



# Supraleitung –

# Moderne Schulphysik ohne Widerstand?

M. Reifenrath, Ch. Weller u. J. Woithe

## 1 Motivation

Die Teilchenphysik bietet mit ihren gigantischen Beschleunigern wie dem LHC am CERN in Genf und den dort durchgeführten Experimenten faszinierende Möglichkeiten, moderne Physik in die Schule zu bringen [1]. Nicht zuletzt führten die dort erhaltenen Erkenntnisse zur Entdeckung des Higgs-Bosons (Nobelpreis 2013). Es ist aber nicht immer ganz einfach, Aspekte

moderner Physik mit eher klassischen Lehrplaninhalten in Einklang zu bringen. Mit dem Thema der Supraleitung ist es möglich, ein aktuelles Forschungsgebiet in enger Verbindung mit wichtigen Konzepten der klassischen Physik zu unterrichten. Zusätzlich bietet Supraleitung eine Vielzahl spannender und motivierender Anwendungsmöglichkeiten, wie zum Beispiel supraleitende Magnetschwebbah-

nen oder extrem starke Elektromagneten in der Magnetresonanztomographie beziehungsweise in der Teilchenphysik. Allerdings setzt die Durchdringung des Themas gewisse Kenntnisse der klassischen Physik (insbesondere thermodynamischer und elektromagnetischer Konzepte) sowie einige grundlegende Kenntnisse der Quantenmechanik und Festkörperphysik voraus, welche im Normalfall nicht Teil des deut-

schen Sek-II-Curriculums sind. Eine didaktische Rekonstruktion ist hier also durchaus erforderlich und wurde auch im Folgenden bedacht.

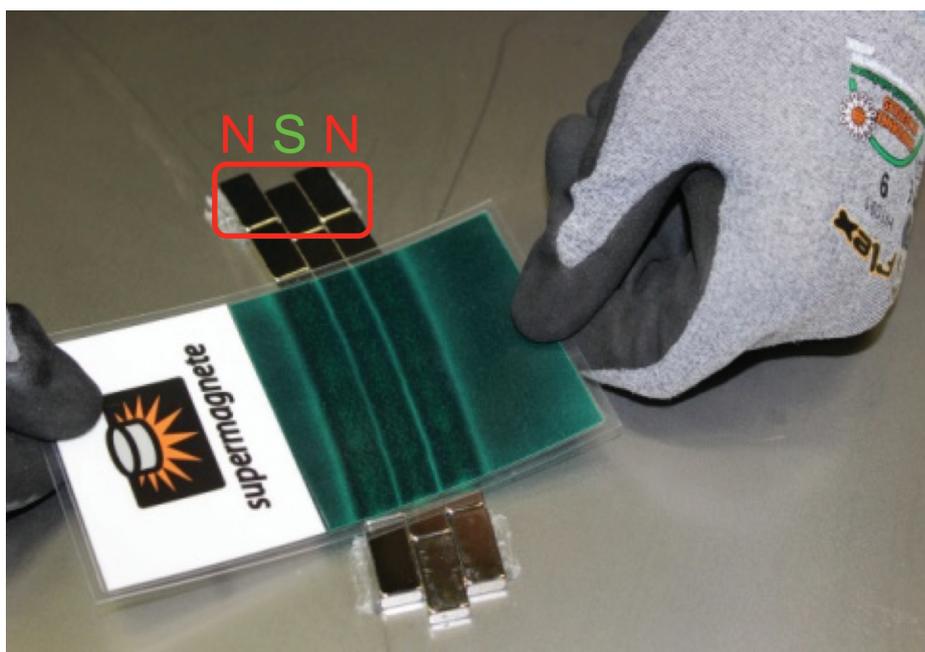
## 2 Bedeutung der Supraleitung für die Teilchenphysikforschung

Die Entdeckung des Higgs-Bosons sowie die gesamte heutige Teilchenphysikforschung wären ohne die technische Anwendung der Supraleitung nicht möglich. Über 10 000 supraleitende Elektromagneten sind im Large Hadron Collider (LHC) verbaut [2]. Die supraleitenden Eigenschaften der Niob-Titan-Kabel in den Elektromagneten erlauben unter anderem extrem hohe Stromstärken in den Ablenkmagneten von bis zu 13 000 Ampere und können somit eine Magnetfeldstärke von 8,3 Tesla erzeugen. Schon geringfügig schwächere Elektromagneten würden die maximal mögliche kinetische Energie der beschleunigten Protonen limitieren, da die kinetische Energie der Protonen in einem Synchrotron wie dem LHC gleichzeitig mit der Zentripetalkraft auf die Protonen erhöht werden muss. Bei schwächeren Ablenkmagneten würde die dadurch auf die Protonen wirkende Lorentzkraft nicht ausreichen, um die Teilchen auf der 27 km langen Kreisbahn zu halten.

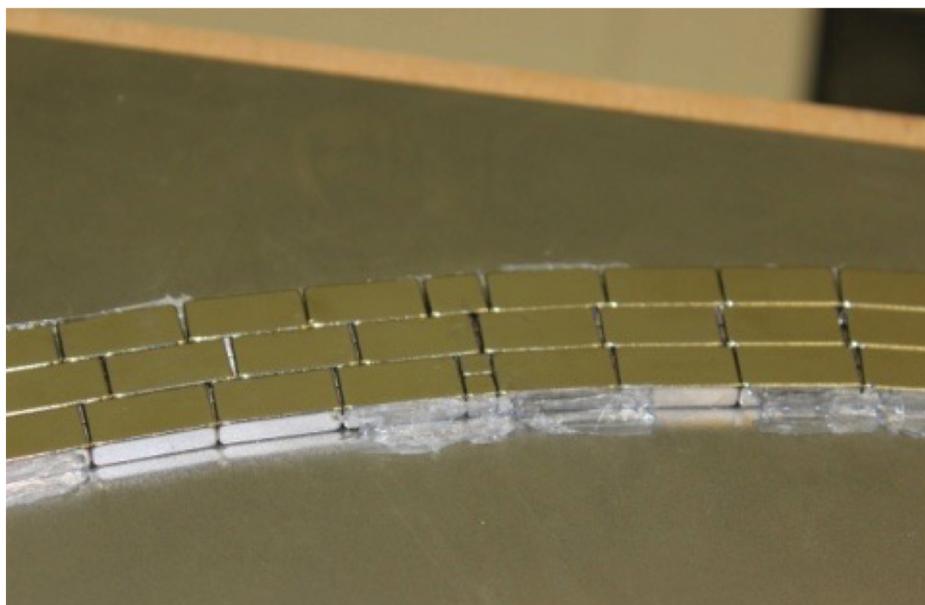
Selbst nach der Kollision von Protonen im LHC sind Supraleiter unabdingbar. Der Impuls und die elektrische Ladung der in der Kollision erzeugten Teilchen werden über die Spurkrümmung in einem Magnetfeld gemessen. Für hochrelativistische Teilchen benötigt man sehr starke Magnetfelder in einem großen Raumbereich, um eine Krümmung der Spuren messen zu können. Im ATLAS-Detektor ermöglichen beispielsweise bis zu 25 Meter lange Spulen mit supraleitenden Niob-Titan-Kabeln das nötige Magnetfeld. Forschungsstätten der Teilchenphysik wie das CERN in Genf haben daher großes Interesse daran, die Technologie der Supraleitung weiterzuentwickeln. Am CERN werden beispielsweise neue Materialien wie Niob-Zinn-Legierungen getestet, mit denen noch stärkere Magnetfelder für die nächste Generation der Teilchenbeschleuniger und Teilchendetektoren erreicht werden könnten.

## 3 Konzeption einer Experimentiersequenz

Das Teilchenphysik-Schülerlabor S'Cool LAB am CERN möchte Jugendlichen Einblick nicht nur in die Forschung, sondern auch in die verwendeten Technologien am größten Teilchenphysiklabor der Welt geben [3]. Da Supraleitung eine wichtige



**Abb. 1:** Setzen der Bahnelemente. Ein Bahnelement bestehend aus drei Magneten ist rot eingerahmt, die Orientierung der Magnete für dieses Bahnelement ist mit NSN angegeben.



**Abb. 2:** Endstück der Bahn.

Schlüsseltechnologie am CERN darstellt, wurde die Entwicklung einer Experimentiersequenz im Kontext des Schülerlabors S'Cool LAB zu diesem Thema angeregt.

Dazu haben wir drei Experimente eingesetzt. Im ersten Experiment nehmen die Schülerinnen und Schüler Widerstandskurven je eines Supraleiters, Normalleiters und Halbleiters bei sinkender Temperatur auf und vergleichen diese miteinander. Im zweiten Experiment lernen sie das Phänomen der supraleitenden Levitation kennen. Dabei besteht dieser Teil streng genommen aus zwei einzelnen Experimenten, bei denen die Levitation zum einen durch den Meißner-Ochsenfeld-Effekt bei einem Supraleiter 1. Art sowie zum anderen durch

das Flux-Pinning bei einem Supraleiter 2. Art untersucht und verglichen wird. Das dritte Experiment ist als Bonus-Experiment angelegt, um dem unterschiedlichen Tempo der Lerngruppen gerecht zu werden. In diesem Experiment entwerfen die Schülerinnen und Schüler selbstständig eine Teststrecke einer supraleitenden Magnetschwebbahn. Dabei finden sie heraus, welche Magnetkonfigurationen für diesen Zweck geeignet sind. Außerdem wird das magnetische Schweben an einem größeren Modell einer supraleitenden Magnetschwebbahn demonstriert.

Im Folgenden werden wir die Teile der Experimentiersequenz beschreiben, die nicht durch kommerziell erhältliche Expe-

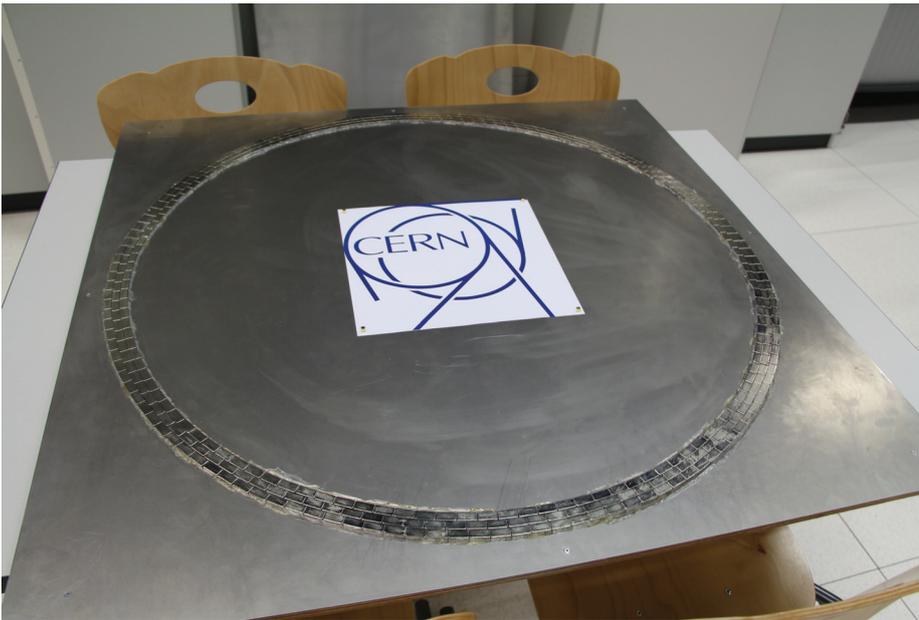


Abb. 3: Finale Bahn.

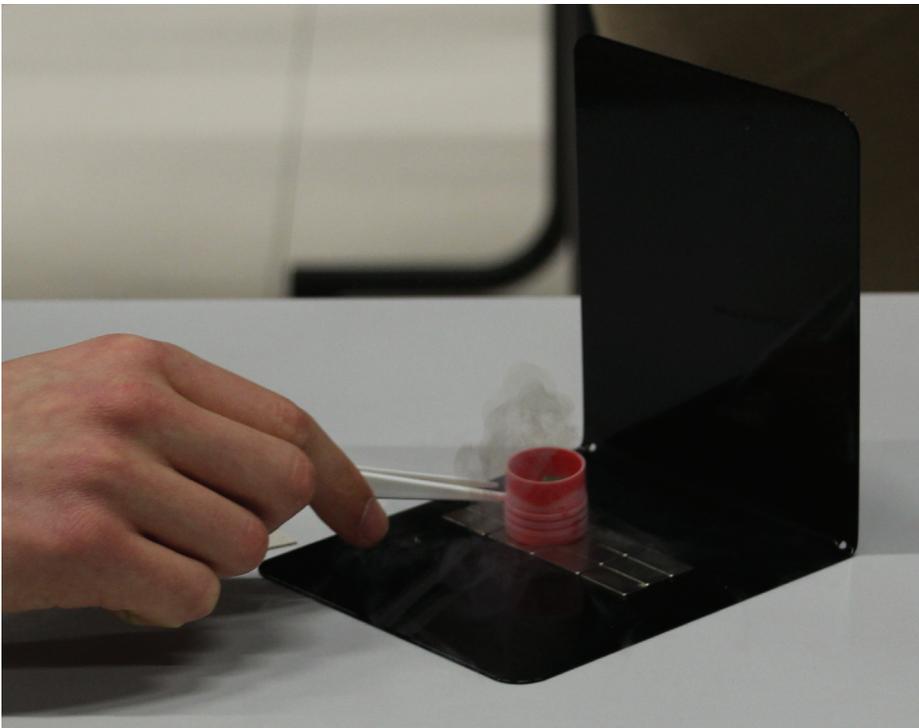


Abb. 4: Schwebende Verschlusskappe inklusive Supraleiter auf Magnet-Teststrecke

rimentiersets abgedeckt werden können. Die Reihenfolge der Experimente ist dabei in gewisser Weise vorgegeben, da die Effekte und Erklärungen zum Teil aufeinander aufbauen. So ist es für die Erklärungen des Meißner-Ochsenfeld-Effektes sinnvoll, zunächst im ersten Experiment festzustellen, dass bei ausreichend tiefer Temperatur der elektrische Widerstand eines Supraleiters verschwindet. Das dritte Experiment, das Entwerfen einer Teststrecke einer supraleitenden Magnetschwebebahn, baut auf Kenntnissen zur supraleitenden Levitation durch den Meißner-Ochsenfeld-Effekt und vor allem den Flux-Pinning-Effekt auf.

Zur gesamten Experimentiersequenz wurde ein Arbeitsheft mit Aufträgen und Erklärungen gestaltet, um möglichst eigenständiges Arbeiten der Jugendlichen zu ermöglichen und zu fördern [4]. Die Experimente sind gemäß des Predict-Observe-Explain-Schemas (POE) von White und Gunstone [5] strukturiert. Die generelle Idee dahinter ist, dass die Schülerinnen und Schüler vor einem Experiment zunächst Vermutungen äußern. Der zweite Schritt besteht in der Durchführung des Experiments und der Beobachtung der auftretenden Phänomene mit anschließender Schilderung, sodass im dritten Schritt eine Er-

klärung des Geschehenen durch die Schülerinnen und Schüler gegebenenfalls in Zusammenarbeit mit der Lehrperson stattfinden kann. Dazu benötigen die Schülerinnen und Schüler allerdings natürlich ein gewisses Vorwissen. Für diese Experimentiersequenz sind daher Kenntnisse der Jugendlichen hinsichtlich Magnetismus und Magnetfeldern, elektrischer Leitfähigkeit und auch Induktion empfehlenswert. Fehlen beispielsweise Kenntnisse zur Induktion, ist es nicht möglich, den Meißner-Ochsenfeld-Effekt angemessen zu erklären. Die Kenntnis von Halbleitern ist dabei für die Experimentiersequenz eher als optional anzusehen, da diese im ersten Experiment auch weggelassen werden könnten, sodass ein Vergleich nur zwischen Widerstandskurven von Leiter und Supraleiter gezogen wird.

## 4 Versuchs Anregungen

### 4.1 Bau einer Magnetschwebebahn

Im Folgenden geben wir Tipps, um eine große ringförmige Magnetschwebebahn zu bauen. Die Form und Größe kann dabei aber an die eigenen Bedürfnisse angepasst werden. Deutlich kostengünstiger und einfacher zu bauen sind gerade Teststrecken. Schon mit relativ schwachen Neodym-Magneten lassen sich so Supraleiter zum Schweben bringen. Kreisbahnen sollten mindestens mit einem Radius von 10 cm geplant werden, wobei bei dieser Größe ein gewisses Ruckeln nicht zu verhindern ist, da die Übergänge zwischen den einzelnen Magneten nicht optimal sind.

**Material für die Bahn:** Stahlblech (3 mm Dicke; alternativ Stahlblech in Form der geplanten Bahn), Sperrholzplatte in der Größe des Stahlblechs (5 mm Dicke), Flux-Detektor [6], Handschuhe, Quadermagnete [7], Typ II Supraleiter z.B. YBCO [8], Metallschrauben, Bohrer, Kappe eines Klebestiftes, Heißklebepistole, Sekundenkleber, Bleistift, Streichmaß oder langes Lineal, eventuell großer Zirkel beziehungsweise Nagel und Faden, Hammer, Stift und Pappe.

Zunächst wird über die Form der Bahn entschieden, da diese zum einen den Bedarf an Magneten und zum anderen die minimale Größe der Bahn vorgibt. Unsere Kreisbahn wurde mit einem Innenradius von 43 cm geplant, die Kosten für die 575 benötigten Quadermagneten liegen bei ca. 380 €. Die Bahn entsteht durch die Aneinanderreihung von mehreren Bahnelementen. Jedes Bahnelement besteht aus drei

nebeneinander liegenden Quadermagneten (Abb. 1). Die Polung muss dabei entweder NSN oder SNS sein und durchweg fortgeführt werden; auf keinen Fall alternierend! So wird ein gleichmäßiger Magnetfeldverlauf über die Bahn erreicht. Dies hat zur Folge, dass die einzelnen Bahnelemente sich gegenseitig abstoßen, da immer Magnete gleicher Polung aufeinander folgen. Um trotzdem eine gleichmäßige Bahn zu erhalten, hat sich folgendes Vorgehen bewährt: Zunächst werden einzelne Bahnelemente aus drei Magneten in der Orientierung NSN (oder SNS) vorgefertigt und auf die Stahlplatte aufgelegt (Handschuhe tragen!), wobei der innere Magnet etwas versetzt zu den anderen beiden stehen sollte. Dadurch lässt sich zu Beginn der Bauphase eine Verzahnung der Magnetreihen erreichen, wodurch die Abstoßung etwas geringer ist. Diese erste Reihe wird an der Kante mit Heißkleber fixiert. Nun werden die einzelnen Bahnelemente mithilfe eines Holzstabes oder Stiftes (Nichtmagnetisch!) gegeneinander geschoben. Es reicht hier aus, nach jeweils drei Bahnelementen eine Fixierung der Kanten mit Heißkleber aufzutragen. Wichtig dabei ist, diese so lange in Position zu halten, bis der Kleber vollständig erhärtet ist. In dieser Art und Weise legt man den gesamten Ring aus. Zwischendurch kann die Qualität der Bahn immer wieder mit dem Flux-Detektor überprüft werden (Abb. 1). Auf diesem dürfen keine „Verwirbelungen“ sichtbar sein, sondern durchgängige helle Linien entlang der Magnetzwischenräume in Bahnrichtung. Am Ende muss vermutlich eine kleine Lücke geschlossen werden. Dazu eignen sich würfelförmige Magnete der gleichen Dicke, die hier eingepasst werden können (Abb. 2). Abschließend wird die Bahn zur Sicherheit einmal mit Heißkleber umrandet und die Lücken zwischen den Magneten mit Sekundenkleber verfüllt. So

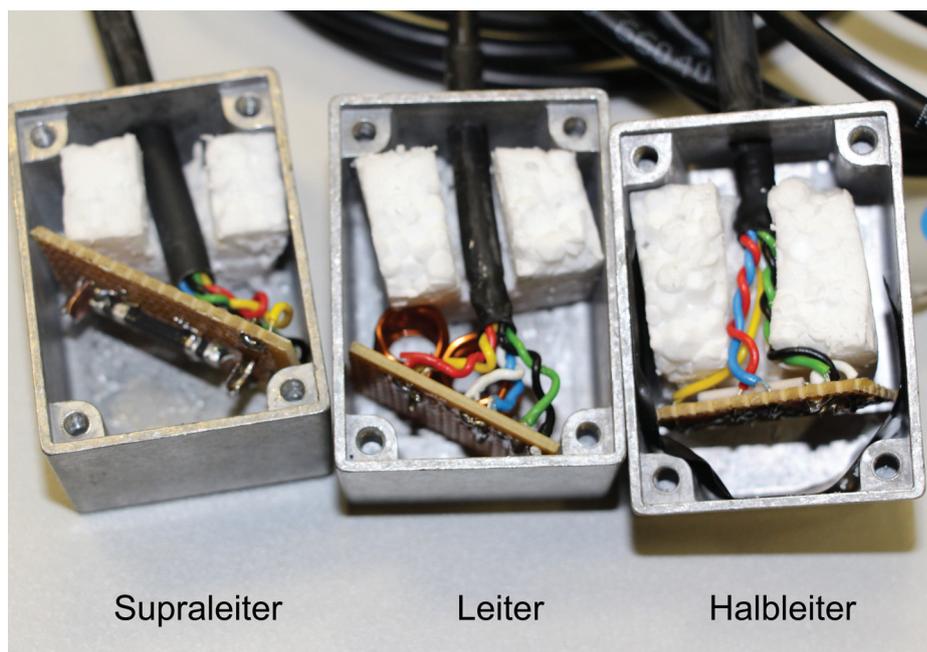


Abb. 5: Messsonden von links nach rechts: Supraleiter, Leiter, Halbleiter.

erhält man die fertige Bahn (Abb. 3). Je nach Stärke der verwendeten Magneten sollte man nun sehr vorsichtig bei der Lagerung der Bahn sein. Eine Sperrholzplatte kann bei der Lagerung zum Schutz auf die Magnetbahn gelegt werden, Chipkarten mit Magnetstreifen oder magnetisierbare Materialien sollten generell nicht in die Nähe der Bahn geraten.

Beim Bau des Zuges, in welchem der Supraleiter sitzt, sind der Kreativität keine Grenzen gesetzt. Am ökonomischsten ist die Verschlusskappe eines Klebestiftes. In diese kann der Supraleiter entweder eingeklebt oder mit einem Streichholz fixiert werden. Um diesen dann auf der Bahn fahren zu lassen, muss er beim Herunterkühlen mit flüssigem Stickstoff durch einen Abstandhalter in einer bestimmten Höhe über der Bahn gehalten werden. Dieser kann nach dem Abkühlen entfernt werden, sodass der Zug freie Fahrt hat (Abb. 4).

#### 4.2 Erweiterung eines Experimentierkits zur kritischen Temperatur

LD-Didactic bietet ein Experimentierkit zur Untersuchung der Sprungtemperatur eines Hochtemperatur-Supraleiters an [9]. Mit wenig Aufwand kann man dieses Set deutlich erweitern. Das Ziel des ursprünglichen Versuchs ist es, die Sprungtemperatur eines Hochtemperatur-Supraleiters zu bestimmen. Wir haben für diese Anordnung eine neue Messsonde gebaut, in welcher ein kleinerer Supraleiter verbaut ist. Gleichzeitig wurden baugleiche Messsonden angefertigt, in welchen Normalleiter (Kupferlackdraht) und Halbleiter (Graphit einer Bleistiftmine) verbaut sind (Abb. 5), sodass Lernende die Widerstandsverläufe in Abhängigkeit der Temperatur miteinander vergleichen können. Das Ziel des Versuchs ist es nunmehr, die Kurvenverläufe miteinander zu vergleichen, die einzelnen Materialien dahingehend zu charakterisie-

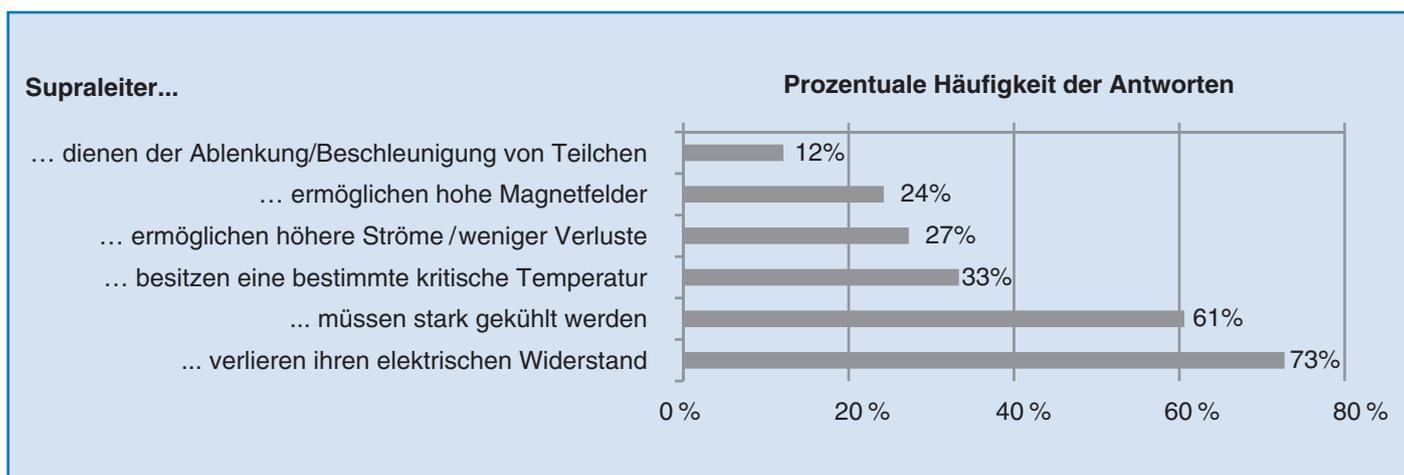


Abb. 6: Häufigste Antworten auf die Frage „Was fällt dir beim Thema Supraleitung ein?“ ( $N = 33$ ).

ren und anhand des physikalischen Vorwissens zu interpretieren. Eine detaillierte Bauanleitung der Messsonden ist online erhältlich [4].

### 4.3 Flüssiger Stickstoff im Unterricht

**Gefahren:** Flüssiger Stickstoff gilt aufgrund seiner physikalischen Eigenschaften als Gefahrenstoff. Daher ist der Umgang im Unterricht über die RiSU geregelt. Die Gefahren rühren dabei von zwei Eigenschaften her. Zum einen durch die tiefe Temperatur von  $-196\text{ °C}$  und andererseits durch die erstickende Wirkung in hohen Konzentrationen. Ein direkter Hautkontakt kann schwere Verbrennungen hervorrufen. So auch der Kontakt mit heruntergekühlten Materialien. Des Weiteren ist es möglich, dass beim Einfüllen des Stickstoffs die Aufbewahrungsgefäße durch den thermischen Schock bersten. Diese sind ähnlich einer Thermoskanne doppelwandig, wobei im Zwischenraum ein Vakuum besteht. Sollte dies bei einem solchen Gefäß mit einem Füllvolumen von 25 Liter und mehr geschehen, so sind die verdampfenden Mengen an Stickstoff so groß, dass Erstickungsgefahr besteht.

**Maßnahmen:** Beim Umgang mit flüssigem Stickstoff ist auf ausreichenden Arbeitsschutz zu achten. Dazu gehören Schutzbrille und lange Kleidung, ebenso wie Thermohandschuhe. Zudem ist für eine ausreichende Belüftung im Raum zu sorgen, um Erstickungsgefahr zu vermeiden. Beim Lagern im Dewar-Gefäß muss unbedingt darauf geachtet werden, dieses nicht dicht zu verschließen, da immer Stickstoff im Inneren verdampft.

**Bezugsquellen:** Für Versuche im Unterricht werden in der Regel kleine Mengen des flüssigen Stickstoffs verwendet. Für die Durchführung der gesamten Experimentiersequenz wird ca. 1 Liter Flüssigstickstoff pro Kleingruppe (3–4 SchülerInnen) benötigt. Eine ortsfeste Gasanlage, welche auch zusätzlicher Sicherheitsmaßnahmen bedarf, ist daher nicht nötig. Am günstigsten ist es, bei örtlichen Universitäten anzufragen, die meist einen Vorrat an flüssigem Stickstoff haben. Dieser kann dann unter geeigneten Schutzmaßnahmen in einem Dewar transportiert werden. Sollte dies nicht möglich sein, so kann auch Stickstoff bei einem industriellen Gaslieferanten bestellt werden. Diese bieten häufig Abgabe in Kleinstmengen an. Lediglich ein Dewar-Gefäß zur Lagerung muss an der Schule vorhanden sein, z. B. von [10].

### 5 Evaluation des Workshops

Die Experimentiersequenz wurde in mehreren Durchläufen mit drei verschiedenen Schülergruppen durchgeführt und evaluiert. Die Rückmeldungen der Schülerinnen und Schüler waren in allen drei Durchgängen sehr positiv. Das Vorwissen bezüglich Supraleitung war – unvermutet – durchaus vorhanden (Abb. 6).

Bei der Befragung der Jugendlichen nach der Experimentiersequenz zeigt sich hohe Zufriedenheit und ein deutlicher Wissenszuwachs. Einzig der Meißner-Ochsenfeld-Effekt wird auch nach unseren Experimenten falsch erklärt: Für viele Schülerinnen und Schüler ist seine Ursache die Abstoßung der magnetischen Felder von Magnet und Supraleiter und nicht die Verdrängung des Feldes des Magneten durch den Supraleiter unterhalb der kritischen Temperatur.

### 6 Einbettung in den Unterricht

Die Einbettung in den Unterricht kann sowohl in der Sekundarstufe I als auch in der Sekundarstufe II stattfinden. In der Sekundarstufe I werden die grundlegenden Kenntnisse der Elektrizität vermittelt. Dazu gehören Grundlagen zur elektrischen Energie, den Ladungsträgern, einem Teilchenmodell, dem Transport elektrischer Energie und den fundamentalen Größen Spannung, Strom und Widerstand. Hier bietet es sich an, den Versuch zur kritischen Temperatur zu integrieren. So können Schülerinnen und Schüler dann gleichzeitig die Eigenschaften verschiedener Materialklassen im Hinblick auf den elektrischen Widerstand erkennen und interpretieren. Die Überleitung zur Elementarteilchenphysik ist aber aufgrund mangelnder Fachkenntnis schwierig. Dies ist aber in der Sekundarstufe II ohne weiteres möglich. Hier wird zudem nahezu der gleiche Anknüpfungspunkt verwendet, da auch hier die Elektrizität erneut behandelt wird. Allerdings werden nun tiefergehende Themen wie Induktion und das Verhalten elektrisch geladener Teilchen in Feldern besprochen. Dies bietet die Möglichkeit, den Meißner-Ochsenfeld-Effekt mit der Lenz'schen Regel zu verbinden und damit thematisch zur Teilchenphysik überzuleiten.

### 7 Fazit und Ausblick

Es ist relativ einfach möglich, mithilfe der Supraleitung Jugendlichen einige Aspekte der modernen Physik und aktueller Technologien näher zu bringen. Dabei können hands-on-Experimente eingesetzt werden, deren Erklärung Konzepte der klassischen und der modernen Physik verbindet. Für Jugendliche sind nicht nur die Anwendun-

gen dieser Technologie, zum Beispiel im LHC am CERN, spannend, sondern auch der Umgang mit flüssigem Stickstoff. ■

### Dank

Ein großer Dank gilt abschließend dem Team des S'Cool LAB am CERN, welches uns die Entwicklung und Durchführung der Experimentiersequenz ermöglicht hat und stets mit Unterstützung zur Seite stand. Besonderer Dank gilt auch Prof. Dr. Claus Grupen der Universität Siegen, der sich bereit erklärt hat, Porträtzeichnungen von Walter Meißner und Robert Ochsenfeld für das Arbeitsheft anzufertigen.

### Literatur

- [1] Wiener, G. J., Woithe, J., Brown, A., & Jende, K. (2016). *Introducing the LHC in the classroom: an overview of education resources available*. *Physics Education*, 51 (3), 035001.
- [2] Rossi, L. (2010). *Superconductivity: its role, its success and its setbacks in the Large Hadron Collider of CERN*. *Super-conductor Science and Technology*, 23(3), 034001.
- [3] S'Cool LAB <http://cem.ch/s-cool-lab>
- [4] Das Arbeitsblatt sowie weitere Materialien inklusive diverser Bauanleitungen sind online erhältlich unter <http://cem.ch/s-cool-lab/content/downloads>
- [5] White, R. T., Gunstone, R. F., & Oversby, J. (1994). *Probing understanding*. *International Journal of Science Education*. 16 (1). 123
- [6] z. B. bei [supermagnete.de](http://supermagnete.de)
- [7] Wir haben 575 Quadermagnete von [supermagnete.de](http://supermagnete.de) verwendet (Q-20-10-05-N, 20 x 10 x 5 mm, ca. 380 €). Zum Füllen der Lücken der Bahn werden dann maximal 10 kleine Würfelmagnete benötigt (W-05-N, 5 x 5 x 5 mm, ca. 4 €). Für die geraden Teststrecken der Jugendlichen verwenden wir je 20 selbstklebende Quadermagnete (Q-20-10-01-STIC, 20 x 10 x 1 mm, ca. 8 €). Der Supraleiter kann über stärkeren Magneten höher und stabiler zum Schweben gebracht werden, zur Demonstration des Prinzips reichen aber bereits relativ schwache Neodymmagneten aus, wie zum Beispiel die hier angeführten selbstklebenden Quadermagnete.
- [8] Wir haben die Levitation Disk CSYL-14 (YBCO, 80 €) von [www.can-superconductors.com](http://www.can-superconductors.com) verwendet.
- [9] <http://www.leybold-shop.de/vp7-2-6-1.html>
- [10] Dewar von SIGMA-ALDRICH (5 l, ca. 640 €) <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/z150819>

### Anschriften der Verfasser

Magnus Reifenrath, Christopher Weller, Universität Siegen, Julia Woithe, Teacher and Student Programmes Section, CERN, Genève 23, Schweiz  
E-Mail: [magnus.reifenrath@student.uni-siegen.de](mailto:magnus.reifenrath@student.uni-siegen.de); [christopher.weller@student.uni-siegen.de](mailto:christopher.weller@student.uni-siegen.de); [julia.woithe@cern.ch](mailto:julia.woithe@cern.ch)