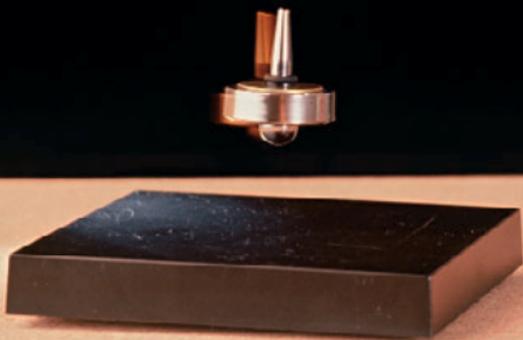


veritas
iustitia
libertas



Fachbereich Physik

Freie Universität Berlin

Zu den Umschlagbildern

Klassische Physik und Quantenphysik

Oben:

Richtet man zwei Permanentmagnete so aus, dass sie sich abstoßen, dann kann im Prinzip der eine über dem anderen schweben. Die Anordnung ist jedoch instabil: Der obere Magnet neigt dazu, sich zu drehen, und wird dann angezogen statt abgestoßen. In einem inhomogenen Magnetfeld lässt sich dies dadurch unterdrücken, dass man den oberen Magneten in Rotation versetzt und zum Kreisel macht. Die Ausführung des Experiments erfordert dennoch Fingerspitzengefühl und die theoretische Beschreibung stellt ein anspruchsvolles Problem der klassischen Mechanik dar.

Unten :

Mit der feinen Spitze eines Rastertunnelmikroskops wurden hier Kupfer-Atome auf einer Kupfer-Einkristalloberfläche in Form eines „Q“ angeordnet. Um sie herum ändert sich die Verteilung der Elektronen an der Metalloberfläche und es bilden sich stehende Wellen aus, die mit dem Rastertunnelmikroskop beobachtet werden. Diese Wellen sind ein typischer Quanteneffekt. Das Experiment wurde am Fachbereich Physik durchgeführt und demonstriert die Möglichkeiten der heutigen Experimentalphysik.

Inhalt

Einleitung	4
Der Fachbereich	5
Aus der Forschung	8
Atome bewegen	8
Elektronen in der Ebene	11
Kleine Kräfte – Große Spannungen	13
Ultradünne Magnete	16
Viele Teilchen	18
Licht als Sonde	21
Blitzschnell beobachten	24
Kontrolle durch Licht	26
Umwandlung von Sonnenlicht	28
Biomoleküle unter der Lupe	31
Exakt und genähert	34
Technik im Hintergrund	37
Studium und Lehre	40
Brücken zur Schule	42
Der Fachbereich im Überblick	43
Blick in die Geschichte	47

Impressum

Herausgeber

Das Präsidium der Freien Universität Berlin
 Presse- und Informationsstelle

V.i.S.d.P.: Dr. Felicitas v. Aretin

pressestelle@fu-berlin.de

www.fu-berlin.de/presse

Redaktion

Gabriele André, Ingo Peschel, Peter Steidl, Martin Wolf

Grafiken

Uta Deffke

Gestaltung & Satz

UNICOM Werbeagentur GmbH · www.unicomcommunication.de

Druck

Druckerei H. Heenemann, Berlin

Fotos

Reiner Hausleitner (25), Ulrich Grimm (1), AKG (1), Archiv zur Geschichte der MPG (3), F1-Online(1), Ullsteinbild (1), BESSY (1).

Einleitung



Die Physik befasst sich mit grundlegenden Fragen: mit den Zusammenhängen in der Natur, mit Kräften, mit Mechanismen. Sie beobachtet Erscheinungen genau und sucht die Gesetze, die dahinter stehen. Sie entwickelt ihre Methoden ständig weiter und dringt in neue Bereiche vor, auch jenseits ihres angestammten Feldes. Ihre Fortschritte wirken sich bis in das tägliche Leben hinein aus.

Diese kleine Broschüre stellt die Physik an der Freien Universität vor. Sie ist für alle gedacht, die daran Interesse haben könnten - Gäste und Besucher, Fachkollegen und Studenten, Lehrer und Schü-



ler. Sie finden darin Allgemeines zum Fachbereich Physik ebenso wie eine Liste seiner Arbeitsgruppen, eine Beschreibung des Physikstudiums und eine Skizze der beeindruckenden Berliner Physikgeschichte. Insbesondere wird aber beschrieben, was die Stärke des Fachbereichs ausmacht: seine Forschung.

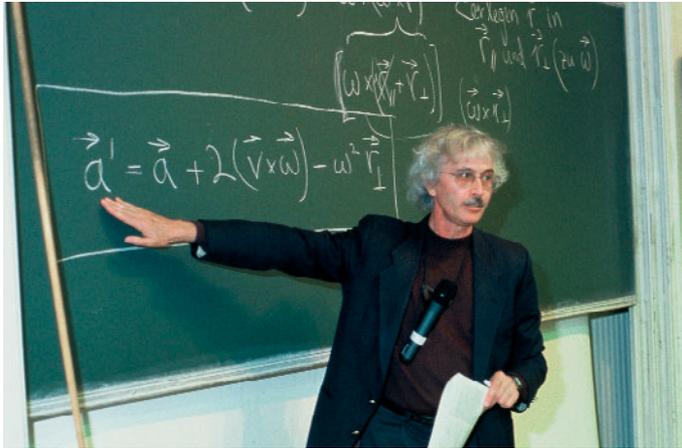
Die Themen dieser Forschung gruppieren sich um verschiedene Schwerpunkte aus der Festkörper- und Biophysik sowie der theoretischen Physik. Im Einzelnen reicht der Bogen von Atomen auf Oberflächen bis zu biologisch wichtigen Molekülen, von mathematischen Modellen bis zur Theorie neuer Materialien. Die gewählten Beispiele sollen dies illustrieren. Dabei wurde stets die physikalische Fragestellung herausgestellt und eine einfache, klare Darstellung angestrebt. Physik ist auch eine Suche nach Einfachheit, wir hoffen, dass wir dabei erfolgreich waren.



Der Fachbereich Physik

An der Freien Universität bildet die Physik einen eigenen Fachbereich mit derzeit 23 Professoren. Er betreibt traditionell Grundlagenforschung und ist dabei sehr erfolgreich, wie Begutachtungen regelmäßig zeigen. Eine wichtige Rolle spielen Forschungsschwerpunkte. Der Fachbereich besaß





einen der ersten Sonderforschungsbereiche der Universität und ist heute Sitz dreier solcher Einrichtungen, die von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert werden. Darüber hinaus sind einzelne Arbeitsgruppen an weiteren externen Schwerpunkten beteiligt. Zu mehreren Berliner Forschungsinstituten bestehen enge fachliche und personelle Beziehungen, insbesondere sind mit dem Hahn-Meitner-Institut und dem Max-Born-Institut insgesamt vier Sonderprofessuren eingerichtet. Der Fachbereich nutzt auch die neue Synchrotronlichtquelle BESSY II in Berlin-Adlershof und hat dort eigene Messplätze. Dazu kommen zahlreiche Kontakte ins In- und Ausland.



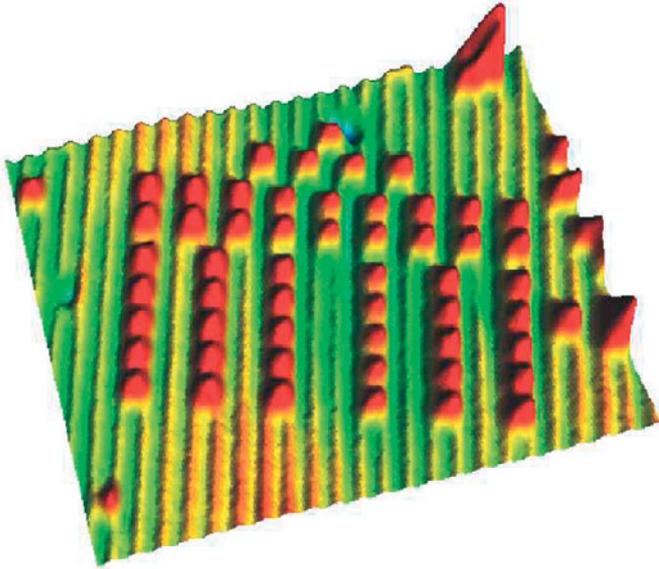
Die Zahl der Studierenden ist in jüngster Zeit deutlich gestiegen und beträgt rund 500. Durch die umfangreiche Forschung ist auch die Zahl der Doktoranden hoch und liegt bei knapp 100, etwa 20% davon sind Frauen. Neben seinen eigenen betreut der Fachbereich eine große Zahl anderer Studenten, die Physik als Nebenfach haben, insgesamt rund 800 pro Jahr. Er unterhält außerdem umfangreiche Kontakte zu Schulen und hat gerade ein spezielles Schülerlabor eingerichtet. Dabei spielt die Fachdidaktik mit einer Professur eine wesentliche Rolle.

Im Rahmen der Universität verwaltet sich der Fachbereich selbst. Die laufenden Geschäfte führt das Dekanat, für die grundsätzlichen Entscheidungen ist der Fachbereichsrat zuständig, in dem Professoren, Mitarbeiter und Studierende vertreten sind. Bis auf das Grundpraktikum sind alle Einrichtungen in einem großen Neubau untergebracht, der 1982 bezogen wurde. Darin befindet sich auch die Fachbereichsbibliothek mit 50.000 Bänden und einer eigenen Abteilung für die Studierenden. Die Institute für Chemie, Mathematik und Informatik liegen in unmittelbarer Nähe. Dadurch ergeben sich sehr gute Arbeitsbedingungen, zu denen die Lage im grünen Dahlem zusätzlich beiträgt.

Weitere Einzelheiten finden sich weiter hinten in der Broschüre. Im Folgenden wird zunächst die Forschung an Beispielen vorgestellt.



Aus der Forschung

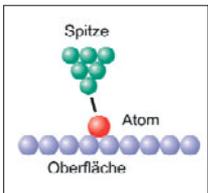


Das kleinste 'Brandenburger Tor' wurde aus 53 Kohlenmonoxidmolekülen auf einer Kupferoberfläche aufgebaut.

Atome bewegen

Ziel der Physik ist es, die elementaren Bausteine der Natur und deren Zusammenspiel zu ergreifen. Seit einigen Jahren ist es möglich, einzelne Strukturen Atom für Atom bzw. Molekül für Molekül zusammenzusetzen und danach ihre Eigenschaften mit atomar auflösenden Verfahren zu untersuchen. Diese Fähigkeit eröffnet neue Dimensionen in der Miniaturisierung. Grundlage ist hierfür das Rastertunnelmikroskop. Seine scharfe Metallspitze tastet eine Oberfläche ab und ermöglicht ihre Darstellung mit atomarer Auflösung.

Die Kraft zwischen der Tunnelspitze und dem Atom wird zur Manipulation benutzt.



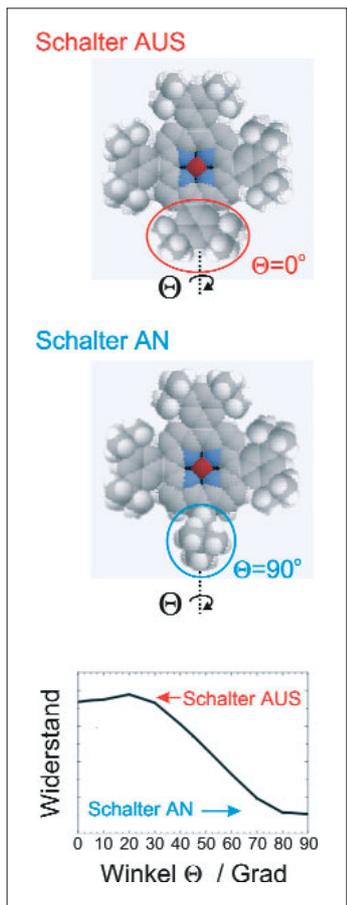
Um Atome oder Moleküle, die auf der Oberfläche angelagert (adsorbiert) sind, kontrolliert bewegen und in atomaren Maßstäben genau platzieren zu können, wird die Spitze so weit angenähert, bis es zu einer ausreichenden Kraft zwischen Spitze und Adsorbat kommt. Diese kann anziehend oder abstoßend sein, so dass die Atome oder Moleküle von der Spitze über die Oberfläche gezogen bzw. geschoben werden können. Atome und kleine Moleküle bewegen sich dabei kontinuierlich über die Oberfläche oder springen von einem Bindungs-

platz zum nächsten. Im Fall größerer Moleküle kann es zusätzlich zu einer Verformung des Moleküls auf Grund seiner inneren Beweglichkeit kommen. Durch detaillierte Messungen lassen sich die Einzelheiten des Bewegungsablaufes bestimmen und damit spezifische Informationen zu den mechanischen Eigenschaften der Moleküle gewinnen. Das ist hinsichtlich bestimmter synthetisierter Moleküle sehr interessant, die mit verschiedenen funktionellen Gruppen ausgestattet sind, welche die Funktion von 'Beinen' oder 'Rädern' haben. Mit der Rastertunnelmikroskopie können die mechanischen Eigenschaften untersucht werden, die derartigen Molekülen das 'Laufen' oder 'Rollen' ermöglichen.

Beispiel eines molekularen Schalters: Die Drehung einer Molekülgruppe von der Horizontalen in die Vertikale ändert den elektrischen Widerstand zwischen Tunnelspitze und Oberfläche.

Die innere Verformung eines Moleküls kann gezielt dazu genutzt werden, seine elektronischen Eigenschaften und geometrische Form zu ändern, wie es zum Beispiel für den Aufbau eines 'molekularen Schalters' notwendig ist. Solch einen Schalter zeigt das nebenstehende Bild. Er besteht aus einem Molekül mit einem starren Grundgerüst, welches zusätzlich an den Außenseiten Molekülgruppen besitzt, die mit der Spitze des Rastertunnelmikroskops um den Winkel Θ gedreht werden können. Liegt solch eine Gruppe horizontal auf der Oberfläche ($\Theta=0^\circ$), ist der elektrische Widerstand zwischen der Spitze und der Oberfläche groß, d.h. der molekulare Schalter befindet sich in der 'AUS' Stellung. Wird die Gruppe dagegen in die Vertikale gedreht ($\Theta=90^\circ$), so sinkt der Widerstand und der Schalter befindet sich in der 'AN' Stellung.

Außer der mechanischen Wechselwirkung zwischen Spitze und Adsorbat lassen sich zusätzlich Effekte des elektrischen Feldes und des Stromes zwischen Spitze und Oberfläche zur gezielten Manipulation einsetzen. Im Falle des Stromes wird ausgenutzt, dass ein Teil der

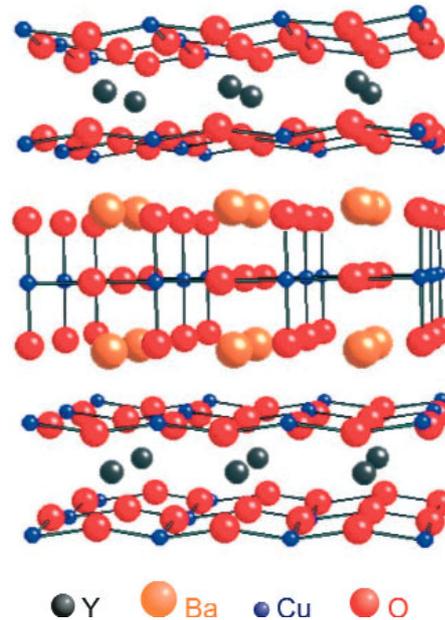
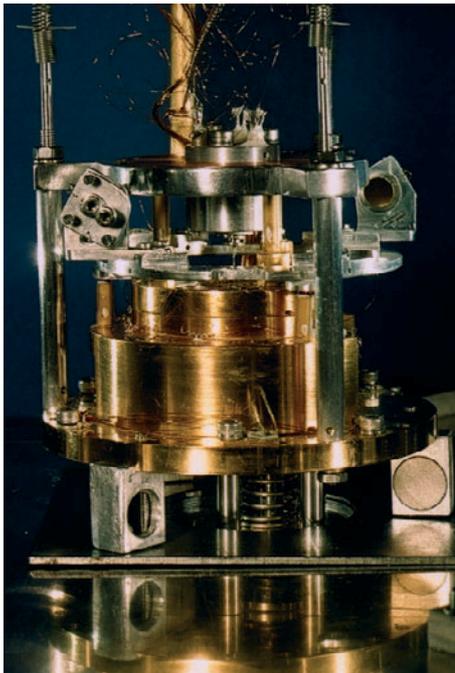


tunnelnden Elektronen seine Energie an das Atom bzw. Molekül abgeben kann. Mittels dieser Anregung lässt sich ein einzelnes Adsorbat von der Oberfläche entfernen oder eine Bewegung parallel zur Oberfläche auslösen. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, einzelne chemische Bindungen kontrolliert aufzubrechen oder zu erzeugen.

Um die beschriebenen Manipulationsverfahren anzuwenden, braucht man ein extrem präzises Werkzeug. Am Fachbereich wurde eigens ein Rastertunnelmikroskop entwickelt, welches im Ultrahochvakuum und bei tiefen Temperaturen (4 – 70 K) arbeitet und die erforderliche Genauigkeit und Stabilität besitzt.

Obwohl derzeit noch die Grundlagen der atomaren und molekularen Manipulation erforscht werden, können bereits jetzt mit einer breiten Palette an verschiedenen Techniken Strukturen auf atomarer Ebene aufgebaut und untersucht werden.

Herzstück eines Tieftemperatur-Rastertunnelmikroskops. Die Bestandteile sind zur Reflexion von Wärmestrahlung vergoldet.



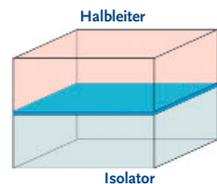
Kristallstruktur eines Hochtemperatur-Supraleiters mit leitenden Schichten (oben und unten).

Elektronen in der Ebene

In unserer dreidimensionalen Welt scheint es zunächst unsinnig, sich mit der Physik in zwei Dimensionen zu beschäftigen. Es können aber tatsächlich viele zweidimensionale Systeme im Labor untersucht werden, und eine Reihe von Nobelpreisen wurde für diese Forschung vergeben. So werden zweidimensionale Magneten hergestellt, indem man eine nur wenige atomare Lagen dicke, magnetische Schicht auf ein dreidimensionales, unmagnetisches Material aufbringt. Zweidimensionale Metalle erhält man, indem man Elektronen an der Grenzfläche zwischen einem Isolator und einem Halbleiter mit Hilfe eines elektrischen Feldes festhält. Schließlich kann auch ein dreidimensionales System aus zweidimensionalen Schichten bestehen, die sich gegenseitig nur wenig beeinflussen. Dies ist z.B. für die so genannten Hochtemperatur-Supraleiter der Fall, bei denen der elektrische Widerstand unterhalb der Temperatur von rund 100 K verschwindet.

Die Untersuchung physikalischer Eigenschaften zweidimensionaler Systeme wird motiviert durch die enge Verbindung zu technischen Anwendungen:

Elektronen an einer ebenen Grenzfläche.

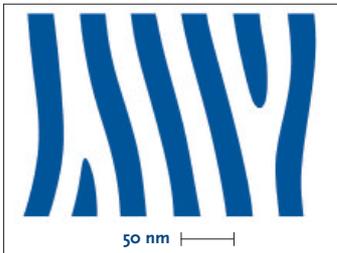


Viele moderne Bauelemente der Mikroelektronik beruhen auf zweidimensionalen Metallen. Einige Anwendungen wurden überhaupt erst durch die Grundlagenforschung auf diesem Gebiet möglich. Ein Beispiel dafür ist eines der genauesten und stabilsten Messgeräte für den elektrischen Widerstand, das zur Zeit existiert. Es beruht auf dem Quanten-Hall-Effekt: Setzt man ein zweidimensionales Metall einem magnetischen Feld aus, so ist der elektrische Widerstand mit enormer Genauigkeit durch gut bekannte, fundamentale Konstanten der Physik wie die elektrische Ladung eines Elektrons gegeben.

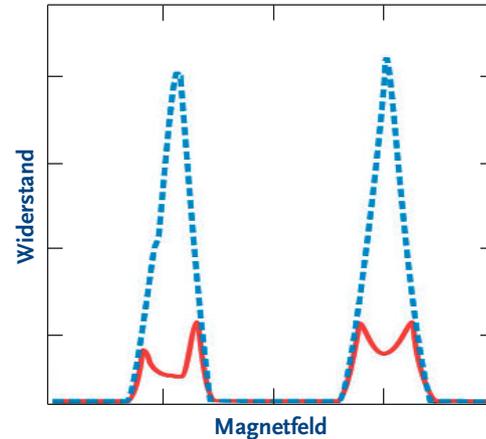
Die theoretischen Arbeiten am Fachbereich zu Hochtemperatur-Supraleitern und zum Quanten-Hall-Effekt werden auch dadurch motiviert, dass zweidimensionale Systeme sich grundsätzlich von dreidimensionalen Systemen unterscheiden können. Insbesondere spielen die Wechselwirkungen zwischen den Teilchen eine stärkere Rolle, wie man sich leicht veranschaulichen kann: Verzichtete man beim Bau von Straßen auf Brücken und damit auf die dritte Dimension, müsste man auf eine größere Zahl Autos, die sich begegnen könnten, Rücksicht nehmen und würde langsamer vorankommen. Ähnlich wie die Autos wollen sich die Elektronen in zweidimensionalen Systemen aufgrund ihrer elektrischen Ladung aus dem Weg gehen. Je nach System kann dies ganz unterschiedliche Konsequenzen haben.

In den Hochtemperatur-Supraleitern führt die Wechselwirkung zum Verschwinden des Widerstandes. Hierbei spielt der Spin der Elektronen eine wichtige Rolle. Einen ganzen 'Zoo' von Zuständen erhält man, wenn die Elektronen zusätzlich einem Magnetfeld ausgesetzt werden. In starken Magnetfeldern können sie sich beispielsweise gemeinsam mit dem Magnetfeld zu einem neuen 'Teilchen' verbinden. Dieses verhält sich dann ähnlich wie ein Elektron in einem viel geringeren Magnetfeld, allerdings sind die Kräfte zwischen diesen neuen Teilchen um einiges geringer als die Kräfte zwischen 'normalen' Elektronen. Bei etwas schwächeren Magnetfeldern können sich die Elektronen aber auch in Streifen anordnen. In diesem Fall hängt der elektrische Widerstand in der Ebene davon ab, ob der Strom parallel oder senkrecht zu den Streifen fließt. Dies ist in der Abbildung in

In einem Magnetfeld können sich Elektronen in zwei Dimensionen in Streifen anordnen. Verunreinigungen führen zu Unregelmäßigkeiten im Muster.



Abhängigkeit vom Magnetfeld gezeigt, wobei sich die Streifen nur bei solchen Magnetfeldern ausbilden, für die sich die rote und die blaue Kurve unterscheiden. Alle diese Effekte werden am Fachbereich theoretisch untersucht.



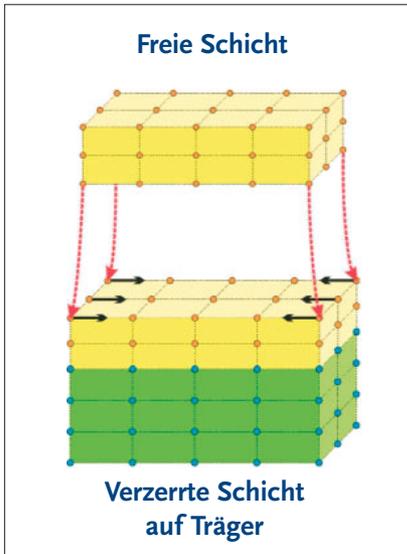
Ordnen sich die Elektronen in einem Streifenmuster, so hängt der elektrische Widerstand davon ab, ob der Strom parallel (durchgezogene Linie) oder senkrecht (gestrichelte Linie) zu den Streifen fließt.

Kleine Kräfte – Große Spannungen

In dem historischen Experiment von Otto von Guericke (inszeniert um 1656 in Magdeburg) ziehen zahlreiche schwere Gewichte an einer aus zwei Halbschalen lose zusammen gefügten und



Einer der Versuche Otto von Guerickes mit seinen Magdeburger-Halbkugeln: zeitgenössischer Stich.



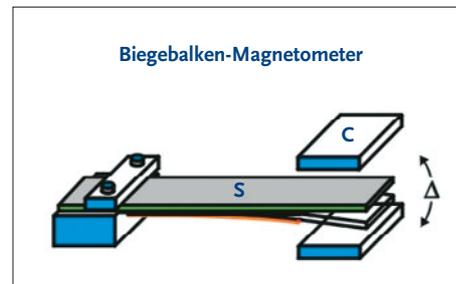
luftleer gepumpten Kugel aus Kupfer. Deren Gewichtskraft reicht jedoch bei weitem nicht aus, um die Kugel gegen den Luftdruck wieder aufzutrennen. Bei diesem Experiment treten in der Kugelschale aufgrund des großen Druckunterschiedes zwischen innen und außen zwar enorme Spannungen auf, die Kraft, die dabei auf jedes einzelne Kupferatom in der Kugelschale wirkt, ist jedoch winzig.

Ein ähnlicher Zusammenhang findet sich auch bei modernen Bauelementen der Mikroelektronik, in denen zunehmend ultradünne, kristalline Schichten zum Einsatz gelangen, deren atomarer Aufbau durch das Trägermaterial (z.B. Silizium- oder Galliumarsenid-Kristalle) bestimmt wird. Allerdings können hier Materialspannungen und Kräfte auftreten, die 10.000 bis 100.000fach größer als in dem Experiment von Guerickes sind. Die Spannungen entstehen während der Herstellung der Schichten, bei der das Material auf den Träger (Substrat) aufgedampft wird. Die Schicht wächst nicht mit ihrer eigenen Kristallstruktur, sondern passt sich der des Trägermaterials an. Man spricht von epitaktischem Wachstum. Aufgrund der unterschiedlichen Gitterabmessungen von Schicht- und Trägermaterial ist das Kristallgitter epitaktischer Dünnschichten vielfach stark verzerrt, wodurch sich die extrem hohen, weit oberhalb der Reißfestigkeit des Volumenmaterials liegenden mechanischen Spannungen (1-10 GPa) ergeben können. So hohe Spannungswerte haben einerseits fatale Auswirkungen auf die Haltbarkeit der Bauelemente, sie können andererseits aber auch neue Materialeigenschaften bewirken, die von den ursprünglichen Eigenschaften des Materials, aus dem die Schicht besteht, abweichen.

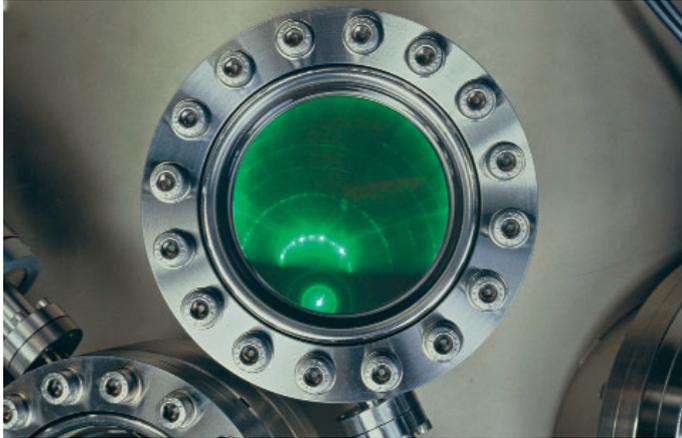
Obwohl die mechanischen Spannungen (Kraft/Fläche) in epitaktischen Dünnschichten extreme Werte annehmen können, sind die dazuge-

Beim epitaktischen Wachstum passt sich die aufwachsende Schicht der Kristallstruktur des Trägers an. Dabei verzerrt sich das Gitter der Dünnschicht, was zu riesigen mechanischen Spannungen führen kann.

hörigen Kräfte sehr klein, kleiner als ein millionstel Newton, da die Metallschichten in der Regel nur wenige Atomlagen 'dünn' sind. Zur Messung solcher kleiner Kräfte wurde am Fachbereich Physik eine im Ultrahochvakuum einsetzbare Messvorrichtung entwickelt, mit der sogar die Gewichtskraft von einem hundertstel Mikrogramm gemessen werden kann. Entsprechend der Abbildung unten wird bei dem Verfahren die Dünnschicht auf das an einer Seite eingespannte Substrat (S) aufgebracht. Die mechanischen und magnetischen Kräfte verspannen das System, wodurch das freie Ende des Substrats um den Winkel Δ ausgelenkt wird. Eine kapazitive Messeinrichtung (C) bestimmt den Winkel mit einer Empfindlichkeit, dank derer sich einzelne Atomlagen unterscheiden lassen. Daraus kann beispielsweise der Absolutwert für die mechanische Spannung berechnet werden. In Zusammenarbeit mit dem Paul-Drude-Institut werden mit diesem Messverfahren die Mechanismen studiert, die beim epitaktischen Schichtwachstum für den Aufbau und die Relaxation der mechanischen Spannungen verantwortlich sind. Da mit der Entwicklung von mechanischen Spannungen auch magnetische Vorgänge verknüpft sind, eignet es sich auch sehr gut, um magnetische Kenngrößen (daher der Name 'Biegebalken-Magnetometer') zu bestimmen, sowie insbesondere auch für die Untersuchung kleinster magnetostriktiver Kräfte. Diese entstehen, wenn in der Dünnschicht magnetische Kräfte auftreten und das Kristallgitter zusätzlich verspannen. Ihre Untersuchung steht vor allem bei epitaktischen Schichtsystemen im Vordergrund, die für mögliche Anwendungen in einer zukünftigen 'Spin-Elektronik', die das magnetische Moment der Elektronen ausnutzt, relevant sind.



Biegebalken-Magnetometer: Die Auslenkung (Δ) des beschichteten Substrates (S) aufgrund der mechanischen und magnetischen Kräfte wird gemessen. Daraus lassen sich mechanische Spannungen, Magnetostruktion und Magnetisierung berechnen.



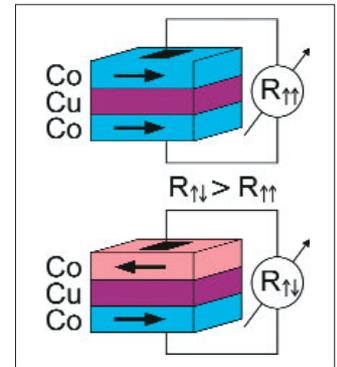
Elektronenbeugungsbild einer Silizium-Einkristalloberfläche. Die regelmäßige Anordnung der Atome an der Oberfläche führt zu Punkten und Kreisen auf dem Sichtschirm.

Ultradünne Magnete

Oft vergehen Jahrzehnte, bevor Resultate aus der Grundlagenforschung in technische Anwendungen umgesetzt werden. Bei vielen Erkenntnissen, die seit einigen Jahren bei der Erforschung dünner magnetischer Schichten gewonnen werden, erfolgt die technologische Umsetzung deutlich schneller; sie revolutionieren schon heute die Mikroelektronik. So bestehen beispielsweise die Sensoren in Automatisierungs- oder Sicherheitssystemen von PKWs oder in Programmwahlschaltern von Waschmaschinen aus magnetischen Schichtsystemen. Die völlig neuartigen Eigenschaften derartiger magnetoelektronischer Bauelemente werden durch die Kombination und Strukturierung bereits bekannter Materialien erzeugt: In Schichtstrukturen atomarer Dimensionen angeordnet, ergeben sich ihre magnetischen und elektronischen Eigenschaften aus der Reihenfolge der Materialien und der Wahl der Schichtdicken.

In den kleinen Dimensionen nur weniger Atomlagen dicker Schichten regiert die Quantenphysik. Sie bewirkt Eigenschaften, die 'klassisch' nicht zu verstehen sind, sondern auf die Welleneigenschaften der Elektronen und ihre magnetischen Momente zurückzuführen sind. Betrachtet man z.B. einen dünnen ferromagnetischen Metallfilm aus Kobalt, so zeigt dessen Magnetisierung überall homogen in eine Richtung. Fügt man horizontal eine nichtmagnetische Zwischenschicht beispielsweise aus Kupfer ein, die nur wenige Atomlagen dick ist, dann ist der Ko-

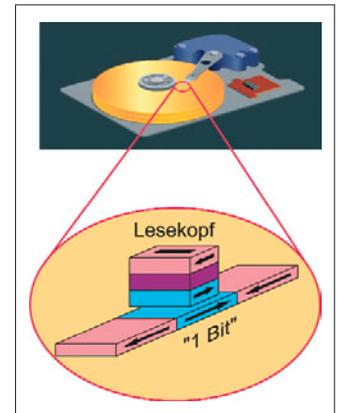
baltfilm zwar geteilt, aber beide Teile können noch miteinander 'kommunizieren': Ihre Magnetisierung richtet sich entweder parallel oder antiparallel zueinander aus – je nachdem wie dick die Kupferschicht ist. Allerdings ist die Kopplung der Magnetisierung nur schwach, so dass ein geringes äußeres Magnetfeld ausreicht, um sie in eine andere Richtung zu drehen. An die Magnetisierung ist der elektrische Widerstand des Schichtsystems gekoppelt: Bei antiparalleler Orientierung der Magnetisierung ist er wesentlich höher als bei paralleler. Dieser Effekt wird als Riesenmagnetowiderstand bezeichnet und zur Konstruktion vieler Bauteile in ganz unterschiedlichen Anwendungsbereichen ausgenutzt. Da bereits ein kleines äußeres Feld die Orientierung der Magnetisierung drehen und dabei den Widerstand sehr stark verändern kann, finden derartige Schichtsysteme beispielsweise Anwendung in den Leseköpfen von Festplatten oder Sensoren. Speicherzellen, deren Inhalt nach dem Abschalten des Rechners erhalten bleiben soll, könnten ebenfalls aus solchen Schichtstrukturen aufgebaut werden.

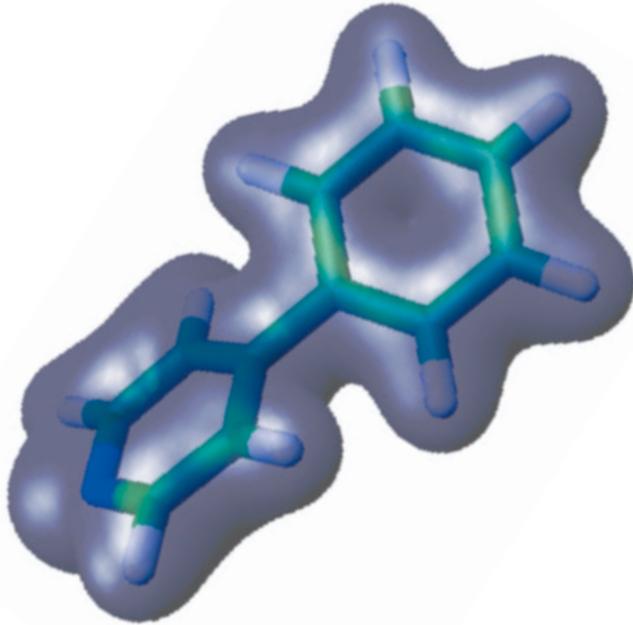


Schichtsystem aus magnetischem und nichtmagnetischem Material. Die Dicke der Zwischenschicht bestimmt die Orientierung der Magnetisierung – und daran gekoppelt den Widerstand.

Mehrere Arbeitsgruppen am Fachbereich stellen dünne magnetische Filme und Schichtstrukturen in Vakuumkammern her und untersuchen deren magnetische Eigenschaften mit einer Vielzahl von experimentellen Methoden. Dabei gehen Experiment und Theorie oft gemeinsam vor, letztere liefert das Verständnis der beobachteten Prozesse und ist die Basis für die Planung neuer Experimente. Neben den eigentlichen magnetischen Eigenschaften, die mit verschiedenen Methoden untersucht werden, interessiert auch die Verknüpfung des Magnetismus mit der atomaren Struktur der Proben sowie die zeitliche Entwicklung des Magnetismus nach einer Anregung der Schicht mit einem Laserpuls. Die wissenschaftlichen Zielsetzungen sind breit gestreut. Sie reichen von der grundlagenorientierten Untersuchung der Eigenschaften und des Verhaltens einiger weniger magnetischer Atome auf kristallinen Substraten über dickere (trotzdem nur wenige Nanometer dünne) Schichten bis hin zu anwendungsnahen Projekten.

Magnetische Schichtstrukturen wie oben beschrieben werden z.B. in Leseköpfen von Festplatten eingesetzt.





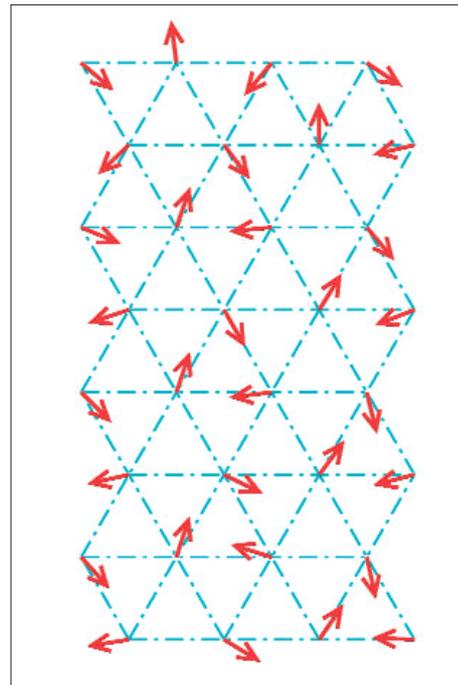
Berechnete Elektronenverteilung (Fläche konstanter Dichte) für das Molekül Phenylpyridin.

Viele Teilchen

Die Eigenschaften von Materie ergeben sich aus dem Zusammenwirken sehr vieler Atome. In Flüssigkeiten sind diese noch relativ frei beweglich, so dass die Substanz ihre Form leicht ändern kann. Im festen Zustand bilden sie meist einen regelmäßigen Kristall und schwingen nur noch um feste Lagen. Wenn die Teilchen außerdem kleine Elementarmagnete sind, die sich gegenseitig ausrichten, erhält man einen magnetischen Körper. In der Natur gibt es noch viele andere solcher geordneten Zustände, etwa in Form der flüssigen Kristalle, wo sich stabförmige Moleküle ausrichten. Besonders interessant ist der Bereich nahe dem Übergang zwischen Ordnung und Unordnung, da man hier bei den verschiedenen Systemen oft gemeinsame Züge findet. Das theoretische Studium dieser Erscheinungen fällt in den Bereich der statistischen Physik, die hierfür besondere Methoden entwickelt hat. Dazu gehören heutzutage auch numerische Verfahren wie die Monte-Carlo-Methode, bei der man für ein System von z.B. einigen hundert Teilchen die

für das Verhalten wichtigsten Anordnungen 'auswürfelt'.

Das Problem wird schwieriger, wenn man die Teilchen nicht klassisch, sondern nach den Regeln der Quantenmechanik behandeln will. Das ist beispielsweise notwendig, wenn es sich um die Elektronen in einem größeren Molekül oder in einem Kristall handelt. Um ihren Zustand exakt zu beschreiben, wäre eigentlich eine Gleichung zu lösen, in der die Orte aller Elektronen und Kerne vorkommen. Das ist aber nicht möglich, und man ist deshalb auf Näherungsverfahren angewiesen. Eine Möglichkeit besteht darin, nicht die genauen Positionen der Elektronen sondern nur deren mittlere Verteilung (d.h. ihre Dichte) zu verwenden, wodurch sich die Situation beträchtlich vereinfacht. Es muss jedoch möglichst genau berücksichtigt werden, dass sich die Elektronen abstoßen und sich deshalb nicht unabhängig von einander bewegen. Dazu ist es nötig, entspre-



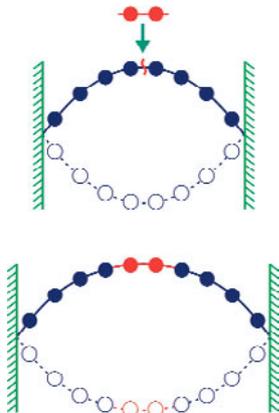
Magnetische Ordnung auf einem Dreiecksgitter, berechnet mit einer Monte-Carlo-Simulation.

chende Ansätze zu finden und sie numerisch auf ihre Brauchbarkeit für eine Vielzahl physikalischer Probleme hin zu testen. Mit diesem Verfahren lassen sich physikalische Eigenschaften von Molekülen und Festkörpern berechnen.

Bei einer anderen Methode startet man von einem kleinen System, das man noch exakt behandeln kann, und macht es schrittweise größer. Dabei müssen zwar schließlich auch Details weggelassen werden, der Fehler bleibt aber klein, wenn man das System von innen her vergrößert (siehe Abbildung). Für kettenförmige Systeme lassen sich damit extrem hohe Genauigkeiten erreichen.

Am Fachbereich wird an allen genannten Themen gearbeitet. Insbesondere das Verfahren zur Behandlung der Elektronen über ihre Dichte wird methodisch weiter entwickelt und auch auf supraleitende Materialien und auf zeitabhängige Probleme angewendet. Ebenso werden Übergänge aus dem ungeordneten Zustand in komplizierte magnetische Strukturen sowie Übergänge in die Glasphase, bei der sich die Atome nicht ganz regelmäßig anordnen, theoretisch behandelt. Auch die zur Zeit experimentell viel untersuchte Bose-Einstein-Kondensation, bei der sich alle Atome im gleichen Quantenzustand ansammeln, gehört zu den Forschungsthemen.

Vergößerung eines Systems, hier einer schwingenden Kette aus Massen: Die neue Grundschwingung (unten) entsteht in guter Näherung aus der alten (oben) durch Einfügung zweier Massen in der Mitte.



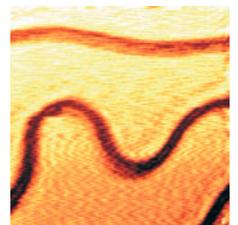
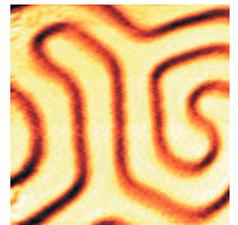
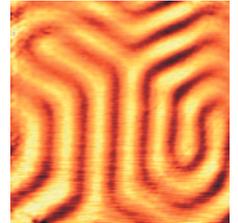
Licht als Sonde

Licht ist das vermutlich wichtigste Werkzeug des Physikers. Er beobachtet damit die größten und die kleinsten Objekte, ihre äußere Form und ihre inneren Strukturen, ihre Bewegungen und ihre Energiezustände. Er kann damit passiv betrachten oder aktiv einwirken. Es genügt allerdings nicht, nur mit sichtbarem Licht zu arbeiten. Für die verschiedenen Fragestellungen wird vielmehr der gesamte Spektralbereich von Radiowellen bis zu Röntgenstrahlen benötigt.

Um kleine Strukturen zu sehen, braucht man in der Regel kleine Wellenlängen. Das Auflösungsvermögen von Lichtmikroskopen ist deswegen beschränkt. Es gibt allerdings eine relativ neue Methode, dies zu umgehen, die auch am Fachbereich benutzt wird. Dabei wird das Objekt optisch abgetastet, indem man die feine Spitze eines Glasfaser-Lichtleiters über das Material führt und die durchgelassene oder reflektierte Intensität misst. Die Auflösung ist dann nur durch den Durchmesser des Lichtleiters bestimmt, der bei 10^{-7} m liegt. Damit wurden die in der Abbildung gezeigten Aufnahmen der magnetischen Struktur eines dünnen Films gewonnen, die bei Verwendung von polarisiertem Licht sichtbar wird. Die dunklen bzw. hellen Flächen entsprechen Bereichen, in denen die Richtung der Magnetisierung nicht parallel zur Filmebene ist. Ein zunehmendes äußeres Magnetfeld richtet die Bereiche mehr und mehr aus, wodurch sich die Breite und die Form der Mäander ändern.

Röntgenlicht hat Wellenlängen, die etwa den Atomabständen in Kristallen entsprechen. Durch Vermessung der Beugungsmuster lassen sich diese Abstände auf mehrere Stellen genau bestimmen. Man kann aber auch bestimmte Atome in einem größeren Molekül gezielt herausgreifen, indem man Röntgenlicht verwendet, dessen Wellenlänge in der Nähe charak-

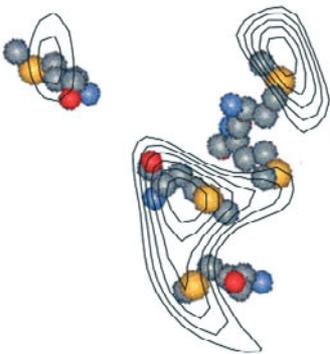
15×10^{-6} m



Magnetisierungsmuster in einem dünnen Granatfilm für von oben nach unten zunehmendes Magnetfeld.

Höhenlinienprofil der Elektronendichte in der Nähe von Schwefelatomen (gelb) innerhalb eines Rhodopsin-Moleküls

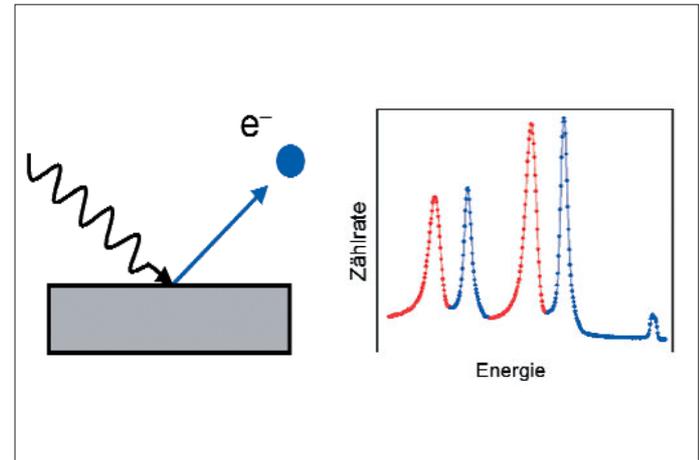
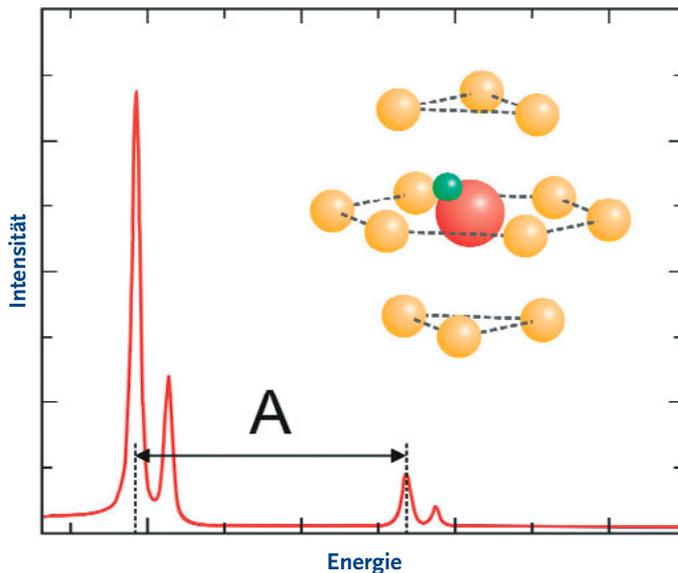
teristischer Werte liegt. Auf diese Weise wurden in dem Molekül Rhodopsin neun Schwefelatome untersucht, die an Aminosäuren gebunden und für seine Funktion besonders wichtig sind. Diese sind in der Abbildung gezeigt, wobei die Höhenlinien die Elektronendichte in der Nähe dieser Atome angeben. Das hier verwendete Licht hat eine Wellenlänge von 5×10^{-10} m.



Will man Auskunft über die Schwingungen oder Rotationen von Molekülen gewinnen, so misst man, bei welchen Wellenlängen Licht absorbiert wird. Dafür braucht man im Allgemeinen infrarotes Licht. In der Abbildung unten ist ein Beispiel gezeigt, in dem HCl-Moleküle untersucht wurden, die dünn verteilt in einen Argonkristall eingebaut waren. Die diskreten Absorptionslinien bedeuten,

1 nm

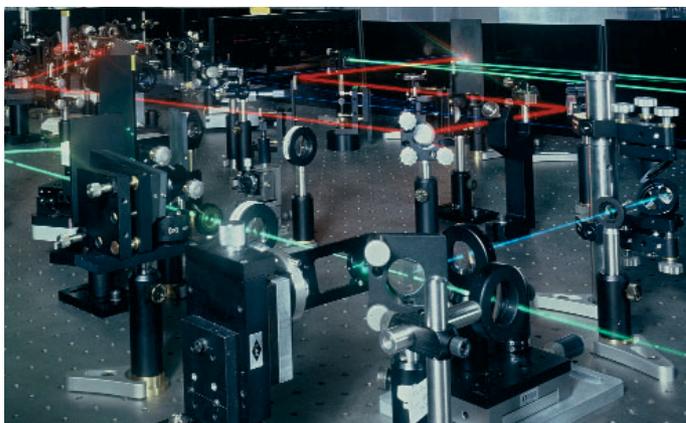
Absorption von infrarotem Licht durch HCl-Moleküle in einem Käfig von Argon-Atomen.



Herauslösung von Elektronen aus einem festen Körper durch Licht (Photoemission): Schema und Resultat für Ytterbium. Rot: Beitrag der Oberfläche.

dass sich nur genau definierte Rotationen anregen lassen. Der Abstand A gibt die entsprechende Energie an. Die Moleküle drehen sich dabei pro Sekunde rund 10^{12} mal um ihre Achse. Eine weitergehende Analyse dieses Spektrums ergibt, dass sich die Moleküle in einem Käfig aus zwölf Argon-Atomen befinden. Dieser behindert die Drehbewegung und zwingt die Moleküle zu einer zusätzlichen Schwingung, an der auch die Käfigatome teilnehmen.

Anstatt Schwingungen anzuregen, kann man mit Licht auch Elektronen aus Molekülen oder festen Körpern herauslösen und die Verteilung ihrer Energien messen (siehe Abbildung oben). Dafür sind höhere Energien notwendig, so dass man hier mindestens mit ultravioletterem Licht arbeiten muss. Man erhält dann detaillierte Informationen über die Zustände der Elektronen im Festkörper und über die Bindung der Atome. Das Verfahren erlaubt es auch, den Oberflächenbereich getrennt zu beobachten und so die Änderung der physikalischen Eigenschaften an der Oberfläche zu bestimmen. Die Methode wird in großem Umfang am Fachbereich eingesetzt. Eine entsprechende Messung ist in der Abbildung für das Metall Ytterbium gezeigt.

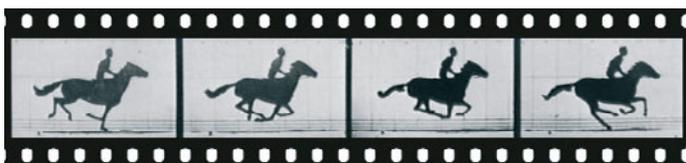


Versuchsaufbau bei einem Laserpuls-Experiment.

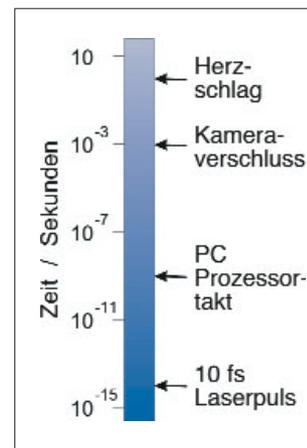
Blitzschnell beobachten

Die Untersuchung extrem schneller Vorgänge in der Natur ermöglicht oft Einblicke in bis dahin unverstandene Phänomene. Noch vor hundert Jahren war ein hochdotierter Preis auf die Frage ausgesetzt, ob ein Pferd beim Galopp immer mit mindestens einem Huf den Boden berührt. Klarheit brachten die Bilder einer Kamera mit Schlitzverschluss, die ein galoppierendes Pferd mit allen vier Hufen in der Luft zeigten. Mit dieser Technik wurde die Beobachtung von Bewegungsabläufen im Zeitbereich von Millisekunden (10^{-3} s) möglich. Die technische Entwicklung zur Analyse extrem schneller Prozesse ist seitdem enorm vorangeschritten. Heute existieren Lasersysteme, die ultrakurze Lichtblitze mit einer Dauer von nur wenigen Femtosekunden (10^{-15} s) erzeugen können. In dieser kaum vorstellbar kurzen Zeit durchläuft das Licht, das in einer Sekunde nahezu die Strecke zwischen Erde und Mond zurücklegt, gerade die Breite eines Haares.

Mit solchen ultrakurzen Laserpulsen ist es möglich, den Ablauf elementarer Vorgänge, wie zum Beispiel die Bewegung von Atomen während chemischer Reaktionen, direkt zu verfolgen. Dabei wird durch



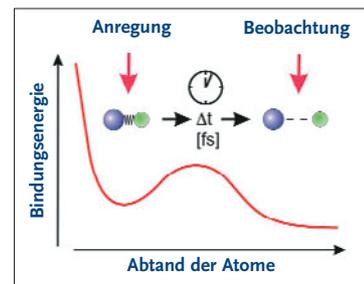
Einstrahlung eines ultrakurzen Laserpulses eine Reaktion angestoßen, woraufhin die Atome sich bewegen und umordnen. Mit einem zweiten, kurz darauf eintreffenden Laserpuls wird ein Schnappschuss der momentanen Anordnung der Atome aufgenommen. Hierzu wird die charakteristische Absorption der Moleküle in Abhängigkeit vom Abstand der Atome und der Farbe des eingestrahlten Laserlichts ausgenutzt. Die Aneinanderreihung dieser Schnappschüsse – wie die Bilder eines Trickfilms – erlaubt Rückschlüsse auf den zeitlichen Ablauf der chemischen Reaktion. Durch Veränderung der Farbe des ersten Laserpulses kann systematisch untersucht werden, wieviel Energie erforderlich ist, um bestimmte Schwingungen anzustoßen oder den Bruch von Bindungen in Molekülen auszulösen. Für die Entwicklung dieser Methode wurde Ahmed Zewail 1999 mit dem Nobelpreis ausgezeichnet.



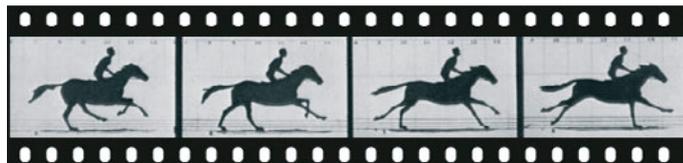
Wie schnell verlaufen verschiedene Prozesse?

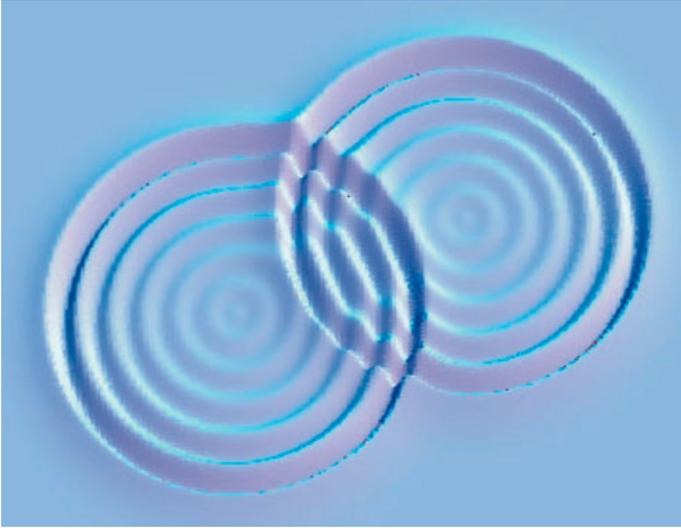
Am Fachbereich Physik wird diese experimentelle Methode zur Untersuchung verschiedenster

physikalischer Phänomene verwendet. Diese reichen von der Photosynthese in Pflanzen bis zum schnellen optischen Schalten und Lesen magnetischer Strukturen. Ein Schwerpunkt liegt auf sehr schnell verlaufenden Reaktionen von Molekülen und kleinen Teilchen im Vakuum, in Flüssigkeiten und in fester Umgebung. Femtosekundenlaser werden auch zur Umweltdiagnostik verwendet, um Luftverunreinigungen in einigen Kilometern Höhe schnell und sicher zu analysieren. Aktuelle Entwicklungen von Lichtquellen, die Lichtpulse von immer kürzerer Dauer aussenden, eröffnen die Perspektive, in Zukunft selbst die noch schnelleren Bewegungen der Elektronen um die Atomkerne zu erfassen.



Prinzip der experimentellen Beobachtung des Ablaufs extrem schneller Reaktionen.





Interferenzmuster bei der Überlagerung zweier kreisförmiger Wellenzüge.

Kontrolle durch Licht

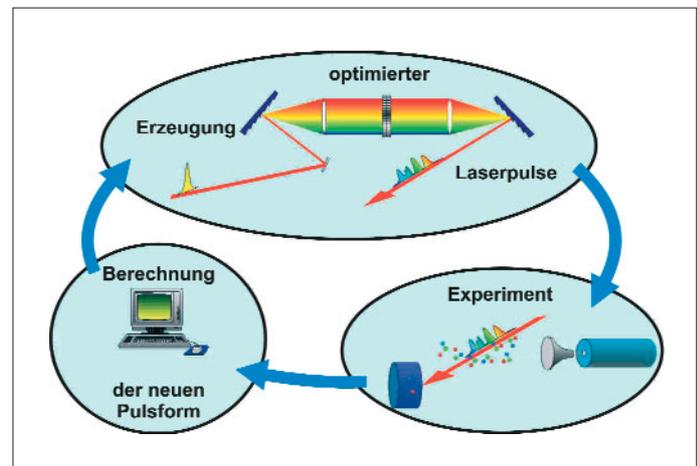
Ein alter Traum von Physikern und Chemikern ist es, Reaktionsabläufe mit Licht zu steuern. Dieser Traum ist durch den technischen Fortschritt bei der Erzeugung ultrakurzer Laserpulse mit nahezu beliebigem Intensitätsverlauf in greifbare Nähe gerückt. Ziel ist dabei, komplexe Bewegungen von Atomen in Molekülen durch Anregung mit geeignet modellierten Laserpulsen auszulösen und eine bestimmte chemische Reaktion durch gezielte Überlagerung der Schwingungen der Atome zu steuern. Wie kann man sich diese Kontrolle von Reaktionen durch Licht vorstellen?

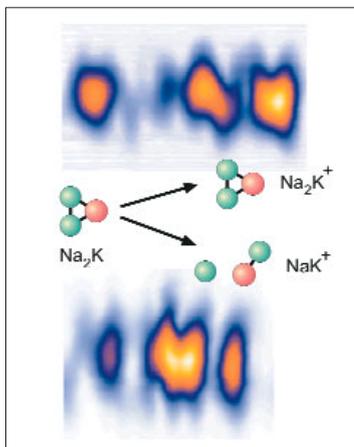
Betrachtet man Wasserwellen, die zum Beispiel entstehen, wenn man zwei Steine in einen Teich wirft, so erkennt man ein regelmäßiges Muster dort, wo sich die beiden Wellenzüge überlagern. In diesem Interferenzbereich können sich die Wellen entweder verstärken, wenn beide Wellen im Gleichtakt – d.h. mit gleicher Phase – schwingen, oder auslöschen, wenn beide Wellen sich im Gegenteil – d.h. mit einer Phasenverschiebung um eine halbe Wellenlänge (180°) – bewegen. Die Verschiebung zwischen beiden Wellen, d.h. die relative Phase zwischen beiden Wellenzügen, spielt für die Bewegung der Wasseroberfläche an einem bestimmten Ort eine wichtige Rolle. Das

gleiche Phänomen gibt es auch bei Lichtwellen: Fällt Licht durch zwei eng benachbarte Spalte, so beobachtet man hinter dem Doppelspalt ebenfalls ein entsprechendes Interferenzmuster aus hellen und dunklen Streifen.

Überträgt man diese Gedanken auf die Überlagerung der Schwingungen von Atomen in Molekülen, so lässt sich verstehen, wie durch Licht ihre Bewegung kontrolliert werden kann. Durch geeignet erzeugte Laserpulse versucht man, bestimmte Schwingungen in einem Molekül zu verstärken oder zu unterdrücken. Im einfachsten Fall wird dies durch zwei Laserpulse erreicht, die im richtigen zeitlichen Abstand voneinander die Schwingung in Phase oder in Gegenphase anregen, wie dies zum Beispiel beim wiederholten Anstoßen einer Kinderschaukel geschieht. Da Molekülschwingungen im Allgemeinen recht komplizierte Bewegungen sind, reicht die Bestrahlung mit einer einfachen Folge von Laserpulsen aber in der Regel nicht aus, um den gewünschten Effekt zu erzielen. Man benutzt vielmehr Laserpulse, die in ihrem zeitlichen Verlauf von Intensität und Farbe der komplexen Molekülbewegung optimal angepasst sind. Diese optimalen Pulsformen werden durch ein selbstlernendes Verfahren ermittelt (siehe untenstehende Abbildung). Ultrakurze Laserpulse werden durch einen Modulator geschickt und solange verändert, bis genau die gewünschte Reaktion des Moleküls abläuft.

Schema eines Experiments zur Steuerung photoinduzierter Reaktionen mittels optimierter Laserpulse, die in einer Schleife sukzessive verändert werden.





Am Fachbereich Physik wird diese experimentelle Methode im Rahmen eines Sonderforschungsbereichs angewandt, um verschiedene durch Licht ausgelöste (photoinduzierte) Prozesse steuern und analysieren zu können. Die nebenstehende Abbildung zeigt zwei Beispiele für einen solchen Optimierungsprozess bei der photoinduzierten Ionisation eines dreiatomigen Moleküls. Das Optimierungsverfahren für den zeitlichen Verlauf der Laserpulse liefert zwei verschiedene Pulsformen, mit denen die jeweilige Ausbeute eines Reaktions-

Reaktionspfade von Na_2K ausgelöst durch zwei optimierte Laserpulse, deren zeitliche Struktur oben und unten dargestellt ist.

pfads gegenüber der konkurrierenden Reaktion maximal wird. Ziel ist es, chemische Reaktionen auch für komplexere Systeme wesentlich selektiver, d.h. möglichst frei von unerwünschten Nebenprodukten, und effizienter ablaufen zu lassen.



Sonnenblumen richten sich mit Hilfe von Photorezeptoren nach der Sonne aus.

Umwandlung von Sonnenlicht

Sonnenenergie strömt seit der Entstehung des Planetensystems auf die Erde, wird in Wärme umgewandelt und hält die Atmosphäre und Ozeane in ständiger Bewegung. Die lebenden Organismen profitieren von diesem Klima, nutzen das Licht aber auch noch in ganz anderer Weise: zur

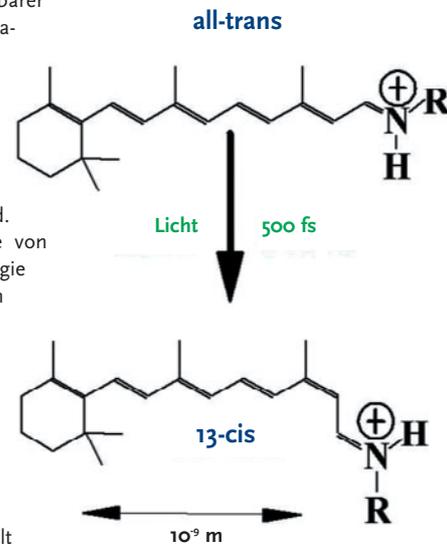
Gewinnung von speicherbarer Energie und von Information.

Bei der Photosynthese erzeugen grüne Pflanzen und auch gewisse Bakterien Zucker aus Wasser und Kohlendioxid. Dies geschieht mit Hilfe von Sonnenlicht, dessen Energie auf diese Weise in Form chemischer Verbindungen gespeichert wird. Auch die in Kohle und Öl enthaltene Energie wurde ursprünglich von Pflanzen aufgenommen und gesammelt.

Diese Photosynthese spielt sich in großen Proteinen ab, die aus mehreren Einheiten bestehen.

Das Sonnenlicht wird dabei von Chlorophyllmolekülen eingefangen und seine Energie dann in das Reaktionszentrum des Proteins weitergeleitet. Die Lichtquanten lösen eine Reaktionskette aus, in der Elektronen über eine Membran transportiert werden und sie ähnlich einem Akku aufladen. Der Elektronentransport läuft über eine Reihe von molekularen Untereinheiten, die als Kofaktoren bezeichnet werden. Die Einzelschritte der Photosynthese umspannen Zeitbereiche von Femtosekunden bis Sekunden. Dabei verlaufen die ersten Reaktionsschritte am schnellsten, so dass konkurrierende Prozesse keine Chance haben, die Energie an sich zu ziehen. Am Ende der Reaktionskette ist die Energie so weit stabilisiert, dass sie für langsam verlaufende chemische Reaktionen zur Verfügung steht.

Ganz ähnliche Vorgänge laufen in Photorezeptoren ab, die Pflanzen Informationen darüber liefern, wann und wie sie ihre Blätter nach dem Sonnenlicht ausrichten müssen. Solche Photorezeptoren finden sich auch in vielen Bakterien und bei den höheren Lebewesen, u.a. auch in unserem Auge. In den von Menschen entwickelten photovoltaischen Zellen (Solarzellen) wird ebenfalls Sonnenlicht in speicherbare Energie, hier in elektrische Energie, umgewandelt. Sie ist die Energieform, die am Viel-

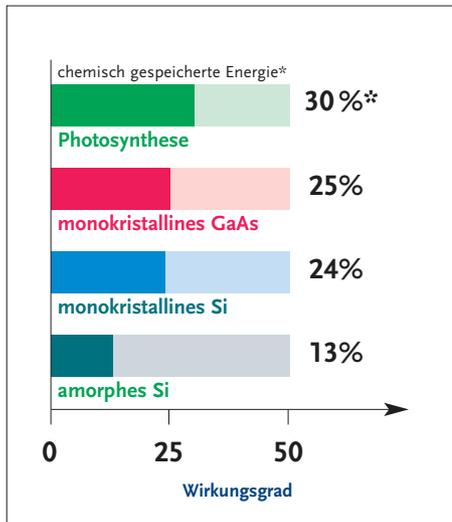


Beispiel einer durch Licht ausgelösten Strukturänderung im Bakteriorhodopsin. Solche Reaktionen spielen sowohl bei der Energiegewinnung aus Sonnenlicht als auch bei der Photorezeption eine Rolle.

seitigsten verwendet werden kann. Entsprechend gibt es eine große Zahl von Einsatzmöglichkeiten für Solarzellen dort, wo keine hohe elektrische Leistung erforderlich ist, von Taschenrechnern bis zu Parkuhren. Physikalisch nutzt man auch hier eine schnelle Elektronenübertragung an Grenzschichten aus, um durch Einstrahlung von Licht positive und negative Ladungsträger zu trennen und sie als Quelle elektrischer Energie einzusetzen.

Die Abläufe bei der Photovoltaik sind sehr gut verstanden, aber ihre Effizienz liegt noch hinter der von natürlichen Systemen (siehe Grafik). Deren Funktionsprinzipien sind wiederum noch nicht im Detail bekannt. Während bei den Solarzellen einfache, aber wenig flexible Strukturen verwendet werden, bedient sich die Natur äußerst komplexer Gebilde, die trotz ähnlichem Aufbau ganz unterschiedliche Funktionen haben können.

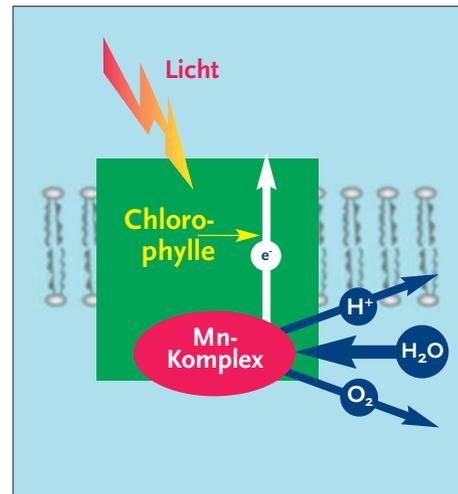
Wirkungsgrad der Photosynthese und verschiedener Solarzellen im Vergleich.



Am Fachbereich befasst man sich mit beiden Arten von Systemen und den zugrunde liegenden Fragestellungen. Mit ausgefeilten magnetischen Resonanzmethoden, Röntgen- und Laserspektroskopie wird an der Aufklärung der physikalischen Prinzipien biologischer Funktionen gearbeitet. Auf der anderen Seite wird versucht, die Struktur und das verwendete Material von Solarzellen weiter zu optimieren, um deren Wirkungsgrad zu erhöhen.

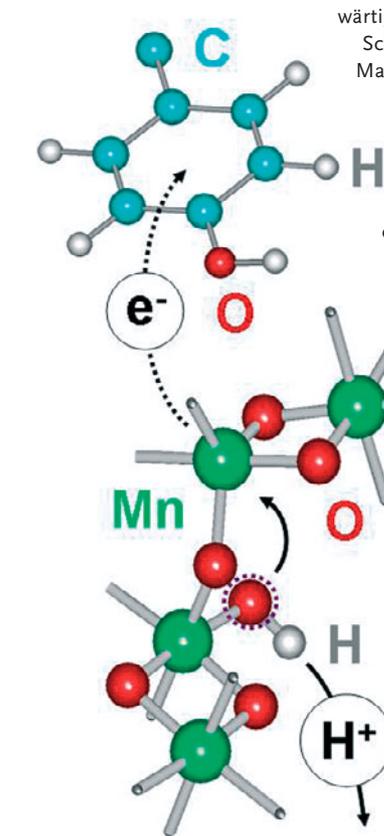
Biomoleküle unter der Lupe

Ob Bakterium oder Mensch, in den Zellen der Lebewesen werden fast alle zentralen Aufgaben von einer Klasse biologischer Makromoleküle übernommen, die wir als Proteine bezeichnen. Proteine ermöglichen sowohl Muskelaktivität als auch das Denken, transportieren Moleküle, beteiligen sich an der Bildung hunderter verschiedener Substanzen, gewährleisten die Energieversorgung der Zellen und nutzen die Erbinformation zur fehlerfreien Synthese neuer Proteine. Durch die großen Erfolge der molekularen Biowissenschaften ist heute bekannt, was Proteine alles leisten. Die Physik sucht nun Antworten auf die Frage, wie Proteine diese erstaunlichen Leistungen erbringen können.



Schema des wasserspaltenden Prozesses am Mangancluster.

Zahlreiche Proteine arbeiten als Katalysatoren. In die Proteine eingebundene Metalle ermöglichen chemische Prozesse, die derart schonend und effizient kein Chemiker im Reagenzglas durchführen kann. Erstaunlicherweise kommt die Natur für Katalyseprozesse bei der Energieumwandlung mit häufig vorkommenden Elementen wie Eisen, Kupfer, Mangan oder Molybdän aus, während die chemische Technologie bisher meist Edelmetalle wie Platin oder Palladium benötigt. Ein Beispiel ist die Gewinnung von Elektronen und Protonen durch die Spaltung des allgegen-



wärtigen Wassers in einem der ersten Schritte der Photosynthese. Vier Manganatome innerhalb eines Proteinkomplexes ermöglichen diesen Prozess. Die Wasser-spaltung ist mit einer übergehenden Strukturänderung des Mangan-clusters verknüpft.

Eine Arbeitsgruppe am Fachbereich verfolgt die kleinen Bewegungen des Mangans und seiner Nachbaratome, um Einblick in den Mechanismus dieser Biokatalyse zu bekommen (siehe Abbildung). Dazu wird unter anderem brillante Röntgenstrahlung genutzt: Bestrahlt man den Proteinkomplex mit Röntgenlicht, so können mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit Elektronen aus der inneren Atomhülle der Manganatome freigesetzt werden, vorausgesetzt, die Energie des Röntgenlichtes liegt oberhalb einer für jede Schale charakteristischen Schwelle. Die Wahr-

scheinlichkeit der Elektronenemission hängt aber auch von der Umgebung des Atoms ab. Zahl, Art und Abstand der Nachbaratome können dann aus einem Absorptionsspektrum, welches die Wahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Energie des Röntgenlichtes wiedergibt, bestimmt werden.

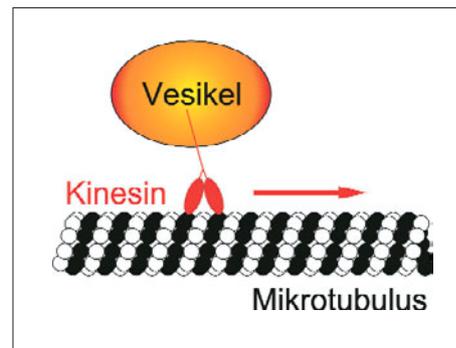
Einige Proteine sind regelrechte molekulare Motoren. Allerdings arbeiten auch sie nach anderen Prinzipien als technische Antriebe in der makroskopischen Welt. Ähnlich dem geschäftigen Treiben von Menschen auf Straßen bewegen sich beispielsweise Kinesine – winzige Motorproteine – entlang von Proteinketten, die ein dreidimensionales Schienensystem durch die Zelle spannen, und transportieren Vesikel – klei-

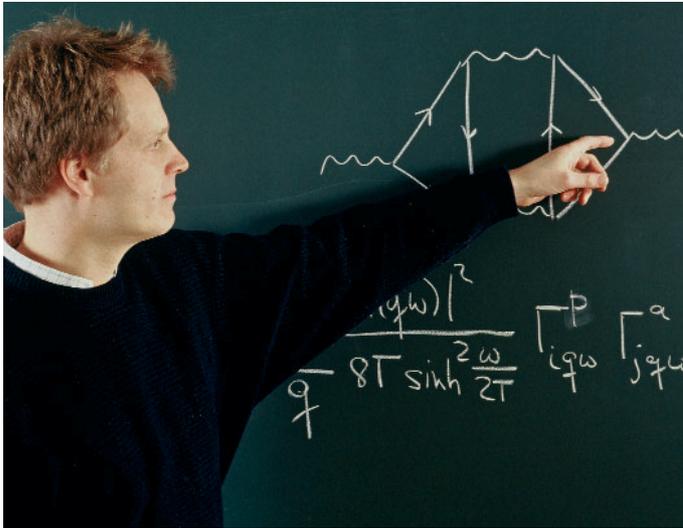
‘Schnappschuss’ des wasserspaltenden Mangan-komplexes im Photosystem in einem Zwischenzustand des katalytischen Zyklus. Die Pfeile zeigen die vermuteten Prozesse beim Übergang zum nächsten Zustand.

ne, bläschenförmige Kapseln, die bspw. Hormone, Enzyme oder Neurotransmitter enthalten. Ansätze zur Erklärung ihrer Fortbewegung müssen die Kopplung zwischen Energiezufuhr durch chemische Prozesse und der molekularen Mechanik der Proteine berücksichtigen. Eine wesentliche Rolle spielt auch die Brownsche Molekularbewegung; durch den Aufprall kleiner Moleküle wie z.B. Wasser auf die Kinesine erfahren diese unregelmäßige Kräfte. Durch eine Kombination von experimentellen und theoretischen Untersuchungen versucht man, den Mechanismen dieser Motoren auf die Spur zu kommen. Von der Theorie entwickelte Modelle müssen durch quantitative Informationen aus Experimenten überprüft werden.

Ziel der Arbeiten am Fachbereich ist es, ausgewählten Proteinen bei der Arbeit ‘zuzuschauen’ und so in enger Kooperation mit Biologen und Chemikern die physikalischen Grundlagen der Lebensprozesse zu erkunden. Dazu werden einerseits fortgeschrittene physikalische Methoden entwickelt und genutzt, die das Beobachten auf der submikroskopischen Ebene ermöglichen. Andererseits arbeiten Theoretiker an Modellen, die die Prinzipien der Funktionsweisen erklären.

Kinesine (rot) – winzige Motorproteine – bewegen sich in Zellen entlang von Proteinketten (weiß/schwarz) und transportieren Vesikel.

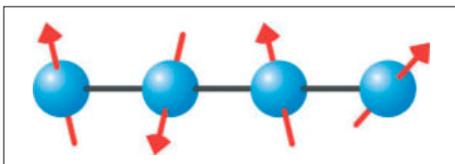




Exakt und genähert

Die Physik strebt danach, Dinge möglichst genau und in allen Details zu beschreiben. In bestimmten Fällen ist dies ohne Abstriche möglich. Betrachtet man etwa die Bewegung eines einzigen Planeten um die Sonne oder die Schwingungen von Massen, die mit idealen Federn gekoppelt sind, dann lassen sich die entsprechenden Gleichungen in voller Allgemeinheit lösen. Auch in der Quantenphysik gibt es solche Beispiele, etwa Modelle für Magneten, bei denen die Atome eine Kette bilden. Wenn es sich um sehr viele Teilchen handelt, also um ein makroskopisches System, dann interessiert besonders das Temperaturverhalten. Auch dies lässt sich für gewisse Modelle vollständig angeben. Diese 'exakt lösbaren Probleme' spielen als Orientierungs- und Bezugspunkte eine wichtige Rolle. Die Untersuchung ihrer Eigenschaften bildet einen eigenen Zweig der theoretischen Physik.

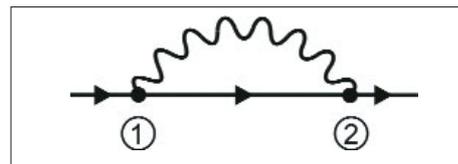
Eine Kette von Elementarmagneten (Pfeile) mit Kopplung zwischen den Nachbarn stellt ein quantenmechanisch exakt lösbares System dar.



In der Wirklichkeit hat man es jedoch selten mit diesen idealen Systemen zu tun. Um die Sonne kreisen insgesamt neun Planeten, die sich gegenseitig beeinflussen. Aufgrund dieser Beeinflussungen ist es schon für drei Körper unmöglich, ihre Bahnen allgemein zu berechnen. Da die gegenseitigen Störungen aber klein sind, besteht die Möglichkeit, sie mit Hilfe besonderer Verfahren zu behandeln. Sie zeigen, dass die einzelnen Planetenbahnen keine Ellipsen mehr sind, sondern über lange Zeiten zu Rosetten werden.

Das Problem, solche Störungen einer idealen, einfachen Situation zu behandeln, tritt in der Physik an vielen Stellen auf. In der Quantentheorie ist es üblich, die entsprechenden Korrekturen durch Diagramme grafisch darzustellen. Diese symbolisieren jeweils einen mathematischen Ausdruck, lassen sich aber auch anschaulich interpretieren. In der Abbildung unten ist dies für den Einfluss elektromagnetischer Strahlung auf die Bewegung eines Elektrons gezeigt. Je genauer man den Effekt der Störung berücksichtigt, desto mehr und kompliziertere Diagramme ergeben sich.

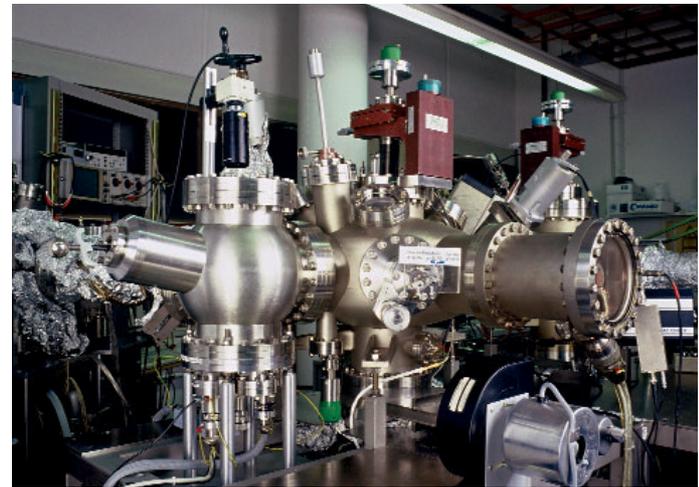
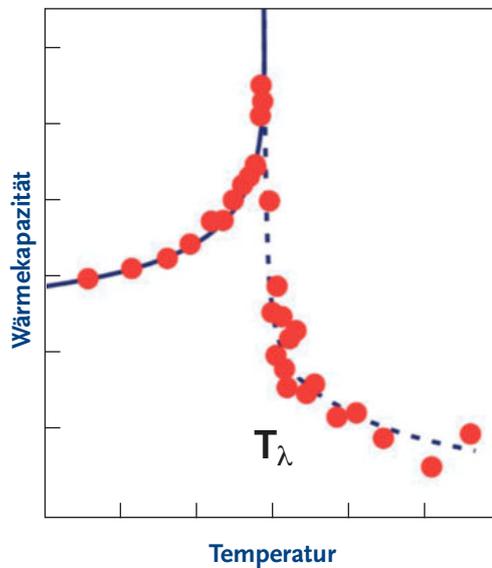
Am Fachbereich interessiert man sich für neue, lösbare Modelle, die beispielsweise für eine quantentheoretische Behandlung der Gravitation von Bedeutung sein können, aber auch für die Eigenschaften schon bekannter, die häufig nicht einfach zu bestimmen sind. Dazu kommen andere Probleme der theoretischen Physik, die eine besondere mathematische Strenge erfordern. Auch an Fragen der Störungstheorie wird gearbeitet. In diesem Fall besteht eine bekannte Schwierigkeit darin, dass bei genauerer Berücksichtigung der Störung die Korrekturen immer größer werden können, so dass man den Gesamteffekt nicht mehr sehen kann. Das lässt sich umgehen, wenn man als Ausgangspunkt der Rechnung ein passend verändertes Problem wählt. Mit diesem Verfahren kann man auch das genaue Verhalten von Systemen in der Nähe von Phasen-



Störungstheorie: Ein Elektron sendet bei 1 eine elektromagnetische Welle (Schlangelinie) aus und nimmt sie bei 2 wieder auf. Der Prozess verändert seine Masse. Er findet auch statt, wenn das Elektron in einem Kristall Gitterschwingungen anstößt.

übergängen berechnen. In der unteren Abbildung ist dies für Helium gezeigt, das einen normalflüssigen und einen supraflüssigen Zustand besitzt. Aufgetragen ist die Wärmemenge, die man für eine Temperaturerhöhung zuführen muss, in der Nähe des Übergangs, der hier – übrigens in Weltraumexperimenten – besonders genau untersucht wurde.

Spezifische Wärme von flüssigem Helium nahe dem Übergang vom normalflüssigen in den supraflüssigen Zustand; Experiment und Theorie.



Technik im Hintergrund

Vakuumkammer

Ein Blick in die Labore des Fachbereichs zeigt, dass viele Experimente einen hohen technischen Aufwand erfordern. Um die physikalischen Eigenschaften von Oberflächen zu untersuchen, müssen diese beispielsweise frei von unerwünschten Verunreinigungen sein, und das Experiment muss deswegen in einem extrem guten Vakuum stattfinden. Dazu sind nicht nur spezielle Pumpen nötig, die gesamte Apparatur muss auch entsprechend stabil sein und besteht daher aus Edelstahl.

Zugleich sind häufig tiefe Temperaturen erforderlich, damit sich zum Beispiel die Atome wenig be-



Heliumverladung



Supraleitender Magnet
(links im Bild)

wegen und geeignet anordnen. Dazu braucht man weitere Vorrichtungen und Kühlmittel. Von diesen ist Helium, mit dem man bis 4 K (-269 °C) kühlen kann, besonders wichtig. Es wird am Fachbereich in einer eigenen Anlage verflüssigt und auch an andere wissenschaftliche Nutzer in Berlin geliefert. Es verdampft bei der Anwendung, wird aber in einem speziellen Rückleitungssystem wieder gesammelt und erneut verflüssigt.

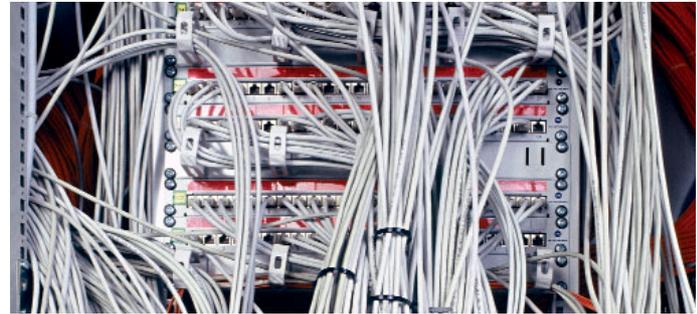
Will man magnetische Materialien untersuchen oder den Magnetismus einzelner Atome als Sonde benutzen, braucht man starke Magneten, die mehrere Tonnen wiegen können. Der Fachbereich besitzt eine Reihe davon, teilweise aus supraleitendem Material.

Als Quellen intensiven Lichtes sind Laser inzwischen aus der Physik nicht mehr wegzudenken. Eine besondere Variante erzeugt kurze Lichtblitze, mit denen sich schnell ablaufende Vorgänge auslösen und verfolgen lassen. Solche Geräte können mehrere hunderttausend Euro kosten. Daneben werden Großgeräte wie die Lichtquelle BESSY II in Adlershof genutzt, wo der Fachbereich mehrere Messplätze hat. Dort arbeitet man mit Synchrotron-Strahlung, die entsteht, wenn schnellfliegende Elektronen auf gekrümmte Bahnen gezwungen werden.

Die Biophysik hat teilweise eigene Methoden. Hier ist es z.B. häufig erforderlich, Materialien nach ihrer Dichte zu trennen. Dazu benutzt man



CNC-Fräse

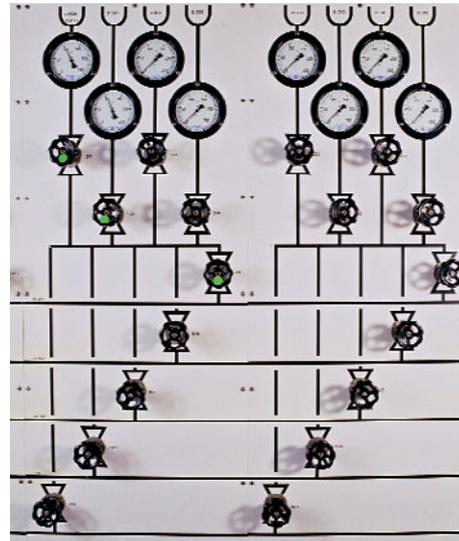


Blick in die Computerzentrale

Ultrazentrifugen, die mit hunderttausend Umdrehungen in der Minute rotieren und Kräfte erzeugen, die dem 20-fachen der Schwerkraft entsprechen.

Selbstverständlich spielen auch Computer eine große Rolle, im experimentellen Bereich ebenso wie in der Theorie. Am Fachbereich sind derzeit fast 1000 Stück im Einsatz, die über ein schnelles internes Netz miteinander verbunden sind.

Um all dies zu betreiben, sind mechanische und elektronische Werkstätten sowie eine eigene EDV-Abteilung notwendig. In diesen Servicebereichen arbeiten rund 30 Personen.



Studium und Lehre



Physik studieren...

...ist insofern leicht, als das Studium eine klare und einfache Struktur besitzt:

In den ersten vier Semestern werden die Grundlagen unterrichtet, von der klassischen Mechanik bis zur modernen Quantentheorie. Parallel dazu behandelt ein Kurs die für die Physik unentbehrliche Mathematik. Im Praktikum werden Versuche selbst durchgeführt, und ein Nebenfach (zur Zeit Chemie, Informatik oder Wirtschaftswissenschaften) gibt Einblick in ein weiteres Gebiet. Dieses Grundstudium wird mit dem Vordiplom abgeschlossen.

Das nachfolgende Hauptstudium von sechs Semestern vertieft und erweitert die Kenntnisse. Neben Vorlesungen umfasst es ein umfangreiches Fortgeschrittenen-Praktikum, ein Lehrseminar und schließlich die einjährige Diplomarbeit. In ihr wird

in einer der Arbeitsgruppen ein Thema aus der aktuellen Forschung selbständig bearbeitet. Sie ist deswegen ein wesentliches Element der Ausbildung. Das Diplom, das auch ein Nebenfach umfasst, ist ein voll für den Beruf qualifizierender Abschluss.



Wer weiter in der Forschung tätig sein will, hat nach dem Diplom die Möglichkeit zu promovieren. Die Doktorarbeit dauert in der Regel drei Jahre. An dieser Grundstruktur wird sich auch bei einer möglichen Einführung von Bachelor- und Master-Abschlüssen wenig ändern.

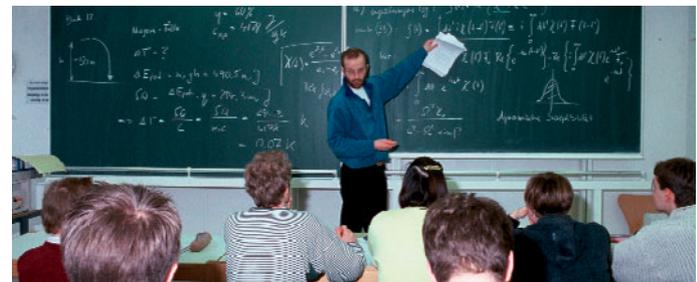
Physik studieren...

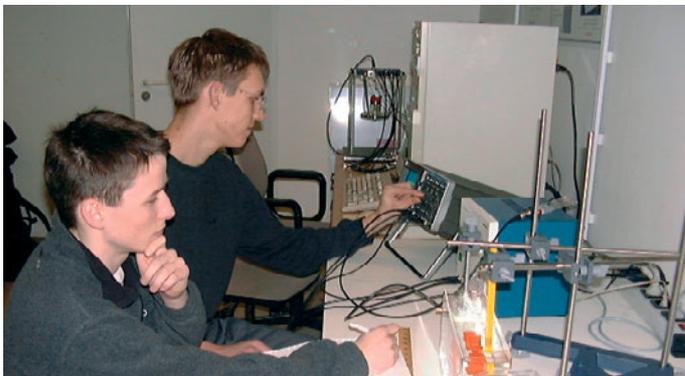
...ist auch schwierig, besonders in den ersten Semestern. Trotz des relativ festgelegten Studienplans sind Selbständigkeit und Eigeninitiative sehr wichtig. Jede Woche sind Übungsaufgaben zu mehreren Vorlesungen zu bearbeiten, was einen deutlich größeren Aufwand bedeutet als an der Schule. Praktika müssen vor- und nachbereitet werden und die Mathematik hat anfangs ein erhebliches Gewicht, das oft nicht vorhergesehen wird. Wer diese Hürden überwindet, dem wird das Studium aber auch Spaß machen.

Der Fachbereich unterstützt die Eingewöhnung mit Brückenkursen und Orientierungswochen für die Erstsemester. Darüber hinaus bietet er

- ein günstiges Betreuungsverhältnis: rund 20 Professoren und 500 Studierende
- Übungsbetrieb in kleinen Gruppen von 10 bis 15 Teilnehmern
- ein modernes Physikgebäude in Dahlem mit eigener Bibliothek, Hörsälen, Computer-Räumen etc.
- ein weites Spektrum von Themen für Diplom- und Doktorarbeiten durch die starken Aktivitäten in der Forschung

Durch ihre breite Ausbildung haben die Physiker in der Vergangenheit immer gute Berufsaussichten gehabt, wobei sich ihr Arbeitsgebiet nicht nur auf den engeren Bereich der Physik beschränkte.





Brücken zur Schule

Um das Interesse an der Physik zu fördern, pflegt der Fachbereich intensive Kontakte zu Schulen in Berlin und Brandenburg. So finden regelmäßig Besuchswochen statt, bei denen Vorträge mit Experimenten und Führungen durch Labore auf dem Programm stehen. Ebenso werden Vorträge in Schulen angeboten. Den Schülern und Lehrern sollen dadurch aktuelle Themen der Physik nahe gebracht werden. Gleichzeitig erhalten sie einen direkten Eindruck von der physikalischen Forschung und von der Arbeit der meist jungen Wissenschaftler.

Dieses Angebot wurde im Frühjahr 2003 durch ein spezielles Schülerlabor erweitert, das für Schülerinnen und Schüler der Oberstufe gedacht ist. Sie können hier in kleinen Gruppen interessante Experimente selbst durchführen, die an Schulen normalerweise nicht möglich sind. Zur Verfügung stehen zahlreiche Versuchsanordnungen, von einer Brennstoffzelle bis zu einem einfachen Rastertunnelmikroskop. Während diese Versuche fest aufgebaut sind, gibt es auch die Möglichkeit, Experimente selbst zusammenzustellen und sie dann vor anderen Schülern oder sogar bei Tagen der offenen Tür, wie zum Beispiel der 'Langen Nacht der Wissenschaften', vorzuführen.

Nähere Informationen sind auf den Internetseiten des Fachbereichs unter 'Schulkontakte' zu finden. Diese Aktivitäten sind auch in das 'Zentrum für Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften und Technik' (MINT) der Freien Universität eingebunden.



Der Fachbereich im Überblick

Adresse

Freie Universität Berlin
 Fachbereich Physik
 Arnimallee 14
 14195 Berlin

Tel.: 030-838 54010
 Fax: 030-838 56746

Internet: <http://www.physik.fu-berlin.de>
 E-Mail: fachbereich@physik.fu-berlin.de

Studenten und Personal (2003)

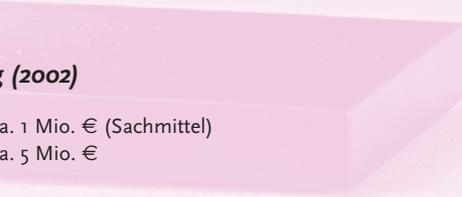
491	Studierende
23	Professoren
4	S-Professoren (an externen Instituten)
184	Akademische Mitarbeiter/innen
68	Sonstige Mitarbeiter/innen
45	Studentische Tutoren und Tutorinnen

Finanzausstattung (2002)

Universitätsmittel:	ca. 1 Mio. € (Sachmittel)
Drittmittel:	ca. 5 Mio. €

Akademische Abschlüsse (2002)

Diplome:	36
Promotionen:	23
Habilitationen:	5



Arbeitsgebiete von A bis Z Professoren am Fachbereich

Detaillierte Informationen über die Arbeitsgruppen erhalten Sie über www.physik.fu-berlin.de

E-Mail: *Vorname.Name@physik.fu-berlin.de*

Biophysik

Maarten Heyn

Biophysik und Photosynthese

Holger Dau

Computerphysik und Quantenfeldtheorie

Volkhard Linke

Dichte-Funktional-Theorie

Eberhard Groß

Dynamik von chaotischen Systemen,

Wissenschaftstheorie

Bodo Hamprecht

EPR-Spektroskopie von biologischen Systemen

Robert Bittl

Fachdidaktik Physik

Helmut Fischler

Magnetische Eigenschaften und Struktur von Festkörpern und Oberflächen

Klaus Baberschke

Magnetische Eigenschaften von Metallen und Legierungen

William D. Brewer

Magneto-Optik und Struktur dünner Filme,

Nahfeld-Optik

Paul Furnagalli

Mikroskopische Struktur von Ober- und

Grenzflächen seltener Erden

Günter Kaindl

NMR-Spektroskopie

Hans-Martin Vieth

Oberflächenphysik,

Tiefemperatur-Rastertunnelmikroskopie

Karl-Heinz Rieder

Photochemie und Ultrakurzzeitspektroskopie in der kondensierten Phase

Nikolaus Schwentner

Primärschritte der Photosynthese, ESR und Ultrakurzzeitspektroskopie

Dietmar Stehlik

Quantenfeldtheorie und Mathematische Physik

Robert Schrader

Statistische Mechanik und Phasenübergänge von Festkörpern

Klaus-Dieter Schotte

Statistische Physik

Ingo Peschel

Statistische Physik, Flüssigkeiten und Gläser

Jürgen Bosse

Theoretische Festkörperphysik

Felix von Oppen

Theoretische Physik

Hagen Kleinert

Ultrakurzzeitdynamik an Oberflächen

Martin Wolf

Ultrakurzzeitspektroskopie an Clustern, LIDAR

Ludger Wöste

Professuren an anderen Instituten

Nukleare Messtechnik und Strukturforchung

Wolfram von Oertzen (Hahn-Meitner-Institut Berlin, E-Mail: oertzen@hmi.de)

Festkörperphysik heterogener Materialsysteme

Martha Lux-Steiner (Hahn-Meitner-Institut Berlin, E-Mail: lux-steiner@hmi.de)

Nichtlineare Optik und Kurzzeit-Spektroskopie an Clustern und Oberflächen

Ingolf Hertel (Max-Born-Institut Berlin,
E-Mail: hertel@mbi-berlin.de)

Theoretische Biophysik

Erwin Frey (Hahn-Meitner-Institut Berlin,
E-Mail: frey@hmi.de)

Sonderforschungsbereiche

Metallische dünne Filme:
Struktur, Magnetismus und elektronische Eigenschaften (Sfb 290) seit 1993

Analyse und Steuerung ultraschneller photoinduzierter Reaktionen (Sfb 450) seit 1998

Protein-Kofaktor-Wechselwirkungen in biologischen Prozessen (Sfb 498) seit 2000

Beteiligung an weiteren Sonderforschungsbereichen

Differentialgeometrie und Quantenphysik (Sfb 288)

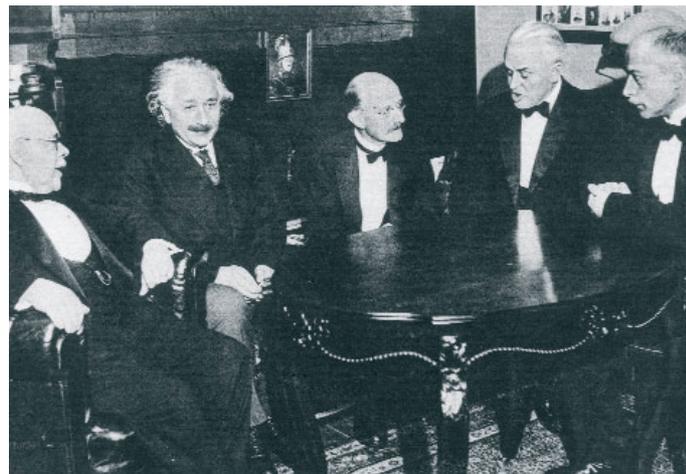
Struktur, Dynamik und Reaktivität von Übergangsmetalloxid-Aggregaten (Sfb 546)

Struktur und Funktion membranständiger Rezeptoren (Sfb 449)

Ferner sind Arbeitsgruppen des Fachbereichs beteiligt an ca. 55 Drittmittelprojekten gefördert durch

- DFG
- BMBF
- EU
- Volkswagen Stiftung
- DAAD
- DLR

Blick in die Geschichte



Die Berliner Physik ist mit klangvollen Namen und großen Entdeckungen verknüpft. Leonhard Euler und Joseph-Louis Lagrange waren zur Zeit Friedrichs des Großen lange Jahre Mitglieder der Akademie der Wissenschaften. Lagrange schrieb in Berlin seine 'Analytische Mechanik', auf die sich die theoretische Physik bis heute stützt. An der 1811 eröffneten Universität begründete Gustav Magnus ab 1831 eine ganze Schule von Physikern. Dazu gehörten Hermann von Helmholtz, der den Energiesatz formulierte, und Gustav Kirchhoff, bekannt durch seine Regeln für elektrische Netzwerke. Beide wurden später Professoren an der Universität. Kirchhoffs Nachfolger wurde 1887 Max Planck, der im Jahr 1900 mit seiner Strahlungsformel die Quantentheorie begründete. Er stützte sich dabei auf Messungen, die Wilhelm Wien und andere an der 1887 gegründeten Physikalisch-Technischen Reichsanstalt machten. Diese Untersuchungen waren durch Probleme der Glühlampenindustrie angeregt worden. Auch zwei andere berühmte

Berliner Physiker und ein amerikanischer Gast 1928: Walther Nernst, Albert Einstein, Max Planck, Robert Millikan und Max von Laue.



Max Planck um 1906



Gedenktafel in Dahlem, Fabeckstrasse 11

Versuche hatten mit Strahlung zu tun. Albert Michelson machte seine ersten Experimente zur Konstanz der Lichtgeschwindigkeit 1881 in Berlin und Potsdam. James Franck und Gustav Hertz untersuchten 1914 die Lichtanregung durch Elektronenstoß.

In diesem Jahr kam auch Albert Einstein nach Berlin und blieb bis 1932. Er formulierte hier seine allgemeine Relativitätstheorie und die nach ihm und dem Inder Satyendra Bose benannte Statistik. Im Jahr 1927 wurde Erwin Schrödinger, auf den die grundlegende Gleichung der Quantentheorie zurückgeht, Plancks Nachfolger. An

Das Kaiser-Wilhelm-Institut für Physik in Berlin-Dahlem 1937



Lise Meitner im Gespräch 1921

der Technischen Hochschule wurde 1931 das erste Elektronenmikroskop gebaut. Im Jahr 1933, das durch die Machtergreifung der Nationalsozialisten einen großen Einschnitt auch für die Berliner Physik bedeutete, entdeckten Walther Meißner und Robert Ochsenfeld, dass ein Magnetfeld nicht in einen Supraleiter eindringen kann. Eine noch bedeutendere Entdeckung machten 1938 Otto Hahn und Fritz Strassmann kurz nachdem ihre Kollegin Luise Meitner emigriert war – die Kernspaltung durch Neutronen. An diesem Problem wurde während des Krieges unter Leitung von Werner Heisenberg weiter gearbeitet.



Theodor Heuss, Max von Laue und Ernst Reuter vor dem Fritz-Haber-Institut in Dahlem 1953

Die Arbeiten zur Kernspaltung fanden in Dahlem statt, wo sich die Institute der 1911 gegründeten Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften (heute Max-Planck-Gesellschaft) befanden.

Von den berühmten Physikern kehrte nach dem Krieg nur Max von Laue, der die Beugung von Röntgenstrahlen an Kristallen entdeckt hatte, nach Berlin zurück. Die wissenschaftlichen Strukturen mussten neu aufgebaut werden. In beiden Hälften der bis 1990 geteilten Stadt wurden dabei neue Forschungseinrichtungen gegründet. In Dahlem entstand 1949 die Freie Universität, wobei die Physik bis 1982 das Gebäude des früheren Kaiser-Wilhelm-Institutes nutzte. Das Hahn-Meitner-Institut, das u.a. einen Reaktor besitzt, wurde 1958 gegründet. Die erste Synchrotron-Strahlungsquelle wurde 1981, die zweite 1998 fertig gestellt. Heute gibt es im Großraum Berlin neben den vier Universitäten rund ein Dutzend Institute, die sich mit physikalischen Themen befassen. Die Stadt ist dadurch wieder ein erstklassiger Forschungsstandort.

Luftbildaufnahme des Synchrotrons BESSY II



