimentell beikommen will! Ich bekomme in meinen alten Tagen noch eine Leidenschaft für das Ex-

▲ Wie Eisen magnetisch wird: Ein Gedankenexperiment von Einstein und Wander Johannes de Haas verhalf zu einer ersten Erklärung. Man stelle sich auf einen Drehteller, in jeder Hand einen Kreisel. Vom Haltenden aus betrachtet sollen beide Kreisel im Uhrzeigersinn rotieren. Bei seitlich ausgestreckten Armen kompensieren sich die – dann gegensätzlich orientierten – Drehimpulse der beiden. Bei hochgereckten Armen und damit gleichgerichteten Drehimpulsen ergibt sich dagegen ein Wert ungleich null. Da aber der Drehimpuls des gesamten Systems erhalten bleiben muss, beginnt nun der Drehteller kompensatorisch zu rotieren. Gemäß der Einstein-de-Haas-Theorie, die später revidiert wurde, sollte ein Eisenstab aus demselben Grund rotieren, sobald die Elektronenbahnen aller seiner Atome schlagartig durch ein äußeres Magnetfeld ausgerichtet werden.

periment.« Zusammen mit Wander Johannes de Haas, Schwiegersohn des niederländischen Physikers und Nobelpreisträgers Jan Hendrik Lorentz, stellte sich Einstein damals einer Herausforderung, an der bereits einige der begabtesten Experimentatoren gescheitert waren – der Erklärung des Mechanismus, der für den Magnetismus von Eisen verantwortlich ist.

Die Grundidee war einfach. Durchläuft ein elektrischer Strom einen kreisförmigen Leiter, sei es eine Drahtschleife oder eine Spule, so erhält man einen Elektromagneten. Sollte magnetisches Eisen seine Fähigkeit zur Magnetisierung einem ähnlichen Phänomen verdanken, so wie es der französische Mathematiker und Physiker André-Marie Ampère und seine Nachfolger seit rund hundert Jahren behauptet hatten? Wenn auf atomarer oder molekularer Ebene – so Einstein – viele solcher elektrischen Kreisströme existierten, die alle räumlich gleich orientiert sind, dann gäbe es nur eine Art von Magnetismus:

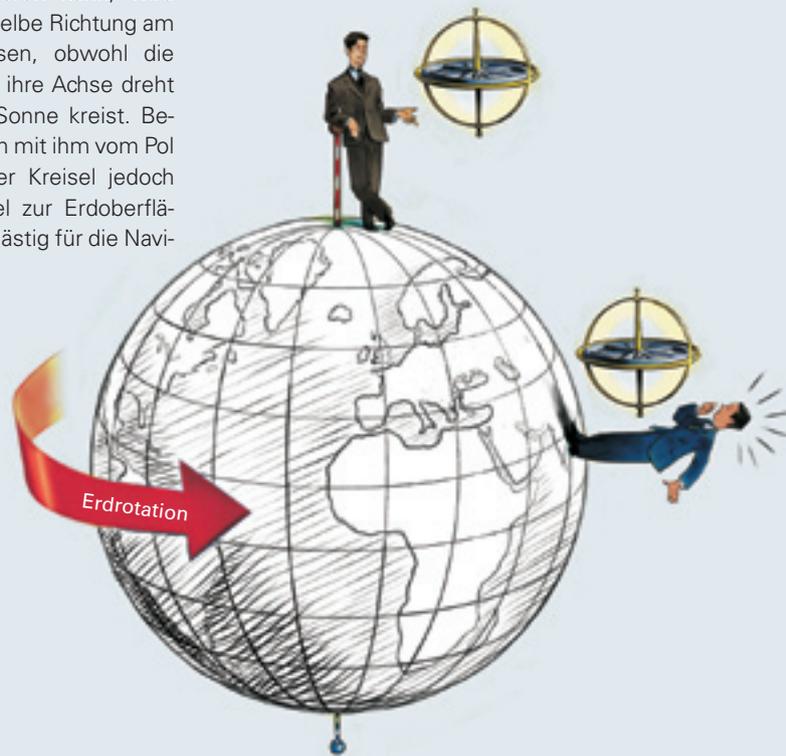
»Seitdem durch Oerstedt entdeckt worden war, dass magnetische Wirkungen nicht nur von permanenten Magneten, sondern auch von elektrischen Strömen ausgehen, gab es zwei voneinander scheinbar vollkommen unabhängige Erzeugungsweisen des magnetischen Feldes. Diese Sachlage brachte das Bedürfnis mit sich, die Wesensverschiedenheit dieser beiden felderzeugenden Ursachen als eine bloß scheinbare aufzufassen, zu versuchen, mit einer einzigen Ursache für die Erregung des Magnetfeldes auszukommen. So wurde Ampère, kurz nach Oersteds Entdeckung, zu seiner bekannten Hypothese von den Molekularströmen geführt, welche die magnetischen Eigenschaften (paramagnetischer und ferromagnetischer Substanzen) auf in den Molekülen gelagerte Ströme zurückzuführen gestattet.« (Experimenteller Nachweis der Ampère'schen Molekularströme, von A. Einstein und W.J. de Haas, Deutsche Physikalische Gesellschaft. Verhandlungen 1915, Bd. 17, S. 152)

Ein simples Gedankenexperiment

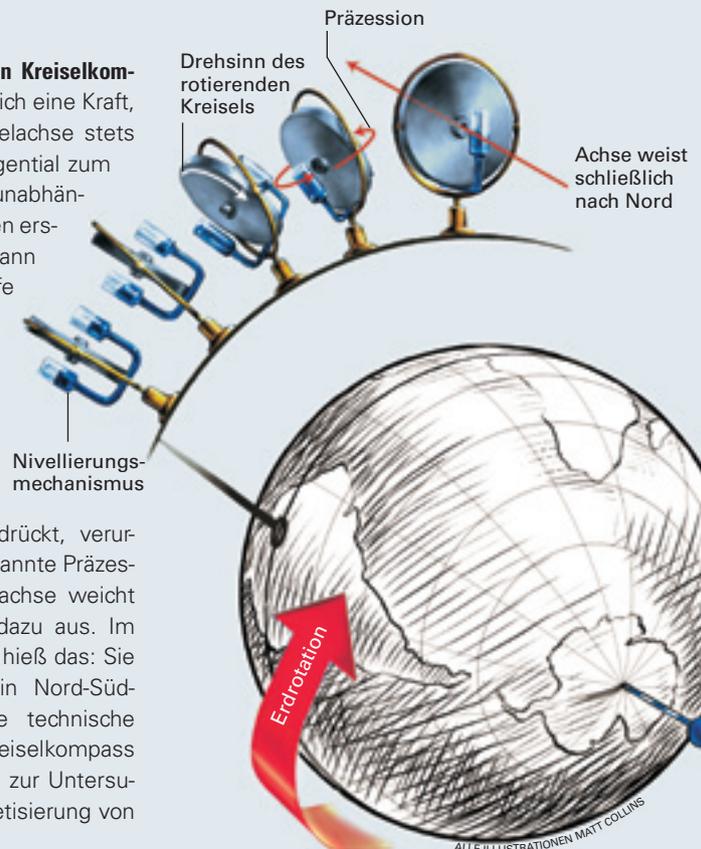
Das war Einstein in Reinkultur: zwei Ursachen auf eine zu reduzieren. Seine Veröffentlichung zur Speziellen Relativitätstheorie 1905 hatte er mit einer Kritik daran eingeleitet, wie die Elektrodynamik des englischen Physikers James Clerk Maxwell gegenwärtig aufgefasst werde. Demnach schien es fälschlich so, als gäbe es zwei Erklärungen für die Entstehung eines elektrischen Stroms, wenn eine Spule und ein Magnet sich einander näherten – je nachdem, welchen Körper man bewegte. Wurde der Magnet der ruhenden Spule genähert, so entstand in seiner Umgebung nach herkömmlicher ▷

Das Prinzip des Kreiselkompasses

Ein ideal aufgehängter rotierender Kreisel, der sich frei im Raum orientieren kann, wird immer in dieselbe Richtung am Himmel weisen, obwohl die Erde sich um ihre Achse dreht und um die Sonne kreist. Bewegt man sich mit ihm vom Pol weg, wird der Kreisel jedoch seinen Winkel zur Erdoberfläche ändern – lästig für die Navigation.



Auf einen richtigen Kreiselkompass wirkt zusätzlich eine Kraft, welche die Kreiselachse stets in die Ebene tangential zum Boden dreht, unabhängig vom Ort. In den ersten von Hermann Anschütz-Kaempfe entwickelten Versionen übte ein Gewicht die notwendige Kraft aus. Diese Gewichtskraft, welche die Achse in die Horizontale drückt, verursacht eine so genannte Präzession. Die Kreiselachse weicht dann senkrecht dazu aus. Im vorliegenden Fall hieß das: Sie orientierte sich in Nord-Süd-Richtung. Eigene technische Berichte zum Kreiselkompass brachten Einstein zur Untersuchung der Magnetisierung von Eisen.



ALLE ILLUSTRATIONEN MATT COLLINS

▷ Auffassung ein elektrisches Feld, das die elektrischen Teilchen im Leiter in Bewegung versetzte. War umgekehrt der Magnet der Ruhende, entstand der Strom in dem herangeführten Leiter nicht auf Grund eines elektrischen Felds, sondern infolge einer elektromotorischen Kraft; da sich die Ladungsträger mit dem Leiter bewegten, verschob das Magnetfeld sie darin. Einsteins Spezielle Relativitätstheorie erklärte beide Phänomene hingegen gleich – mit veränderten Begriffen von Raum, Zeit und Gleichzeitigkeit.

In seinem Äquivalenzprinzip von 1907 hatte Einstein zudem der Annahme widersprochen, es gäbe zwei Formen von Masse: die schwere Masse, die für das Gewicht eines Körpers verantwortlich ist, und die träge Masse, die bewirkt, dass er der Beschleunigung einen Widerstand entgegensetzt. Sein Argument für nur eine Form lautete modern ausgedrückt: Befindet sich eine geschlossene Kiste in einem gleichförmig beschleunigenden Raumschiff oder stationär in einem Schwerfeld, so verhält

sich ihr Inhalt gleich – er wird zu Boden gedrückt beziehungsweise gezogen. Nach dem Äquivalenzprinzip machen diese beiden scheinbar so unterschiedlichen Ursachen für das Verhalten der Masse keinen Unterschied.

Entsprechend glaubte Einstein auch fest daran, dass es nur eine Art von Magnetismus gibt und dass dieser auf die parallel ausgerichtete Orientierung kleinster Elektromagnete zurückzuführen sei – nämlich der Ringströme von Elektronen, die um den Atomkern kreisten. Die Frage war nur: Wie könnte man diese Idee überprüfen?

Stellen Sie sich Folgendes vor. Sie stehen mit ausgebreiteten Armen auf einem Drehteller, in jeder Hand einen Kreisel mit der Achse nach außen, der sich von Ihnen aus gesehen im Uhrzeigersinn dreht (siehe Abbildung S. 2). Die Drehimpulse dieser beiden Kreisel sind dann entgegengesetzt und heben sich auf. Nun recken Sie Ihre Arme über den Kopf, sodass die Kreiselachsen in die Vertikale kommen. Da beide Drehimpulse jetzt dieselbe Orientierung besitzen, addieren sie sich zu einem Wert ungleich null. Bekanntlich muss aber der Drehimpuls in einem geschlossenen System erhalten bleiben. Daher wird Ihr Drehteller mit Ihnen in einer Weise zu rotieren beginnen, die den Drehimpuls der beiden Kreisel kompensiert.

Auf das Innere eines Eisenstabs übertragen, ergab sich die Grundidee für das Experiment. Man hänge einen unmagnetischen Eisenzylinder an einem dünnen, flexiblen Faden auf. Dann erzeuge man plötzlich ein äußeres Magnetfeld, das stark genug ist, die kleinen Elektronenbahnen im Innern gleich auszurichten und damit den Zylinder zu magnetisieren. Wenn Einstein Recht hatte, so sollte die Mehrzahl der zuvor zufällig orientierten Elektronenbahnen nun gleichgerichtete Achsen haben. Ihre Drehimpulse würden sich schlagartig addieren und nicht gegenseitig aufheben. Somit müsste sich der magnetisierte Zylinder, ähnlich wie der Drehteller, zu drehen beginnen (siehe Kasten links).

Fasziniert vom Magnetismus

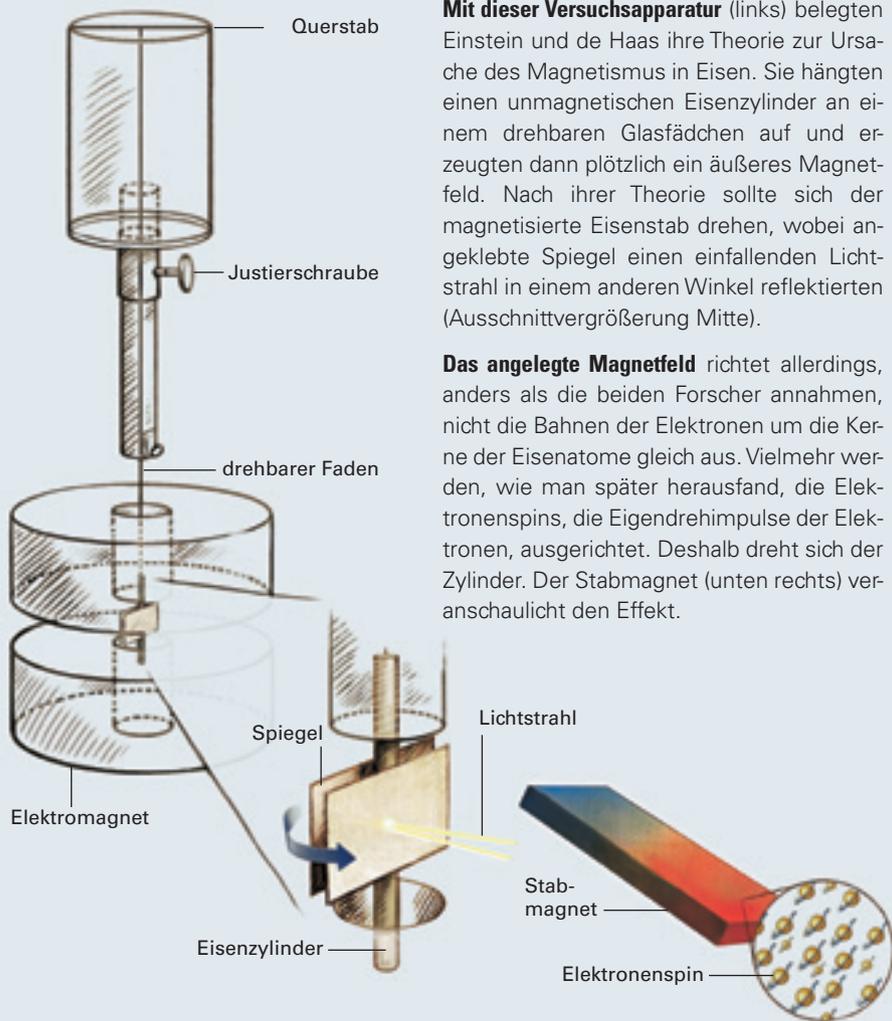
Einstein und de Haas bastelten an der diffizilen Apparatur, bis sie ihr schließlich Ergebnisse zu entlocken vermochten. Aber woher kam das Konzept und warum befasste er sich ausgerechnet 1915 damit, einem Jahr geprägt vom Ersten Weltkrieg und dem eigenen Kampf mit der Allgemeinen Relativitätstheorie?

Eine Antwort bietet die Zeit nach Einsteins Diplom am Züricher Polytechnikum im Jahre 1900. Damals konnte er keine dauerhafte Anstellung finden. Ablehnungsbriefe stapelten sich bei ihm bis Mitte 1902, als er endlich

Was Eisen magnetisch macht

Mit dieser Versuchsanordnung (links) belegten Einstein und de Haas ihre Theorie zur Ursache des Magnetismus in Eisen. Sie hängten einen unmagnetischen Eisenzylinder an einem drehbaren Glasfädchen auf und erzeugten dann plötzlich ein äußeres Magnetfeld. Nach ihrer Theorie sollte sich der magnetisierte Eisenstab drehen, wobei angeklebte Spiegel einen einfallenden Lichtstrahl in einem anderen Winkel reflektierten (Ausschnittvergrößerung Mitte).

Das angelegte Magnetfeld richtet allerdings, anders als die beiden Forscher annahmen, nicht die Bahnen der Elektronen um die Kerne der Eisenatome gleich aus. Vielmehr werden, wie man später herausfand, die Elektronenspins, die Eigendrehimpulse der Elektronen, ausgerichtet. Deshalb dreht sich der Zylinder. Der Stabmagnet (unten rechts) veranschaulicht den Effekt.



ein hoffnungsvolles Angebot vom Berner Patentamt erhielt. Im Gegensatz zu den schlechten Erfahrungen seiner Schulzeit fand er in dem Leiter des Patentamts Friedrich Haller einen bewundernswerten Lehrer. Einstein bevorzugte Hallers Devise, stets kritisch und wachsam zu bleiben und die Anträge der Erfinder mit Skepsis zu betrachten.

Einstein mochte Maschinen, wie seine Korrespondenz mit anderen Enthusiasten belegt. Er baute sogar einige neue in seiner Wohnung. Im Lauf der Jahre meldete er Patente für Kühlschränke an, erfand neue elektrische Messgeräte und beriet Freunde bei der Entwicklung von Maschinen. Schon sein Vater und sein Onkel hatten eigene Erfindungen patentieren lassen und elektrotechnische Betriebe besessen. Leider wurden nahezu alle Patentprüfungen Einsteins nach der gesetzlichen Aufbewahrungspflicht vernichtet. Die wenigen erhaltenen fanden sich vorwiegend in Gerichtsakten. Der Physiker war nämlich bald eine der geachteten technischen Autoritäten im Patentamt und damit auch ein gefragter Sachverständigen-Gutachter geworden.

Hierin liegt auch der Schlüssel für die Faszination, die der Magnetismus von Eisen auf ihn ausübte. Im frühen 20. Jahrhundert gab es zunehmend Schwierigkeiten mit dem altbewährten Kompass. Er arbeitete unzuverlässig auf Schiffen, die aus Metall erbaut und elektrifiziert waren, und funktionierte schlecht in U-Booten und in den Polargebieten. Problematisch war er auch in Flugzeugen, weil die Nadel bei Kurven vor- oder nachgingen.

Zwei Firmen nahmen sich damals des Problems an. Die eine leitete der amerikanische Erfinder und Industrielle Elmer A. Sperry, die andere sein Erzrivale auf deutscher Seite, Hermann Hubertus Maria Anschütz-Kaempfe. Die Lösung bestand darin, elektrisch angetriebene Kreisel als Kompass zu verwenden. Anschütz-Kaempfe konstruierte das Gehäuse geschickt so, dass das Präzessieren – das langsame Trudeln der Kreiselachse – diese nach Norden ausrichtete (siehe Grafik S. 3 unten). Kurz darauf baute Sperry ein ähnliches Instrument, woraufhin Anschütz-Kaempfe ihn wegen Patentverletzung verklagte. Sperry entgegnete mit dem üblichen Argument, er habe lediglich eine alte, bereits vorher existierende Idee weiter verfolgt.

Mitte 1915 hörte man Einstein als Gutachter in dieser Angelegenheit. Seine Ausführungen zeigten für das Gericht zufrieden stellend, dass die früheren, kardanisch aufgehängten Kreisel vermutlich nicht als Kompass getaugt hätten. Sie waren so konstruiert, dass sie sich in ihrem Gehäuse nur in einem sehr engen Bereich bewegen konnten. Wenn ein

Schiff geringfügig stampfte oder rollte, waren sie als Kompass bereits nutzlos. Anschütz-Kaempfe gewann den Prozess. Einstein entwickelte so viel Sachverstand für die Technik von Kreiselkompassen, dass er noch über Jahrzehnte hinweg Honorare für seine Arbeiten auf diesem Gebiet erhielt.

Nur ein Theoretiker glaubt an seine Theorie

Im Bereich der Physik waren seine Meriten allerdings erheblich größer. An Professor Emile Meyerson in Paris schrieb er am 27. Januar 1930: »Zum Nachweis der Kreiselnatur der paramagnetischen Atome wurde ich z. B. angeregt durch ein Gutachten, das ich über einen Kreiselkompass auszuarbeiten hatte.« Ebenso wie die Erdrotation einen Kreiselkompass ausrichtet, so erkannte Einstein, ließ sich ein Eisenzylinder zum Rotieren bringen, indem man all die kleinen atomaren Kreisel im Innern ausrichtete. Das Experiment wurde ein großartiger Erfolg. Einstein und de Haas machten damit einen Effekt sichtbar, der so klein war, dass selbst der große Experimentator und Theoretiker Maxwell ihn nicht nachzuweisen vermocht hatte.

Aber die Geschichte hatte einen Haken. Die beiden Physiker fanden zwar eine gute Übereinstimmung zwischen der Theorie des durch umlaufende Elektronen erzeugten Ferromagnetismus und ihren experimentellen Ergebnissen. Leider wurde ihr Ergebnis bald angegriffen – zunächst verhalten, doch bald mit wachsender Bestimmtheit. Ihr Wert für den Magnetismus pro Einheit des Drehimpulses schien um den Faktor zwei falsch. Diese Differenz konnte lange niemand überzeugend erklären. Hierzu bedurfte es erst der Quantenmechanik und des Konzepts des Elektronenspins.

Offenbar ebnete die Festlegung auf ein spezielles theoretisches Modell Einstein in zweierlei Hinsicht den Weg. Es machte ihn sicher, wie das Experiment anzulegen und auszuführen sei, insbesondere, wo er nach dem Effekt forschen musste. Maxwell und andere, die zuvor vergebens danach gesucht hatten, fehlte eine Vorstellung über die winzige Größenordnung des zu erwartenden Phänomens. Zudem machte das gewählte Modell es Einstein leicht, trotz mehrerer Störeffekte wie dem Erdmagnetfeld oder den Tücken der anfälligen Apparatur ein experimentelles Ergebnis zu akzeptieren, wenn es mit seinen theoretischen Berechnungen übereinstimmte.

Die ganze Geschichte erinnert mich an einen der vielen wunderbaren Aussprüche Einsteins: »Nur ein Theoretiker glaubt an seine Theorie; jeder schenkt einem Ergebnis aus dem Laboratorium Vertrauen, bis auf den Experimentator selbst.« ◀



Peter Galison

ist Mallinckrodt-Professor für Geschichte der Wissenschaften und für Physik an der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts).

Unter anderem erhielt er den Max-Planck-Preis 1999.

How experiments end. Von P. Galison, University of Chicago Press 1987