Zeitschrift: Helvetica Physica Acta
Band: 41 (1968)
Heft: 6-7

Artikel: Festkörperphysik in Megagaussfeldern
Autor: Herlach, Fritz
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-113945

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 01.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Festkörperphysik in Megagaussfeldern

von **Fritz Herlach**
Department of Physics, Illinois Institute of Technology, Chicago 60616

(12. IV. 68)

Abstract. Solid state effects that would be of interest for experiments in megagauss fields are discussed. The emphasis is on the particular experimental conditions which are associated with these fields, and on the interaction of megagauss fields with metallic conductors. It follows that in many experiments the prevailing effects of interest are not primarily due to the megagauss field, but to extreme values of pressure, temperature and current density.

1. Einleitung

Es ist mir noch in lebhafter Erinnerung, wie Herr Professor Busch uns in der «Einführung in die Metallelektronik» erklärte, dass in Megagaussfeldern neue und interessante Effekte auftreten könnten. Damals waren so hohe Felder noch ein Wunschtraum, heute ist die Möglichkeit von Experimenten in Megagaussfeldern in greifbare Nähe gerückt. Die Erzeugung von Megagaussfeldern war wesentlich schwieriger als erwartet: Von den ersten Versuchen [1] bis zur Realisierung eines zuverlässigen Megagauss-Generators sind fast 10 Jahre vergangen [2]. Tabelle I gibt eine Übersicht über den derzeitigen Stand der Entwicklung [3].

Tabelle I

Übersicht über derzeitige Methoden zur reproduzierbaren Erzeugung von Megagaussfeldern [3].

Methode	Feld MG	Feldanstieg MG/μs	Dauer[a]) μs	Volumen cm^3
Kondensatorbank-Entladung (ca. 100 kJ)	2	1	1	0,3
Elektromagnetisch angetriebene Implosion (ca. 100 kJ)	2	1	$<0{,}5$	$<0{,}05$
Implosion mit Sprengstoff (Flusskompression)	2	0,6	0,8	0,3
	5	4	0,5	0,2
Sprengstoffbetriebener Impulsgenerator	2	0,5	2	10

[a]) Zeit, in der das Feld grösser ist als der Scheitelwert minus 10%.

Unsere Kollegen aus der Festkörperphysik fragen oft, warum eigentlich immer nur Felder gemacht werden anstatt endlich einmal Experimente, und andererseits, wie überhaupt sinnvolle Festkörperexperimente unter diesen extremen Bedingungen möglich seien. Antwort: Bevor ein Experiment in Megagaussfeldern mit Aussicht auf

Erfolg durchgeführt werden kann, muss die Technik zur Erzeugung der Felder zu sehr grosser Zuverlässigkeit entwickelt werden. Es lässt sich nämlich nicht vermeiden, dass die Versuchsanordnung und insbesondere die Probe in jedem einzelnen Experiment zerstört wird. Diese extremen Versuchsbedingungen sind nur zu einem kleinen Teil durch die spezielle Experimentiertechnik, z.B. den Gebrauch von Sprengstoff, bedingt. Sie hängen vielmehr ursächlich damit zusammen, dass jedes Megagaussfeld ein hochbrisanter Sprengstoff ist – ein Feld von 1,3 MG hat die gleiche Energiedichte wie TNT, und diese Energie kann sich im Grenzfall mit Lichtgeschwindigkeit fortpflanzen. Deshalb stehen Experimente in Megagaussfeldern in ihrer Art der neueren Entwicklung der Festkörperphysik diametral gegenüber. Es kann hier nicht die Rede davon sein, viele Messpunkte an einer sorgfältig vorbereiteten Probe aufzunehmen. Wir können es uns nicht zum Ziel setzen, Feinheiten in der Struktur der Fermifläche zu untersuchen. Es gibt aber eine ganze Anzahl von interessanten Effekten, die in Verbindung mit Megagaussfeldern auftreten. In Ermangelung moderner theoretischer Arbeiten hierüber gehen wir am besten zur «Einführung in die Metallelektronik» zurück, um auf elementarer Basis einige dieser Effekte aufzuzeigen.

2. Metallische Leiter im Kontakt mit Megagaussfeldern

Wegen ihres explosiven Charakters können Megagaussfelder nur in Form sehr schnell ansteigender Impulse erzeugt werden. Die Eindringtiefe der Felder ist deshalb klein, und die felderzeugenden Ströme fliessen nur an der Innenfläche der Feldspulen. Für einen exponentiellen Feldanstieg $H_0\, e^{\nu t}$, wie er in den meisten Kompressionsexperimenten annähernd vorkommt, existiert eine analytische Lösung für die Feldverteilung im Metall:

$$H(x, t) = H_0\, e^{\nu t}\, e^{-x/a}\,, \quad a = \sqrt{\frac{\varrho}{\mu_0\, \nu}}\,. \tag{1}$$

Die Koordinate x ist von der Grenzfläche Feld-Metall aus gemessen. Für einen Feldanstieg $\nu = 10^6\ \mathrm{s}^{-1}$ (1 MG/μs bei einer Feldstärke von 1 MG) beträgt die Eindringtiefe in Kupfer 0,3 mm. Die Stromdichte wird deshalb sehr gross ($\sim 10^7$ A/cm^2 an der Oberfläche des Metalls in diesem Beispiel) und ebenso die Erwärmung. An Hand von Gleichung (1) kann man leicht ableiten, dass die thermische Energiedichte im Metall gleich der Energiedichte des Magnetfeldes ist. Der Schmelzpunkt von Kupfer wird bei 1,1 MG erreicht, und der Siedepunkt bei 1,5 MG. Die Verdampfung des Spulenmaterials würde der Felderzeugung ein schnelles Ende bereiten, wenn sie nicht durch verschiedene Effekte eingeschränkt wäre. Es lässt sich zeigen, dass die ganze zur Verfügung stehende Energie in dem sehr kurzen Zeitintervall des Feldanstieges nur eine dünne Metallschicht verdampfen kann; ausserdem wird bei dem raschen Temperaturanstieg ein Teil des Metalls im überhitzt flüssigen Zustand bleiben.

Der spezifische Widerstand lässt sich aus dem Ergebnis von Kompressionsexperimenten abschätzen; er kann auch in relativ einfachen Versuchsanordnungen indirekt bestimmt werden. Direkte Messungen sind durch den schnellen Feldanstieg sehr erschwert wegen der in den Zuleitungen zur Probe induzierten Spannungen. Die Messanordnungen müssen deshalb innerhalb des Hochfeldvolumens aussergewöhnlich induktionsarm aufgebaut werden. Die indirekten Messungen erfolgen immer bei sehr hoher Stromdichte und damit bei hoher Temperatur und hohem Druck. Dies sind die

gleichen Bedingungen, denen das Material der felderzeugenden Spulen ausgesetzt ist. Ähnliche Bedingungen entstehen, wenn ein dünner Draht durch einen sehr schnellen Stromanstieg zur Explosion gebracht wird. TUCKER [4] hat bei Experimenten mit explodierenden Golddrähten eine Verminderung des spezifischen Widerstandes bei sehr hohen Stromdichten beobachtet. Nehmen wir eine Elektronendichte von $6 \cdot 10^{28}$ m^{-3} an, so ergibt sich bei einer Stromdichte von 10^{12} A/m^2 eine Driftgeschwindigkeit von 10^2 m/s. Diese liegt noch vier Grössenordnungen unterhalb der Fermi-Geschwindigkeit, sie kommt aber der Schallgeschwindigkeit nahe. Die Energiezunahme eines Elektrons zwischen zwei Stössen wird von der Grössenordnung 10^{-2} Elektronvolt. Dies ist zwar noch ein kleiner Betrag im Vergleich zum Bandabstand; trotzdem ist es denkbar, dass einzelne Elektronen genügend Energie aufnehmen, um zusätzliche Ladungsträger freizumachen.

Der magnetische Druck wird innerhalb der stromführenden Haut auf das Metall übertragen; die Druckverteilung ist

$$p(x) = \frac{1}{2}\,\mu_0\,H_0^2\,e^{2\nu t}\,(1 - e^{-2x/a})\,. \tag{2}$$

Bei der Kompression von Metallen vermindert sich der spezifische Widerstand. Dieser Effekt ist von BRIDGMAN [5] im Bereich bis zu 12 kbar experimentell untersucht worden. Die Widerstandsänderung ist eine Exponentialfunktion des spezifischen Volumens:

$$\frac{\varrho}{\varrho_0} = \left(\frac{V}{V_0}\right)^{\gamma}. \tag{3}$$

Der Exponent liegt zwischen 2 und 5 für die meisten Metalle bei Zimmertemperatur[1]). Mit Megagaussfeldern können diese Experimente in den Megabar-Bereich ausgedehnt werden; ein Feld von 5 MG übt einen Druck von 1 Mbar aus, und dieser Druck würde den spezifischen Widerstand etwa um einen Faktor 3 verkleinern. Megagaussfelder können ganz allgemein als druckübertragendes Mittel in Höchstdruckexperimenten Anwendung finden. Solche Experimente konnten bisher nur mit Hilfe von starken Schockwellen ausgeführt werden [6]. Diese Schockwellen haben Geschwindigkeiten der Grössenordnung 10 mm/μs, d.h. der Druck steigt äusserst rasch an und ist von kurzer Zeitdauer. Mit Magnetfeldern lässt sich im Prinzip ein sanfterer Druckanstieg erreichen; ein rasch ansteigendes Feld kann jedoch auch eine «magnetische Detonationswelle» ins angrenzende Metall treiben [7]. Die magnetischen Detonationswellen sind wiederum von eigenem Interesse, denn ihre Stärke und Geschwindigkeit ist im Gegensatz zu Detonationswellen in chemischen Sprengstoffen stufenlos regelbar.

3. Magneto-optische und galvomagnetische Effekte

In einem Feld von 10 MG ist die Zeeman-Aufspaltung von der Grössenordnung 500 Å, d.h. $5 \cdot 10^{-2}$ eV. Diese Energie ist wiederum klein im Vergleich zum Bandabstand in den meisten Substanzen, und spektakuläre Effekte sind deshalb nicht ohne weiteres zu erwarten. Unter den speziellen Bedingungen in Megagaussfeldern sind optische Experimente an Nichtleitern am einfachsten auszuführen. Sowohl der Zeeman-Effekt [8] (bis 5 MG) als auch der Faraday-Effekt [9] (bis 2 MG) sind schon

[1]) In wenigen Ausnahmefällen ist der Exponent negativ.

experimentell an einzelnen Substanzen untersucht und soweit linear befunden worden. Diese Experimente waren hauptsächlich als unabhängige Bestätigung der Feldmessungen geplant und um zu zeigen, dass man in Megagaussfeldern überhaupt experimentieren kann. An speziell ausgesuchten Substanzen dürfte es möglich sein, bei beiden Experimenten nichtlineare und eventuell sogar drastische Effekte nachzuweisen.

Bei den galvanomagnetischen Effekten gibt es ausser den Störspannungen noch eine weitere Schwierigkeit: Die Proben müssen wesentlich kleiner sein als die Eindringtiefe, um den Einfluss von Erwärmung und magnetischem Druck klein zu halten. Die magnetische Widerstandsänderung befolgt allgemein ein Gesetz der Form [10]

$$\frac{\Delta\varrho}{\varrho} = f\left(\frac{H}{\varrho}\right) \tag{4}$$

und wird deshalb bei hohen Temperaturen sehr klein. Insbesondere bei der indirekten Widerstandsmessung dürfte sie in diesem Fall kaum nachweisbar sein. Um das Verhältnis (H/ϱ) wirklich grösser zu machen, müsste man Kryogenik mit Megagaussfeldern kombinieren. Der Verlust eines einfachen Kryostaten mit jedem Experiment ist durchaus tragbar. In jedem Fall muss bei Experimenten mit Megagaussfeldern durch geschickte Planung und sorgfältige Vorbereitung dafür gesorgt werden, dass aus jedem einzelnen Experiment möglichst viel Ergebnisse gewonnen werden.

Im Zusammenhang mit galvanomagnetischen Effekten können wir noch eine grössenordnungsmässige Beziehung erwähnen: In einem Feld von 10 MG wird die Larmorfrequenz $3 \cdot 10^{13}\,\mathrm{s}^{-1}$, d.h. die Umlaufszeit wird von der gleichen Grössenordnung wie die Zeit zwischen zwei Zusammenstössen mit dem Gitter, $3 \cdot 10^{-14}\,\mathrm{s}$; ebenso wird der Larmorradius von der Grössenordnung der freien Weglänge.

Als Hauptgrund für das Auftreten neuartiger Effekte in Megagaussfeldern wird man jedoch deren hohe Energiedichte ansehen; diese kann wesentlich grösser werden als die Energiedichte der chemischen Bindung.

Im Hinblick auf den Schwierigkeitsgrad dieser Experimente müssen wir etwas Geduld üben; im Verlauf der nächsten Jahre werden aber sicher eine ganze Reihe von Festkörperexperimenten in Megagaussfeldern ausgeführt werden. Es ist zu hoffen, dass dann das Interesse der Theoretiker an diesem neuen Forschungsgebiet geweckt wird.

Literaturverzeichnis

[1] C. M. Fowler, W. B. Garn und R. S. Caird, J. appl. Phys. *31*, 588 (1960).
[2] Proc. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation by Explosives and Related Experiments, Frascati, September 1965 (EURATOM EUR 2750.e).
[3] F. Herlach, Rep. Progr. Phys. *31* (1968).
[4] T. J. Tucker, J. appl. Phys. *10*, 1894 (1961).
[5] P. W. Bridgman, The Physics of High Pressure (Bell, London 1949).
[6] L. V. Al'tshuler, Usp. Fiz. Nauk. *85*, 197 (1965); englische Übersetzung: Soviet Physics Uspekhi *8*, 52 (1965).
[7] A. R. Bryant, p. 183 in Ref. [2].
[8] W. B. Garn, R. S. Caird und C. M. Fowler, Rev. Sci. Instr. *6*, 762 (1966).
[9] F. Herlach, H. Knoepfel, R. Luppi und J. van Montfoort, p. 471 in Ref. [2].
[10] J. L. Olsen, *Electron Transport in Metals* (Interscience, London 1962), enthält einen ausführlichen Literaturnachweis.