

Topologie – von einer eleganten mathematischen Theorie zum verlustfreien Stromtransport

- Die Topologie erzeugt in gewissen Materialien besondere elektronische Zustände.
- Dazu gehören neue Quanten-Hall-Effekte.
- Sie erlauben einen verlustfreien Stromtransport – in Zukunft möglicherweise schon bei Raumtemperatur.

Die Topologie ist eine Eigenschaft des Raumes, die unter Verformung wie Biegen, Strecken oder Dehnen erhalten bleibt. In Festkörpern beeinflusst die Topologie deren elektronische Eigenschaften und erzwingt neue Zustände. Zugleich kommt hier der quantenmechanische Charakter der Elektronen zum Vorschein. Das eröffnet neue technologische Möglichkeiten.

Quantenmechanisch haben Elektronen neben der Ladung einen sogenannten Eigendrehimpuls (Spin) – sie scheinen sich um ihre eigene Achse zu drehen. Die Wechselwirkung dieses Eigendrehimpulses mit der Bahnbewegung der Elektronen im Festkörper

per ist die Ursache für neue Effekte: Im Unterschied zum konventionellen Hall-Effekt, bei dem bewegte Ladungen unter dem Einfluss eines Magnetfeldes und der Lorentz-Kraft je nach Vorzeichen der Ladung senkrecht zur Bewegungsrichtung nach rechts oder links abgelenkt werden, kommt es in topologischen Materialien zu neuen Hall-Effekten: Für nichtmagnetische Metalle zum sogenannten Spin-Hall-Effekt, für magnetische Metalle zum anomalen Hall-Effekt (Abb. 1) [1].

Die Physik beschreibt die topologischen Eigenschaften durch ein hypothetisches Feld – Berry-Curvature genannt (nach Michael Berry [2]). Es wirkt wie ein Magnetfeld und verursacht ebenfalls eine Ablenkung der Elektronen senkrecht zu ihrer Bewegungsrichtung [3]. Im Unterschied zur Lorentz-Kraft werden die Elektronen nun aber entsprechend ihres Drehsinns nach rechts oder links sortiert. Beim Spin-Hall-Effekt baut sich dabei jedoch keine elektrische Spannung auf, sondern es fließt ausschließlich ein sogenannter Spin-Strom I_s .

Von besonderem Interesse sind topologi-



„Es ist faszinierend, wie das abstrakte Gebiet der Topologie Einzug in die Physikklabore gehalten hat und künftig einen Platz in unserem Alltag einnehmen könnte.“

Rolf Heuer, Präsident der Deutschen Physikalischen Gesellschaft

sche Isolatoren. An deren Oberfläche ist eine Symmetrie des Systems gebrochen. Infolgedessen können sich stabile, topologisch geschützte Zustände ausbilden. Diese können die sogenannte Bandlücke des Isolators überbrücken und das Material an den Grenzflächen leitend machen. Die Eigenschaften solcher topologischer Phasen haben David J. Thouless, J. Michael Kosterlitz und F. Duncan M. Haldane mit einfachen Modellen vorhergesagt [4], wofür sie im Jahr 2016 den Nobelpreis für Physik erhielten.

Konkret bewegen sich beim Quanten-Hall-Effekt (Abb. 2) [6] zwei Elektronen mit entgegengesetztem Spin unter dem Einfluss des Magnetfeldes in die gleiche Richtung und erzeugen so den quantisierten Beitrag zum Hall-Widerstand $R_K = h/e^2$, für dessen Entdeckung der deutsche Physiker Klaus von Klitzing 1985 den Nobelpreis für Physik erhielt. Beim Quanten-Spin-Hall-Effekt [7] bewirkt das Berry-Curvature-Feld, dass sich Elektronen mit entgegengesetztem Spin in entgegengesetzte Richtung bewegen. Der Hall-Widerstand ist Null, es fließt aber ein Spinstrom. Der anomale Quanten-Hall-Effekt [8] wird in magnetischen Systemen beobachtet. Hier bewegen sich einzelne spinpolarisierte Elektronen entlang des Randes und verursachen einen quantisierten Beitrag zum Hall-Widerstand. Da alle genannten Randströme topologisch geschützt sind, fließen sie verlustfrei.

Viele Forscher erhoffen sich davon künftige Anwendungen, wie zum Beispiel einen verlustfreien Stromtransport bei Raumtemperatur und energiesparende Elektronik.

Abb. 1: Hall-Effekte mit Jahr des experimentellen Nachweises.

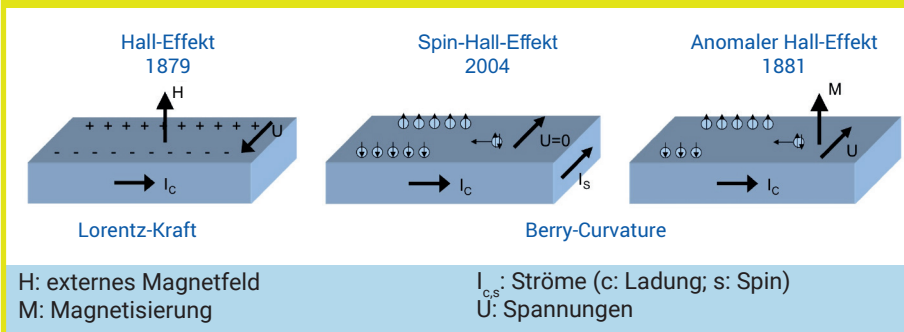
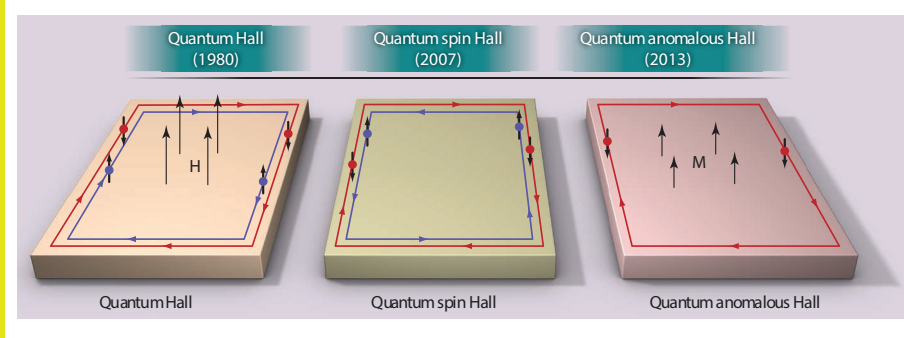


Abb. 2: Quantum-Hall-Effekte mit Jahr des experimentellen Nachweises [5].



[1] N. Nagaosa, J. Sinova et al., Rev. Mod. Phys. 82, 1539 (2010)
 [2] M. V. Berry, Proc. R. Soc. A 392, 1802 (1984)
 [3] M.-C. Chang and Q. Niu, Phys. Rev. B 53, 7010 (1996)
 [4] R. Thomale, Physik Journal 12, 24 (2016)
 [5] S. Oh, Science 340,153 (2013)
 [6] K. v. Klitzing, G. Dorda und M. Pepper, Phys. Rev. Lett. 45, 494 (1980)
 [7] M. König et al., Science 318, 766 (2007)
 [8] Cui-Zu Chang et al. Science 340, 167 (2013)

Deutsche **Physikalische** Gesellschaft

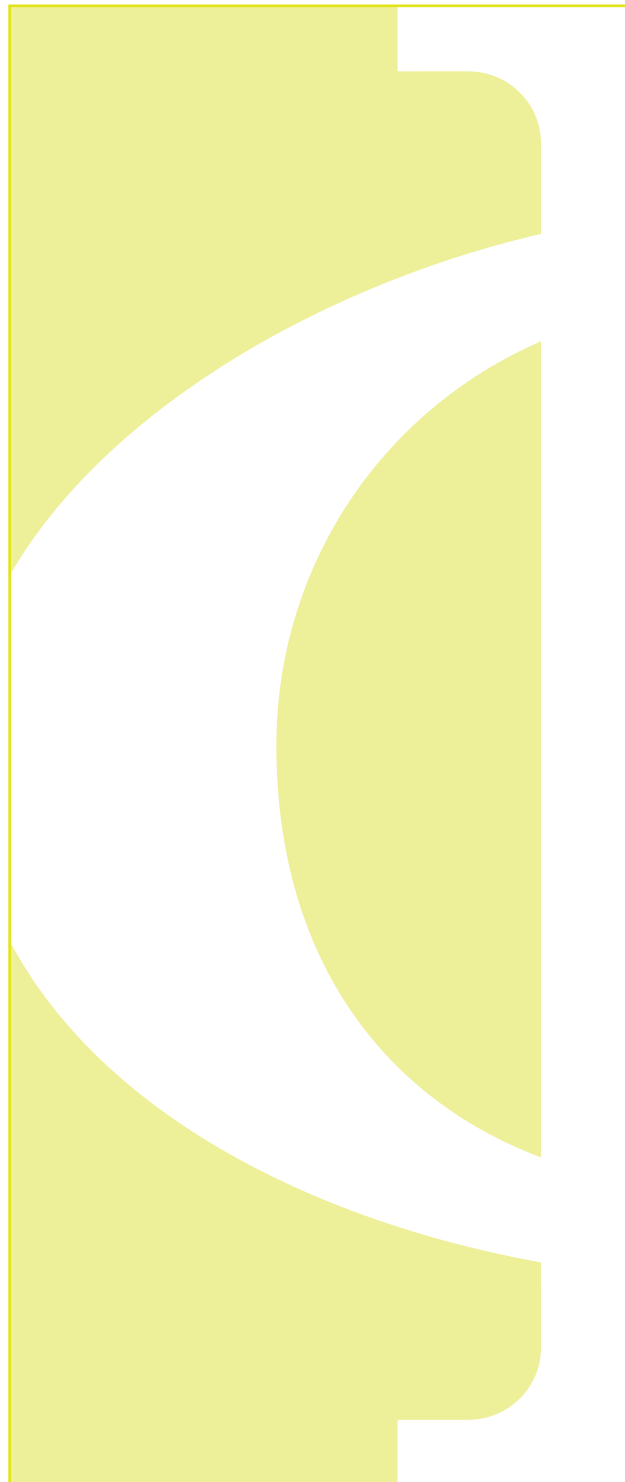
Die Deutsche Physikalische Gesellschaft e. V. (DPG), deren Tradition bis in das Jahr 1845 zurückreicht, ist die älteste nationale und mit rund 62.000 Mitgliedern auch die größte physikalische Fachgesellschaft weltweit. Sie versteht sich als Forum und Sprachrohr der Physik und verfolgt als gemeinnütziger Verein keine wirtschaftlichen Interessen. Die DPG unterstützt den Gedankenaustausch innerhalb der wissenschaftlichen Gemeinschaft mit Tagungen und Publikationen. Sie engagiert sich in der gesellschaftspolitischen Diskussion zu Themen wie Nachwuchsförderung, Chancengleichheit, Klimaschutz, Energieversorgung und Rüstungskontrolle. Sie fördert den Physikunterricht und möchte darüber hinaus allen Neugierigen ein Fenster zur Physik öffnen.

In der DPG sind Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, Studierende, Lehrerinnen und Lehrer, in der Industrie tätige oder einfach nur an Physik interessierte Personen ebenso vertreten wie Patentanwälte oder Wissenschaftsjournalisten. Gegenwärtig hat die DPG neun Nobelpreisträger in ihren Reihen. Weltberühmte Mitglieder hatte die DPG immer schon. So waren Albert Einstein, Hermann von Helmholtz und Max Planck einst Präsidenten der DPG.

Die DPG finanziert sich im Wesentlichen aus Mitgliedsbeiträgen. Ihre Aktivitäten werden außerdem von Bundes- und Landesseite sowie von gemeinnützigen Organisationen gefördert. Besonders eng kooperiert die DPG mit der Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung.

Die DPG-Geschäftsstelle hat ihren Sitz im Physikzentrum Bad Honnef in unmittelbarer Nähe zur Universitäts- und Bundesstadt Bonn. Das Physikzentrum ist nicht nur ein Begegnungs- und Diskussionsforum von herausragender Bedeutung für die Physik in Deutschland, sondern auch Markenzeichen der Physik auf internationalem Niveau. Hier treffen sich Studierende und Spitzenwissenschaftler bis hin zum Nobelpreisträger zum wissenschaftlichen Gedankenaustausch. Auch Lehrerinnen und Lehrer reisen immer wieder gerne nach Bad Honnef, um sich in den Seminaren der DPG fachlich und didaktisch fortzubilden.

In der Bundeshauptstadt Berlin ist die DPG ebenfalls präsent. Denn seit ihrer Vereinigung mit der Physikalischen Gesellschaft der DDR im Jahre 1990 unterhält sie dort das Magnus-Haus. Dieses 1760 vollendete Stadtpalais, das den Namen des Naturforschers Gustav Magnus trägt, ist eng mit der Geschichte der DPG verbunden: Aus einem Gelehrtentreffen, das hier regelmäßig stattfand, ging im Jahre 1845 die „Physikalische Gesellschaft zu Berlin“, später die DPG hervor. Heute finden hier Kolloquien und Vorträge zu physikalischen und gesellschaftspolitischen Themen statt. Gleichzeitig befindet sich im Magnus-Haus Berlin auch das historische Archiv der DPG.



Deutsche Physikalische Gesellschaft e. V.

Geschäftsstelle Tel.: 02224 / 92 32 - 0
Hauptstraße 5 Fax: 02224 / 92 32 - 50
53604 Bad Honnef E-Mail: dpg@dpg-physik.de

Die Deutsche Physikalische Gesellschaft dankt Ingrid Mertig von der Gruppe Quantentheorie der Festkörper der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg für die wissenschaftliche Beratung