

FESTKÖRPERPHYSIK

Die Sonde aus der Antiwelt

Mit Positronen lassen sich Fehlstellen in Kristallen aufspüren und elektronische Strukturen bestimmen.

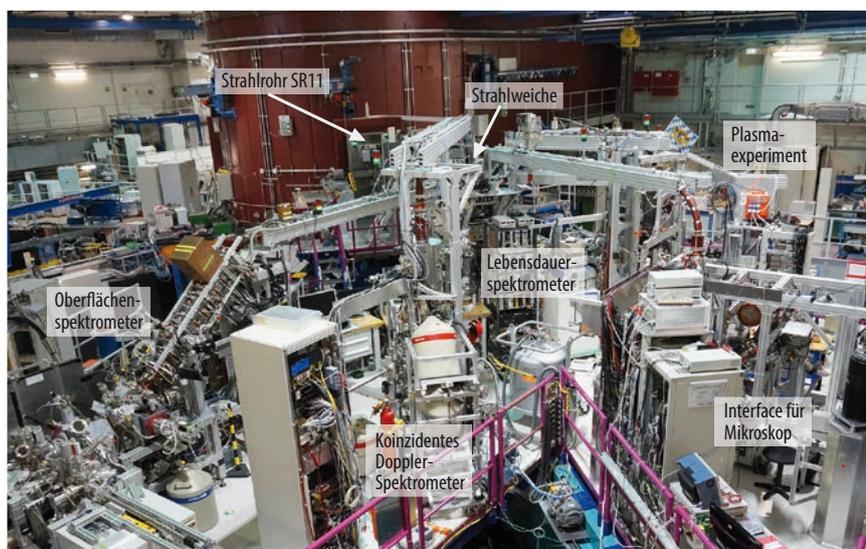
Christoph Hugenschmidt

Innerhalb der letzten Jahre hat sich die Physik mit Positronen dank hoher Strahlintensitäten rasant entwickelt. Das führte sowohl in der Festkörperphysik als auch in der Grundlagenforschung zu zahlreichen neuen Erkenntnissen. Prominente Beispiele dieser Erfolgsgeschichte sind die Untersuchung von Hochtemperatur-Supraleitern und die Optimierung funktionaler Materialien für die Energietechnik und Spintronik.

Als Werner Heisenberg 1933 die Teilchenspuren betrachtete, die Carl David Anderson aufgenommen hatte, war er begeistert: „Wenn das Teilchen auf der Nebelkammeraufnahme wirklich das Dirac’sche Positron war, so war damit das Tor zu einem ungeheuer weiten Land geöffnet.“ Heute ist das Tor nicht nur durchschritten, sondern auch das Neuland in weiten Teilen erkundet. Denn die Positronen aus der Antiwelt helfen dabei, Festkörper besser zu verstehen und Materialien beispielsweise für die Photovoltaik zu optimieren. Für die Grundlagenforschung sind Positronen als Antiteilchen der Elektronen in vielerlei Hinsicht interessant: Sie könnten gemeinsam sogar ein Bose-Einstein-Kondensat bei Raumtemperatur bilden.

Trifft das Positron ein Elektron, wird die gesamte Ruhemasse in Strahlungsenergie umgewandelt: $E = 2m_0c^2 = 1022 \text{ keV}$. Bereits kurz nach der Entdeckung des „Anti-Elektrons“ zeigte sich, dass die Energie und die Richtungsabhängigkeit der Annihilationsquanten stark von der lokalen Umgebung des Annihilationsorts abhängen. Das gilt auch für die Lebensdauer der Positronen. Seit diese Prozesse gut verstanden sind, lässt sich aus den Zerstrahlungsparametern auf die Eigenschaften von Festkörpern schließen. Das Positron hilft durch seine außergewöhnlichen Sondeneigenschaften, die elektronische Struktur von Kristallen zu untersuchen und vorhandene Defekte zu charakterisieren. In jüngerer Zeit treten dabei Experimente mit polarisierten Positronen und die Entwicklung hochintensiver Positronenstrahlen in den Fokus.

Um die Eigenschaften des Positrons als Sonde zu verstehen, gilt es zunächst, seine Wechselwirkung mit Materie zu untersuchen (Abb. 1). Treten Positronen in einen Festkörper ein, verlieren sie mittels Ionisation, Elektron-Loch-Anregungen und der Streuung an Phononen ihre Energie, bis sie ins thermische Gleichgewicht mit ihrer Umgebung gelangen. Die Thermalisie-



In der Experimentierhalle des Garchingener Forschungsreaktors FRM II liefert NEPOMUC den weltweit intensivsten niederenergetischen Positronenstrahl.

rung findet innerhalb weniger Pikosekunden statt und verläuft damit – im Vergleich zur Positronenlebensdauer von mehr als 100 ps in Materie – sehr schnell. Dabei dringen Positronen aus β^+ -Zerfällen im Mittel einige Zehntel Millimeter tief in das Material ein. Monoenergetische Positronenstrahlen erlauben dagegen tiefenabhängige Messungen von der Oberfläche bis zu einigen Mikrometern Tiefe. Als Sondenteilchen diffundiert das punktförmige Positron typischerweise etwa 100 nm weit nahezu ungestört durch das Kristallgitter. Vor der Annihilation lässt es sich sehr effektiv von vorhandenen Fehlstellen einfangen und nimmt beispielsweise den Platz eines fehlenden Atomrumpfs im Kristallgitter ein.

Die Nachweisgrenze für atomare Leerstellen liegt mit einer Konzentration von etwa 10^{16} bis 10^{17} cm^{-3}

KOMPAKT

- Positronen im Festkörper spüren als Sondenteilchen Kristallfehler wie atomare Leerstellen auf.
- Monoenergetische Positronenstrahlen ermöglichen es, Defekte in dünnen Schichten zu spektroskopieren und ihre Verteilung räumlich darzustellen.
- Mithilfe spinpolarisierter Positronen lässt sich die elektronische Struktur eines Festkörpers spinaufgelöst analysieren.

Priv.-Doz. Dr. Christoph Hugenschmidt, TU München, Lichtenbergstr. 1, 85748 Garching

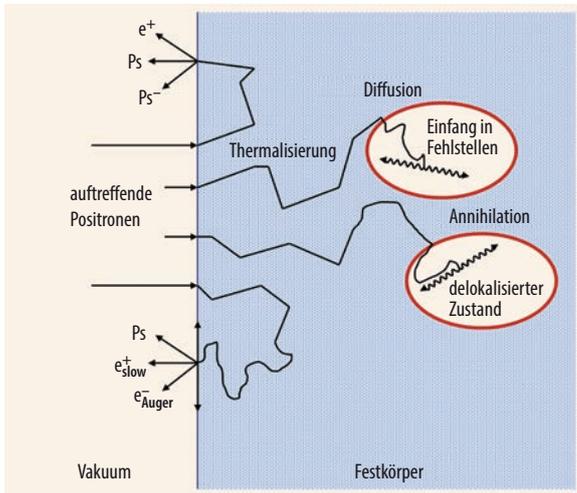


Abb. 1 Positronen thermalisieren in Materie innerhalb weniger Pikosekunden. Nach der Diffusion zerstrahlen sie im Festkörper mit einem Elektron (rot). An der Oberfläche kommt es auch zur Bildung von Positronium (Ps).

deutlich unter derjenigen anderer Methoden. Im Gegensatz zur Elektronenmikroskopie oder zu Streu- und Beugungsmethoden mit Neutronen, Photonen oder Elektronen handelt es sich bei der Positronenannihilationsspektroskopie um eine echte Sondentechnik.

In einem defektfreien Kristall nimmt das Positron aufgrund des idealen periodischen Atomgitters bis zur Annihilation einen Bloch-ähnlichen Grundzustand ein. Gelangen Positronen während oder nach der Thermalisierung zurück an die Oberfläche, kommt es zu ihrer Re-Emission, zur Bildung von neutralem oder geladenem Positronium oder zur Emission von Auger-Elektronen (Abb. 1). Mit dem Aufkommen niederenergetischer Positronenstrahlen gelang es, die Wechselwirkung mit Oberflächen für neuartige oberflächensensitive Messtechniken nutzbar zu machen [1].

Positronen erzeugen und moderieren

Positronen lassen sich auf zwei unterschiedliche Weisen gewinnen: mittels Paarbildung und über den radioaktiven β^+ -Zerfall. Für nicht-medizinische Anwendungen kommt heute fast ausschließlich das Radionuklid ^{22}Na zum Einsatz. Seine Halbwertszeit ist mit 2,6 Jahren vergleichsweise lang und die Positronenausbeute mit 90 Prozent hoch. Außerdem emittiert ^{22}Na beim Zerfall ein quasi promptes hochenergetisches Gammaquant, dessen Nachweis als Startsignal für Messungen der Positronenlebensdauer dienen kann. Das kontinuierliche β^+ -Spektrum erreicht Energien bis zu einigen 100 keV, sodass zunächst hochenergetische Positronen entstehen. Tiefenabhängige und lateral ortsauflösende Untersuchungen erfordern jedoch einen monoenergetischen Positronenstrahl mit geringerer Energie.

Um solche langsamen Positronen mit Energien im eV-Bereich zu erzeugen, moderiert man die Positronen. In einem Material mit negativer Positronenaus-

trittsarbeit Φ^+ diffundieren die Positronen nach ihrer Thermalisierung mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit an die Oberfläche, wo sie mit einer kinetischen Energie von $E = |\Phi^+|$ ins Vakuum emittiert werden. Der Moderator sollte möglichst wenige Gitterdefekte aufweisen, da diese Positronen einfangen können. Außerdem ist eine plane und saubere Oberfläche wichtig, um eine möglichst scharfe Energieverteilung des so erzeugten Positronenstrahls zu erreichen. Obwohl nur etwa jedes tausendste Positron moderiert die Oberfläche verlässt, lässt sich die Intensität im gewünschten Energieintervall um mehrere Größenordnungen steigern. Durch Anlegen einer Hochspannung an den Moderator entsteht ein Positronenstrahl mit variabler Energie. Im Labor begrenzt die Selbstabsorption der Positronen im Quellenmaterial die Strahlintensität auf etwa 10^6 moderierte Positronen pro Sekunde.

Weltrekord mit Kadmium und Platin

Auch bei der Paarbildung, die als Wechselwirkung von Photonen mit schweren Elementen ab einer Energie von etwa 5 MeV dominiert, entstehen zunächst hochenergetische Positronen. An Elektronenbeschleunigern lassen sich Targets aus Tantal oder Wolfram nutzen, in denen Elektronen Bremsstrahlung mit genügend hoher Energie erzeugen. Beispiele finden sich an den Großforschungsanlagen ELBE am Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf sowie bei KEK und AIST in Tsukuba, Japan. Die Leistung, die im Target- und Strukturmaterial deponiert wird, limitiert dabei die Intensität des Positronenstrahls. Dieser besitzt eine gepulste Struktur, weil schon die Elektronen in Paketen („Bunches“) beschleunigt werden. Je nach Zeitstruktur kann dies für die Messung der Positronenlebensdauer von Vorteil sein, weil sich daraus einfach ein Startsignal generieren lässt. Allerdings können hohe Positronendichten dazu führen, dass beim Nachweis der Annihilationsstrahlung die Ereignisse nicht mehr eindeutig einander zugeordnet werden können.

Alternativ lässt sich hochenergetische Gammastrahlung an Forschungsreaktoren nutzen. Am Delfter Reaktor absorbiert eine Anordnung von Wolfram-Röhrchen die Strahlung aus der Kernspaltung und dem Zerfall der Tochterkerne. Höhere Gammaintensitäten können beim Neutroneneinfang in ausgewählten Materialien erzielt werden. An der neutroneninduzierten Positronenquelle NEPOMUC am Forschungsreaktor FRM II in Garching wird hierfür Kadmium eingesetzt. Die bei der Kernspaltung freigesetzten und im Schwerwasser moderierten Neutronen treffen bei NEPOMUC in der Spitze des Strahlrohrs auf eine Kadmiumkappe (Abb. 2). Diese besteht zu 80 Prozent aus ^{113}Cd , das mit 20 600 barn einen enorm hohen Einfangquerschnitt für thermische Neutronen besitzt. Bei der Reaktion $^{113}\text{Cd} + n \rightarrow ^{114}\text{Cd} + \gamma$ wird Gammastrahlung mit einer Energie von bis zu 9,05 MeV freigesetzt, wobei das umgebende Schwerwasser die durch Absorption im Strahlrohr generierte Wärme dissipiert. Die Gamma-

strahlung erzeugt in einer Struktur aus Platinfolien mittels Paarbildung Positronen, die durch Selbstmoderation in den Folien mit einer diskreten Energie von $|\Phi^+| = 2 \text{ eV}$ an der Oberfläche austreten. Ein positives Potential am Platinkopf und elektrische Linien formen einen Positronenstrahl mit einer kinetischen Energie von 1 keV, der mit Hilfe von Magnetfeldern adiabatisch zu den Experimenten geführt wird. NEPOMUC bietet seit etwa zehn Jahren mit 10^9 monoenergetischen Positronen pro Sekunde den weltweit intensivsten Positronenstrahl [2].

Elektronenimpulse bestimmen

Aus den Parametern der Annihilationsstrahlung lassen sich über verschiedene Messgrößen die Materialeigenschaften auf atomarer Skala studieren. Beispielsweise ist die Zerstrahlungsrate thermalisierter Positronen, die etwa 10^{10} s^{-1} beträgt, in sehr guter Näherung proportional zur lokalen Elektronendichte: In einer atomaren Leerstelle lebt daher ein Positron länger als im ungestörten Kristallgitter. Mit der klassischen Positronenlebensdauerspektroskopie untersucht man bereits seit Jahrzehnten die Spezies und die Konzentration von Kristallfehlstellen, aber auch das freie Volumen in amorphen Festkörpern.

Um Kristalldefekte zu untersuchen und die elektronische Struktur von Festkörpern zu verstehen, ist es nötig, die Impulsverteilung der Elektronen zu analysieren. Diese lässt sich aus der Energieverteilung und der Winkelkorrelation der Annihilationsphotonen ableiten. Nur im Schwerpunktsystem von Positron und Elektron werden beide Photonen genau unter 180° emittiert und die Energie beider Photonen beträgt exakt je 511 keV. Im Laborsystem führt dagegen die endliche longitudinale Impulskomponente der Elektronen zu einer Doppler-Verschiebung. Die Doppler-Verbreiterungsspektroskopie („Doppler Broadening Spectroscopy“) hat daher zum Ziel, die Linienform des Annihilationspeaks im Energiespektrum bei 511 keV exakt zu bestimmen. Dieser so genannte Photopeak entsteht, wenn die Gammaquanten ihre Energie vollständig im Detektormaterial deponieren. Durch den transversalen Impulsanteil der Elektronen weicht die Winkelkorrelation der Annihilationsphotonen im Laborsystem um wenige mrad von der Kollinearität ab: Der Winkel schwankt leicht um die erwarteten 180° . Diese Abweichung bestimmt man mithilfe so genannter ACAR-Messungen („Angular Correlation of Annihilation Radiation“).

Fehlstellen nachweisen und abbilden

Bei der Doppler-Verbreiterungsspektroskopie dienen hochauflösende Germaniumdetektoren dazu, das Annihilationsspektrum aufzunehmen. Meist ist schon mit bloßem Auge zu erkennen, dass der Photopeak bei 511 keV breiter ist, als es die Auflösung erwarten lässt.

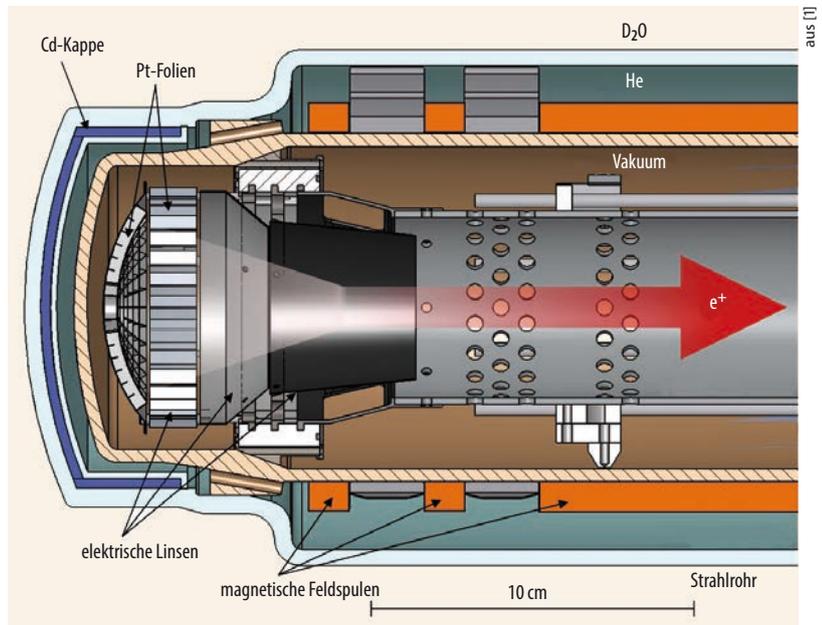


Abb. 2 Am Forschungsreaktor FRM II arbeitet die Positronenquelle NEPOMUC in drei Schritten: Der Einfang thermischer Neutronen in Cadmium führt zur Emission hochenergetischer Gammastrahlung.

Danach werden über Paarbildung und Selbstmoderation in Platinfolien monoenergetische Positronen erzeugt. Diese werden mithilfe elektrischer Potentiale extrahiert und beschleunigt.

Bereits Elektronen mit einer Energie von 10 eV führen zu einer Energieverschiebung von $\Delta E = 1,6 \text{ keV}$ – ein Wert, der bereits höher liegt als die typische Detektorauflösung. Kernnahe Elektronen besitzen deutlich höhere Impulse und führen daher auch zu entsprechend größeren Energieverschiebungen. Allerdings sinkt die Wahrscheinlichkeit der Zerstrahlung mit kernnahen Elektronen, wenn das Positron in einer atomaren Leerstelle gefangen ist. Dann weisen die Annihilationsphotonen im Mittel eine geringere Doppler-Verschiebung auf als im ungestörten Kristall – der Photopeak fällt im Vergleich schmaler aus. Quantitativ lässt sich die Linienbreite über den so genannten S-Parameter bestimmen, der den Anteil der Ereignisse in einem definierten Bereich um die Peakmitte angibt. Verschiedene S-Parameter weisen auf eine relative Änderung in der Fehlstellendichte hin.

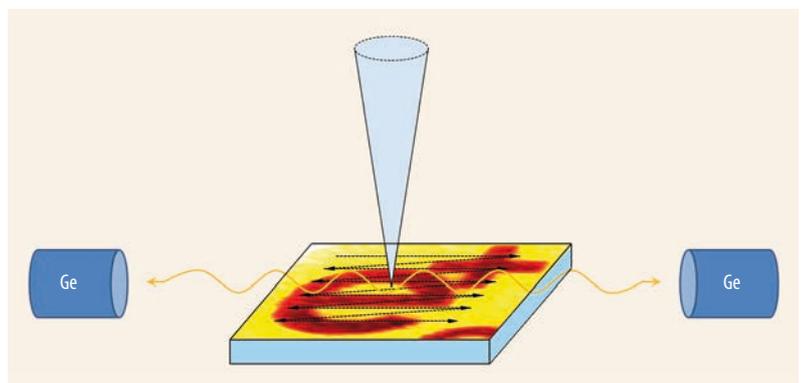


Abb. 3 Das Abrastern mit einem Positronenstrahl (hellblau) ermöglicht es, die Verteilung von Defekten zweidimensional zu bestimmen. Die Annihilationsphotonen weisen zwei Detektoren (Ge) in Koinzidenz nach.

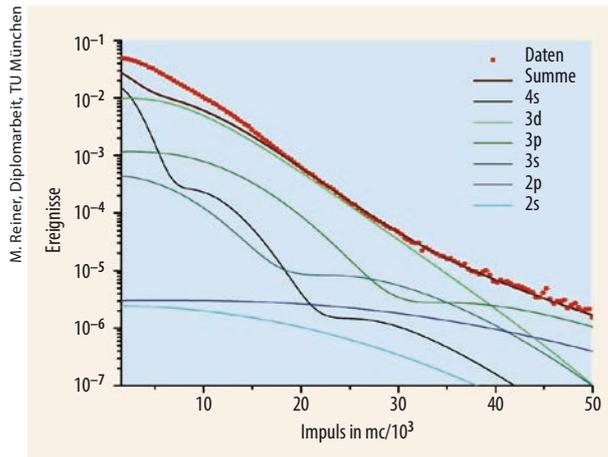


Abb. 4 Annihilationspeak in Kupfer: Die gemessene Impulsverteilung (rot) ergibt sich als Summe von Zerstrahlungen mit Elektronen aus verschiedenen Orbitalen (grün, blau). Ein Fit an die Daten erlaubt Rückschlüsse auf die chemische Umgebung des Positrons.

Das Abrastern einer Probe mit einem monoenergetischen Positronenstrahl erlaubt es, die Defektverteilung zweidimensional darzustellen (Abb. 3). Die Probentiefe als dritte Dimension ist zugänglich, wenn sich die Positronenenergie beispielsweise zwischen 0,1 und 30 keV einstellen lässt [3] und die Positronen entsprechend unterschiedlich tief implantiert werden. Das Informationsvolumen ist dabei im Wesentlichen durch die Ausdehnung des Strahlflecks und das Implantationsprofil der Positronen mit einer Breite bis zu einigen Mikrometern definiert. Beispielsweise erreicht der Mikrostrahl von NEPOMUC laterale Auflösungen von 30 bis 50 μm . Bei einer Koinzidenzmessung weisen zwei Detektoren, die sich gegenüberstehen, die beiden Gammaquanten eines Zerstrahlungsereignisses zeitgleich nach. Mit dieser Methode wird der Untergrund in den Spektren effizient unterdrückt, sodass

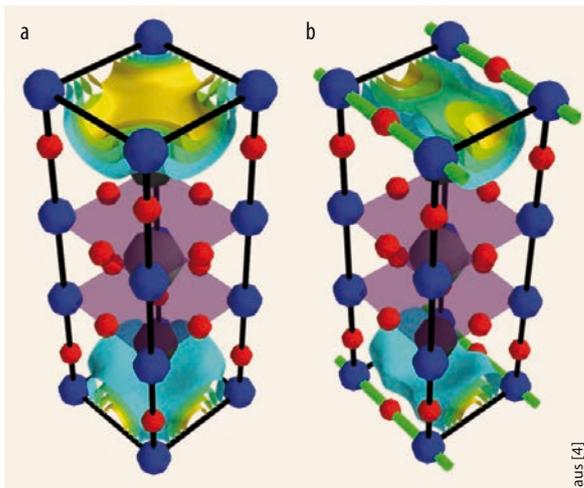


Abb. 5 Bei $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ -Verbindungen ordnen sich um das zentrale Yttrium-Atom zwei benachbarte Barium-Atome an (lila). In den darum liegenden Ebenen aus Kupfer- und Sauerstoff-Atomen (blau und rot) lassen sich Sauerstoffleerstellen aufgrund von Variationen der Positronendichten (Isoflächen) mit Doppler-Verbreiterungsspektroskopie nachweisen. Für $\delta = 1$ ist der Kristall tetragonal und halbleitend (a), für $\delta = 0$ orthorhombisch und supraleitend (b).

sehr hohe Doppler-Verschiebungen experimentell zugänglich werden und sich die Beiträge der einzelnen Elektronenorbitale am Annihilationspeak identifizieren lassen (Abb. 4). Die Bestimmung des gewichteten Anteils der Elektronenorbitale erlaubt somit die Analyse der chemischen Umgebung von Fehlstellen.

Kristallfehler aufspüren

Atomare Leerstellen und andere Kristallfehler beeinflussen makroskopische physikalische Eigenschaften von Festkörpern wie Festigkeit oder elektrische Leitfähigkeit. Von komplexeren kristallinen Systemen ist bekannt, dass sie verschiedene Phasen einnehmen können – je nachdem wie hoch die Leerstellenkonzentration auf einem bestimmten Untergitter ist. Ein prominentes Beispiel sind die Hochtemperatur-Supraleiter $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, kurz YBCO. Die Konzentration der Sauerstoffleerstellen bestimmt die Sprungtemperatur T_c , und solange $\delta < 0,6$ bleibt, liegt T_c bei bis zu 92 K. Für Anwendungen und um das Wechselspiel von Ladungsdichte und supraleitender Phase zu untersuchen, sind hochwertige YBCO-Kristalle mit einer wohldefinierten und homogenen Verteilung von Sauerstoffatomen von großer Bedeutung. Solche Proben hat die Gruppe um German Hammerl an der Universität Augsburg hergestellt. Die 210 nm dünnen einkristallinen YBCO-Schichten wurden epitaktisch mittels gepulster Laserdeposition auf kommerziellen SrTiO_3 -Substraten gewachsen und unterschiedlich getempert.

Die Sprungtemperatur T_c der Proben ergibt sich aus Elektronentransportmessungen, während der mittlere Sauerstoffgehalt mittels Röntgendiffraktion der YBCO-Schicht zugänglich ist. Da die Wellenfunktion der Positronen in den Kristallen fast ausschließlich in den Ebenen lokalisiert ist, in denen beim Übergang von der tetragonalen zur orthorhombischen Phase Sauerstoffleerstellen entstehen (Abb. 5), ermöglicht es die Doppler-Verbreiterungsspektroskopie mit einem Positronenstrahl, die Dichte der Leerstellen ortsaufgelöst zu messen. Anhand der Augsburger Proben konnte eine lineare Abhängigkeit des S-Parameters von der Sauerstoffkonzentration nachgewiesen werden [4]. Durch eine Implantationsenergie von 4 keV lassen sich die Positronen in den Proben so platzieren, dass die Annihilation fast ausschließlich in der YBCO-Schicht stattfindet: Die Oberflächen der Proben, Grenzschichten zum Substrat sowie das Substrat selbst beeinflussen die Messung nicht. Das Rastern der Proben mit dem Positronenstrahl erlaubte es, die inhomogene Verteilung der Sauerstoffleerstellen abzubilden. Damit konnte gezeigt werden, dass die Sprungtemperatur innerhalb einzelner Proben um mehr als 10 K variiert (Abb. 6).

Solche Schwankungen orts- und tiefenaufgelöst nachweisen zu können, ist wichtig, wenn YBCO-Kristalle als supraleitende Drähte eingesetzt werden. Je nach Anwendung, beispielsweise für leistungsfähige Magnetspulen oder in Fehlerstrombegrenzern, können

YBCO-Drähte mit zu großer räumlicher Variation der Sprungtemperatur zu Ausfällen führen oder gänzlich unbrauchbar sein.

Spinpolarisation ausnutzen und...

Die Winkelkorrelation der Annihilationsphotonen delocalisierter Positronen mit Valenzelektronen spiegelt die elektronische Struktur des untersuchten Kristalls wider. Diese Winkelkorrelation lässt sich zweidimensional mit einem Paar ortsauflösender Szintillationsdetektoren bestimmen, die in Koinzidenz ausgelesen werden (2D-ACAR). Aus den nachgewiesenen Annihilationsereignissen ergibt sich die zweidimensionale Projektion der Elektronenimpulsverteilung, wobei die Auflösung etwa eine Größenordnung besser ist als bei der Doppler-Verbreiterungsspektroskopie – allerdings auf Kosten geringerer Zählraten. Mehrere Projektionen, aufgenommen unter verschiedenen Kristallorientierungen, erlauben die dreidimensionale Rekonstruktion der Elektronenimpulsverteilung des Kristalls.

Mit spinpolarisierten Positronen lassen sich sogar ferromagnetische Materialien untersuchen. Dazu wird ein Magnetfeld an eine Probe gelegt, das entweder antiparallel oder parallel zum bekannten Spin der Positronen ausgerichtet ist. Im ersten Fall sind die Spins von Positron und Elektron antiparallel ausgerichtet. Dieser Singulettzustand zerstrahlt mit einer um drei Größenordnungen höheren Wahrscheinlichkeit als der Triplettzustand, der sich durch parallel ausgerichtete Spins beider Teilchen auszeichnet. Aus dem Vergleich der ACAR-Spektren bei den unterschiedlich ausgerichteten Magnetfeldern ergeben sich die Beiträge der Majoritäts- und Minoritätsladungsträger zur elektronischen Struktur.

... elektronische Strukturen erkunden

Anwendungen der Spintronik, magnetische Speicherung und Supraleitung sind auf maßgeschneiderte funktionale Materialien mit einer besonderen elektronischen Struktur angewiesen. Die winkelaufgelöste Photoemissionsspektroskopie ist ein etabliertes Verfahren, um die Bandstruktur an Oberflächen oder in zweidimensionalen Systemen zu untersuchen. Um die Grenze zwischen besetzten und freien Elektronenzuständen im Impulsraum, die so genannte Fermi-Fläche, im Kristallvolumen zu bestimmen, gibt es andere Methoden. Ein Beispiel ist der Nachweis von Quantenoszillationen, was tiefe Temperaturen und hohe Magnetfelder benötigt. Mit Positronen bleiben die Fermi-Flächen auch bei Raumtemperatur und ohne Magnetfeld zugänglich – mit polarisierten Positronen sogar spinaufgelöst.

So haben zweidimensionale winkel- und spinaufgelöste Positronenuntersuchungen an ferromagnetischem Nickel gezeigt, dass die Korrelationsstärke der Elektronen quantitativ etwa 2,0 eV beträgt [5]. Die

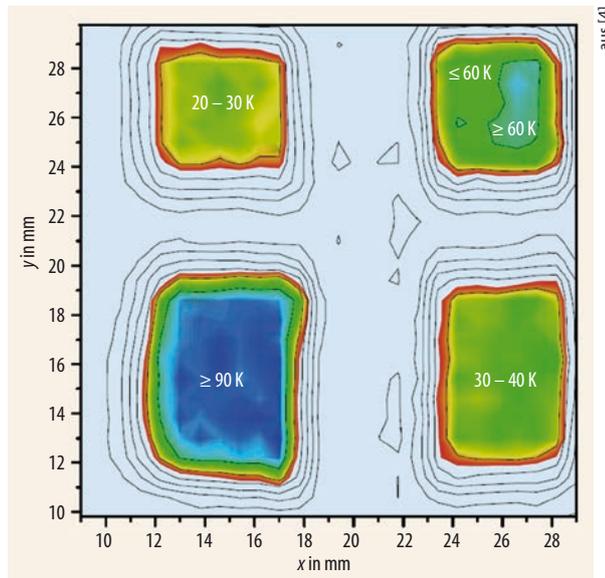


Abb. 6 Die ortsaufgelöste Konzentration der Sauerstoffleerstellen in YBCO-Kristallen (farbig) korreliert mit der Variation der lokalen Sprungtemperatur T_c .

Messergebnisse helfen, theoretische Modelle anhand vermeintlich einfacher zu modellierender Stoffe wie Nickel zu vergleichen und die Berechnung elektronischer Strukturen zu optimieren. Auch für die Heusler-Legierung[§] Cu_2MnAl gelang es, mit polarisierten Positronen die Fermi-Flächen spinaufgelöst zu rekonstruieren und den Beitrag der einzelnen Minoritäts- und Majoritätsbänder zur Magnetisierung zu bestimmen [6]. Die experimentellen Ergebnisse stimmen hervorragend mit theoretischen Berechnungen überein, wenn letztere mit der Auflösung gefaltet werden und das statistische Rauschen berücksichtigt wird (Abb. 7). Die Summe über teilbesetzte Bänder und die zwei gefüllten Majoritätsbänder ergibt eine Magnetisierung von etwa $3,6 \mu_B$ pro Elementarzelle – das stimmt gut mit experimentellen Resultaten zur makroskopischen Magnetisierung überein.

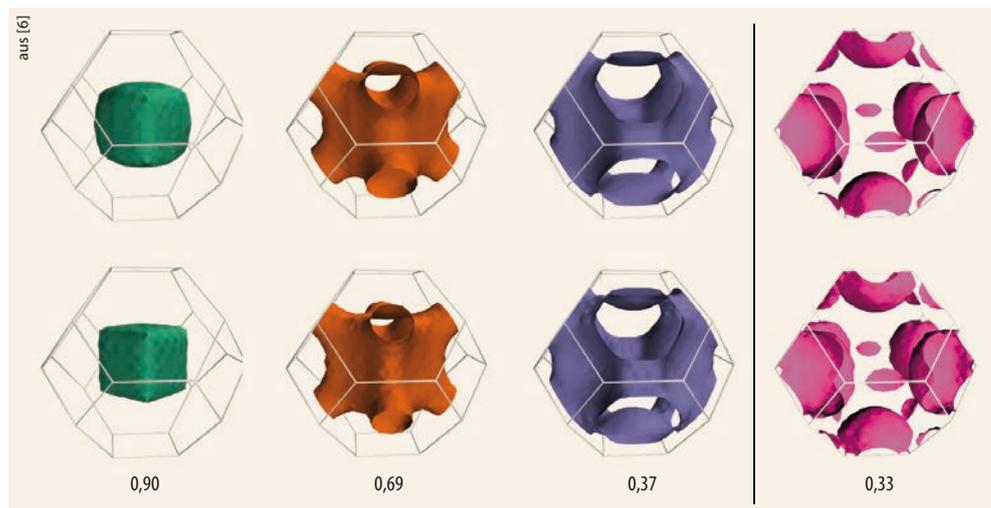
§) Friedrich Heusler entdeckte 1903 intermetallische Verbindungen mit ferromagnetischem Verhalten, obwohl diese sich aus nichtmagnetischen Elementen zusammensetzen.

Mit Positronen Materialien optimieren

Positronen ermöglichen es für zahlreiche Materialien, die Art und Konzentration von Fehlstellen auf atomarer Ebene oder die elektronische Struktur zu analysieren. Das gilt auch für die in der Photovoltaik relevanten CuInGaSe -Legierungen. Dünne Schichten aus diesem Material zeichnen sich durch hohes optisches Absorptionsvermögen und eine hohe Strahlungsstabilität aus. Um dies weiter zu optimieren, kann ein Konzentrationsgradient von Gallium in den photovoltaisch aktiven Schichten die Bandbreite der Absorption vergrößern. Gleichzeitig gilt es, bei der komplexen Herstellung Gitterfehlstellen zu vermeiden, die sich mit Positronen exzellent nachweisen lassen [7].

In modernen leistungsfähigen Akkus kommen heute langzeitstabile Elektroden aus Nickel, Mangan, Kobalt und Lithium zum Einsatz. Allerdings nimmt

Abb. 7 Die Fermi-Flächen von Cu_2MnAl lassen sich theoretisch berechnen (oben) und mit spinaufgelösten zweidimensionalen ACAR-Messungen bestimmen (unten). Sowohl für Majoritäts- (links) wie auch Minoritätsladungsträger (rechts) stimmt beides hervorragend überein – unabhängig vom Anteil der besetzten Fermi-Fläche in der ersten Brillouin-Zone (Zahlenwerte).



die Kapazität solcher Akkus bereits beim ersten Ladezyklus um bis zu zehn Prozent ab. Untersuchungen mit Positronen haben gezeigt, dass ein enger Zusammenhang zwischen den Gitterfehlstellen, die beim Wiederaufladen im Kathodenmaterial verbleiben, und dem irreversiblen Kapazitätsverlust besteht [8]. Ein weiteres Beispiel ist die Entwicklung robuster und effizienter Membranen für Brennstoffzellen, Ionenaustauschreaktionen oder Entsalzungsanlagen. Hier helfen Analysen mit Positronen, das freie Volumen in den relevanten Polymeren und seine Veränderung zu bestimmen.

Wohin geht die Reise?

In der Grundlagenforschung ist das Studium untereinander wechselwirkender Positronen von herausragendem Interesse. Beispielsweise wird derzeit versucht, erstmals ein neutrales Elektronen-Positronen-Plasma in einer Dipolfalle einzufangen und zu untersuchen. Mithilfe magnetischer Fallen können Positronenpulse erzeugt und auf Materie geschossen werden, um hohe Dichten von Positronium in Quarzkavitäten zu erzeugen. Mittlerweile ist es so gelungen, das Positronium-Molekül Ps_2 nachzuweisen. Als nächster Schritt steht an, ein Bose-Einstein-Kondensat aus Positronium-„Atomen“ zu erzeugen. Ein Kondensat aus kaltem Ortho-Positronium könnte aufgrund der geringen Masse von Elektron und Positron bei genügend hoher Dichte selbst bei Raumtemperatur existieren [9].

Um dies zu erreichen, werden immer leistungsfähigere Anlagen für Positronenstrahlen entwickelt. Ein neuartiger Positronenakkumulator soll an NEPOMUC dafür sorgen, Pulse von einer Nanosekunde Länge mit 10^9 Positronen zu erzeugen. Das entspricht einer Steigerung der bisher erreichten Positronendichte um weitere neun Größenordnungen!

Völlig neue Möglichkeiten bietet die Gammastrahlung, die bei der inversen Compton-Streuung hochintensiven Laserlichts an einem relativistischen Elektronenstrahl entsteht („Laser Compton Back-Scattering“). Diese Gammastrahlung ist in Vorwärtsrichtung nahe-

zu vollständig polarisiert, was sich auch auf die daraus erzeugten Positronen überträgt. Mit ELI-NP befindet sich eine erste europäische Anlage bei Bukarest in Rumänien im Aufbau. Ein Ziel dabei ist es, mittels Paarbildung aus zirkular polarisierten hochenergetischen Photonen einen Positronenstrahl zu generieren [10]. Die extrem kleine Bandbreite der Photonen ermöglicht es, einen hochbrillanten, spinpolarisierten und monoenergetischen Positronenstrahl zu erzeugen. Die in der ersten Ausbaustufe angestrebte Intensität beträgt etwa $2 \cdot 10^6$ Positronen pro Sekunde [11].

Literatur

- [1] C. Hugenschmidt, Surf. Sci. Rep. **71**, 547 (2016)
- [2] C. Hugenschmidt et al., Nucl. Instr. Meth. A **593**, 616 (2008)
- [3] T. Gigl et al., New J. Phys. **19**, 123007 (2017)
- [4] M. Reiner et al., Appl. Phys. Lett. **106**, 111910 (2015)
- [5] H. Ceeh et al., Sci. Rep. **6**, 20898 (2016)
- [6] J. A. Weber et al., Phys. Rev. Lett. **115**, 206404 (2015)
- [7] A. Uedono et al., Thin Solid Films **603**, 418 (2016)
- [8] S. Seidlmayer et al., Journal of Power Sources **336**, 224 (2016)
- [9] P. M. Platzman und A. P. Mills, Phys. Rev. B **49**, 454 (1994)
- [10] C. Hugenschmidt et al., Appl. Phys. B **106**, 241 (2012)
- [11] N. Djourellov et al., Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A **806**, 146 (2016)

DER AUTOR

Christoph Hugenschmidt (FV Metall- und Materialphysik, FV Oberflächenphysik) hat in Freiburg und Bonn studiert. 1997 promovierte er am Bonner Helmholtz-Institut für Strahlen- und Kernphysik. Danach baute er als Instrumentwissenschaftler der TU München am Forschungsreaktor FRM II die neutroneninduzierte Positronenquelle auf. Während Forschungsaufenthalten am ILL in Grenoble entwickelte er den Prototypen von NEPOMUC. Danach war er an verschiedenen Instituten in Japan tätig. Er habilitierte sich 2010 und etablierte die Forschungsgruppe „Physik mit Positronen“. Freie Tage genießt er beim Wandern oder Skifahren in den Alpen.

