

## Das Unsichtbare sichtbar machen – technologiegestützte Visualisierung von Spin- und Magnetismusphänomenen

Anna Donhauser, Carina Heisel, Katrin Hochberg, Jochen Kuhn

AG Didaktik der Physik, Fachbereich Physik, TU Kaiserslautern  
donhauser@physik.uni-kl.de

### Kurzfassung

Der DFG-Sonderforschungsbereich Spin+X untersucht interdisziplinär Spin-Phänomene von der Grundlagenforschung bis hin zur technologischen Anwendung. Die Physikdidaktik der TU Kaiserslautern übernimmt dabei mit Spin+Education die Vermittlung der Forschungsinhalte durch Wissenschaftskommunikation und im Rahmen eines Schülerlabors. Die bislang entwickelten Experimentiermodule für die Unter- und Oberstufe behandeln als Schwerpunkt Magnetismus bzw. moderne, Spin-basierte Analysemethoden. Die Konzeption der Module verfolgt das Ziel, die Schulausbildung im Bereich Magnetismus und Spin-Phänomene zu verbessern, um motivierte und kompetente Schüler\*innen für ein MINT-Studium zu gewinnen. Mit einem Experimentiermodul zur Erarbeitung des Spin-Begriffes wird das Schülerlabor für die Mittelstufe erweitert. Inhaltliche Bezüge zum schulischen Lehrplan werden dabei ebenso genutzt wie die Verknüpfung zum Forschungsalltag in Spin+X. Ein wichtiger Aspekt der zweiten Förderphase ist die Visualisierung Spin-basierter Phänomene innerhalb der Lernmodule mittels immersiver Technologien (VR/AR). Die bestehenden Experimentiermodule, sowie die Erweiterung des Schülerlabors von Spin+Education werden vorgestellt.

### 1. Sonderforschung im Sinne des Magnetismus

Im Sonderforschungsbereich Spin+X finden sich verschiedene wissenschaftliche Disziplinen, die gemeinsam Spinphänomenen auf den Grund gehen [1]. Von der Analyse und dem gezielten Design mikroskopischer, Spin-basierter Eigenschaften bis hin zur makroskopischen Funktionalität kooperieren dabei Wissenschaftler\*innen der Physik, Chemie und Ingenieurwissenschaft im Sinne des Advanced Spin Engineering. Die Forschungsinhalte lassen sich in zwei Forschungsgebiete gliedern: Forschungsgebiet A behandelt grundlegende Spinphänomene wie die Spin-Bahn-Wechselwirkung als fundamentale Basis des Magnetismus, während sich das Forschungsgebiet B auf anwendungsorientierte, funktionale Zusammenhänge fokussiert.

Um die komplexen Forschungsinhalte auch für Menschen zugänglich zu machen, die keine Mitarbeiter\*innen des Sonderforschungsbereiches sind, übernahm die Arbeitsgruppe Didaktik der Physik die Aufgabe der Didaktischen Rekonstruktion, um das Bewusstsein für Magnetismus und Spinphänomene sowohl in der breiten Öffentlichkeit als auch bei Schüler\*innen und Lehrkräften zu fördern. Unter dem Namen Spin+Education werden spannende Erkenntnisse der Spin+X-Forschung sowohl als Outreach-Projekt als auch auf Schulebene aufbereitet. Nachfolgend werden beide Bereiche von Spin+Education vorgestellt.

### 2. Das Thema „Spin+X“ für die breite Öffentlichkeit

Spin+Education nimmt regelmäßig an regionalen und überregionalen Veranstaltungen mit Wissenschaftsbezug teil. Ziel der Präsentation von Spin+X auf diesen Veranstaltungen ist es, der lokalen Bevölkerung zu veranschaulichen, mit welchen Forschungsgebieten sich der Sonderforschungsbereich beschäftigt und wie die Ergebnisse dieser Forschung in den Alltag Einzug halten könnten. Dazu wurden verschiedene Demonstratoren entwickelt.

#### 2.1 Demonstrator „Phasenumwandlung in Stahl“

Das Phänomen, dass Stahl bei einer Belastung durch Biegen oder Brechen seine magnetischen Eigenschaften ändert, ist Gegenstand aktueller Forschung, unter anderem von Spin+X.

Der Demonstrator zum Thema „Phasenumwandlung in Stahl“ besteht aus kleinen Stahlplättchen, einmal in flacher Form („Urzustand“ aus der Produktion) und einmal nachdem sie in der Mitte mehrfach hin und her gebogen wurden (vgl. Abb. 1). Außerdem liegen kleine Magnete bereit. Interessierte Besucher können selbst austesten, dass die ungebogenen Metallplättchen nicht magnetisch sind. Die Biegestelle wird allerdings vom Magneten angezogen (die ungebogenen Enden der gleichen Probe sind nach wie vor nicht magnetisch).



**Abb. 1:** Demonstrator zur Phasenumwandlung in Stahl. Links: drei ungebogene, flache Stahlplättchen, rechts: drei gebogene, magnetische. Vorne liegen zwei Magnete mit Spin+X-Logo und die Spielzeugeisenbahn hinten dient der Veranschaulichung des Anwendungsgebietes.

Die Plättchen bestehen im Urzustand aus sogenanntem austenitischem, paramagnetischem Stahl. Auf makroskopischer Ebene sind die Plättchen nicht magnetisch. Das Verbiegen verändert die innere Struktur des Materials und damit auch seine Eigenschaften: Die Anordnung der Spins verändert sich, der Stahl wird martensitisch und damit ferromagnetisch. Ferromagnetische Materialien werden von Magneten angezogen, was man an der Biegestelle deutlich sehen kann.

Eine Anwendung für dieses Phänomen ist die einfache und sichere Überprüfung von ICE-Rädern, bei denen bereits mikroskopische Risse fatale Folgen haben können.

## 2.2 Demonstrator „Taipeh-Tower“

GMR-Sensoren (GMR = giant magnetoresistance, Riesenmagnetowiderstand) sind eine der am weitesten verbreiteten Anwendungen von Spin-Phänomenen im Alltag. Sie kommen z. B. im Auto vor, werden zur Positionsbestimmung verwendet (z. B. bei Fahrstuhlsensoren) oder in magnetischen Speichermedien eingesetzt.

Der Taipei 101 Tower in Taipeh, Taiwan, beispielsweise verfügt über Aufzüge, die zu den schnellsten der Welt gehören. Personen werden mit einer Geschwindigkeit von bis zu 60 km/h in den 89. Stock und mit etwa 36 km/h wieder Richtung Erdgeschoss transportiert. In diesen Aufzügen sorgen GMR-Sensoren dafür, dass der Fahrstuhl auf exakt der richtigen Höhe hält, um die Türen zu öffnen, so dass es beim Ein-/Ausstieg keine Stolperkante gibt. Außerdem kann damit die Geschwindigkeit überwacht und bei Fehlfunktionen die Sicherheitsbremse ausgelöst werden – alles fast wartungsfrei und mit hoher Lebensdauer.

Im Spin+X-Demonstrator des Taipei 101 Towers (s. Abb. 2) ist ebenfalls ein GMR-Sensor am Modell-

Aufzug angebracht. Alle für die Funktion wichtigen Bauteile sind gut zu sehen und ermöglichen eine einfache und leicht zugängliche Erklärung des GMR. Der Demonstrator wird dazu benutzt, um den GMR und seine Bedeutung im Alltag zu verdeutlichen und so die physikalischen Grundlagen und die Bedeutung der Spinforschung zu erläutern.



**Abb. 2:** Modell des Taipei 101 Tower zur Veranschaulichung des GMR-Sensors.

## 2.3 Demonstrator „Festplatte mit Sichtfenster“

Auch die (HDD-)Festplatte ist eine Alltagsanwendung des GMR-Sensors (s. Abschn. 2.2). Informationen werden vom Computer in ein binäres Format mit Nullen und Einsen umgewandelt, um verarbeitet werden zu können. Diese Nullen und Einsen werden mit Nord- und Südpolen magnetisch auf der Oberseite der Festplatte kodiert. Im Lesekopf der Festplatte befindet sich ein GMR-Sensor, der die Veränderung zwischen Nord- und Südpolabschnitten registrieren und wieder zurück in Nullen und Einsen umwandeln kann.

Zum anschaulichen Einstieg in ein Gespräch über Spinforschung mit interessierten Besuchern wird als Demonstrator eine HDD-Festplatte mit integriertem Sichtfenster verwendet (s. Abb. 3). Durch das Fenster kann der Lesekopf bei Schreib- und Leseprozessen beobachtet werden. Dazu werden idealerweise einige Dateien von einer Partition der Festplatte auf eine andere kopiert. Zusätzliche Informationen über Geschwindigkeit des Lesekopfes und seiner Höhe über der Festplattenoberfläche wecken darüber hinaus das Interesse technisch interessierter Menschen.

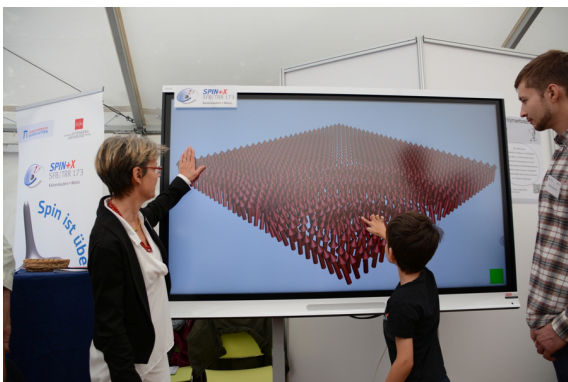


**Abb. 3:** HDD-Festplatte mit Sichtfenster, durch das der Lesekopf beobachtet werden kann.

## 2.4 Demonstrator „Spinwellen-Animation“

Spin+X erforscht neue Formen der Elektronik, mit denen man schnellere, kleinere und energieeffizientere und damit umweltfreundlichere Bauteile herstellen kann: Spintronik und Magnonik. In der herkömmlichen Elektronik wandern Elektronen durch einen Leiter. Die Ladung der Elektronen wird dazu benutzt, Information zu übertragen. In der Spintronik wird zur Informationsübertragung nicht mehr die Ladung der Elektronen ausgenutzt, sondern ihr Spin. Die Magnonik geht noch einen Schritt weiter: Hier werden Spinwellen, sogenannte Magnonen, benutzt, um Informationen zu übertragen.

Solche Spinwellen haben mehrere Vorteile gegenüber der gewöhnlichen Elektronik: Der Hauptvorteil ist, dass die Elektronen sich nicht mehr fortbewegen müssen. Zur Veranschaulichung von Spinwellen wurde ein Demonstrator programmiert, der die Propagation von Spinwellen auf einem Smartboard darstellt (vgl. Abb. 4). Die Spins in einem Material werden dabei als ein Array aus beweglichen Pfeilen visualisiert. Tippt eine Person einen der Pfeile auf dem Smartboard an, entsteht eine Spinwelle, die sich über die gesamte Anordnung ausbreitet, ohne dass die einzelnen Spins ihren Platz verlassen.



**Abb. 4:** Ein Kind benutzt das Smartboard mit der Spinwellen-Animation und erhält eine physikalische Erklärung von einer Wissenschaftlerin.

Durch Spinwellen wird ein großer Nachteil der Elektronik umgangen: Wenn die Elektronen sich durch den

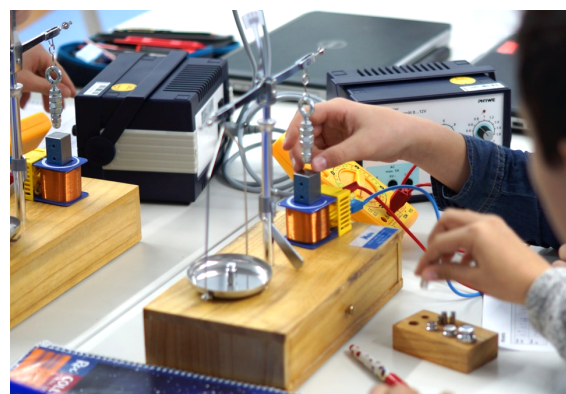
Leiter bewegen, stoßen sie immer wieder mit den Atomen des Leiters zusammen. Dadurch wird zum einen ihre Geschwindigkeit begrenzt und zum anderen entsteht Wärme. Durch die Stöße (die wir insgesamt als Widerstand bezeichnen) geht also Energie „verloren“. Mit den Spinwellen können Informationen mit höherer Geschwindigkeit und fast ohne Widerstand, also ohne Energieverlust, übertragen werden. Diese Eigenschaft lässt sich mit Hilfe des Demonstrators leicht verständlich der breiten Öffentlichkeit erklären.

Darüber hinaus haben Spinwellen noch den Vorteil, dass sich mehrere Spinwellen ungestört überlagern können. Das kann man in der Animation sehen, indem mehrere Spinwellen gleichzeitig angeregt werden. Man kann also gleichzeitig mehrere Informationen in einem Leiter transportieren, auch das ist mit herkömmlicher Elektronik nicht möglich.

Da eine Welle durch ihre Amplitude und ihre Phase beschrieben wird, kann man mit jeder Spinwelle nicht nur eine, sondern gleich zwei Informationen übertragen. Insgesamt ermöglicht der Demonstrator somit die Veranschaulichung vieler verschiedener Vorteile von Spinwellen gegenüber herkömmlicher Elektronik. Er hilft dabei, Spinforschung der allgemeinen Öffentlichkeit bekannt zu machen und den Nutzen der Forschung für die Allgemeinheit zu verstehen.

## 3. Spin+X im Schülerlabor

Die fachdidaktische Arbeit von Spin+X konzentriert sich auf die Interaktion mit Schulklassen und Schüler\*innengruppen im Rahmen eines Schülerlabors. In Abhängigkeit von der besuchenden Jahrgangsstufe werden den Inhalten des Lehrplans entsprechende Module bearbeitet. Für ein nachhaltiges Lernangebot bereiten Erklärvideos und Arbeitshefte den Schülerlaborbesuch vor und nach.



**Abb. 5:** Experimentieren im Unterstufenmodul: Schüler\*innen testen, welches Gewicht ein Elektromagnet „tragen“ kann.

### 3.1 Grundlegende Magnetismus-Phänomene

Die makroskopische Wirkung der mikroskopischen Spinphänomene lässt sich bereits in der sechsten Jahrgangsstufe experimentell erkunden. In den Modulen für die jüngsten Schüler\*innen wird



beispielsweise die Abhängigkeit der Magnetfeldstärke eines Elektromagneten von der Stromstärke untersucht. Dafür testen die Experimentierenden, wie viele kleine Gewichte ein Elektromagnet „tragen“ kann (s. Abb. 5). Hier kann ein erstes Gespür für die Dimensionierungen der Stärke des Magnetfeldes eines Elektromagneten entwickelt werden. Magnetische Spielereien mit Ferrofluiden, einem Mini-Elektromotor, schwebenden Globen und einer Gauß-Kanone ergänzen das Modul. Neben der Vermittlung grundlegender, magnetischer Wirkungszusammenhänge soll den Schüler\*innen ein Einblick in den Forschungsalltag gewährt werden. Während des Experimentierens wird dafür in Anlehnung an das wissenschaftliche Vorgehen in Forschungseinrichtungen ein Versuchsprotokoll angefertigt. An die Experimentierphase schließt sich eine Führung durch Laboratorien an.

### 3.2 Einblicke in moderne Forschungsmethoden

Für die 12./13. Jahrgangsstufe (v.a. Leistungskurse) wurde das Themenmodul „Reingeschaut!“ konzipiert. Mit dem Blick auf die gängigen Analysemethoden der Spin+X-Forschung werden die Experimentierenden an Forschungsprozesse und funktionale Zusammenhänge herangeführt, die über die Inhalte des Lehrplans hinausgehen. Für die Durchführung notwendige Grundlagen werden durch Erklärvideos vermittelt, die der betreuenden Lehrkraft vorab zukommen und entsprechend in den Unterricht integriert werden können. Nachfolgend werden die vier großen Themengebiete dieses Moduls vorgestellt. Für jedes Themengebiet gibt es einen Vorversuch, der die grundlegende Funktionsweise der jeweiligen Analysemethode modellhaft vermittelt. Die anschließenden Hauptversuche bieten die Möglichkeit durch High-End-Geräte in kleinste Strukturen „reinzuschauen“.

#### 3.2.1 Magnetische Rasterkraftmikroskopie

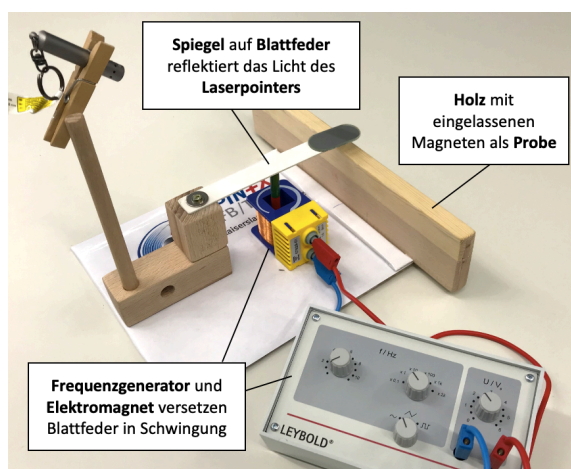


Abb. 6: Modellversuch zum magnetischen Rasterkraftmikroskop.

Ein magnetisches Rasterkraftmikroskop nutzt die magnetische Wechselwirkung zwischen der Oberfläche der zu untersuchenden Probe und der magnetisierten Mikroskopspitze, mit der diese Oberfläche in Rasterbewegungen abgefahren wird. Dieses Prinzip wird in einem Vorversuch (Abb. 6) nachempfunden. Im Modellexperiment dient eine Blattfeder als Mikroskopspitze, an deren Unterseite ein kleiner Stabmagnet befestigt ist, während ein Spiegel auf der Oberseite das Licht eines Laserpointers auf eine Skala reflektiert. Ein Frequenzgenerator versetzt die Blattfeder mit Hilfe eines Elektromagneten in Schwingung. Als Probe dient ein Holzstück mit eingelassenen Magneten, deren unsichtbare Anordnung mit Hilfe des Modell-Rasterkraftmikroskops analysiert werden kann.

Im Hauptversuch wird mit einem professionellen MFM (Magnetic Force Microscopy) experimentiert.

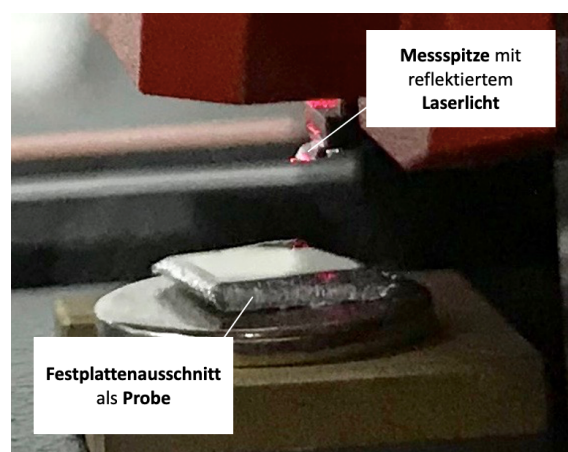


Abb.7 : Scanningeinheit des MFM.

Abbildung 7 zeigt einen Blick auf die Einheit des MFM, mit der die unbekannte Oberfläche in Rasterbewegungen analysiert wird. Der Ausschnitt einer Festplatte dient als Probe, deren Speicherstrukturen die Schüler\*innen untersuchen.

#### 3.2.2 Elektronenspinresonanz

Stoffkonzentrationen einer Probe und daraus rückschließend das Alter eines archäologischen Fundes oder die Radikalenbelastung von Lebensmitteln können mit Hilfe der Elektronenspinresonanz bestimmt werden. Die zu untersuchende Substanz, die ungepaarte Elektronen und folglich permanente magnetische Momente enthält, befindet sich in einem äußeren Magnetfeld. Eingestrahelte, elektromagnetische Wellen geeigneter Frequenz sorgen für einen energetischen Übergang zwischen zwei Spinzuständen. Dieser Umklappmechanismus wird im Vorversuch wie in Abbildung 8 dargestellt modelliert.

Ein Stabmagnet in einer Billardkugel dient als Analogie für den Spin. Während die Experimentieranleitung wiederholend die Grenzen dieses Modells betont, werden die Schüler\*innen schrittweise angewiesen, die Einzelkomponenten eigenständig zu



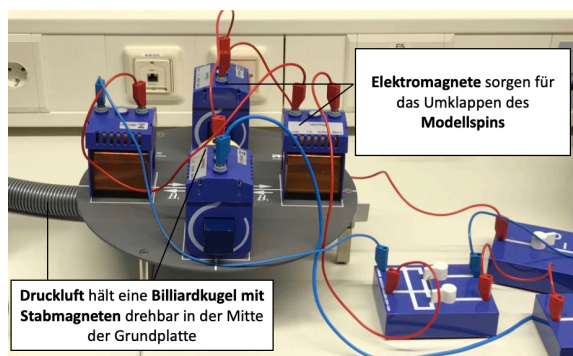


Abb. 8: Modellversuch zur Elektronenspinresonanz.

verschalten. Vier Elektromagnete und deren gezieltes Umpolen sorgen für eine Simulation des Umklappprozesses des Modellspins, der mittels eines Druckluftkompressors drehbar auf einem Luftkissen gehalten wird.

Das Hauptexperiment beschäftigt sich mit der Bestimmung des Landéschen Faktors für eine Probe aus Diphenylpicrylhydrazyl. Dieses DPPH beinhaltet freie Radikale, ist aber gleichzeitig stabil und damit für die Analyse mittels Elektronenspinresonanz besonders geeignet.

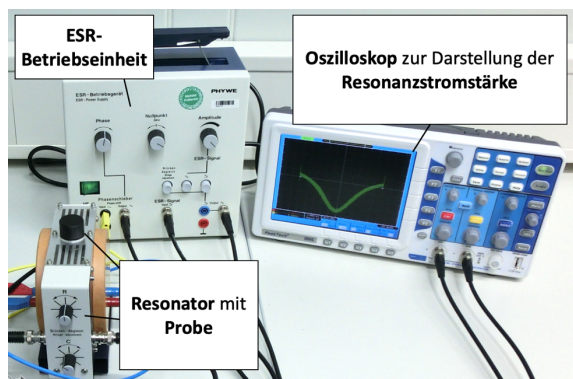


Abb. 9: Messaufbau zur Bestimmung der Resonanzstromstärke.

Abbildung 9 zeigt ausschnitthaft die entsprechende Messanordnung [2], die unter bebildeter Instruktion von den Experimentierenden selbst aufgebaut wird. Die Schüler\*innen ermitteln experimentell die Resonanzstromstärke und berechnen daraus den g-Faktor der Probe.

### 3.2.3 Magnetresonanztomographie

Durch seinen berühmten Vertreter in der Medizintechnik erfreut sich die Magnetresonanztomographie größerer Bekanntheit als die bisher vorgestellten Analysemethoden. In einem äußeren Magnetfeld werden die Kernspins der zu untersuchenden Probe ausgelenkt. Die stoffabhängige Relaxationszeit, die einzelne Spins für den Rückgang vom ausgelenkten in den Gleichgewichtszustand benötigen, wird als Information für die Erstellung einzelner Aufnahmen der Tomographie genutzt. Eine solche Aufnahme stellt eine Schicht der Probe dar. Eine Abbildung der

dreidimensionalen Struktur ergibt sich entsprechend aus dem Zusammenfügen einzelner Schichten.

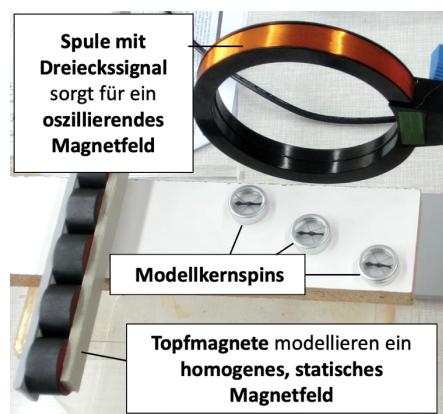


Abb. 10: Modellversuch zur Magnetresonanztomographie mit einem oszillierenden Magnetfeld.

Abbildung 10 zeigt einen vorbereitenden Modellversuch. Kompassnadeln modellieren Kernspins, die in verschiedenen Abständen von einer Leiste mit Topfmagneten platziert werden. Folglich sind diese Modellspins unterschiedlichen Stärken dieses äußeren, homogenen Magnetfeldes ausgesetzt. Senkrecht zur Orientierung dieses Magnetfeldes sorgt eine mit Dreiecksspannung betriebene Spule für ein oszillierendes Magnetfeld. Dabei ergibt sich folgender Zusammenhang: Während die Kompassnadeln durch das oszillierende Magnetfeld ausgelenkt und zum Schwingen angeregt werden, dämpft das homogene Magnetfeld diese Schwingung. Je näher sich die Modellspins an den Topfmagneten befinden, desto größere Frequenzen des oszillierenden Feldes sind nötig, um eine Resonanz beobachten zu können. Diese Resonanzerscheinung macht sich durch die vollständige Rotation der Kompassnadel um die eigene Achse bemerkbar.

Im Hauptversuch können die Schüler\*innen eigene Magnetresonanztomographie-Bilder einer unbekannt Probe aufnehmen. Eine Herausforderung des Messvorgangs bildet die notwendige Abstimmung der Frequenz des eingestrahlten Pulses auf die Frequenz der präzedierenden Kernspins in der Probe, die sogenannte Larmorfrequenz.

### 3.2.4 Das Rastertunnelmikroskop

Analog zum magnetischen Rasterkraftmikroskop analysiert die kleine Spitze eines Rastertunnelmikroskops – kurz STM für *scanning tunneling microscopy* – eine Probe in Rasterbewegungen. Zwischen der Spitze des STM und der kontaktlosen Probe fließt ein elektrischer Strom. Die Stärke dieses sogenannten Tunnelstroms wird durch den Abstand zwischen Probe und Spitze und die lokale Elektronenzustandsdichte beeinflusst und dient so als Signal zur Abbildung der elektrisch leitfähigen Probe.

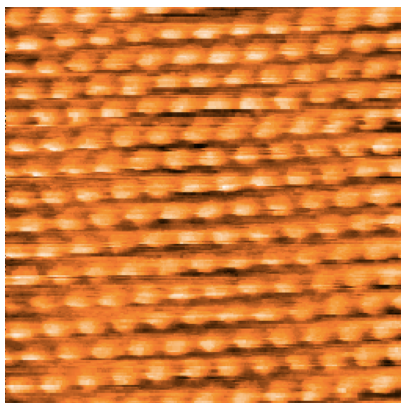
Ein akustisches Modellversuch<sup>11</sup> verdeutlicht die Funktionsweise des Rastertunnelmikroskops. Als



**Abb. 11:** Modellexperiment zur Funktionsweise des Rastertunnelmikroskops.

Messprobe dienen leeren Joghurtflaschen (vgl. Abb. 11), über die eine Modellmessspitze in Form eines Kopfhörers kombiniert mit einem Headset-Mikrofon bewegt wird. Anstelle der angelegten Spannung zwischen Probe und Spitze wird über den Kopfhörer eine Frequenz von 600 Hz auf die Modellprobe eingestrahlt. Diese Frequenz entspricht der Eigenfrequenz der Flaschen, die wiederum eine Analogie der lokalen Elektronenzustandsdichte darstellt. Das Mikrofon detektiert die Lautstärke als Entsprechung der Tunnelstromstärke. Das detektierten Lautstärken lassen auf das Höhenprofil der Probe rückschließen.

Im Hauptexperiment untersuchen die Schüler\*innen mit dem Rastertunnelmikroskop eine Probe hochorientierten Graphits zur Bestimmung der Atomabstände. Während des Messvorgangs im sogenannten *Constant Current Mode* wird der Abstand zwischen

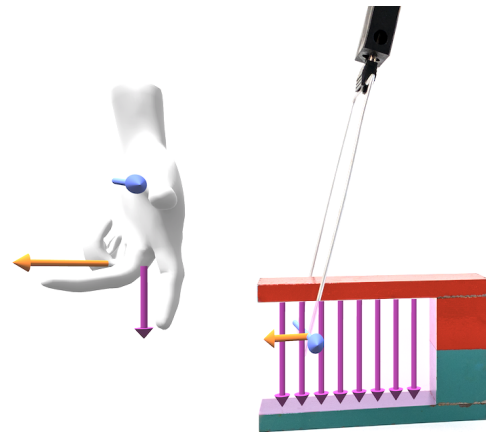


**Abb. 12:** STM-Aufnahme einer Probe aus hochorientiertem Graphit. Der Bildausschnitt zeigt eine Fläche von 2,78 x 2,78 nm.

Probe und Messspitze so variiert, dass ein konstanter Wert für die Tunnelstromstärke detektiert werden kann. Um ein wie in Abbildung 12 dargestelltes, optimiertes Bild der Probe zu generieren, müssen Messfehler wie eine verunreinigte Spitze oder Staub auf der Probe erkannt und behoben werden.

### 3.3 VR/AR Experimente zum Elektromagnetismus

Rund um das Thema Elektromagnetismus und die Darstellung von Magnetfeldern werden derzeit Experimente konzipiert, die durch visuelle, digitale Unterstützungen ergänzt werden. Die thematischen Inhalte der Experimente reichen dabei von biophysikalischen Schwerpunkten wie dem Magnetsinn der Tiere bis hin zur magnetbasierten Sensorik. Anhand des Leiterschaukel-Experiments zur Demonstration der Lor-



**Abb. 13:** Das Leiterschaukelexperiment in einer AR-Experimentierumgebung.

entkraft wurden erste Schritte zur digitalisierten Erweiterung der Experimentierumgebung unternommen. Abbildung 13 zeigt den Blick durch eine Holo-Lens der Firma Microsoft. Derartige Mixed-Reality-Brillen ermöglichen die Verknüpfung des Realexperiments mit einer digitalen Visualisierung [4-8]. Im Fall des Leiterschaukelexperimentes werden die Richtung des elektrischen Stromes, die Orientierung des Magnetfeldes und schließlich die Bewegungsrichtung des Leiters virtuell ergänzt. Der Mehrwert solcher Visualisierungen liegt in der Vermeidung und Begegnung bekannter Fehlkonzepte. Im Gegensatz zur Bewegung der Leiterschaukel bleiben das Magnetfeld des Hufeisenmagneten, der elektrische Stromfluss und das zugehörige Magnetfeld um die Leiterschaukel herum unsichtbar. Gerade zu physikalischen Phänomenen, die unsere Sinne nicht wahrnehmen können, entwickeln Schüler\*innen mentale Konzepte, die der physikalischen Fachlichkeit widersprechen [3]. Im Rahmen dieser Erhebungen zu Fehlkonzepten werden besonders Lernschwierigkeiten im Umgang mit dem abstrakten Feldbegriff deutlich. Die Visualisierung der abstrakten Felder und deren Wirkungsrichtung im elektromagnetischen Zusammenhang soll die Schüler\*innen dabei unterstützen, physikalisch richtige mentale Konzepte und Lösungsstrategien zu entwickeln.

Mit Hilfe von Mixed-Reality-Brillen können Realitäts- und Modellebene verknüpft und gleichzeitig im

Sinne der haptischen Kodierung [9,10] Lerninhalte über den Tastsinn erfahrbar gemacht.

#### 4. Spin im Ausblick

Da dem Sonderforschungsbereich Spin+X eine weitere Förderperiode zugesprochen wurde, kann sich auch das zugehörige Ö-Teilprojekt „Spin+Education“ weiterentwickeln. In beiden Bereichen von Spin+Education halten dabei Eye-Tracking, Virtual und Augmented Reality vermehrt Einzug.

##### 4.1 Ausblick für Angebote für die breite Öffentlichkeit

In der zweiten Förderphase des Sonderforschungsbereiches wird der bestehende Showcase um neue immersive Technologien (virtuelle Realität, VR / augmentierte Realität, AR) erweitert. Dazu werden bestehende Demonstratoren erweitert und neue aufgebaut.

Ein bereits vorhandener Demonstrator des aktuellen Showcase, der sich für die Umsetzung mit immersiven Technologien eignet, ist die Spinwellen-Animation auf dem Smartboard visualisiert. Diese Visualisierung ist sehr hilfreich für die Erklärung von Spinwellen und Magnonik [12]. Mit Hilfe von virtueller Realität können Personen mitten in oder direkt über eine Spinwelle versetzt werden. Die Intensität des Erlebnisses wird erhöht, indem die Personen vollständig in eine 3D-Visualisierung eintauchen.

Darüber hinaus ist ein neuer Demonstrator geplant, der die Ausbreitung von Spinwellen in einem Material mit Hilfe einer Infrarotkamera sichtbar machen kann. Hierbei kann Augmented Reality genutzt werden, um die Spinwellen-Propagation im Material mittels präzedierender Pfeile darzustellen. Diese Darstellung kann dabei helfen, das zugrunde liegende Phänomen besser zu verstehen [13]. Verglichen mit der bestehenden Smartboard-Spinwellen-Animation wird dies den Vorteil haben, dass die Menschen eine Echtzeit-Darstellung einer realen Spinwelle in einem Medium sehen und diese manipulieren können.

##### 4.2 Ausblick für Lernmodule im Schülerlabor

Auch die Experimente der Schülerlabormodule werden um virtuelle Lernhilfen erweitert. Zentrale Inhalte bilden dabei die Visualisierung elektromagnetischer Zusammenhänge, Bewegungen geladener Teilchen in magnetischen und elektrischen Feldern, die Superposition magnetischer Felder und die Integration symbolischer Repräsentationen. Um lernwirksame AR-Unterstützungen zu konzipieren, werden Lernschwierigkeiten vorbereitend durch Konzepttests ermittelt. Die Auswahl der Experimente orientiert sich dabei immer an den Forschungsschwerpunkten von Spin+X.

#### 5. Literatur

- [1] Homepage der TU Kaiserslautern zum Sonderforschungsbereich Spin+X: <https://www.uni-kl.de/trr173/> (Stand: 5/2020)
- [2] ESR-Resonator mit Feldspulen (09050-00) und ESR-Betriebsgerät (09050-93) der Firma Phywe
- [3] Hopf, M.; Wilhelm, T. (2018). Schülervorstellungen zu Feldern und Wellen. In: Schülervorstellungen und Physikunterricht, S. 186-205
- [4] Kapp et al. (2019). Augmenting Kirchoff's laws: Using augmented reality and smartglasses to enhance conceptual electrical experiments for high school students. In: Phys. Teach. 57, 52
- [5] Strzys, M. P., Kapp, S., Thees, M., Klein, P., Lukowicz, P., Knierim, P., Schmidt, A. & Kuhn, J. (2018). Physics holo.lab learning experience: Using Smartglasses for Augmented Reality labwork to foster the concepts of heat conduction. Eur. J Phys. 39 (3), 035703.
- [6] Strzys, M. P., Kapp, S., Thees, M., Lukowicz, P., Knierim, P., Schmidt, A. & Kuhn, J. (2017). Augmenting the thermal flux experiment: A mixed reality approach with the HoloLens Phys. Teach. 55 (2017), 376-377.
- [7] Thees, M., Kapp, S., Strzys, M. P., Beil, F., Lukowicz, P. & Kuhn, J. (2020). Effects of augmented reality on learning and cognitive load in university physics laboratory courses. Computers in Human Behavior 108 (2020), 106316.
- [8] Kuhn, J., Lukowicz, P., Hirth, M., Poxrucker, A., Weppner, J. & Younas, J. (2016). gPhysics – Using Smart Glasses for Head-Centered, Context-Aware Learning in Physics Experiments. IEEE Transactions on Learning Technologies 9 (4), 304-317
- [9] Harnad, S. (1990). The symbol grounding problem. In: Physica D: Nonlinear Phenomena, 42(1), S. 335–346
- [10] Goldstone, R. L.; Schyns, P. G.; Medin, D. L. (1997). Learning to bridge between perception and cognition. In: Psychology of Learning and Motivation, 36, S. 1–14.
- [11] Thees, M., Hochberg, K., Aeschlimann, M. & Kuhn, J. (2017). Adaptation of acoustic model experiments of STM via smartphones and tablets Phys. Teach. 55 (2017), 477-478.
- [12] Ainsworth, S. (2006). DeFT: A conceptual framework for considering learning with multiple representations. In: Learning and Instruction, 16(3), 183–198. doi:10.1016/j.learninstruc.2006.03.001
- [13] De Jong, T., Linn, M. C., Zacharia, Z. C. (2013). Physical and Virtual Laboratories in Science and Engineering Education. In: Science, 340(6130), 305–308. doi:10.1126/science.1230579



### **Danksagung**

Das Projekt wird gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – TRR 173 – 268565370 (Projekt Ö)