

HEINZ BITTEL

VON NATÜRLICHEN
UND
KÜNSTLICHEN MAGNETEN

DIE BEDEUTUNG
ATOMARER ORDNUNGSZUSTÄNDE
FÜR DEN MAGNETISMUS

SCHRIFTEN DER GESELLSCHAFT
ZUR FÖRDERUNG DER WESTFÄLISCHEN
WILHELMS-UNIVERSITÄT ZU MÜNSTER
HEFT 55

B

VON NATÜRLICHEN
UND
KÜNSTLICHEN MAGNETEN

DIE BEDEUTUNG
ATOMARER ORDNUNGSZUSTÄNDE
FÜR DEN MAGNETISMUS

VON

HEINZ BITTEL



VERLAG ASCHENDORFF
MÜNSTER WESTF. 1964

5753, K

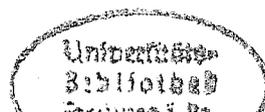
1964 T 925

*Rede bei der
feierlichen Übernahme des Rektorates
am 15. November 1963*

© Aschendorff, Münster Westfalen, 1964 · Printed in Germany

Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdrucks,
der fotomechanischen und tontechnischen Wiedergabe
und die der Übersetzung, vorbehalten.

Aschendorffsche Buchdruckerei, Münster Westf., 1964



Meinem verehrten Lehrer
WALTHER GERLACH
zum 1. 8. 1964

„Magnetismus“ galt früher als etwas Merkwürdiges, ja Geheimnisvolles. Zeigt sich doch hier eine Kraftwirkung zwischen zwei Körpern, ohne daß zwischen diesen Körpern ein unmittelbar wahrnehmbarer Zusammenhang besteht. So zieht z. B. ein Magnet ein Stück Eisen — etwa ein kleines Eisenstäbchen — an. Diese Eigenschaft des Magneten beschreibt der Physiker durch ein magnetisches Feld, ein Feld, das dem Raum in der Umgebung des Magneten eigen ist, und man sagt dann, das Stäbchen erfährt im Magnetfeld eine Kraftwirkung.

Es zeigt sich aber etwas ganz anderes Merkwürdiges, das man lange nicht erklären konnte: Man beobachtet nämlich, daß Eisen, das in ein Feld gebracht wird, selbst zum Magneten wird, also auch magnetisch bleibt, wenn das Feld aufgehört hat zu wirken. Man spricht dann von „permanentem Magnetismus“. Das kleine Stäbchen, das wir beispielsweise betrachten wollen, kann also kurzzeitig einem Feld ausgesetzt und dadurch so magnetisiert werden, daß es an seinem oberen Ende einen magnetischen N-Pol, an seinem unteren Ende dagegen einen S-Pol besitzt. Dieser Zustand bleibt bestehen, bis durch die Wirkung eines starken, entgegengesetzt gerichteten Feldes die umgekehrte Magnetisierung erzwungen wird, d. h. die entgegengesetzte Polbelegung „eingeschrieben“ wird. In einem Körper kann auf diese Weise eine Information — Nord oder Süd; plus oder minus; ja oder nein; 0 oder 1 — gespeichert werden. Solche magnetischen Speicherzellen finden in den datenverarbeitenden Maschinen, den sogenannten Elektronenrechnern, Verwendung. Selbstverständlich bedarf es

dabei einer außerordentlich großen Anzahl von magnetisierbaren Körpern (z. B. einige 10^5), um in großem Umfang Zahlen und Worte zu speichern. In einer etwas abgewandelten Form beruht auch das Tonband auf dieser Abhängigkeit des magnetischen Zustandes von der vorausgehenden Behandlung, oder wie man auch sagt, von der „magnetischen Vorgeschichte“. Unter Verwendung geeigneter Hilfsmittel kann diese Vorgeschichte zu einer beliebigen Zeit wieder „abgelesen“ werden.

Zunächst kannte man nur wenige Stoffe, die magnetisch sind oder magnetisch gemacht werden können: Der Magneteisenstein (Magnetit) als in der Natur vorkommender „natürlicher Magnet“ sowie die Metalle Fe, Ni, Co und einige ihrer Legierungen. In den letzten Jahrzehnten sind hierzu noch eine Reihe weiterer Substanzen getreten, nicht zuletzt als Folge der verschiedenartigen Anforderungen der Technik.

Man beobachtet nun, daß der starke Magnetismus, von dem hier die Rede ist, nur dann auftritt, wenn eine gewisse Temperatur, die sogenannte Curietemperatur, nicht überschritten wird. Die besonderen magnetischen Eigenschaften des Eisens, die ich versucht habe zu skizzieren, sind zwar bei Zimmertemperatur — und auch bei tieferen sowie bei höheren Temperaturen — zu beobachten. Untersucht man dagegen das Eisen bei einer Temperatur oberhalb von 770°C , so stellt man fest, daß es nur noch ganz wenig magnetisierbar ist und daß es keinen permanenten Magnetismus mehr zeigt. Nur unterhalb der Curietemperatur, einer für jeden der erwähnten Stoffe charakteristischen Temperatur, tritt ein besonderer Zustand auf, der die Vorbedingung ist

für all das, was wir an einem Magneten beobachten können.

Man wird dabei fragen, durch welche Besonderheiten in der Struktur der Materie dieser Zustand bestimmt wird. Wir sind ja heute gewohnt, die Materie durch ihren Aufbau aus Atomen und Molekülen sowie durch die räumliche Anordnung dieser Bausteine — d. h. durch die atomare Struktur — zu beschreiben und die makroskopischen Eigenschaften der Stoffe aus dieser Struktur zu verstehen. Hierbei zeigt sich nun, daß der besondere Zustand, von dem hier die Rede ist, ein „magnetischer Ordnungszustand“ ist. Bei Eisen, Nickel, Kobalt und ihren Legierungen spricht man vom „Ferromagnetismus“ oder auch vom „ferromagnetischen Zustand“, weil das Eisen der Hauptvertreter der Stoffe ist, die einen starken Magnetismus zeigen.

1.

Nachdem ich einige Besonderheiten in den magnetischen Erscheinungen aufgezählt und damit einiges Wesentliche in Erinnerung gebracht habe, kann ich mich jetzt dem eigentlichen Thema dieses Vortrages zuwenden. Gestatten Sie mir dabei, mit einer Bemerkung zu beginnen, die sich auf den heutigen Tag bezieht:

Es ist üblich, daß der Rektor aus Anlaß dieser Feierstunde einen wissenschaftlichen Vortrag aus seinem Fachgebiet hält. „Dabei sollte“ — und ich darf hier meinen verehrten Lehrer Walther Gerlach zitieren — „ein Naturwissenschaftler nicht durch Darlegungen neuester Entdeckungen ein Staunen des fachfremden Zuhörers hervorlocken, vielmehr sollte er sich mühen,

einige allgemeine Prinzipien seines Wissensbereiches dem nahezubringen, der nicht in ihm tätig ist, orientiert an dem, was er mit Stolz die Frucht seiner Arbeit nennt: an Tatsachen.“ Ein Beispiel für ein solches allgemeines Prinzip ist das Auftreten von geordneten Zuständen der Materie, und es ist recht reizvoll zu überlegen, inwieweit sich solche Ordnungszustände in den verschiedenen Bereichen der reinen und angewandten Physik auswirken. Kennzeichnend für die Physik — vor allem auch für die moderne Physik — sind die vielfältigen Zusammenhänge zwischen Erscheinungen und Vorgängen, die bei einem ersten Zusehen nichts miteinander zu tun haben. So kennt man —⁹um ein Beispiel aus der Festkörperphysik zu nennen — heute Wechselwirkungen zwischen Schallwellen und elektrischen Wellen, also zwischen Erscheinungen der Mechanik und Erscheinungen der Elektrizität. Ein solcher Zusammenhang ergibt sich aus der atomaren Struktur der Materie: Es sind nämlich dieselben Atome, die das mechanische und das elektrische Verhalten bestimmen.

Oftmals ist es deshalb auch gar nicht möglich, ein Teilgebiet ohne die übergreifenden Zusammenhänge zu anderen Gebieten zu verstehen, eine Erfordernis, die der auseinanderstrebenden Tendenz des Spezialistentums entgegenwirkt. Ich möchte meinen, daß sich gerade hier der Hochschullehrer — im Gegensatz zum Physiker eines Forschungsinstituts oder eines Industrielaboratoriums — in einer besonders glücklichen Lage befindet: Ist er doch genötigt, bei seinen Vorlesungen sich immer wieder intensiv mit den verschiedenen Teilgebieten der Physik zu befassen und sich mit den Problemen auseinanderzusetzen.

2.

Beim Magnetismus weiß man schon sehr lange, daß er aufs engste mit der Elektrizität verknüpft ist. Die klassische Elektrodynamik, so wie sie von FARADAY und MAXWELL um die Mitte des vergangenen Jahrhunderts entwickelt wurde, ist ja geradezu gekennzeichnet durch eine enge Verknüpfung zwischen elektrischen und magnetischen Größen, eine Verknüpfung, die die Voraussetzung ist für das Auftreten elektromagnetischer Wellen, wie sie uns als Licht oder auch als Radiowellen begegnen.

Die magnetische Wirkung des elektrischen Stromes, nämlich sein Einfluß auf eine Kompaßnadel, wurde von OERSTED gefunden und im Juli 1820 der wissenschaftlichen Welt zur Kenntnis gebracht. Diese Entdeckung war möglich, nachdem man aufgrund der Arbeiten von GALVANI und VOLTA in die Lage versetzt worden war, starke elektrische Ströme herzustellen. Es ist das Verdienst von AMPÈRE, der mit seinen Untersuchungen unmittelbar an OERSTED anschließt, den Begriff des „elektrischen Stromes“ (*courant électrique*) eingeführt zu haben. Es handelt sich also um etwas Fließendes, so wie beim Strömen einer Flüssigkeit. Heute wissen wir, daß das, was bei einem elektrischen Strom in einem Metall (also z. B. in einem Kupferdraht) fließt, elektrisch geladene Teilchen, nämlich Elektronen, sind. Die Elektrizität wird von Teilchen transportiert, die wägbare sind, also eine Masse besitzen.

AMPÈRE stellte auch fest, daß die Wirkung eines Magneten durch einen kreisförmig fließenden elektrischen Strom oder auch durch eine stromdurchflossene Spule ersetzt werden kann. Die Spule wirkt nach außen wie

ein Magnet, sie zeigt — wie wir heute sagen — dasselbe Feld wie ein Magnet. Damit war es möglich geworden, ohne Zuhilfenahme der „natürlichen Magnete“ magnetische Felder — und zwar viel stärkere Felder als zuvor — zu erzeugen. In einem bekannten Physiklehrbuch [JOH. MÜLLER: Grundriß der Physik und Meteorologie; Braunschweig 1866] aus der Mitte des letzten Jahrhunderts lesen wir: „Man findet im Schoße der Erde gewisse Eisenerze, die man Magneteisensteine nennt und welche öfters die Eigenschaft haben, Eisen anzuziehen, in welchem Falle sie den Namen ‚natürliche Magnete‘ führen“. Ihre Fähigkeit kann dem Eisen mitgeteilt werden, dadurch, daß man es in ihre Nähe bringt oder mit ihnen streicht.

Es erhebt sich die Frage, woher die Mineralien, die wir heute als natürliche Magnete finden, ihren Magnetismus haben. Wie vorhin bereits erwähnt wurde, entsteht der permanente Magnetismus durch die Einwirkung eines magnetischen Feldes. Ein solches Feld ist aber überall auf der Erde vorhanden, es bewirkt u. a. die Ausrichtung der Kompaßnadel. Dieses verhältnismäßig schwache Feld konnte die Gesteine während des Abkühlungsprozesses in früheren geologischen Zeiträumen oder auch noch heute bei Erstarrung vulkanischer Gesteine stark magnetisieren. Im Sinne der vorhin erwähnten Informationsspeicher ist deshalb in den natürlichen Magneten das Erdfeld „eingeschrieben“. So kann etwa die Richtung des erdmagnetischen Feldes (Deklination und Inklination), wie es vor vielen Jahrtausenden oder auch Jahr-millionsen vorhanden war, aus dem Magnetismus von Mineralien, deren Alter bekannt ist, bestimmt werden. Man muß sich immer wieder folgendes vor Augen

führen: Bis zur Zeit von AMPÈRE mußten alle Magnete, vor allem die Kompaßnadeln für die Schifffahrt durch Bestreichen mit natürlichen Magneten hergestellt werden. Sie waren, um in der Ausdrucksweise des Gärtners zu sprechen, „Ableger der natürlichen Magnete“. Häufig wurde auch der Magneteisenstein selbst benutzt, so wie wir dies noch heute in der schönen Sammlung historischer physikalischer Apparate in Florenz sehen können, Apparate, die zum Teil auf GALILEI zurückgehen. Der in der Natur vorkommende Magnet, der lithos magnetes, d. h. der Stein aus Magnesia in Kleinasien, hat dem Magnetismus auch den Namen gegeben.

Aufgrund seiner Feststellungen über die magnetische Wirkung elektrischer Ströme führte AMPÈRE (1825) ganz allgemein den Magnetismus auf elektrische Erscheinungen zurück. Er übertrug in genialer und wie sich zeigen sollte, sehr fruchtbarer Weise die Erkenntnis von der Wirkung eines Kreisstromes auf den Magnetismus des Eisens. Er prägte die — im Grunde genommen heute noch gültige — Vorstellung von „Molekularströmen“, d. h. von Kreisströmen, die im Bereich jedes einzelnen Bausteins der Materie fließen und deren Zusammenwirken unter geeigneten Bedingungen eine magnetische Wirkung in der Umgebung hervorbringt.

3.

Diese Molekularströme sehen wir heute im Licht der Atomtheorie etwa folgendermaßen:

1. Es handelt sich um elektrische Ströme, die im Bereich der Atome unaufhörlich fließen und damit jedes einzelne Atom zum Magneten machen. Ein derartiges

unaufhörliches Fließen, ohne daß es dabei einer Stromquelle bedarf, bleibt auf dem Boden der klassischen Physik freilich unverständlich.

2. Diese atomaren Ströme sind nicht in beliebiger Stärke möglich. Sie sind den Gesetzen der Quantenphysik unterworfen und damit gibt es auch ein Quantum des Magnetismus, das sogenannte „Magonon“. Das einzelne Atom stellt daher einen kleinen Magneten dar, dessen Stärke nur ein einfaches Vielfaches dieser Einheit betragen kann. Diese Tatsache ist von einer weittragenden praktischen Bedeutung: Da die Anzahl der Atome in der Volumeneinheit bei allen Körpern im festen Aggregatzustand — also etwa bei den ferromagnetischen Metallen — von derselben Größenordnung ist, liefert diese Quantenbedingung eine obere Grenze für den Magnetismus der magnetischen Werkstoffe. Damit ist aber auch die magnetische Feldstärke begrenzt, die sich mit einem üblichen Elektromagneten erzeugen läßt. Diese Feldstärke bestimmt aber, um ein besonders auffälliges Beispiel anzuführen, den Durchmesser von Teilchenbeschleunigern, wie sie zur kernphysikalischen Forschung Verwendung finden. Wenn das große Synchrotron bei CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) in Genf einen Durchmesser von etwa 200 m aufweist, so wird diese äußerst unbequeme Abmessung eines physikalischen Apparates letztlich durch die erwähnte Quantenbedingung für den Magnetismus bestimmt und es wäre sinnlos, in mühevoller Kleinarbeit nach Substanzen zu suchen, die mehr leisten, da es sich hierbei um ein allgemein gültiges physikalisches Prinzip handelt.
3. Nachdem wir wissen, daß ein elektrischer Strom die

Bewegung von etwas Wägbarem ist, stellt ein Kreisstrom von der Mechanik her gesehen einen Kreisel dar. Der Richtung vom S-Pol zum N-Pol des kleinen Magneten, der sogenannten magnetischen Achse, ist eine mechanische Drehachse zugeordnet. Es muß also einen Zusammenhang zwischen Magnetismus und Mechanik geben, so wie er sich in den sogenannten kreiselmagnetischen Effekten offenbart. So wird, wie tatsächlich festgestellt werden kann, ein in sehr rasche Umdrehung versetztes Stück Eisen durch diese mechanische Einwirkung magnetisiert. Umgekehrt wird auch, wie EINSTEIN und DE HAAS (1915) fanden, ein solcher Körper beim Magnetisieren in Umdrehung versetzt. In beiden Fällen handelt es sich um außerordentlich schwache Effekte, die nur mit erheblichem Aufwand und unter sorgfältigster Beachtung aller störenden Einflüsse nachweisbar sind.

Die Kreiseigenschaften des Magnetismus sind auch die Ursache für magnetische Resonanzerscheinungen im Bereich sehr hoher Frequenzen. Solche Effekte ermöglichen es umgekehrt, Aussagen über magnetische Strukturen der Materie zu gewinnen, etwa darüber, ob der atomare Kreisstrom durch den Umlauf eines Elektrons oder durch seine Eigenrotation (seinen Spin) gebildet wird. Umfangreiche Apparaturen für magnetische Resonanzexperimente gehören daher heutzutage zum Werkzeug physikalischer und auch chemischer Forschung.

Die kreiselmagnetischen Erscheinungen geben uns aber auch Auskunft über eine andere Frage: Wie rasch kann die Magnetisierung eines Körpers verändert werden, also etwa das erwähnte kleine Stäbchen seine Pole

vertauschen? Die mechanische Trägheit des Kreisels liefert hierfür eine Grenze von etwa 10^{-9} sec. Diese Zeit läßt sich aufgrund der prinzipiellen Zusammenhänge nicht unterschreiten, sie wird tatsächlich erreicht, wenn alle anderen hemmenden Ursachen eliminiert werden. Von praktischer Bedeutung ist diese Umagnetisierungszeit für unsere Rechenanlagen: Gibt sie doch an, wie schnell die Speicherzellen — manche sagen auch das „Gedächtnis“ — abgelesen werden können.

4.

Ein makroskopischer Körper — also etwa ein Eisenstab — kann nur dann einen starken Magnetismus besitzen, wenn jedes Atom des betreffenden Stoffes ein kleiner Magnet ist und wenn sich außerdem alle diese atomaren Magnetchen parallel ausrichten, d. h. ihre N-Pole alle nach derselben Richtung weisen. Sie tragen dann nämlich als Anteile zu einer starken magnetischen Gesamtwirkung bei.

Ohne Ausrichtung liefert zwar jedes einzelne Atom eine magnetische Wirkung, also etwa eine magnetische Kraft; diese Kräfte wirken aber dann in den verschiedensten Richtungen, so daß sie sich insgesamt aufheben. Es ist dies so ähnlich wie bei dem bekannten, sprichwörtlichen Strick, wo es auch vorkommen soll, daß an *beiden* Enden gezogen wird und man sich dann wundert, wenn die Gesamtwirkung praktisch null ist.

Eine Ausrichtung ist — abgesehen von extremen Verhältnissen — nur dann zu erreichen, wenn ein magnetischer Ordnungszustand vorliegt. Es ist das Verdienst

VON PIERRE WEISS, bereits im Jahre 1907 einen solchen Zustand, zunächst hypothetisch, zur Deutung des Ferromagnetismus herangezogen zu haben. Danach sind die atomaren magnetischen Achsen in großen Bereichen des Körpers auch dann parallel ausgerichtet, wenn kein äußeres Magnetfeld wirksam ist. Ein relativ schwaches Feld ist in diesem Fall nämlich in der Lage, einen starken Magnetismus des ganzen Körpers hervorzurufen. Das Feld muß den Magnetismus nämlich nicht erst „erzeugen“. Es macht den in den WEISS'schen Bereichen vorhandenen Magnetismus lediglich nach außen wirksam. Auch ist es in diesem Falle möglich, daß permanenter Magnetismus auftritt. Einen Magneten kann es also nur im Zusammenhang mit einem magnetischen Ordnungszustand geben.

Die Existenz des ferromagnetischen Ordnungszustandes kann heute als gesichert gelten. Er äußert sich auch in anderen, nicht magnetischen Erscheinungen und kann damit festgestellt werden. Er existiert nur unterhalb der Curietemperatur, bei höheren Temperaturen liegt ein magnetisch ungeordneter Zustand vor. Dieser Übergang vom Ungeordneten zum Geordneten bei Erniedrigung der Temperatur ist ein allgemeines Prinzip, das sich auch bei der Kondensation eines Gases wiederfindet.

Ein Stoff kann bekanntlich drei Aggregatzustände zeigen: Bei hohen Temperaturen ist er gasförmig, bei mittleren flüssig und bei tiefen Temperaturen befindet er sich im festen, kristallinen Zustand. So begegnet uns z. B. das Wasser als Dampf, als Flüssigkeit oder auch als Eis. Beim Gas sind die einzelnen Teilchen, die Molekeln, in immerwährender Bewegung. Jedes Teilchen kann sich an irgendeiner Stelle des Gefäßes, in dem das Gas ein-

geschlossen ist, befinden; es handelt sich um einen Zustand hoher Unordnung. Im Gegensatz hierzu liegt im kristallinen Zustand eine sehr regelmäßige Anordnung der Atome vor, wie wir sie — seit v. LAUE (1912) — aufgrund der Röntgenstrukturuntersuchung aufs genaueste kennen. Die Idee einer solchen Regelmäßigkeit findet sich übrigens bereits bei JOHANNES KEPLER in seiner Schrift „De Nive Sexangula“ (vom sechseckigen Schnee) aus dem Jahre 1611.

5.

Die regelmäßige Anordnung der Atome im Kristall können wir als *Ordnung der Lage* bezeichnen: Jedes Atom befindet sich an seinem Platz und weist ganz regelmäßige Abstände zu seinen Nachbarn auf. Sofern die Atome aber kleine Magnetchen sind, können wir außerdem von *Unordnung* oder auch *Ordnung der Richtung* sprechen. Die Atome können insbesondere mit ihren magnetischen Achsen parallel zueinander liegen. Wir haben es dann mit dem bereits erwähnten magnetischen Ordnungszustand zu tun. Gestatten Sie mir, dies an einem anschaulichen Beispiel klarzumachen: Wenn in einer Bibliothek alle Bücher in den Regalen stehen und jedes Buch den dafür vorgesehenen Platz einnimmt, dann ist dies eine Ordnung der Lage. Dabei braucht aber eine Ordnung der Richtung noch keineswegs gewährleistet sein, da es bei Büchern ja eine Achse, ein Oben und Unten gibt. Die Ordnung der Richtung ist erst dann gegeben, wenn alle Bücher so eingeordnet sind, daß der Kopf der Seiten nach oben weist, so wie wir dies bei einer Bibliothek erwarten.

Die Parallelrichtung der atomaren magnetischen Achsen ist die Ursache für den starken Magnetismus, wie er vor allem bei Eisen und seinen Legierungen auftritt. Man spricht daher hier vom „ferromagnetischen Ordnungszustand“. Diese Ordnung kommt erst durch das Zusammenwirken einer Vielzahl von Atomen zustande. Der Ferromagnetismus ist eine typische Festkörpereigenschaft: Er kommt nicht dem einzelnen Atom zu, sondern ist an den festen, kristallinen Zustand gebunden. Die parallele Ausrichtung wird, wie unabhängig voneinander FRENKEL und HEISENBERG (1928) gezeigt haben, durch quantenmechanische Austauschkräfte bewirkt; sie ist aufgrund der klassischen Physik nicht zu verstehen und sie kann damit auch nicht anschaulich klargemacht werden.

Zunächst war der ferromagnetische Zustand der einzige magnetische Ordnungszustand, der bekannt war; über die magnetische Struktur nichtmetallischer Stoffe, insbesondere der Oxyde, bestand keine klare Vorstellung. Sie wurde erst nach dem Zweiten Weltkrieg aufgeklärt [NÉEL (1948)]. Dies ist insofern bemerkenswert, als der am längsten bekannte Magnet — nämlich der Magnet-eisenstein mit seinem „natürlichen Magnetismus“ — gerade zu dieser Stoffklasse gehört.

Wir müssen uns hier fragen: Ist die Parallelstellung der einzig mögliche geordnete Zustand? Eine andere, ebenfalls sehr regelmäßige Anordnung besteht offensichtlich darin, daß die Achsen abwechselnd nach entgegengesetzten Richtungen weisen, also keine parallele, sondern, wie man dies nennt, eine „antiparallele Ordnung“ vorliegt. Ein sehr einfaches, aus der Erfahrung des täglichen Lebens gewähltes Beispiel möge dies erläutern: Die

regelmäßige Anordnung von Weinflaschen in einer Kiste. Zur besseren Stapelung liegt hier der Hals einer Flasche jeweils neben dem Boden der Nachbarflasche; die Flaschen sind antiparallel geordnet.

Eine solche antiparallele magnetische Ordnung ist die Ursache für den Magnetismus von Oxyden, den sogenannten Ferriten, die in Form von keramischen Stoffen Verwendung finden. Das Auftreten einer starken Magnetisierung setzt allerdings hier voraus, daß die beiden antiparallel gerichteten Anteile verschieden große Beiträge zum gesamten Magnetismus leisten, da sich gleich große Anteile in ihrer Wirkung gerade aufheben würden.

6.

Die stürmische Entwicklung bei den Ferriten ist typisch für manche Gebiete der Physik, in denen das früher übliche zeitliche Nacheinander von Grundlagenforschung und Anwendung einem Nebeneinander Platz gemacht hat. Beim Magnetismus geht seit etwa 30 Jahren die theoretische und experimentelle Grundlagenforschung weitgehend Hand in Hand mit der technischen Entwicklung, und es darf uns deshalb auch nicht wundern, wenn wir feststellen können, daß der wissenschaftliche Fortschritt auf dem Gebiet der magnetischen Ordnungszustände zum Teil aus den Laboratorien von Industriewerken hervorgegangen ist.

Durch eine Erforschung der physikalischen Zusammenhänge und eine Beherrschung der chemischen Technologie ist es hier in wenigen Jahren gelungen, Stoffe mit den mannigfaltigsten magnetischen Eigenschaften herzu-

stellen, die in der Elektrotechnik, vor allem der Nachrichtentechnik, ihre Anwendung finden. Kennzeichnend für eine solche Entwicklung ist, daß man dabei nicht eine Vielzahl von Stoffen herstellt und diese auf ihre Eignung für bestimmte Anwendungen prüft, sondern daß man umgekehrt aufgrund einer tiefgehenden Kenntnis der physikalischen Zusammenhänge durch ein gezieltes Vorgehen geeignete Stoffe „züchtet“.

Es sei noch erwähnt, daß, gewissermaßen als Nebenprodukt der magnetischen Werkstoffentwicklung, die vielfältig verwendbaren kleinen Haftmagnete entstanden sind, wie sie etwa als Verschuß von Schranktüren und dergleichen benutzt werden. Die Form solcher Magnete ist weitgehend durch den Werkstoff bestimmt: Während früher für eine starke magnetische Kraftwirkung die Form des Hufeisens gewählt werden mußte, genügt heute ein kleines Klötzchen oder Scheibchen. Das Hufeisen gehört in der Magnettechnik — ebenso wie im Straßenverkehr — einer vergangenen Epoche an.

Bei der Entwicklung von Werkstoffen für Magnete steht ein Gesichtspunkt mit im Vordergrund, der noch der Erwähnung bedarf: Ein guter Magnet sollte eine über Jahrzehnte immer gleichbleibende Wirkung zeigen, eine Forderung, die z. B. bei der Verwendung in Meßinstrumenten (Elektrizitätszähler) von großer praktischer Bedeutung ist. Im allgemeinen verliert ein Magnet im Lauf der Zeit seine Wirkung, er ist streng genommen also gar kein „permanenter“ Magnet. Über diesen Sachverhalt, den wir jetzt verstehen und als magnetische Nachwirkung bezeichnen, bestanden in früheren Zeiten recht mysteriöse Vorstellungen. So lesen wir in der

„Allgemeinen deutschen Real-Encyclopädie für die gebildeten Stände“ (verlegt von Fleischhauer u. Spohn, Reutlingen 1831): „Die Kraft des Magnets geht verloren, wenn man ihn *unbeschäftigt* läßt.“ In ähnlicher Weise steht im „Curieusen und realen Natur- Kunst- Berg-Gewerck- und Handlungs-Lexicon“ (verlegt von Joh. Friedrich Gleditschens sel. Sohn 1717): „Ein guter Magnet muß grau, schwärtzlicht, dabey auch roth aussehen, und damit er etwas *zu zehren* habe, stets in Eisenfeilig liegen.“ Wie wir heute wissen, wird durch derartige Maßnahmen die Wirkung eines entmagnetisierenden Feldes vermieden.

Die Nachwirkungerscheinungen, von denen hier die Rede ist, lassen sich bei geeigneten, in neuerer Zeit entwickelten Stoffen zwar sehr stark vermindern. Dieser Sachverhalt darf uns jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, daß jeder Magnet sich prinzipiell nicht in einem Gleichgewichtszustand befindet, sondern seinen Magnetismus aufgrund der thermischen Energie im Lauf der Zeit verliert. Bei guten Magneten sind die Zeiten, die verstreichen müssen, bis der Magnetismus wahrnehmbar abnimmt, lediglich sehr groß.

7.

Die technische Entwicklung baut auf den physikalischen Grundlagen auf. Es muß aber daran erinnert werden, daß sich auch umgekehrt die Grundlagenforschung die Ergebnisse technischer Entwicklung zu Nutze macht. So sind die magnetischen Werkstoffe, um nur einige Beispiele zu nennen, unentbehrlich für den Bau des Elektronenmikroskops, der elektronischen Rechenmaschinen, der

Radioteleskope und auch der Anlagen zur kernphysikalischen Forschung sowie ganz allgemein für die in allen Zweigen naturwissenschaftlicher Forschung heute unentbehrliche elektronische Meßtechnik.

Bereits vorhin war im Zusammenhang mit den kreiselmagnetischen Erscheinungen und der magnetischen Resonanz von umfangreichen Apparaturen für die physikalische Forschung die Rede. Erlauben Sie mir, hier, nachdem ich einzelne Geräte erwähnt habe, noch eine Bemerkung zu machen:

Das physikalische Experiment ist im Laufe der Zeit immer komplizierter geworden! Bei den Versuchen, die GALILEI (um 1600) über den freien Fall und über den Wurf angestellt hat, konnte die Bewegung eines Körpers unmittelbar — nämlich mit dem Auge — wahrgenommen werden, und der zeitliche Ablauf dieser Vorgänge konnte mit einer Uhr — damals noch einer Wasseruhr — bestimmt werden. Bei einem Experiment über die ferromagnetische Resonanz wird dagegen ein Magnetfeld durch ein ausgeklügeltes Programm automatisch gesteuert und es erscheint dann — vermittelt einer elektronischen Apparatur, die der Einzelne in all ihren Teilen vielleicht erst nach langer Einarbeitungszeit zu übersehen in der Lage ist — auf einem Registrierstreifen ein Meß-Signal.

Der Zusammenhang zwischen dem, „was geschieht“ und dem, „was beobachtet wird“, d. h. dem, was wir mit unseren Sinnen wahrnehmen, ist ungleich komplizierter geworden. Vielleicht ist die Beweiskraft des Experiments für den Außenstehenden dann sogar in Frage gestellt. Für den Fachmann erwächst daraus die Verpflichtung — heute noch mehr als früher —, die störenden Effekte,

die sein Ergebnis und seine Schlußfolgerung beeinflussen könnten, kritisch zu untersuchen und möglichst viele Kontrollen einzubauen. Was aber das Verständnis des Nicht-Fachmannes angeht, so darf nicht übersehen werden, daß die Physik die Aufgabe hat, die Eigenschaften der Materie und die Vorgänge in der Natur nicht nur zu beschreiben, sondern quantitative Zusammenhänge aufzufinden. Die Schlüsse, die aus dem Experiment gezogen werden, gründen sich daher auf *Meßergebnisse*, etwa in der Weise, daß die Messung Werte liefert, die aufgrund einer Theorie oder aufgrund einer Modellvorstellung, die sich bereits bei ganz anderen Erscheinungen bewährt hat, zu erwarten sind. Dieses wesentliche Charakteristikum der physikalischen Arbeitsmethode wird aber bei einer Darlegung, die sich an den Nicht-Fachmann wendet, begreiflicherweise kaum ausreichend berücksichtigt werden können.

8.

Vorhin wurde der Übergang in einen magnetischen Ordnungszustand mit dem Übergang zwischen den Aggregatzuständen (gasförmig, flüssig, fest) verglichen. Es zeigt sich nun, daß in beiden Fällen bei einem solchen Übergang ein Wärmeeffekt auftritt. Wir kennen dies von der Kältewirkung, die ein Tropfen Äther auf unserer Hand infolge von Verdunstung hervorbringt. In genau der gleichen Weise kann durch magnetische Prozesse eine Abkühlung erzwungen werden und tatsächlich ist es gelungen, unter Ausnutzung von magnetischen Ordnungszuständen bis zu extrem tiefen Temperaturen vorzustoßen.

Die Verflüssigung der Gase und im Zusammenhang damit das Erreichen tiefer Temperaturen war ein zentrales physikalisches Problem des 19. Jahrhunderts. Lange Zeit nahm man an, daß sich einige Gase (Luft, Wasserstoff) überhaupt nicht verflüssigen lassen, während sich z. B. das Chlor und das Kohlendioxyd (die sogenannte Kohlensäure) in den flüssigen Aggregatzustand überführen ließen. Schließlich gelang es aber, die Luft (1877), den Wasserstoff (1898) und auch das zunächst auf der Sonne entdeckte und erst später als Edelgas in der Erdatmosphäre gefundene Helium (1908) in den flüssigen und sogar in den festen Aggregatzustand überzuführen. Die Siedepunkte liegen für die Komponenten der Luft bei 90° (Sauerstoff) bzw. 77° (Stickstoff), für Wasserstoff bei 20° und für Helium bei 4° der sogenannten absoluten Temperaturskala, d. h. für He bei -269° C.

Bei der Temperatur des flüssigen Helium wurde von KAMERLINGH-ONNES (1911) eine unvorhersehbare Erscheinung, die sogenannte Supraleitung entdeckt: Viele Stoffe zeigen bei tiefen Temperaturen keinen elektrischen Widerstand mehr und es kann daher in einer Spule ein elektrischer Dauerstrom fließen. Mit derartigen Spulen lassen sich magnetische Felder erzeugen, ohne daß es einer Stromquelle bedarf. Es handelt sich gewissermaßen um das makroskopische Abbild der AMPÈRE-schen Kreisströme. Die Wirkung solcher Magnete, man könnte sie als künstliche Magnete bezeichnen, beruht also nicht auf elektrischen Strömen, die im Bereich der Atome fließen, sondern auf räumlich ausgedehnten elektrischen Strömen. Tatsächlich finden supraleitende Spulen in neuerer Zeit anstelle der üblichen Elektromagnete

Verwendung zur Erzeugung starker und räumlich ausgedehnter Magnetfelder.

9.

Bei dem Verfahren, das zur Abkühlung der Gase und schließlich zu ihrer Verflüssigung führt, wird eine von außen angreifende Kraft, nämlich der Druck, plötzlich geändert. Die Kühlwirkung ist dann besonders groß, wenn bei einer derartigen Entspannung ein Übergang zwischen Flüssigkeit und Gas erfolgt oder zumindest sich dieser Vorgang in der Nähe der Kondensationstemperatur abspielt.

Die Entspannung* beeinflusst den Grad der Ordnung, und zwar jener Ordnung, die wir als „Ordnung der Lage“ bezeichnet haben. Die tiefste Temperatur, die sich auf diese Weise herstellen läßt, ist erreicht, wenn eine Ordnung entstanden ist, die sich von außen praktisch nicht mehr beeinflussen läßt. Bei Helium ist dies bei etwa 1° oberhalb des absoluten Nullpunktes der Fall. Alle anderen Stoffe gehen bereits bei höheren Temperaturen in den Ordnungszustand über; sie sind also nicht geeignet, um noch tiefere Temperaturen zu erzeugen.

Ist die Ordnung, die auf diese Weise entsteht, nun eine vollständige? Ganz offensichtlich dann nicht, wenn es sich um magnetische Atome handelt und damit die Ordnung der Richtung zu berücksichtigen ist. Verwendet man auch hier das eben dargelegte Prinzip, so muß eine weitere Abkühlung bei solchen Stoffen möglich sein, die sich bei der Temperatur von 1° noch nicht im magnetischen Ordnungszustand befinden. Die äußere Kraft, die dabei den Ordnungszustand zu beeinflussen gestattet, ist ein magnetisches Feld.

Einen solchen neuartigen Kühlprozeß haben im Jahre 1926 unabhängig voneinander DEBYE und GIAUQUE vorgeschlagen. Nach Vorkühlung in flüssigem Helium lassen sich, wie dann im Jahre 1933 erstmalig gezeigt werden konnte, geeignete Stoffe durch eine plötzliche Verringerung des Feldes tatsächlich weiter abkühlen. Mit derartigen magnetischen Kühlprozessen sind Temperaturen von 1/1000 Grad absolut und weniger erreicht worden.

Man wird vielleicht fragen, ob die Realisierung von immer tieferen Temperaturen lediglich einer Art Rekordsucht der Physiker entspringt. Hierzu müssen wir aber bedenken, daß viele Stoffeigenschaften stark von dem abhängig sind, was hier als Grad der Ordnung bezeichnet wurde, und daß sich daher beim Fortschreiten zu tieferen Temperaturen immer wieder neue Erkenntnisse gewinnen lassen. So hat z. B. das Verfahren der magnetischen Kühlung bei den Experimenten, die im Jahre 1957 zum sogenannten „Sturz der Parität“ geführt haben, eine wesentliche Rolle gespielt. Jedes Fortschreiten zu noch tieferen Temperaturen kommt letztlich einer weiteren Annäherung an einen ungestörten Idealzustand der Materie gleich, ein Idealzustand, der freilich grundsätzlich unerreichbar ist.