

1. Einleitung

1.1. Organisatorisches

Vorlesung: Dienstag 8¹⁵ - 9⁰⁰

Donnerstag 8³⁰ - 10⁰⁰

Inhalt: Einführung in die Festkörperphysik

- Übersicht über die Phänomenologie
- Verständnis für die mikroskopischen Ursachen
- Übersicht über Untersuchungsmethoden (theor. und exp.)

Übungen: Donnerstag 14¹⁵ - 16⁰⁰

Gruppeneinteilung: siehe Listen

Ablauf der Übungen: Die Übungszettel werden am Donnerstag in der Vorlesung verteilt. Selbständiges Lösen bis Dienstag; Abgabe in Kästen der Assistenten bis Dienstag. Besprechung in der Übungsstunde am Donnerstag.

Bedingungen für Schein: erfolgreiche Teilnahme an der Klausur, $\geq 1/3$ der maximalen Punktezahl

Abgabe von 10 Übungen; mindestens 1/2 der Aufgaben gelöst, resp. versucht zu lösen.

Beteiligung während der Übungsstunde; wird beurteilt durch Assistenten.

Um sich den Stoff richtig zu erarbeiten ist ein passendes Lehrbuch (besser: 2-3 passende Lehrbücher) eine unabdingbare Voraussetzung. Die Liste zeigt einige bewährte Standardwerke. Natürlich stellt diese Liste nur eine kleine Auswahl möglicher Vorlesungsbegleiter dar.

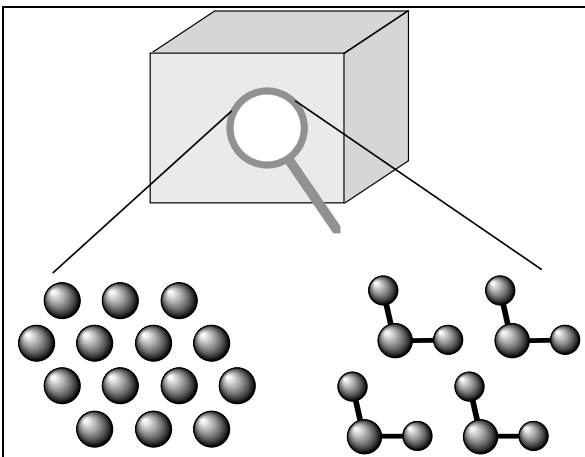
- | | |
|---|------------------|
| <ol style="list-style-type: none">1. K. Kopitzki
<i>Einführung in die Festkörperphysik</i>
Teubner Studienbücher2. Ch. Kittel
<i>Einführung in die Festkörperphysik</i>
R. Oldenburg, München3. K. H. Hellwege
<i>Einführung in die Festkörperphysik</i>
Springer-Verlag, Berlin4. N. Ashcroft, N. Mermin
<i>Solid state physics</i>
Holt, Rinehart and Winston5. Ibach-Lüth
<i>Festkörperphysik</i>
Springer | Literatur |
|---|------------------|

1.2. Themenübersicht

1.2.1. Mikroskopische Grundlagen

Die Festkörperphysik diskutiert "feste Körper", d.h. kondensierte Materie, welche sich in einem kristallinen Zustand befindet.

Als Beispiel kann man sich einen Kristall anschauen. Die Beschreibung eines solchen Kristalls kann auf unterschiedlichen Ebenen erfolgen. Meist beginnt man auf einer phänomenologischen Ebene, d.h. man beschreibt zunächst die makroskopischen Eigenschaften wie z.B. optische Eigenschaften, elektrische Leitfähigkeit, Wärmekapazität etc. Diese Ebene wird nicht nur in der Festkörperphysik, sondern auch in der Mechanik und Werkstoffkunde untersucht.



Im Gegensatz dazu steht die Beschreibung auf einer mikroskopischen Ebene. Hier geht es um die Deutung der phänomenologischen Beobachtungen, so z.B. die Erklärung des elektrischen Widerstandes aufgrund von Streueffekten an Fehlstellen; der Supraleitung durch Paarbildung von Elektronen; des Magnetismus durch Kopplungen zwischen Elektronen.

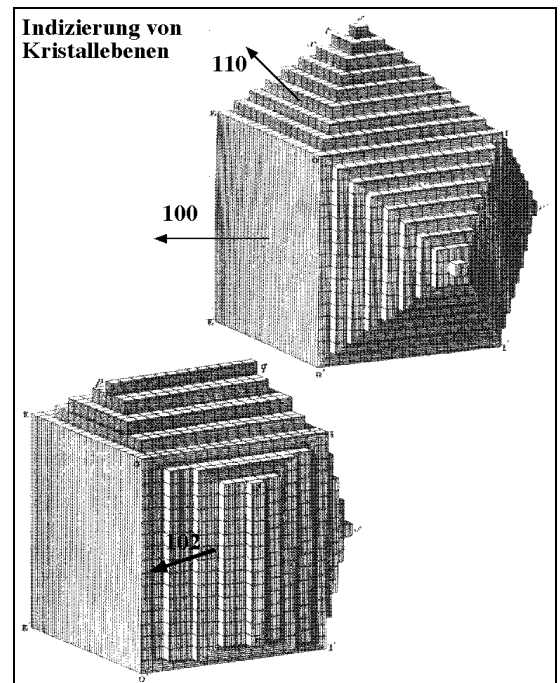
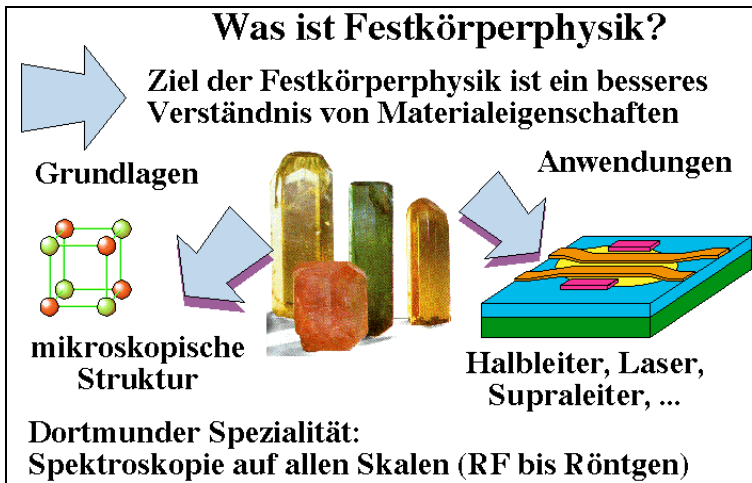
Der Wunsch, makroskopische Beobachtungen aufgrund mikroskopischer Strukturen oder Prozesse zurückzuführen hat in der Physik eine lange Tradition. So wurde die Atomtheorie, also die Theorie von der Existenz kleinster Teilchen, welche in der Antike von Demokrit (460-370 v. Chr.) postuliert worden war, in der Neuzeit wieder entdeckt, weil man verschiedene makroskopische Beobachtungen damit am elegantesten erklären konnte. Die bekannteste Beobachtung, welche die Atomhypothese nahe legte stammen aus der Chemie, wo Antoine Lavoisier und John Dalton im 18. Jh. beobachtete, dass chemische Elemente in bestimmten Verhältnissen miteinander reagieren. So entstehen z.B. aus zwei Teilen Wasserstoff und einem Teil Sauerstoff Wasser. Die möglichen Verhältnisse, in denen die gleichen Elemente reagieren, können durch kleine ganze Zahlen beschrieben werden konnten.

Praktisch gleichzeitig fanden aber auch Kristallographen, dass die Ebenen der Kristalle durch wenige ganze Zahlen indiziert werden konnten.



Diese makroskopische Beobachtung konnte man wiederum am besten erklären, wenn man davon ausging, dass die Kristalle aus vielen identischen, regelmäßig angeordneten Teilchen bestehen.

1.2.2. Ziele und Interessen



Wie bereits erwähnt versucht die Festkörperphysik, das Verständnis für die Materialeigenschaften von festen

Körpern zu verbessern. Hierzu gehören auf der Grundlagenseite vor allem Aussagen über die mikroskopische Struktur und deren Konsequenzen auf makroskopisch beobachtbare Eigenschaften. Genau so versucht die Festkörperphysik, diese Eigenschaften für praktische Anwendungen nutzbar zu machen. Hier sind viele entsprechende Resultate bekannt, wie z.B. Halbleiter, Laser oder Supraleiter.

Ursprünglich hat man versucht, die makroskopischen Eigenschaften mit Hilfe von mechanischen Modellen zu erklären. Es zeigte sich aber, dass dies nur in sehr begrenztem Umfang möglich ist. Statt dessen muss zur Erklärung der allermeisten Phänomene die Quantenmechanik benutzt werden. Die Festkörperphysik ist deshalb wahrscheinlich eine der wichtigsten Anwendungsgebiete für die Quantenmechanik. So können die qualitativen Unterschiede zwischen verschiedenen Stoffklassen, wie z.B. Metalle, Isolatoren, oder Supraleiter nur quantenmechanisch erklärt werden. Sie dürfen dies durchaus als Aufforderung verstehen, sich nochmals Ihre Unterlagen zur Quantenmechanik anzuschauen. Dabei muss man sich bewusst sein, dass die quantenmechanischen Methoden, welche in der Festkörperphysik zur Anwendung kommen, häufig wesentlich anders sind als die üblichen quantenmechanischen Modellsysteme. In einem Festkörper muss man sich mit 10^{20} wechselwirkenden Teilchen beschäftigen. Eine exakte und vollständige Beschreibung eines solchen Systems ist nicht möglich. Häufig ist es aber auch gar nicht nötig, eine exakte Beschreibung zu haben, sondern es reicht, wenn man Aussagen über die Symmetrie oder die Reaktion auf eine äußere Störung machen kann. Die theoretische Festkörperphysik beinhaltet eine große Zahl von Quasiteilchen und benutzt Feldtheorien, welche formal ähnlich aufgebaut sind wie in der Quantenelektrodynamik oder Quantenchromodynamik.

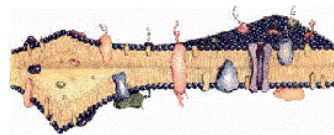
1.2.3. Kondensierte Materie

Die Festkörperphysik ist ein Teilgebiet der Physik der kondensierten Materie. Das erweiterte Gebiet umfaßt insbesondere auch die Physik des flüssigen Zustandes. Im Rahmen dieser Vorlesung wird nicht spezifisch auf Flüssigkeiten eingegangen. Man sollte sich aber im klaren sein, dass eine exakte Abgrenzung zwischen Flüssigkeiten und Festkörpern nicht möglich ist. So wird ein Glas häufig als Flüssigkeit bezeichnet, welche zu kalt sei, um zu gefrieren, und der Übergang zwischen den beiden Aggregatzuständen, nämlich der Glaspunkt, ist nicht immer exakt bestimmt.

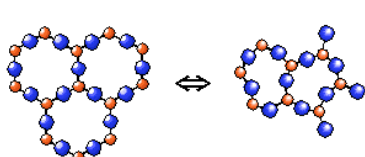
Im englischsprachigen Raum wird meist von der Physik der kondensierten Materie („condensed matter physics“) gesprochen. Während sich die traditionelle Festkörperphysik in erster Linie auf kristalline Festkörper konzentriert werden in einem weiteren Umfeld auch Systeme diskutiert, welche zwar zur kondensierten Materie gehören, jedoch keine strenge langreichweitige Ordnung besitzen. Dazu gehören z.B. sog. Weiche Materialien wie z.B. molekulare Systeme, Gläser, Polymere und andere amorphe Materialien. Auch oberflächendominierte, mikro- und nanostrukturierte Systeme werden heute immer intensiver untersucht.

etwas weiter gefasst **Physik der kondensierten Materie**

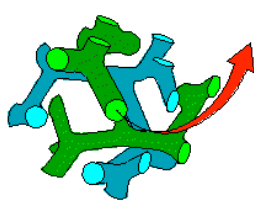
dazu gehören auch:
Weiche Materialien, Molekulare Systeme



Oberflächendominierte und mikrostrukturierte Materialien, Cluster

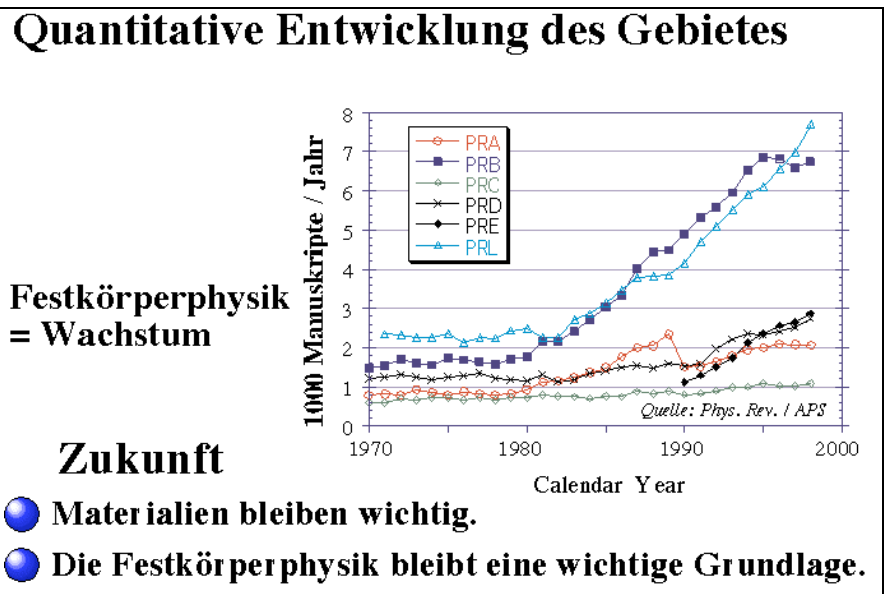


Gläser, amorphe Materialien



1.2.4. Entwicklung

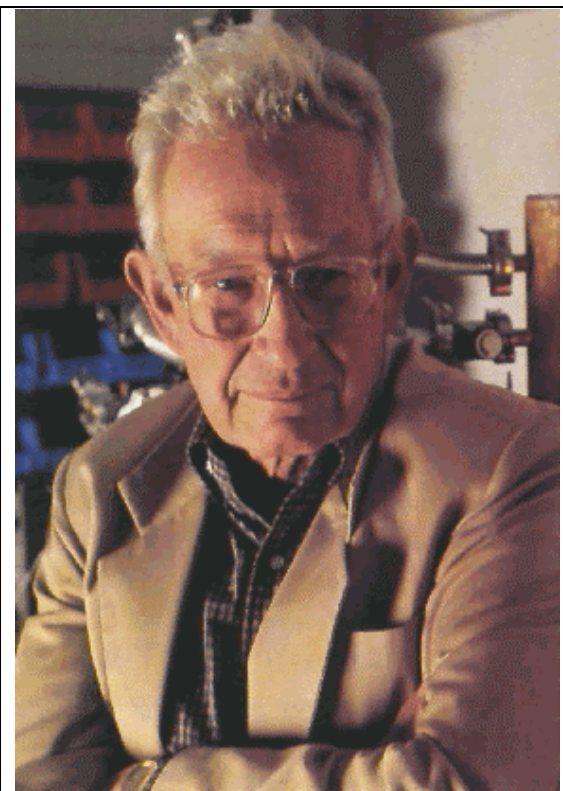
Die Festkörperphysik stellt ein Teilgebiet der Physik dar. Dabei handelt es sich um ein Teilgebiet, welches in den letzten Jahren ein enormes Wachstum erlebt hat und heute mit Abstand das wichtigste Teilgebiet darstellt. Man kann dies z.B. anhand der Publikationen verfolgen, welche in den letzten 30 Jahren in Physical Review erschienen sind. Physical Review B, welche Publikationen



aus dem Bereich der Festkörperphysik enthält, hat das weitaus größte Wachstum erlebt. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Betonung der Materialforschung als ein Schlüsselthema für das neue Jahrhundert diesen Effekt eher noch verstärken wird. Stichworte: Halbleiterindustrie, neue Materialien, HTC-Supraleiter etc.

1.2.5. Methodik

Jedes Gebiet hat seine eigenen Arbeitsmethoden. Der Atomphysiker Wolfgang Pauli sagte einmal über die Festkörperphysik, diese sei eine „Schmutzphysik“. Damit wollte er in erster Linie darauf hinweisen, dass in der Festkörperphysik Verunreinigungen und Imperfektionen eine wesentlich wichtigere Rolle spielen als z.B. in der Atomphysik: Festkörper bestehen im Allgemeinen aus einer sehr großen Zahl von Teilchen, welche nie perfekt angeordnet sind – im Gegensatz zu Atomen: zwei Wasserstoffatome sind immer identisch und ununterscheidbar. Wir werden uns allerdings während dem größten Teil dieser Veranstaltung mit sehr idealisierten Systemen beschäftigen und die Diskussion der meisten Imperfektionen für spezialisiertere Veranstaltungen aufsparen.



Einen anderen Aspekt betont der Festkörpertheoretiker P.W. Anderson (Philip W. Anderson, 1977 Nobel Preis für „their fundamental theoretical investigations of the electronic structure of magnetic and disordered systems“) in einem 1972 erschienenen Artikel (P.W. Anderson, 'More is different', *Science* 177, 393 (1972)). Damit spricht er in erster Linie die Hierarchie von Phänomenen an, welche unter anderem in der Festkörperphysik sehr wichtig sind: Es sind die kollektiven Phänomene, also Phänomene, bei denen viele Teilchen zusammenwirken, die neue Physik hervorbringen in dem Sinn, dass dafür eine neue Art der Beschreibung benötigt wird. Es ist nicht möglich oder auch nur sinnvoll, die Schwingungen eines Festkörpers anhand der Bewegungen der einzelnen Atome zu beschreiben, sondern man führt dafür kollektive Freiheitsgrade ein, die Gitterschwingungen oder Phononen.

Ein anderes Beispiel ist die Supraleitung: Alle E-

Elektronen rotten sich im Wechselspiel mit dem Kristallgitter zu einem makroskopischen Quantenzustand zusammen, der widerstandsfrei Strom führen kann, oder der Quanten-Hall Effekt: Im Zusammenwirken von Elektronen bildet sich in zweidimensionalen Systemen ein Ladungsträgersystem mit quantisiertem Hallwiderstand aus.

Aus diesen Gründen wird die Festkörperphysik für Sie eine neue Art der Behandlung physikalischer Probleme darstellen: Ein Kristall ist aus einer extrem großen Anzahl ($> 10^{20}$) von Teilchen aufgebaut. Dies schließt eine exakte Lösung von Problemen a priori aus. Stattdessen muss auf Näherungsverfahren zurückgegriffen werden. Das zentrale Problem ist, Näherungen so geschickt durchzuführen, dass einerseits das Problem lösbar wird, andererseits noch alle wesentlichen physikalischen Faktoren erfasst werden.

Letztlich versucht man die Probleme auf ein Niveau zu vereinfachen, auf dem die physikalischen Phänomene durch einzelne Anregungen oder Teilchen beschrieben werden: Das gemeinsame Verhalten vieler Teilchen wird so beschrieben, dass sich neue ‚künstliche‘ Teilchen ergeben. Bei der Beschreibung von Phänomenen wird dann

- das Verhalten eines durch Modellbildung erzeugten ‚Teilchens‘
- das Verhalten einer großen Anzahl solcher Teilchen in einem kollektiven Zustand betrachtet. In diesem Sinn bestehen direkte Analogien zur Teilchenphysik.

1.2.6. Inhalt

Inhaltlich beginnt die Vorlesung mit einem Überblick über die Struktur von Festkörpern. Dabei wird die Struktur wesentlich durch die möglichen Symmetrieoperationen bestimmt. Bei den Methoden, welche für die Strukturbestimmung verwendet werden, wird zwischen direkten Methoden und Beugungsmethoden unterschieden. Kapitel 3 und 4 behandeln die unterschiedlichen Kräfte, welche die Festkörper zusammenhalten und die Bewegungen der Atome um ihre Gleichgewichtspositionen. In Kapitel 5 und 6 werden die Elektronen diskutiert, wobei sie zunächst als freie Elektronen diskutiert werden, und erst danach der Einfluss der Atomkernrümpfe diskutiert wird. Das resultierende Bändermodell wird im siebten Kapitel anhand der Materialklasse „Halbleiter“ noch genauer diskutiert. Kapitel 8 und 9 behandeln die Aspekte Magnetismus und Supraleitung.

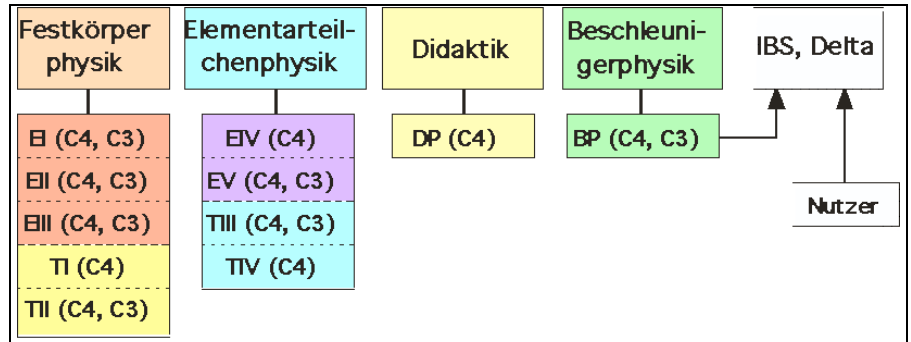
1. Einleitung
1. 1. Organisatorisches
1. 2. Themen
1. 3. Festkörperphysik in Dortmund
2. Symmetrie und Struktur
3. Bindungen im Festkörper
4. Gitterschwingungen und Phononen
5. Freie Elektronen
6. Fast freie Elektronen: Bandstrukturen
7. Halbleiter
8. Magnetismus
9. Supraleitung

1.3. Festkörperphysik in Dortmund

1.3.1. Struktur

Es ist Tradition, dass an dieser Stelle auch eine erste Übersicht über die Forschung im Bereich der Festkörperphysik in diesem Fachbereich gegeben wird.

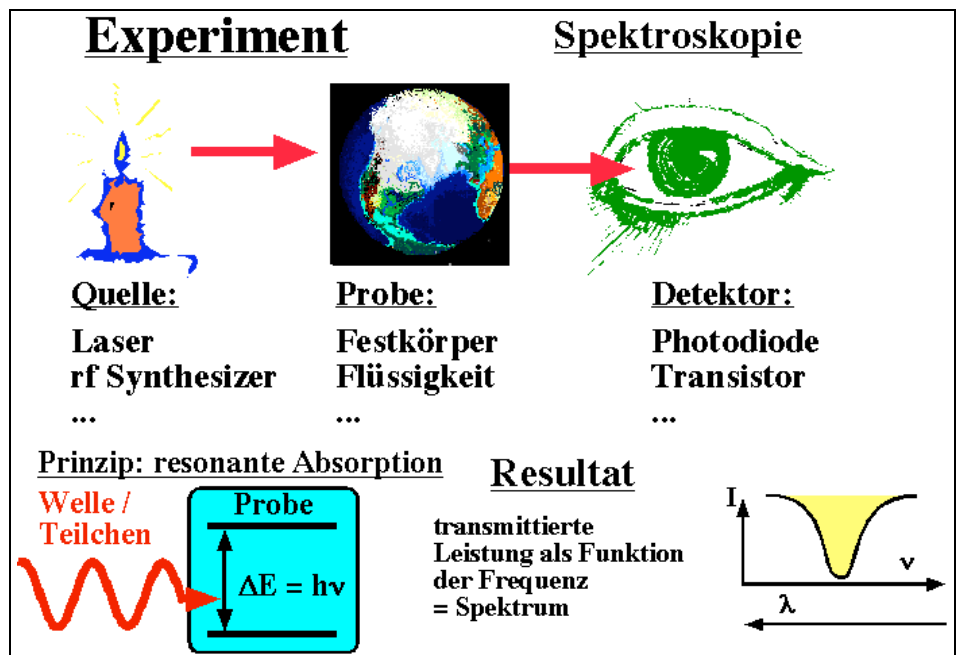
Die Festkörperphysik ist das größte Standbein der Dortmunder Physik; sie umfasst drei experimentelle und zwei theoretische Lehrstuhlbereiche. Das zweite große Standbein ist die Teilchenphysik. Neben diesen beiden Schwerpunkten gibt es die Didaktik der Physik, welche auch einen wichtigen Beitrag zur Ausbildung der zukünftigen Lehrer liefert, sowie die Beschleunigerphysik, welche den Elektronenspeicherring DELTA betreibt und Synchrotronstrahlung, v.a. für Nutzer aus der Festkörperphysik zur Verfügung stellt.



Für die Untersuchung der Materialien benötigt man spezialisierte experimentelle Ausrüstungen. Eine Dortmunder Spezialität besteht darin, dass wir eine breite Palette von spektroskopischen Methoden entwickelt haben, wobei der Bereich der verwendeten Wellenlängen von vielen Metern bis in den sub-Å Bereich reicht.

1.3.2. Spektroskopische Methoden

Spektroskopische Methoden verwenden allgemein elektromagnetische Strahlung, welche mit dem zu untersuchenden Gegenstand in Wechselwirkung tritt, um über die Variation der Wechselwirkung als Funktion der Wellenlänge Informationen über die untersuchten Materialien zu erhalten. In bestimmten Fällen wird anstelle von elektromagnetischen Wellen auch ein Teilchenstrom verwendet.



Ein Großgerät, welches u.a. für spektroskopische Messungen verwendet wird, ist DELTA, die Dortmunder Elektronen Testspeicher Anlage.

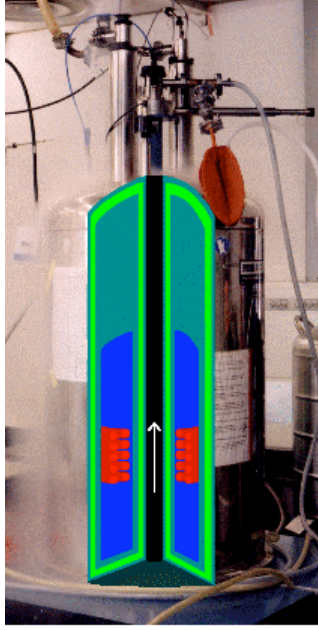
Ich möchte aber an dieser Stelle mehr auf die experimentellen Techni-

ken eingehen, welche wir in unserer Arbeitsgruppe verwenden. Dazu gehört die magnetische Resonanz. Hierbei verwendet man ein starkes Magnetfeld, um die Entartung zwischen unterschiedlichen Spin-zuständen von Kernen oder Elektronen aufzuheben. Mit Hilfe eines magnetischen Wechselfeldes werden Übergänge zwischen Spin-

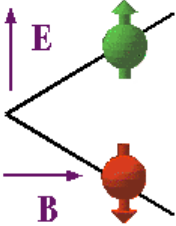
zuständen induziert, welche dann stattfinden, wenn die Frequenz des Wechselfeldes in Resonanz mit dem Energieunterschied zwischen den zugehörigen quantenmechanischen Zuständen ist. Die dafür benötigten starken Magnetfelder von 4-14 T (ca. 100'000-faches Erdmagnetfeld) werden meist durch supraleitende Magneten erzeugt.



Magnetische Resonanz



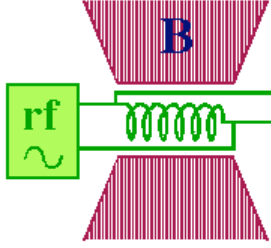
Prinzip
Die MR mißt Übergänge zwischen unterschiedlichen Spin-Zuständen. Diese werden durch ein magnetisches Wechselfeld im Radiofrequenzbereich angeregt.



Geschichte

1944 Elektronenspinresonanz durch Y.K. Zavoysky (Kazan)

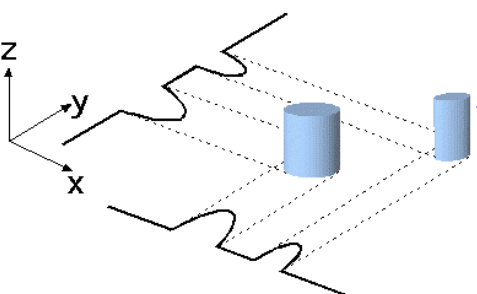
1945 Kernspinresonanz durch Bloch, Hansen, Packard (Stanford) und (unabhängig) Purcell, Pound, Torrey (MIT)




Zu den bekanntesten Anwendungen der magnetischen Resonanz gehört die Bildgebung: hier interessiert man sich z.B. für die Verteilung der Spindichte im menschlichen Körper, wie z.B. hier im Gehirn. Dafür benötigt man ein räumlich variierendes Magnetfeld. Je stärker das Magnetfeld, desto größer die Aufspaltung zwischen den Spinzuständen und damit die Resonanzfrequenz.

Bildgebende Magnetische Resonanz

Um feststellen zu können, wo im Körper sich Spins befinden, muß das Signal ortsabhängig gemacht werden. Dies geschieht über ein Magnetfeld dessen Stärke als Funktion des Ortes variiert. Dabei erfolgt eine Projektion auf die Richtung des Feldgradienten.





Magnetfeld und Resonanzfrequenz nehmen von links nach rechts zu

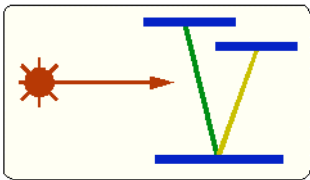
Indem man die Absorption von Radiowellen als Funktion der Frequenz misst erhält man damit ein Bild der untersuchten Probe.

Neben der magnetischen Resonanz verwenden wir auch die Laserspektroskopie. Hier verwendet man Laserlicht um die Energie von elektronischen Zuständen zu messen. Laserspektroskopie ist extrem empfindlich und kann u.a. zur Untersuchung von einzelnen Teilchen, wie z.B. Atomen oder Ionen verwendet werden. Sie ermöglicht auch sehr präzise Messungen, z.B. bezüglich der zeitlichen oder spektralen Auflösung.

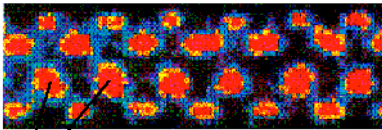
Laserspektroskopie

Prinzip

Laserlicht bringt ein System in energetisch höherliegende Zustände




Empfindlichkeit



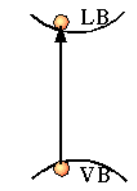
Mg⁺ Ion

Zustände und Systeme

Atome



Halbleiter



Zeitliche Auflösung:
 $\Delta t < 10^{-14}$ sec \rightarrow $\mathcal{E} II$

Spektrale Auflösung:
 $\Delta \nu / \nu > 10^{15}$

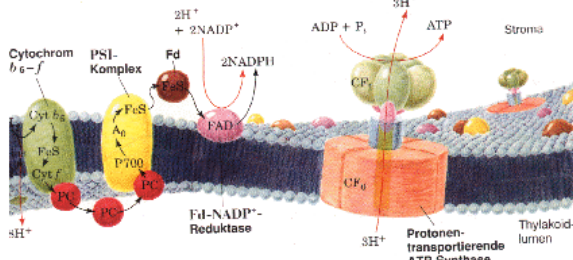
1.3.3. Materialien

Zu den von uns untersuchten Materialien gehören z.B. Metalloproteine. Dazu gehören ca. 30% aller Enzyme. Metalloproteine enthalten mindestens ein Übergangsmetallion, welches für die Funktion der Proteins benötigt wird. Beispiele findet man vor allem bei Elektronen-Übertragungsreaktionen und bei der Atmung. Zu den bekanntesten Molekülen gehören Hämoglobin oder Chlorophyll.

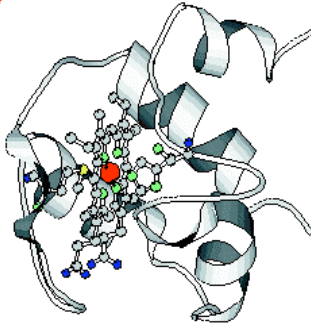
Metalloproteine

Rund 30% aller Enzyme enthalten mindestens ein Metallion, welches für die Funktion des Proteins unentbehrlich ist.

Beispiele:
Elektronenübertragung, Atmung

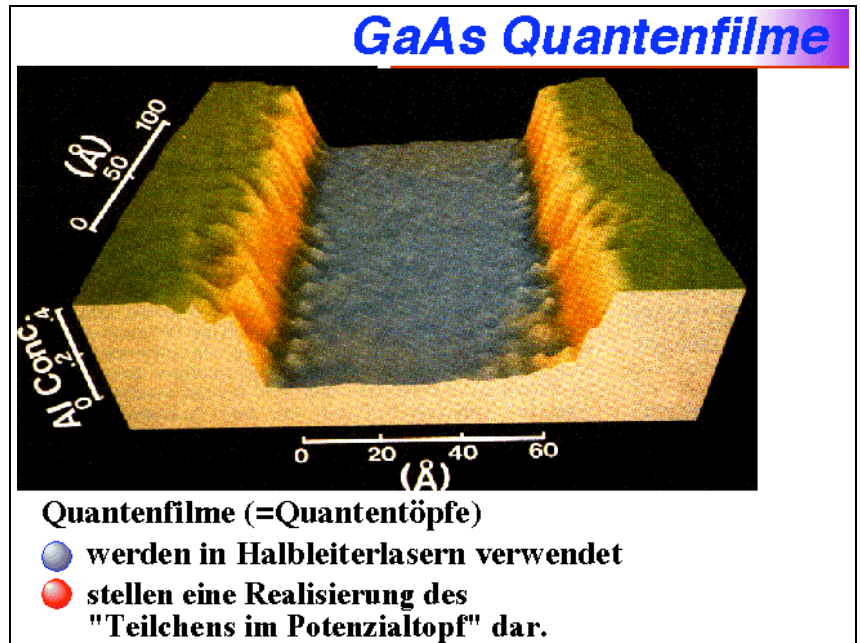


Cytochrom



Elektronenspinresonanz (ESR) ist ein sehr nützliches Hilfsmittel für Untersuchungen über die Struktur des aktiven Zentrums. Wir verwenden besonders optische Nachweismethoden.

Ein anderes Beispiel, welches wir untersuchen, sind nanostrukturierte Halbleiter. Im Verlaufe der Vorlesung werden Halbleiter genauer diskutiert. Die Strukturierung auf Nanometerskalen dient vor allem dazu, ihre elektronischen Eigenschaften gezielt zu verändern. Man kann solche Quantenfilme z.B. als experimentelle Realisierung des „Teilchens im Potenzialtopf“ verstehen. Sie werden u.a. in Halbleiterlasern verwendet, welche wiederum in Laserzeigern, CD und CDRom Spielern verwendet werden.



Ein aktueller Schwerpunkt unserer Arbeiten ist die Quanten Informationsverarbeitung. Wir implementieren dazu Quantenalgorithmen, führen grundlegende Messungen zur Dekohärenz durch und untersuchen Möglichkeiten, skalierbare Quantenrechner zu bauen. Ein Beispiel für einen solchen Ansatz sind endohedrale Fullere. Dabei handelt es sich um Fullerenmoleküle, also die sog. Buckyballs oder Fussballmoleküle, in deren inneren sich ein zusätzliches Atom befindet. Prinzipiell sollte es möglich sein, in diesem Atom Information zu speichern und dies in einem Quanten-Rechenwerk zu verarbeiten.

