

1 Atom- und Molekülphysik

Diese Seite strukturiert den Stoff der Kursvorlesung Physik IV (ohne Umweltphysik) und gibt Hinweise zur Vorbereitung (Literatur...). Wenn Sie die Testfragen (die so ähnlich in einer Prüfung gestellt werden könnten) locker beantworten können, dann sind Ihre Prüfungsvorbereitungen schon ziemlich weit gediehen. Sie dienen der Überprüfung des "physikalischen Verständnisses". Solche Fragen sind schwieriger zu beantworten als Fragen zum "Faktenwissen".

In einer Prüfung werden natürlich auch viele Fragen gestellt, die einfach Fakten abfragen. Beispiele wären:

- Skizzieren Sie das Termschema von Helium und bezeichnen Sie die Zustände mit ihren Quantenzahlen.
- Wie sieht die Wellenfunktion im Wasserstoffgrundzustand aus ?
- Wie funktioniert ein Fabry-Perot Interferometer ?

Testfragen die über die Atomphysik hinausgehen sind kursiv gekennzeichnet - sehr beliebt bei Prüfungen.

1.1 Literatur zur Vorbereitung

- **Das 'Standardbuch' ist Haken/Wolf, Atom- und Quantenphysik. Springer Lehrbuch:**
Dieses Buch ist zum Teil schwer verdaulich und verwirrend. Es ist zudem theorielastig. Viele Teile sind zumindest im ersten Durchgang entbehrlich. Wir empfehlen daher nicht mit diesem Buch anzufangen, falls Sie Probleme mit dem Überblick haben. Eine gute Strategie könnte sein, erst eine kompakte einfache Darstellung durchzuarbeiten, die sich auf die "Basics" beschränkt und damit einen guten Gesamtüberblick und eine Grundlage zu bekommen. Im zweiten Schritt können Sie dann den Stoff vertiefen, indem sie in einen ausführlicheren 'Wälzer' schauen.
- Zur Einführung empfehlen wir:
A. Beiser, Concepts of Modern Physics.
- **Mc Graw-Hill:**
Hier wird Atom-, Molekül- und Festkörperphysik behandelt. Das Buch ist einfach, knapp und sehr gut gemacht.

- **Alonso/Finn, Physik III:** Quantenphysik und statistische Physik, Inter. Europ. Ed. Amsterdam
Hier ist insbesondere eine schöne, kompakte Einführung in die Molekülphysik enthalten, die eigentlich für eine Standardprüfung schon fast ausreicht.
- In letzter Zeit vom Geheimtip zum 'Standardrepertoire' geworden ist der
Demtröder, Experimentalphysik 3. Springer Lehrbuch
Ein sehr schönes und klares Lehrbuch mit ausgewogener Mischung aus Experiment, Phänomenologie und theoretischen Konzepten. Dieses Buch enthält auch Festkörperphysik. Man kann damit anfangen und sich letzten Endes auch auf dieses Buch beschränken ⇒ **Zur Anschaffung sehr empfohlen.**

Natürlich ist ein Lehrbuch "Geschmackssache" und Sie müssen sehen, mit welchem oder welchen Sie am besten zurecht kommen.

2 Strukturierung des Stoffes

2.1 Das mathematische Gerüst der Quantenmechanik (kein Ersatz für Theorie)

- Vergleich der Beschreibung in klassischer Mechanik mit der Quantenmechanik
- Wellenfunktion, Operatoren, Eigenfunktionen und Eigenwerte
- Messung und Erwartungswerte

Literatur: z.B. Haken/Wolf Kap. 9.2 und 9.3

2.1.1 Testfragen zum Stoff

- Was ist der fundamentale Unterschied zwischen Quantenmechanik und klassischer Mechanik?
- Wann ist die Beschreibung durch die klass. Mechanik ausreichend?
 - Diskutieren Sie das für ein Elektron mit $E=10$ eV, das durch ein abbildendes System fliegt

- Für ein Gas der Dichte n und Temperatur T . Wann macht sich die Wellennatur der Gasmoleküle bemerkbar? Welche Statistik muss ich benutzen?
 - Für einen Rotator
 - Für einen Oszillator
- Welche Anforderungen müssen an phys. sinnvolle Wellenfunktionen gestellt werden?
 - Wie können Sie Messwerte einer Observablen aus der bekannten Wellenfunktion berechnen? Konkretes Beispiel: Welche Werte würde man für die kin. Energie des Elektrons im H-Grundzustand messen?
 - Was sind die Eigenfunktionen und Eigenwerte der kinet. Energie?
 - Welche Observablen sind gleichzeitig messbar? Konkretes Beispiel: starrer Rotator? Wo spielt der physikalisch eine Rolle?

2.2 Das Wasserstoffatom ohne Feinstruktur

- Wasserstoffspektrum, Termschema, Quantenzahlen (experimentelle Fakten)
- Hamiltonoperator, Erhaltungsgrößen, Drehimpuls, gute Quantenzahlen
- Die Kugelwellenfunktionen, l , l_z , m
- Das $1/r$ Potential: Energieeigenwerte und Radialwellenfunktionen
- Diskussion der Elektronenorbitale und Aufenthaltswahrscheinlichkeiten für verschiedene l, n

Literatur z.B Haken/Wolf Kap.10, 11 oder Beiser Kap. 6.

2.2.1 Testfragen zum Stoff

- Welche Observablen sind gleichzeitig messbar, wie gross sind die zugehörigen Messwerte für einen stationären Zustand fester Energie?
- Wie sieht das effektive Potential im H-Atom aus, das für die Bestimmung der Energie massgebend ist?

- Skizzieren Sie den 2s und 2p Zustand. Wie vergleichen sich die mittleren Aufenthaltswahrscheinlichkeiten $w(r)$? Warum haben beide dieselbe Energie? Warum ist das beim Na nicht mehr so?
- Wie bekommt man aus der Radialwellenfunktion die radiale Aufenthaltswahrscheinlichkeit?
- Wie sieht die Wellenfunktion eines Elektrons im 2p Zustand als Funktion des Winkels aus (kein äusseres Feld)? Geben Sie die Wellenfunktion explizit an.
- Wie sieht das Energiespektrum von H und Na im Vergleich aus?
- *Das Potential zwischen Neutron und Proton im Deuteron wird näherungsweise durch ein Zentralpotential (Kasten) beschrieben. Diskutieren Sie qualitativ den Grundzustand und einen möglichen ersten angeregten Zustand. (Quantenzahlen, Wellenfunktion, Energie).*

2.3 Feinstruktur in Ein-Elektronensystemen, Alkali- und H-Atom

- Elektronenspin und magnetisches Moment
- Effektives Potential bei Alkaliatomen, Aufhebung der l-Entartung, Gesetzmässigkeit der Serien
- Feinstruktur: Wechselwirkung vom magnetischen Moment des Elektronenspins mit dem Magnetfeld des Hüllenelektrons. Magnetische Momente für Bahndrehimpuls und Spin, Kopplung von Drehimpulsen. Energieaufspaltung mit praktischen Beispielen H-Atom, Na, Cs. Hyperfeinstruktur: welche Kerne haben Spin und magn. Momente? Hyperfeinwechselwirkung, Abschätzung der Grösse. Beispiele: H-Atom, Na, Cs.
- Bedeutung der 21 cm Linie für die Astrophysik
- Das H-Atom mit allen Korrekturen: relativistische Korrektur, Feinstruktur mit Spin relativistisch (Dirac).
- Was ist die Diracgleichung, wo gilt sie, was leistet sie (qualitativ)?
- QED Korrekturen: Lambshift und Elektroschwache Effekte: Paritätsverletzung in der Atomphysik (qualitativ)

2.3.1 Testfragen zum Stoff

- Wie sieht die Elektronenkonfiguration für Na aus?
- Mit Na Atomen wurde Bose-Einsteinkondensation beobachtet. Wieso sind das Bosonen? Gilt das bei beliebigen Temperaturen?
- Wie sieht das effektive Potential für das Leuchtelektron von Alkaliatomen aus? Für welche Energieniveaus erwarten sie eine Energie, die der des H-Atoms bei denselben QZ entspricht? Warum sind die S-Orbitale energetisch am tiefsten für festes n?
- Wie gross ist die WW-Energie zweier magnetischer Dipole als Funktion ihres Abstands? Wie hängt demnach in erster Näherung die Energieaufspaltung von Fein- und Hyperfeinstruktur von der Hauptquantenzahl ab, wie von Z?
- Warum liegt $p_{3/2}$ in der Energie höher als $p_{1/2}$ für gleiches n?
- Wie sind Hyperfeinstrukturaufspaltungen experimentell zu beobachten? Welche Rolle spielt der Übergang $F = 1 \rightarrow F = 0$ beim Wasserstoff für n=1?
- Was sind qualitativ die Effekte des Strahlungsfeldes auf die Energieniveaus (QED Korrekturen)? Geben Sie 2 Beispiele wie diese sich bemerkbar machen.
- *Wieso weicht g von 2 ab - für Elektron, für Proton?*
- *Warum erwarten wir Paritätsverletzung im Atom? Schätzen Sie die Grösse dieser Effekte ab. (Feynmandiagramme?)*
- *Wenn der n=2 Elektroneneigenzustände im H-Atom streng kein Eigenzustand zur Parität ist, welche Eigenfunktion erwarten Sie dann näherungsweise dafür ?*

2.4 Das Periodensystem der Elemente: Überblick und das Röntgenspektrum

- Überblick, Haupt- und Nebengruppenelemente, seltene Erden und Aktiniden
- Systematische Änderungen der chemischen Eigenschaften. Charakteristische physikalische Eigenschaften (Atomvolumen, Metalle, Halbleiter, Isolatoren, magnetische Eigenschaften)

- Bauprinzip im 'Schalenmodell', Eigenschaften der Elektronenorbitale und ihr Effekt auf die chemische Bindung
- Das charakteristische Röntgenspektrum, Erzeugung von Röntgenstrahlung, Absorptionsverhalten
- Augereffekt und Quantenausbeute

2.4.1 Testfragen

- Was charakterisiert Hauptgruppenelemente? Welche Bindungstypen haben sie?
- Wie unterscheidet sich die Elektronenkonfiguration von Kalium und Kupfer?
- Warum sind beides Metalle? Warum leitet Cu viel besser als Kalium? Warum sind alle Übergangselemente Metalle?
- Was wissen Sie über ihre magnetischen Eigenschaften?
- Warum liegt die Bindungsenergie des 5s Elektrons unter dem des 4d Elektrons (qualitativ)?
- Wie viele Lanthaniden gibt es und warum?
- Wie sieht Spektrum einer Röntgenröhre aus, was ändert sich bei Erhöhung der Anodenspannung?
- Wieso gibt es im Röntgenbereich Absorptionskanten und keine Absorptionslinien wie im sichtbaren Bereich? Welches Material eignet sich am besten zur Abschirmung und warum?
- Wie können freie Elektronenplätze in inneren Schalen gefüllt werden? Welche Strahlung emittiert das Atom dabei?
- Wie können Sie das Emissionsspektrum eines Atoms im Röntgenbereich messen?

2.5 Spektroskopie: Linienform, spektroskopische Methoden

- Linienform und Linienbreite: natürliche Breite, Dopplereffekt und Stossverbreiterung

- Spektroskopische Methoden: Prismenspektrometer, Vielstrahlinterferenz: Gitter und Fabry-Perot (Auflösung, Bandbreite)
- Messung der Feinstruktur und Hyperfeinstruktur durch Hochfrequenzexperimente
- Laserspektroskopie: Festlegung der Laserfrequenz durch Resonator und Frequenzbestimmung
- Elemente dopplerfreie Spektroskopie:
 - a) Sättigungsspektroskopie
 - b) 2-Photon-Spektroskopie
- Optische Messung der H-Feinstruktur mit Lasern.

Experimentelle Methoden und Laser werden gut im Demströder behandelt.

2.5.1 Testfragen zum Stoff

- Was sind die physikalischen Grundvoraussetzungen für Lasing?
- Was ist die Kohärenzlänge? Wie hängt sie bei natürlichen Lichtquellen mit Lebensdauer und Linienbreite zusammen?
- Wie kann man bei Messungen der Energieniveaus die Effekte der Dopplerverbreiterung und der Stossverbreiterung vermeiden?
- Wovon hängt die Auflösung eines Vielstrahlinterferometers ab, wie erhält man die bestmögliche Auflösung? Gibt es prinzipielle Beschränkungen?
- Was ist ein optischer Resonator? Für welche mittleren Frequenzen gibt es stehende Wellen? Wie lässt sich in ihm ein Wellenlängenbereich auswählen?
- Warum funktionieren Hochfrequenzmethoden trotz Dopplerverschiebung?

2.6 Auswahlregeln für elektromagnetische Übergänge

- Erhaltungsgrößen für 1 Photonübergänge: Energie, Drehimpuls und Parität
- Dipoloperator und Dipolmatrixelemente

- Warum im Normalfall nur Dipolübergänge? Grösse und Bedeutung von $k \cdot r$
- Übergangsrate und Auswahlregeln für Dipolstrahlung
- Bedingungen für 1-Photonabsorption.

2.6.1 Testfragen zum Stoff

- Warum hat das Photon im Normalfall keinen Bahndrehimpuls relativ zum Atom, das es aussendet?
- Welche Quantenzahlen hat das Photon?
- Was sind die wesentlichen Faktoren, die die Lebensdauer eines Dipolübergangs bestimmen?
- Warum lebt der $2s_{1/2}$ Zustand im H-Atom lange obwohl der Übergang zum $2p_{1/2}$ Zustand 'erlaubt' ist?
- Welche Atomübergänge kann ich optisch durch Absorption eines Photons anregen?
- Wie kann ich ein H-Atom optisch anregen?
- Leben isolierte angeregte He-Atome im 2s Zustand beliebig lange?
- *Warum zeigen angeregte Kerne häufig Multipolstrahlung (Quadrupol, Oktupol etc...), welche Auswahlregeln gelten?*
- *Diskutieren Sie die Erhaltung von Drehimpuls und Parität für diese Übergänge.*

2.7 Atome in äusseren magnetischen und elektrischen Feldern: Zeemaneffekt

- Potentielle Energie eines magnetischen Dipols im Magnetfeld, Richtungsquantelung
- Energieaufspaltung im 'schwachen' Magnetfeld für ganz- und halbzahligen Gesamtspin J
- Versuch zum Zeemaneffekt; Zahl der Linien und deren Polarisation.

- Extremfall eines sehr hohen äusseren Magnetfelds: Paschen Back Effekt (Aufbrechen der Spin-Bahn Kopplung)
- Elektronenspinresonanz (Prinzip und mögliche Anwendungen)

2.7.1 Testfragen zum Stoff

- Warum heisst m Magnetquantenzahl?
- Welche Energien kann ein magnetisches Moment das zu einem Gesamtdrehimpuls J gehört in einem äusseren Magnetfeld haben?
- In wieviele Energiezustände spaltet die Lyman Alpha Linie im äusseren Magnetfeld auf? (Vernachlässigung der Hyperfeinstruktur)
- Welche Übergänge sind möglich und wie ist die Polarisation der Lichtquanten?
- Wann kann man den 'normalen' Zeemaneffekt beobachten, also 2 verschobene und eine unverschobene Linie.? (Hinweis: es gibt 2 Möglichkeiten)
- Warum haben die Energiezustände bei halbzahligem J alle unterschiedliche Energieaufspaltungen?
- Wann macht es in einem äusseren Magnetfeld Sinn von einer Aufspaltung der Feinstrukturlinien zu reden?
- Wann ist die Kopplung zwischen den magnetischen Momenten im Atom nicht mehr relevant?

2.8 Atome in äusseren magnetischen und elektrischen Feldern: Starkeffekt

- Starkeffekt im elektrischen Feld
- Aufspaltung der Spektrallinien und Abhängigkeit von der elektrischen Feldstärke
- Berechnung der Aufspaltungen und der Zustandsmischungen mittels Störungstheorie
- Linearer Starkeffekt im H-Atom und seine Ursachen (qualitativ).

2.8.1 Testfragen zum Stoff

- Woher kommt die quadratische Abhängigkeit der Energieverschiebung von der el. Feldstärke? (anschauliche phys. Begründung)
- Wann kann ein linearer Effekt auftreten?
- Welche Zustandsmischungen kann die WW zwischen el. Feld und dem Atom bewirken? Wie sieht der Störoperator aus?
- Betrachten Sie den $3p_{3/2}$ Zustand im Na Atom. Welche ungestörten Zustände wird die WW mit dem elektrischen Feld bevorzugt beimischen?
- Wo spielt der Starkeffekt eine Rolle?

2.9 Mehrelektronensysteme / Heliumatom und Pauli- prinzip

- Ununterscheidbarkeit gleicher Teilchen in der Quantenmechanik
- Fermionen und Bosonen, Symmetrie gegen Vertauschung von Teilchen
- Konstruktion symmetrischer und antisymmetrischer Wellenfunktionen
- He: Konzept der Einteilchen -Wellenfunktionen, symm. und antisymmetrische Orts- und Spinwellenfunktionen
- Singulett und Triplettzustände, Grundzustand und erste angeregte Zustände
- Aufenthaltswahrscheinlichkeiten der Elektronen in symmetrischen und antisymmetrischen Ortswellenfunktionen
- Energiekorrekturen durch e-e Wechselwirkung: Austauschintegrale, Energiereihenfolge der Niveaus
- LS Kopplung und Multiplizität der Energieniveaus
- Auswahlregeln für elektromagnetische Übergänge

2.9.1 Testfragen zum Stoff

- Weshalb sind gleiche Teilchen in der QM ununterscheidbar? Gilt das grundsätzlich oder gibt es Situationen wo die Teilchen unterscheidbar sind? Versuchen Sie eine quantitative Formulierung.
- Was bedeutet ununterscheidbar in einem konkreten Fall für Aufenthaltswahrscheinlichkeit, Erwartungswerte, Messungen...
- Wodurch unterscheiden sich Fermionen und Bosonen, wie sehen ihre Wellenfunktionen aus?
- Diskutieren Sie das Pauliprinzip, warum hat das etwas mit der Antisymmetrie der WF zu tun? Geben Sie konkrete Beispiele
- Durch welche QZ wird ein Zustand im He beschrieben, wie ergibt sich das aus der Konfiguration der Elektronen? Geben sie beides an für den 2. Triplettzustand.
- Welche Zustände im He Atom sind metastabil und warum? Wie kriegen sie ihre Anregungsenergie los?
- Woher kommt das Interkombinationsverbot? Gilt das für alle Atome?
- Diskutieren Sie die LS Kopplung: was sind 'gute' Quantenzahlen, woher kommt die Multiplizität der Zustände und wie gross ist diese?

2.10 Mehrelektronensysteme - weniger Relevantes

- Heliumähnliche : Be, Mg, Ca, ...Zn... Hg
- Allgemeine Regeln für Kopplung von Spins und Bahndrehimpulsen: Multiplizitäten und Pauli'scher Lückensatz
- Hundt'sche Regel
- Exemplarische Beispiele für Atomspektren; C,N,O
- Hg Spektrum , Interkombinationslinien und Übergang zur JJ -Kopplung
- Prinzip des Hartree-Fockverfahrens zur Berechnung von Mehrelektronensystemen

2.10.1 Testfragen zum Stoff

- Wie ändert sich die Feinstrukturaufspaltung im Triplettzustand als Funktion von Z ?
- Warum ist bei Atomen mit zwei s-Valenzelektronen kein Triplettzustand als Grundzustand möglich, warum geht das für zwei p-Elektronen?
- Betrachten Sie die tiefstliegenden Zustände schwerer Atome. Wie findet man die und welcher liegt energetisch am tiefsten? Warum?
- "Erklären" Sie die Hundt'sche Regel
- Wie kommen für kleine Anregungsenergien die angeregten Zustände zustande? Welche Elektronenkonfiguration haben sie?
- Welche Auswahlregeln gelten für Dipolstrahlung.
- Wie sieht der Grundzustand von Kohlenstoff aus? Wie die nächst höherliegenden Zustände. Können diese in den Grundzustand zerfallen?

2.11 Quantenstatistik

- Verteilungsfunktion und statistisches Gewicht eines Zustands
- Bose-Einstein und Fermi-Dirac Verteilungsfunktionen. Physikalische Ursache der Unterschiede
- Unter welchen Bedingungen ist die Maxwell-Boltzmannverteilung ausreichend
- Strahlungsgesetz: Hohlraumstrahlung als Bosegas.
- Leitungselektronen im Metall. Besetzungsdichte der Energieniveaus. Beitrag zur spez. Wärme.
- Fermidruck: kurze Diskussion von weissen Zwergen und Neutronensternen.

2.11.1 Testfragen zum Stoff

- Wie sieht die Besetzungsdichte der Rotationsniveaus eines 2-atomigen Moleküls bei Temperatur T aus?
- Welche Energieverteilung haben Protonen im Innern der Sonne? Welche Statistik ist jeweils angebracht und warum?

- Betrachte Wasserstoffgas bei Zimmertemperatur und bei sehr tiefer-Temperatur (mK).
- Was ändert sich? Welche Statistik wird bei genügend tiefer Temperatur gebraucht? Welche Energieverteilung erwarten Sie dann für das Wasserstoffgas? Was ist die thermische Wellenfunktion?
- Geben Sie einige Beispiele für Boson und Fermionsysteme in denen die Ununterscheidbarkeit der Teilchen eine Rolle spielt.
- *Warum tragen Leitungselektronen bei Normaltemperatur nichts zur spezifischen Wärme von Metallen bei?*
- *Schätzen Sie die mittlere freie Weglänge eines Protons im Pb Kern ab, macht es Sinn von einem mittleren Potential zu reden?*
- *Erklären Sie die relativen Radien von weissen Zwergen und Neutronsternen. Wodurch werden sie jeweils gegen den Gravitationsdruck stabilisiert?*

2.12 Moleküle / Molekülbindung

- Kovalente Bindung und Ionenbindung qualitativ
- Das H_2^+ Molekül: Schrödingergleichung für festen Protonenabstand, Näherungslösung mit LCAO, Berechnung der Energie in Störungsrechnung. Symmetrischer Bindungszustand; Energie, Wellenfunktion, Rolle der Austauschenergie
- Das H_2 Molekül: Schrödingergleichung. Ansatz mit Einteilchen Wasserstoffwellenfunktionen. Para- und Orthowasserstoff. Berechnung der Coulombstörterme: Austauschwechselwirkung. Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Elektronen.
- Symmetrie des Moleküls um die Achse: Quantisierung von Lz. Nomenklatur der Molekülzustände.
- Abfolge und Besetzungszahlen der Molekülorbitale. Die einfachsten homöopolaren Moleküle.
- Beispiele für 'Ionenbindung'. Elektronendichte und el. Dipolmoment im NaCl
- Hybridisierung: sp, sp², sp³ mit Beispielen, Pi- und Sigmabindungen. Beispiele : H_2O , Azetylen, Äthylen, Methan, Benzol, Fullerene

2.12.1 Testfragen zum Stoff

- Erklären Sie die Herkunft der 'Austauschenergie' im H_2 . Wann ist sie gross, wann klein? Warum ist sie entscheidend für die chemische Bindung?
- Skizzieren Sie den Verlauf der Potentialkurve für ein homöopolares Molekül. Erklären Sie sie qualitativ.
- Warum bilden Edelgase keine Moleküle?
- Wie sieht die Elektronendichte bei 2-atomigen Molekülen aus 2 Atomsorten aus?
- Was bedeuten die Bindungsstriche der Chemiker?
- Welche kovalenten Bindungen gibt es; warum sind sie unterschiedlich stark?
- Skizzieren Sie die Elektronendichte bei einer Dreifachbindung des Kohlenstoffs: Bsp. Azetylen
- Was ist Hybridisierung, warum nutzen verschiedene Verbindungen unterschiedliche Hybridwellenfunktionen?

2.13 Molekülspektroskopie

- Das Energiespektrum von 2-atomigen Molekülen: Elektron-, Schwingungs- und Rotationsanregungen; Hierarchie der Energieabstände
- Besetzungsdichte der Niveaus bei Normaltemperatur, statistische Verteilung
- Mikrowellenspektroskopie: Auswahlregel, Spektrum, Bestimmung der Rotationskonstante und eff. Molekülabstand
- Infrarotspektroskopie; R- und P- Zweige, Auswahlregel für Vibrationsanregungen Eigenschwingungen mehratomiger Moleküle: Beispiel CO_2 .
- Sichtbares Molekülspektrum, Stokes shift
- Prinzip von Fluoreszenz und Phosphoreszenz
- Messung von Spurengasen durch Molekülspektroskopie; Prinzip an wenigen Beispielen

2.13.1 Testfragen zum Stoff

- Skizzieren Sie das Energiespektrum eines 2-atomigen Moleküls incl der ersten elektronischen Anregung
- In welchen Energiebereich liegen die Aufspaltungen für el. Anregung, Vibration und Rotation?
- Welche Zustände sind bei 'Normaltemperatur' bevölkert und wie stark?
- Wie würden Sie nach Spurengasen durch Infrarotspektroskopie suchen? Wie sieht ein typisches Absorptionsspektrum aus?
- Erläutern Sie die Eigenschwingungen eines mehratomigen Moleküls, wie machen die sich im Absorptionsspektrum bemerkbar?
- Was ist Fluoreszenz und Phosphoreszenz?

2.14 Kühlen von Atomen und Bose-Einstein Kondensation

Dieses Thema ist sehr aktuell und spannend. Die Grundkonzepte sollten klar sein !

- Laserkühlung
- Prinzip Magnetooptische Fallen
- Verdampfungskühlung
- Bedingungen für Bose-Einstein Kondensation
- Kurze Erläuterung eines Experiments zur Bose-Einstein Kondensation.

Eine schöne Darstellung finden Sie auf der Schmiedmayerseite: "Laser cooling and trapping of neutral atoms"

2.14.1 Testfragen zum Stoff

- Warum sind Na Atome Bosonen?
- Wie tief lässt sich ein Gas mit optischer Kühlung abkühlen?
- Wie sieht die Feldkonfiguration einer magnetischen Falle aus? Welche Kräfte wirken auf das Atom?
- Wann tritt Bose-Einstein Kondensation ein, wie macht sie sich bemerkbar?