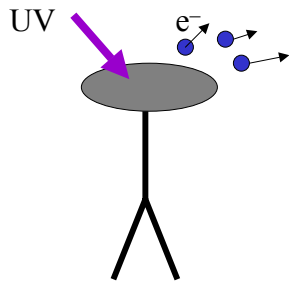


Photoeffekt

Anfang 20. Jahrhundert entdeckt.

Bei Bestrahlung mit Licht (blau oder UV) wird Zinkplatte positiv aufgeladen, bzw. negativ geladene Platte entladen.



Unter Einfluß des Lichts werden Elektronen aus der Platte herausgeschlagen.

Licht überträgt Energie auf die Elektronen.

Wenn soviel Energie, daß die Austrittsarbeit erreicht wird

----> Elektron verläßt Metall.

Falls mehr Energie ----> Elektron hat auch kinetische Energie.

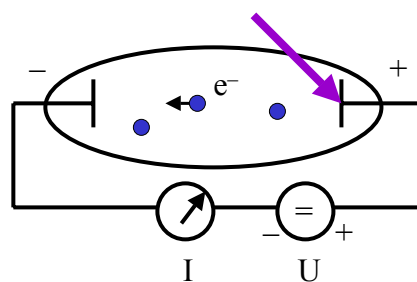
Erklärung (1900): Licht ist elektromagnetische Welle und transportiert Energie.

Wenn das Metall genügend Energie gesammelt hat tritt e^- aus

Mehr Licht ----> mehr Elektronen. Anwendung Photozelle, -multiplier

Aber: bei rotem Licht noch so hoher Intensität werden keine Elektronen emittiert.

Energie und Zahl der Elektronen kann gemessen werden



Elektronen müssen gegen negative Spannung anlaufen.

Mehr kinetische Energie:

Anlaufen gegen negativere

Spannung möglich.

Strom gibt Anzahl der

Elektronen

Experimentelles Ergebnis:

- (1) Kinetische Energie der Elektronen ist unabhängig von der Intensität
(bei geringer Intensität zwar weniger Elektronen,
aber die wenigen Elektronen haben dieselbe Energie)
- (2) Maximale Energie der Elektronen ist von der Wellenlänge des Lichts abhängig.
kurze Wellenlänge ----> mehr Energie der Elektronen

Mit Vorstellung von Licht als elektromagnetische Welle unvereinbar.

Hypothese von Einstein (1904):

- (1) Energie des Lichtes tritt nur in bestimmten Portionen auf (**Quanten**)
hohe Intensität ----> viele Quanten
- (2) Energie der Photonen ist proportional zur Frequenz der Lichtwelle
(verkehrt proportional zur Wellenlänge)
 $E = h \cdot f$ $h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{J.s}$ (Wirkungsquantum)
- (3) **Ein Photon** löst bei der Wechselwirkung **ein Elektron** aus

Photoeffekt erklärt:

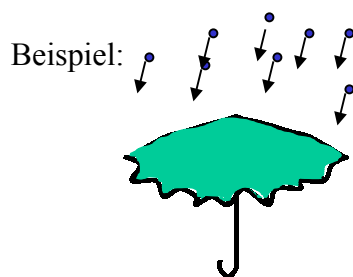
Energie des Photons ($h \cdot f$) = Auslösearbeit + kinetische Energie

Wenn Energie der Quanten zu klein ($<$ Auslösearbeit)

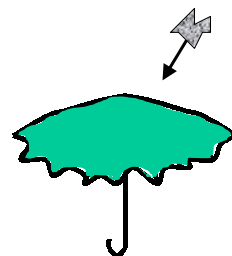
----> kein Photoeffekt, auch wenn noch so viele Quanten

----> geringe Quantenzahl löst trotzdem Photoeffekt aus, wenn

$h \cdot f >$ Auslösearbeit.

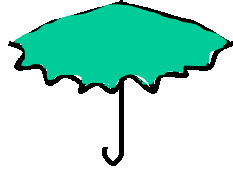


Viele Regentropfen



Ein Hagelkorn mit derselben Energie

Danach



Schirm naß, aber ganz



Schirm zerrissen

Kann man Quanten sehen???

Beispiel: 20W Halogenlampe, strahlt 0.05W auf 5 cm².

Wieviele Quanten in 1 s ?? ($\lambda = 550 \text{ nm}$)

Bereits 12 Bilder pro Sekunde verschmelzen.

Quanten bestimmen die Sehschwelle:

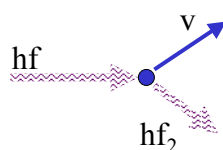
2 Quanten in einem Bereich notwendig um Reiz auszulösen.

Photonen mit PM nachweisbar.

Licht besteht aus Photonen, Photon als Teilchen auffaßbar,
welches mit Elektron zusammenstößt.

Gibt Energie ab. Durch viele Experimente und Effekte gesichert.

Z.B. Compton Effekt: Photon (Röntgen oder γ Quant) tritt mit
Elektron in Wechselwirkung.



Photon stößt auf Elektron. Photon überträgt Teil
der Energie auf Elektron.

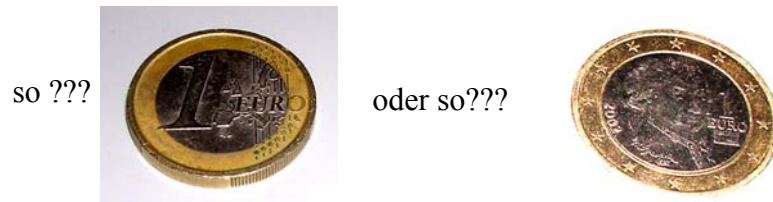
Wie bei Billardspiel geht Photon in andere
Richtung. Energie und Impuls bleibt erhalten

Aber: Licht ist elektromagnetische Welle. Zeigt Interferenz, Beugung, Polarisation.

Ebenso gesichert.

Was ist nun Licht: Welle oder Teilchen????

Vergleich: Wie sieht 1 Euro aus:



Frage so nicht stellbar. Ist beides.

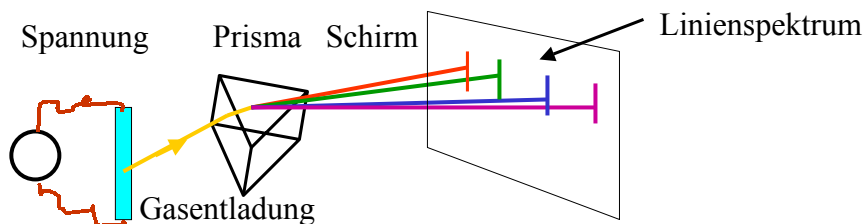
Analog bei Licht. Ist welle und Teilchen gleichzeitig

Die Amplitude der Welle gibt Häufigkeit für das Auftreten der Photonen an.

Atom und Molekülspektren

Emittiertes Licht erlaubt Struktur von Atomen und Molekülen zu untersuchen.

Spektrum eines glühenden Gases ist meist färbig und besteht aus einem "diskreten" Spektrum (Linienspektrum)



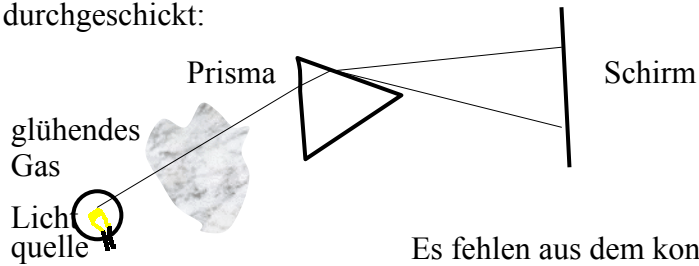


diskretes Emissionsspektrum
z.B. Gasentladung



kontinuierliches Spektrum
z.B. weißes Licht von
glühendem W-Draht

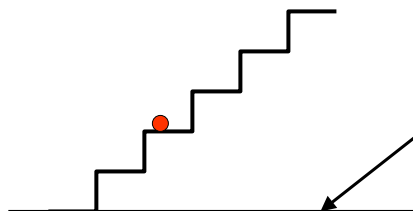
Absorptionsspektrum: Weißes Licht wird durch glühendes Gas durchgeschickt:



Es fehlen aus dem kontinuierlichen Spektrum einige Linien genau jene, die auch emittiert werden können

Elektronen treten mit Photonen in Wechselwirkung:
Wenn nur bestimmte Wellenlängen (Frequenzen) absorbiert bzw. emittiert werden
---> dann kann das Elektron nur bestimmte Energie aufnehmen oder abgeben
---> nur bestimmte Energien im Atom sind möglich.

Energieniveauschema zur graphischen Darstellung: (analog zu Stiege)



Höhe der Stufe gibt potentielle Energie des Objekt relativ zu Referenzwert an

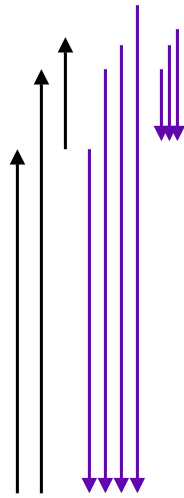


Abb 23.2 Biologische Physik

Energieniveauschema von Wasserstoff:

Grundzustand hat Energie = 0

Energie in eV = Energie die ein Elektron bei Spannung von 1 V hat: $1\text{eV} = 1.6 \cdot 10^{-19}\text{J}$

Angeregte Zustände haben immer geringere Energiedifferenz. Dann Kontinuum (Elektron verläßt das Atom und kann jede beliebige kinetische Energie "mitnehmen")

Lichtabsorption: Elektron wird auf höheren Zustand gehoben

Lichtemission: Elektron fällt auf einen Zustand geringerer Energie zurück

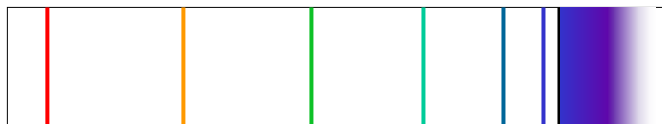
Energieniveaus mittels Quantentheorie

Ionisierungsenergie Wasserstoff: $21.47 \cdot 10^{-19}\text{J} = 13\text{ eV}$.

Übliche Ionisierungsenergien um 10 eV.

Wellenlänge der Emissionen/Absorptionen die auf dem Grundzustand enden: Energie des Photons 16.34 bis $21.74 \cdot 10^{-19}\text{J}$
Wellenlänge??

Das (Absorptions-, Emissions-) Spektrum eines glühenden Gases besteht aus Linien (wegen Energie zwischen den Niveaus) und an die kurzellige Seite anschließendes Grenzkontinuum



Mehrere Elektronen: wesentlich kompliziertere Spektren da viel mehr Energieniveaus. Auswahlregeln für Übergang

Energie der Elektronen ist die Bindungsenergie
 ---> Energie die frei wird wenn das Elektron in das Atom eingebaut wird



Je näher Elektron zum Kern gebracht wird, desto größer die anziehende Kraft, desto mehr Energie wird frei
 -----> Elektronen nahe dem Kern haben hohe Bindungsenergie
 -----> Wenn sich Energiezustände der inneren Elektronen ändern:
 -----> Quanten haben hohe Energie -----> Röntgenstrahlung

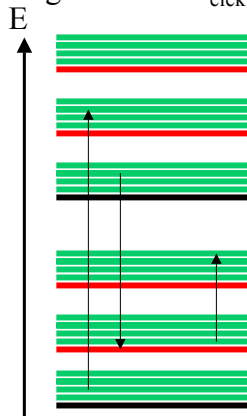
Charakteristische Röntgenstrahlung: Elektron von Kathode der Röntgenröhre kommend "schießt" ein inneres Elektron heraus. Äußeres Elektron füllt Platz auf, gibt Energie in Form von Röntgenphoton ab.

Moleküle: können Energie neben Änderung des elektronischen Zustandes auch noch Energie in Form von Änderung des Vibrationszustandes (ΔE_V) und des Rotationszustandes (ΔE_R) aufnehmen bzw abgeben.

Es ist $\Delta E_{\text{elektronisch}} > \Delta E_{\text{vibratorisch}} > \Delta E_{\text{rotations}}$

Gesamtenergie des Moleküls:

$$E_{\text{gesamt}} = \Delta E_{\text{elektronisch}} + \Delta E_{\text{vibratorisch}} + \Delta E_{\text{rotations}}$$



Elektronische Energieniveaus

vibratorische Niveaus Rotationsniveaus

Viele Übergänge, nicht alle aber (Auswahlregeln) sind möglich, kompliziertes Linienspektrum

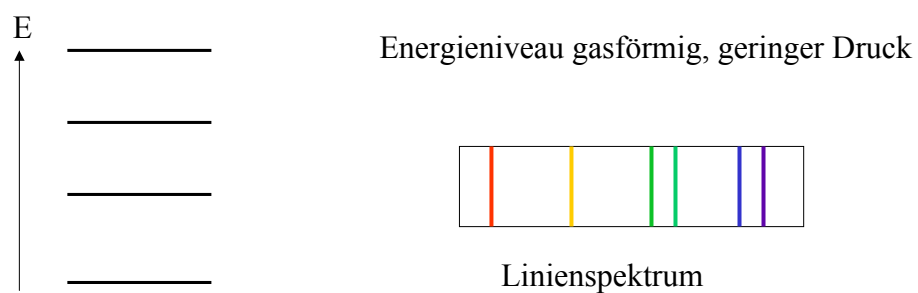
Übergänge zwischen Vibrations- und Rotationsniveaus im IR

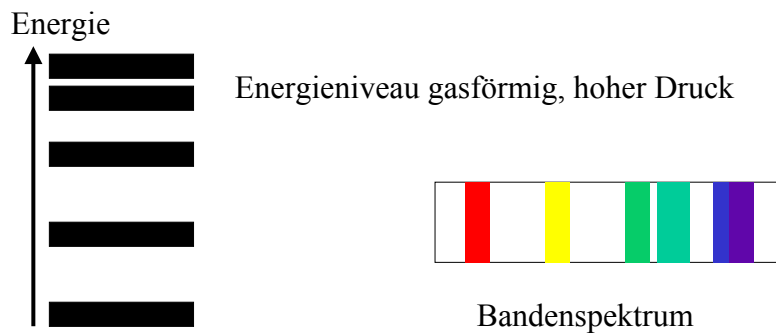
Jede Bindung eines Moleküls kann Vibrationen ausführen.
daher sehr viele Schwingungsmöglichkeiten. z.B. Glyzin
besteht nur 10 Atome, hat aber 24
Schwingungsfreiheitsgrade

Messung der Emissions und Absorptionsspektren
----> Atome, Atomgruppen und Moleküle identifizierbar
z.B. im Weltraum

Moleküle haben ein kompliziertes Linienspektrum im gasförmigen
Zustand (z.B. Hg Niederdrucklampe)

Hoher Gasdruck: Moleküle knapp nebeneinander
----> elektrische Felder der Atome beeinflussen sich,
Verbreiterung der Energieniveaus -----> Bandenspektren





Analog für Moleküle in Lösungen und Festkörper

Komplizierte organische Moleküle haben weite Banden:

visuelle Pigmente, Chlorophyll

Absorption der 3 visuellen Pigmente in den Zäpfchen Atwood Neurophysiologie, Abb. 8.13A

Messung von Spektren ----> Info über Atome, Atomgruppen, Moleküle

Messung mit Spektrometer, Spektroskop.
Wesentliche Bestandteile dieser Geräte

Lichtquelle : Glühbirne, Xe, oder D Lampe
für kontinuierliches Spektrum

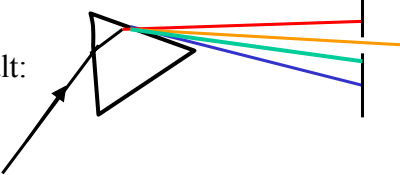
Glühendes leuchtendes Gas
z.B. zu analysierende Substanz in
Tröpfchenform in Gasbrenner 2000-3000°C

Spektrallampe emittiert einige Linien

Laser

Monochromator:

wählt aus dem Licht eine Wellenlänge (Farbe) aus

- Prisma mit Spalt:
 - Gitter mit Spalt
 - Farbfilter
- 
- A diagram illustrating the principle of a monochromator. An arrow representing light enters a triangular prism from the left. The light is dispersed into a spectrum of colors (red, orange, yellow, green, blue, violet) as it exits the right side of the prism. A vertical line with a horizontal tick mark is positioned to the right of the prism, representing a slit that selects a specific wavelength from the dispersed light.

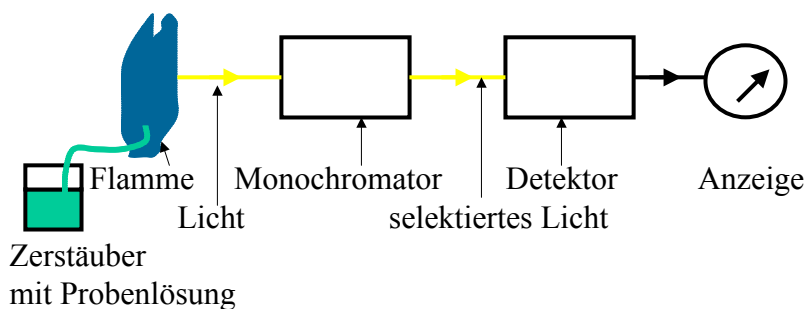
Detektor: Mißt Menge der emittierten / durchgelassenen Strahlung
meist elektrische Anzeige

- Photozelle, Photowiderstand, Photodiode
- Pyroelektrischer Detektor
- Halbleiterdetektor (IR bis 100µm möglich)
- Photomultiplier
- Thermosäule
- Golay Zelle (Gasausdehnung)
- Auge
- CCD (Serie von kleinen Photozellen, die ein Spektrum auf einmal registrieren)
- photographischer Film/Platte....

Verschiedene Ausführungen von Spektrometern:

Atomemissionanalyse:

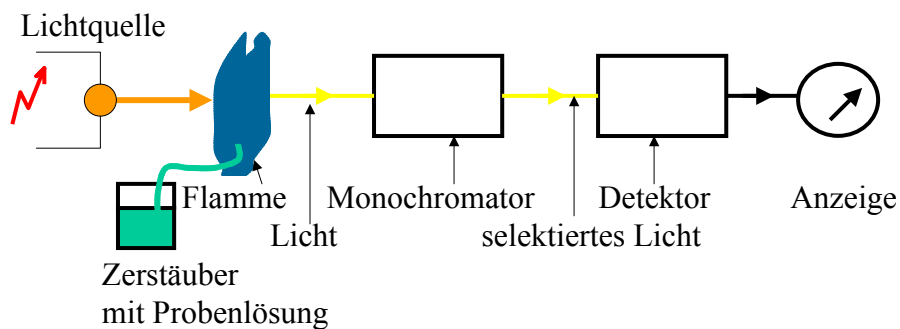
Probe in flüssiger Form zerstäubt, in Sauerstoff-Gasflamme auf ca 3000°C erhitzt, emittiertes Licht durch Monochromator zum Detektor.



AtomAbsorptionsAnalyse, AAA :

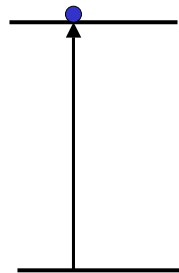
Licht geht durch Flamme mit gasförmigen zu analysierender Substanz durch, Temperatur ca 2000°C. Lichtquelle entweder weißes Licht, oder Entladungslampe, die das Spektrum des zu analysierenden Stoffes emittiert (z.B. Cd Lampe für Cd Analyse).

Wegen der hohen Temperaturen können nur stabile Atome, nicht jedoch z.B. organische Moleküle analysiert werden
-----> gut z.B. für Schwermetalle



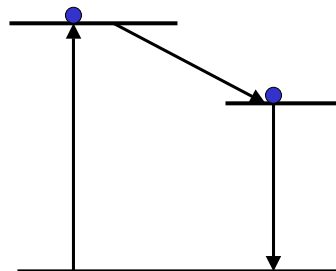
Fluoreszenz

Licht wird absorbiert, Elektron in Atom / Molekül / Kristall auf höheres Energieniveau, Photon einer der Energiedifferenz entsprechenden Wellenlänge λ wird absorbiert.



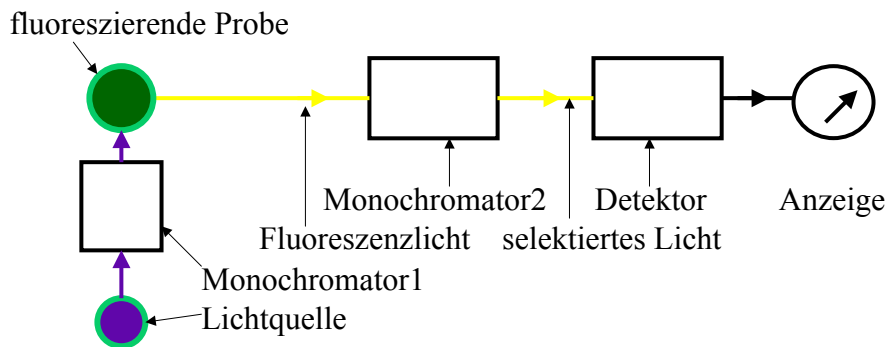
Rückkehr in den Grundzustand nicht direkt (unter Emission der Wellenlänge λ), sondern über ein Zwischenniveau

Dadurch Emission eines Photons mit geringerer Energie (größerer Wellenlänge $\lambda_1 > \lambda$).



Fluoreszenz typisch für Moleküle, Festkörper.
 Proteine fluoreszieren wenn mit UV beleuchtet
 Chlorophyll fluoresziert rot, Zur Analyse verwendbar

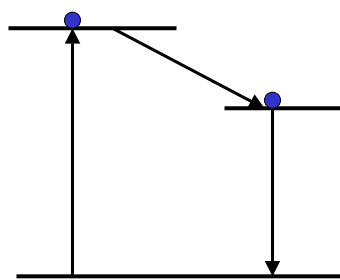
Waschmittel, Kleidung absorbiert UV und fluoresziert bläulich, dadurch erscheint Kleidung weißer.
 Leuchtstoffröhre: Hg Dampf Gasentladung gibt UV. Leuchtstoff fluoresziert.



Schema eines Fluoreszenzphotometers

Lumineszenz (Nachleuchten)

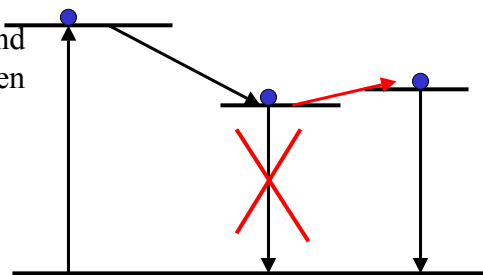
Zwischenzustand beim Rückfallen ist metastabil.
System verweilt einige Zeit in diesem Zustand, daher Nachleuchten



Thermolumineszenz

Übergang vom Zwischenzustand in den Grundzustand ist verboten

Atom, Molekül, **Kristall**, verweilt in diesem Zustand. Übergang von etwas höher energetischem Zustand wäre möglich.



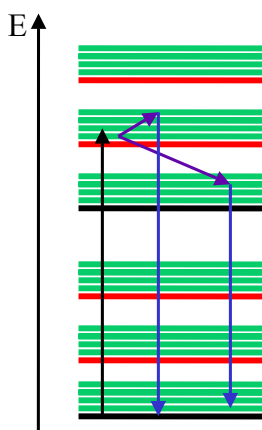
Durch Zufuhr von Wärmeenergie bei Erhitzen wird dieser Zustand erreicht,

Dann Übergang in den Grundzustand ----> Leuchten bei Erwärmung

Anwendung z.B. Kerndosimeter: Absorption von Kernstrahlung führt zu metastabilen Zustand. Bei Erwärmung ist Leuchten proportional der absorbierten Strahlung

Ramanspektroskopie

Voraussetzungen: Vibratorische und Rotatorische Energiezustände haben viel weniger Energie als elektronische, daher im IR. Wasser absorbiert IR, fast alle wichtigen Biomoleküle liegen in wässriger Lösung vor IR Spektroskopie nicht möglich.



Aber: Energieniveauschema gibt Hinweis

Sichtbare Lichtquant wird absorbiert.

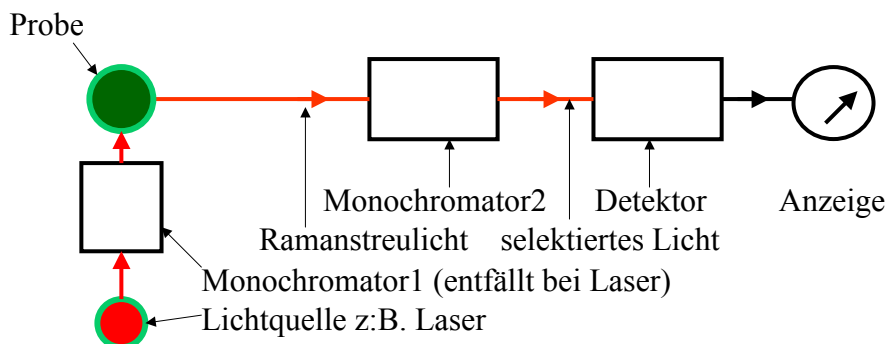
Molekül kann (z.B. durch Stoß mit anderem Molekül) Rotations oder Vibrationsenergie abgeben oder aufnehmen

Danach Übergang in den Grundzustand. Andere Wellenlänge als absorbiert wird emittiert.

Differenz in Energie ist Rotations, bzw. Schwingungsenergie

---> Vibrations- und Rotationspektren können gemessen werden aufgrund kleiner Veränderungen des emittierten Lichts:

Raman Streuung. Sehr genaue Wellenlängenmessung nötig, aber Messung im Wasser möglich



Streulichtphotometer:

mißt Streuung des Lichts als Funktion des Winkels: Abb 23.9 Biologische Physik

Kettenförmige, runde, längliche Moleküle haben verschiedene Streumuster. Aus Streumuster Rückschluß auf Form, eventuell auch Größe.

Spektralphotometer

Mißt Lichtabsorption z.B. von Lösungen
besteht aus Lichtquelle, Monochromator, Probe (Küvette mit Lösung),
Detektor, Anzeige.

Abb. 23.7 Biologische Physik

Beim Durchtritt durch die Küvette wird ein Teil des (parallelen) Lichtflusses absorbiert.

----> Austretender Fluß Φ ist kleiner als eintretender Fluß Φ_0

Φ_0 Φ

Abb. 23.6 Biologische Physik

Nach x Meter im absorbierenden Medium ist

$$\Phi = \Phi_0 \cdot e^{-\mu \cdot x}$$

μ ... Absorptionskoeffizient
Schwächungskoeffizient
Extinktionskoeffizient
[μ] = m⁻¹

$$\frac{\Phi}{\Phi_0} = e^{-\mu \cdot x} = T \quad \text{Transmission}$$

Der Absorptionskoeffizient ist von Material und von λ abhängig

Bei gelösten Substanzen auch von der Konzentration

$$\mu = c \cdot a$$

c Konzentration
a spezifischer Absorptionskoeffizient

Beispiel: In einer 1m Schichte Meerwasser gehen 5% des Sonnenlichts verloren.

Wieviel % des auf der Meeresoberfläche auftreffenden Sonnenlichts gelangt in 50 m Tiefe??

LASER

(Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

Stimulierte Emission:

Betrachte System mit 2 möglichen Energiezuständen für Elektron,
Energiedifferenz ist ΔE

Absorption: Photon mit Energie

$\Delta E = h \cdot f$ gibt bei Absorption

Energie an das System ab,

Energie ΔE wird aufgenommen

Emission. System geht in den

Grundzustand und Photon mit

Energie $\Delta E = h \cdot f$ wird ausgesendet

Falls System im angeregten Zustand ist, kann ein Photon der
"richtigen" Energie nicht absorbiert werden

Aber es kann **stimulierte Emission**

stattfinden: Das Photon ruft Emission

eines Photons gleicher Phasenlage,

Polarisationsrichtung (und Wellenlänge)

hervor.

Diese zwei Photonen können bei anderem

Systemen im angeregten Zustand weitere

Emissionen stimulieren

----> Lawinenartige Vermehrung der Photonenzahl

ABER: Der angeregte Zustand ist energetisch ungünstiger.

Normalerweise gehen die Systeme sofort nach Anregung in den

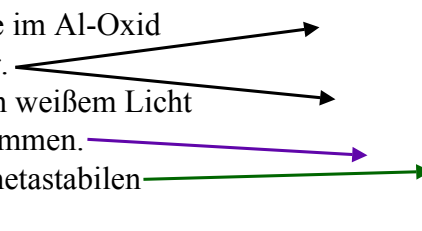
Grundzustand über.

Voraussetzung für Stimulierte Emission:
Überbesetzung des angeregten Zustandes, mehr Systeme im angeregten Zustand.
wird erreicht durch "Pumpen"----> dem System wird Energie zugeführt -----> mehr angeregte Zustände
Falls Überbesetzung --- Stimulierte Emission möglich.

Pumpen wäre möglich mit jener Frequenz (Wellenlänge) die der Emission des Systems entspräche -----> nicht zielführend

Aber: Pumpen auch über Umwege möglich: Elektrisch, Chemisch, mit weißem Licht.

Außerdem: Zustand von dem aus stimulierte Emission erfolgt soll metastabil sein. Dann größere Chance für Überbesetzung, da kein augenblicklicher Rückfall in den Grundzustand erfolgt.

Rubinlaser: Cr-Atome im Al-Oxid
haben 2 breite Bänder. 

Pumpen mit Blitzlichtröhre
(intensives weißes Licht)

Photonen sollen im Rubin hin- und herlaufen um möglichst viele Emissionen zu stimulieren. Daher an den Enden verspiegelt, eine Seite teildurchlässig ($T=1\%$). Wellen müssen in Phase sein: im Resonator muß sich stehende Welle ausbilden.
Lichtstrahl ist parallel, polarisiert, monochromatisch, kohärent.

He-Ne Laser:

Pumpen durch Gasentladung: He nimmt Energie durch Gasentladung auf

Gibt energie strahlungslos an Ne ab ---> Überbesetzung
---> stimulierte Emission bei 632.8 nm

Lasermaterialien: (Überbesetzung zumindest kurzfristig möglich):

Rubin

Neodym

Ar

CO₂

Halbleiter

Farbstoffe

Wellenlängen von UV bis IR (z.B. CO₂... 10µm)

Anwendungen von Lasern:

intensive monochromatische Lichtquelle
z.B. für Fluoreszenz, Ramanstreuung
Distanzmessung
Bohren (Laser wird konzentriert durch Linse)
Schneiden
Schweißen

Mikrochirurgie von Zellen: Zellorganellen oder genetisches Material wird mit Laser gezielt zerstört.----> gewisse Zellfunktion fällt aus
----> Funktion lokalisierbar

Netzhaut anschweißen: Augenlinse fokussiert Strahl auf Punkt der Netzhaut. Blitz von 1 ms ----> Erwärmung, Proteine koagulieren und haften

Laserskalpell: Schneiden mittels Laserstrahl.
Berührungslos, Blutgefäße neben Schnittgrat versiegelt,
----> minimaler Blutverlust, geringe postoperative Schmerzen
Auch Vaporisieren von krankhaftem Gewebe

Vorsicht mit Laser, schon 1...2 ms Exposition mit 2 mW führen zu Verbrennungen der Netzhaut ----> Schutzbrille !!

Beispiel: Laserzeiger 0.5 mW strahlt ins Auge
Sonne zu Mittag TNG, 700W/m² strahlt auf Pupille
(3mm Durchmesser)

Was ist gefährlicher ???

Photoeffekt: Photon gibt Energie an Elektron ab. Ja nach Energie des Photons kann passieren:

- Anregung zu Molekülschwingungen (Licht im IR)
- erreichen eines höheren Niveaus und Abgabe der Energie an Umgebung (Absorption)
- Photosynthese: Energie des absorbierten Lichts wird zum Aufbau von biologisch wichtigen, energiereichen Molekülen verwendet.

Chlorophyll absorbiert bei ca 420 nm (blau-violett) und bei ca. 670 nm (rot). Reflektiert/läßt durch grünes Licht.
Für Photosynthese sind Photonen um 600 nm wichtig, da die hier maximaler Photonenfluß.

Photosynthese eines Hexosemolekül --> ca 54 Quanten müssen absorbiert werden. In der Zelle werden immer energiereichere Zwischenprodukte gebildet.

Technisch nicht nachmachbar, da Zwischenprodukte sofort reagieren.

Wichtige Rolle von Membranen, verhindern Rückfallen in den Ausgangszustand.

- Wenn Photon ausreichend Energie: Schädigung des Moleküls
- Bei Proteinen mit aromatischen Aminosäuren (Tyrosin, Phenylalanin, Tryptophan): Benzolring wird gesprengt. Absorption bei $\lambda \leq 280$ nm
- Nukleinsäuren haben Absorption bei $\lambda < 240$ bis $\lambda < 290$ nm.

Photoeffekt kann biologische Moleküle verändern:

- Proteine durch Licht denaturiert
- Enzyme deaktiviert
- Gewebsschädigungen

Glücklicherweise nur durch UV

Vorgang: Quant absorbiert

-----> Elektron auf unbesetztes Niveau

-----> verläßt bindendes Orbital

-----> Photodissoziation

-----> chemische Reaktion

Hängt davon ab wo das Photon "trifft", wenn Wechselwirkung mit fest gebundenem Elektron ----> keine Photodissiziation

“Effektivität” eines Photons durch Quantenausbeute charakterisiert

$$\text{Quantenausbeute} = \frac{\text{Zahl der dissoziierten Moleküle}}{\text{Zahl der auftreffenden Moleküle}}$$

Quantenausbeute vom Molekül und Energie des Quants abhängig
Für sichtbares Licht verschwindend klein
für kurzwelliges UV und Röntgenstrahlung fast 1.

Biomoleküle besonders durch UV < 300 nm gefährdet.

Wird von O₂, N₂ und besonders O₃ abgeschirmt

Ozonschicht in der Stratosphäre. Wäre bei 1 Bar Druck nur 3 mm dick
Trotzdem praktisch undurchlässig für UV mit $\lambda < 300$ nm
Biologische Entwicklung erst unter dem Schutzschild der Ozonschicht

Sehr kurzwelliges UV der
Sonnenstrahlung spaltet O₂,
Atomares O bildet O₃

Stolarski, Scientific American 258(1)

UV Photon zerlegt O₃ in O₂ und O.

O lagert sich an O₂ an, bildet O₃
UV wird wieder absorbiert usw.
Zyklus der Absorption läuft
viele tausende Male.

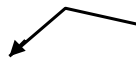
Irgendwann trifft O₃ mit O zusammen
Es bilden sich 2 O₂ ----> O₃ Molekül
verloren, aber Neubildung durch
kurzwelliges UV.

Rekombination von O und O₂ zu O₃: Energieabgabe als Wärme
-----> Stratosphäre ist warm.

Störung des O₃- UV Absorptionszyklus
durch reaktives Cl.

Fluor-Chlor- Kohlenwasserstoffe sind
reaktionsträge und kommen unbeschadet
in die Stratosphäre.

Dort bildet sich unter UV Strahlung
reaktives Cl



Stolarski, Scientific American 258(1)

Stolarski, Scientific American 258(1)

Cl reagiert mit O₃ und bildet ClO und O₂,
dadurch steht O₃ nicht mehr für UV
Absoerption zur Verfügung

Zerstörung weiterer O₃ Moleküle



ClO findet atomaren Sauerstoff
bildet Cl + O₂.

Verhindert dadurch Bildung
von O₃ (O₂ + O --> O₃)

Cl zerstört weitere O₃ Moleküle

Ein Cl Molekül kann 100000
O₃ Moleküle zerstören, bevor es
durch eine Interferenzreaktion
inaktiv gemacht wird.

Interferenzreaktion: NO₂
reagiert mit ClO und bildet
stabiles ClNO₃.

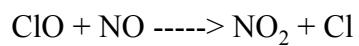
Dieses gelangt langsam zur
Erdoberfläche

-----> Elimination von reaktiven
Chlor

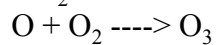
Stolarski, Scientific American 258(1)

Stolarski, Scientific American 258(1)

Reaktion mit NO setzt Cl frei aber erzeugt auch O₃:



NO₂ wird von Photonen des sichtbaren Lichts in NO + O gespalten



Ozonloch: Tritt immer im Arktischen / antarktischen Frühjar auf.

Bei tiefen Temperaturen ist NO₂ fest, kann nicht reagieren (im Winter nicht nötig, da keine Sonne).

Im Frühjahr: O₃ und reaktives Chlor von Sonne gebildet, wegen tiefen Temperaturen funktioniert die Interferenzreaktion noch nicht.