

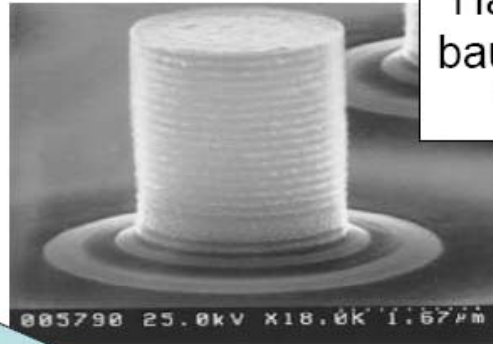
VI. Quantenphysik

VI.1 Ursprünge der Quantenphysik, Atomphysik

Mikroskopische Welt



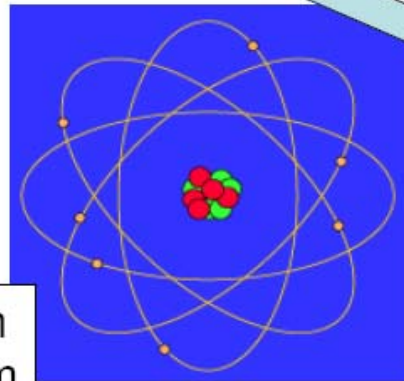
Bergkristall
 10^{-1} m



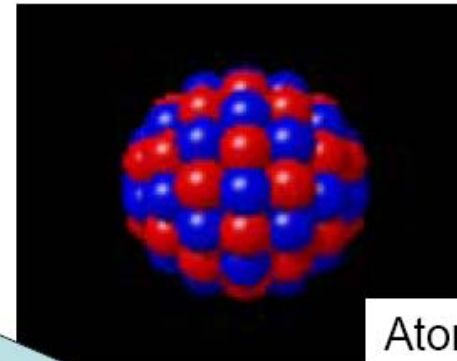
Halbleiter-
bauelement
 10^{-6} m



Schnee-
flocke
 10^{-3} m



Atom
 10^{-9} m



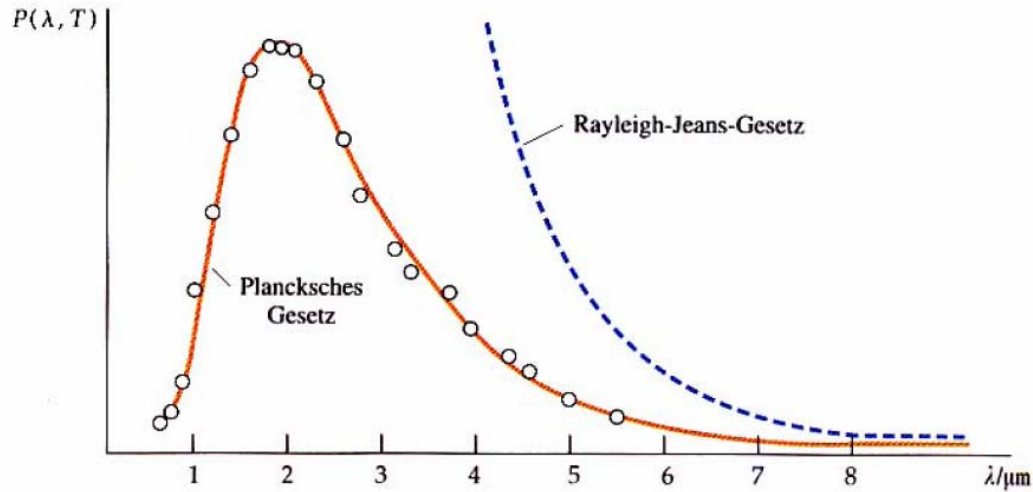
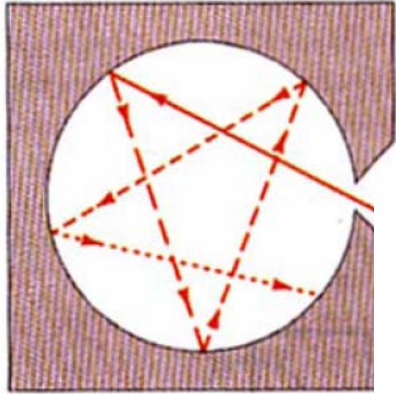
Atomkern
 10^{-15} m



Elementar-
teilchen
 10^{-18} m

Strahlung des Schwarzen Körpers

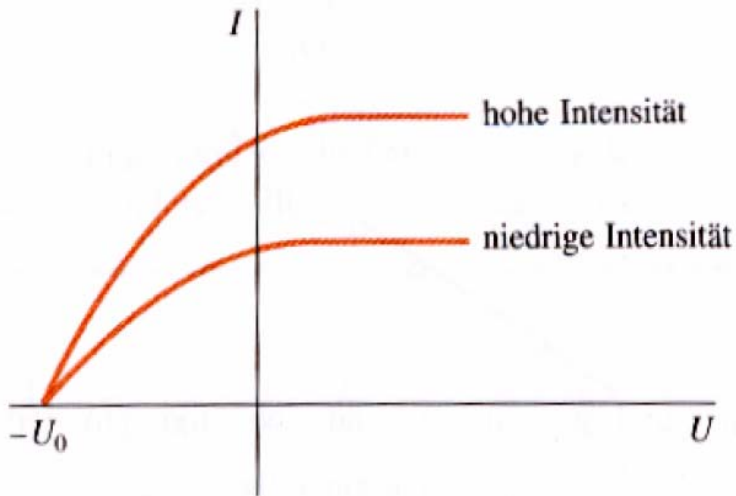
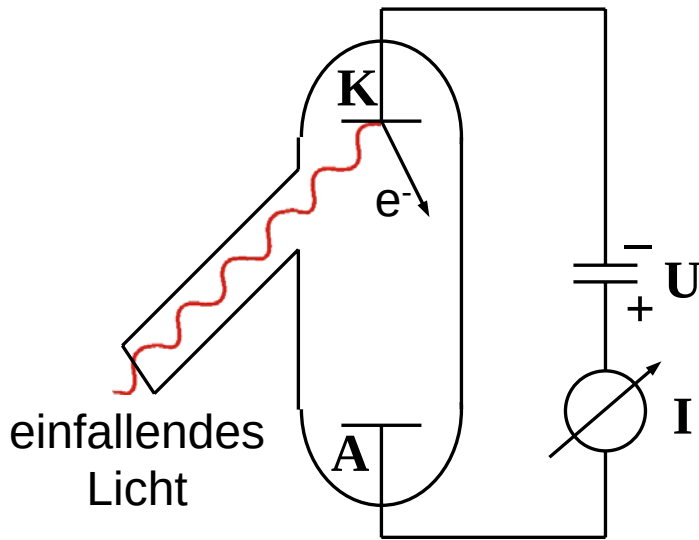
- **Schwarzer Körper:** eintretendes Licht im Innern gefangen
- Im Inneren des schwarzen Körpers elektromagnetische Strahlung im Gleichgewicht mit Wänden; Wände auf Temperatur $T \Rightarrow$ Hohlraumstrahlung



M. Planck
(1858-1947)

- nach Strahlungsgesetz von Rayleigh-Jeans divergiert Hohlraumstrahlung für kleine Wellenlängen λ : **Ultraviolett katastrophe** im Widerspruch zum Experiment
- Korrektur durch **M. Planck** (Nobelpreis 1918): Lichtmoden können nur **portionsweise** angeregt werden mit **Energiequanten $h \cdot f$** ; thermische Energie kT reicht nicht aus, Moden bei kurzen Wellenlängen λ anzuregen:
 $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$: **Plancksches Wirkungsquantum**

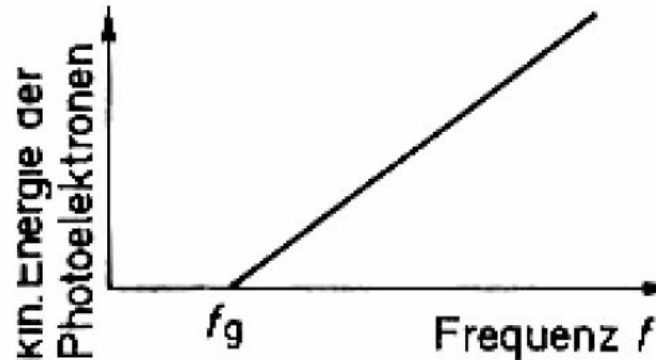
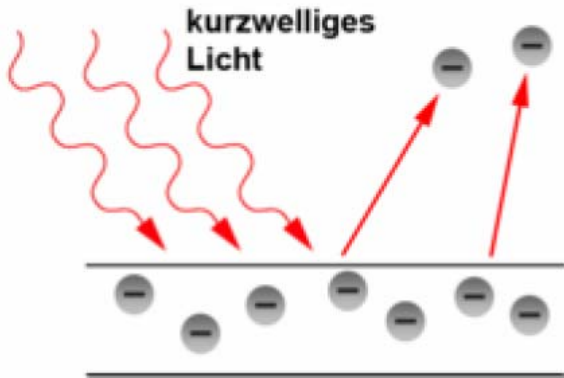
Photoeffekt



- Licht löst aus Metalloberfläche Elektronen aus, die zur positiv geladenen Anode beschleunigt werden.
- bei negativer Polung der Anode auf $-U_0$ erreichen nur solche Elektronen die Anode, deren kinetische größer als $e \cdot U_0$ ist.
- nach klassischer Physik erwartet, dass kinetische Energie der Elektronen mit der Lichtintensität ($\sim \vec{E}^2$) wächst.
- Experiment: kinetische Energie der Elektronen unabhängig von Lichtintensität aber abhängig von der Frequenz des Lichts
nicht erklärbar mit klassischer Physik

Das Photon

- Erklärung durch A. **Einstein**: Licht verhält sich wie ein **Teilchen (Photon)** der Energie $E = h \cdot f$



$$E_{\text{kin}} = h \cdot f - E_A$$



Albert Einstein
1879 – 1955
Nobelpreis 1921

- die kinetische Energie E_{kin} des Elektrons ist gleich der Energie des Photons $h \cdot f$ vermindert um die Austrittsarbeit E_A
- die Energie des Photons hängt nur von der Frequenz und nicht von der Intensität des Lichts ab in Übereinstimmung mit dem Experiment



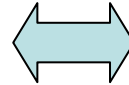
Photoeffekt

- erstmalige Anwendung der Energiequantisierung außerhalb der Hohlraumstrahlung. Steigung gibt Wert für h wie von Planck angegeben

Welle-Teilchen-Dualismus

Licht als elektromagnetische Welle

- Phasengeschwindigkeit: $c = \lambda \cdot f$
- Wellenlänge: λ
- Frequenz: f



Licht als Teilchen (Photon)

- Energie: $E = h \cdot f$
- Impuls: $p = h/\lambda$
- Spin: $S = 1$

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$



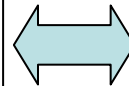
Albert Einstein
1879-1955
Nobelpreis: 1921

• Welle-Teilchen-Dualismus:

je nach Problemstellung wird Licht als Welle oder Teilchen beschrieben

Elektron als punktförmiges Teilchen

- Masse: $m = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
- elektr. Ladung $e = 1,602 \cdot 10^{19} \text{ C}$
- Spin: $\frac{1}{2}$
- Impuls $p = m \cdot v$



Elektron als Welle

$$\lambda = \frac{h}{p} \approx \frac{h}{\sqrt{2 \cdot m \cdot E_{\text{kin}}}}$$

De-Broglie-Wellenlänge



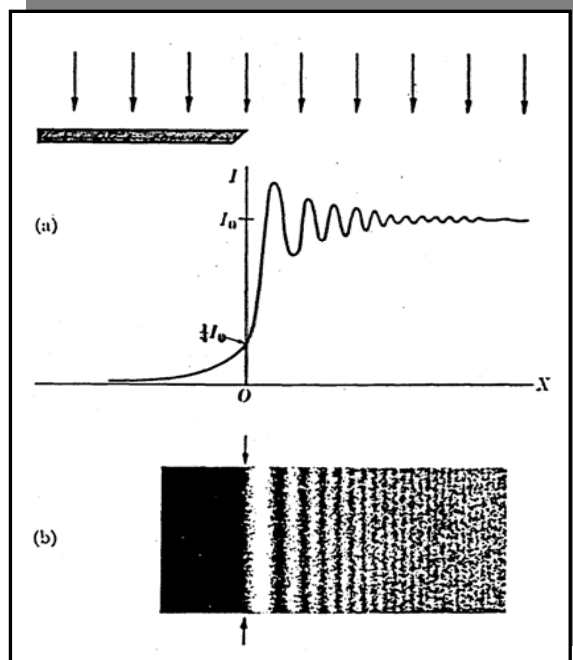
Louis de Broglie
1892-1987
Nobelpreis: 1929

• Welle-Teilchen-Dualismus:

je nach Problemstellung werden Teilchen auch als Welle beschrieben

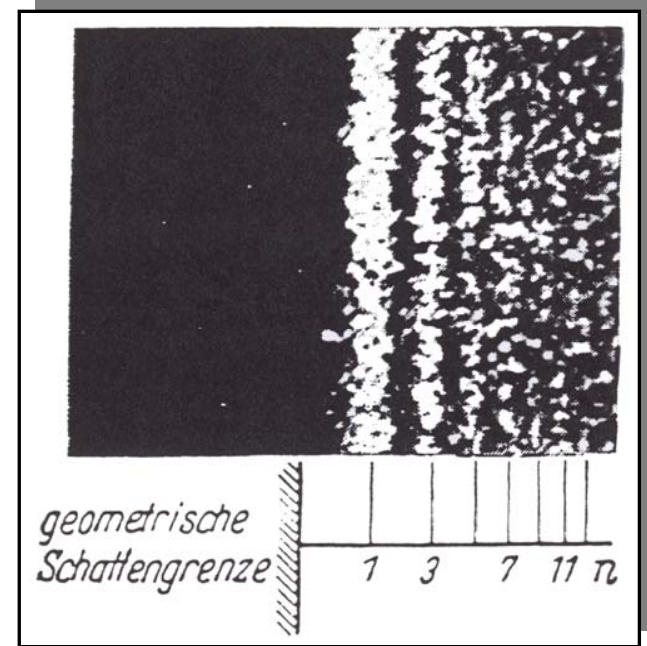
Beugung von Licht und Elektronen an einer Kante

Licht



Intensitätsverteilung bei Beugung an einer geraden Kante

Elektronen



Beugungsmuster mit Elektronenstrahlen an scharfer Kante
 $\Rightarrow$ Wellencharakter von Elektronen

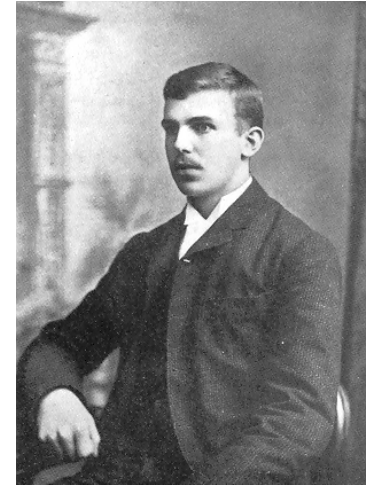
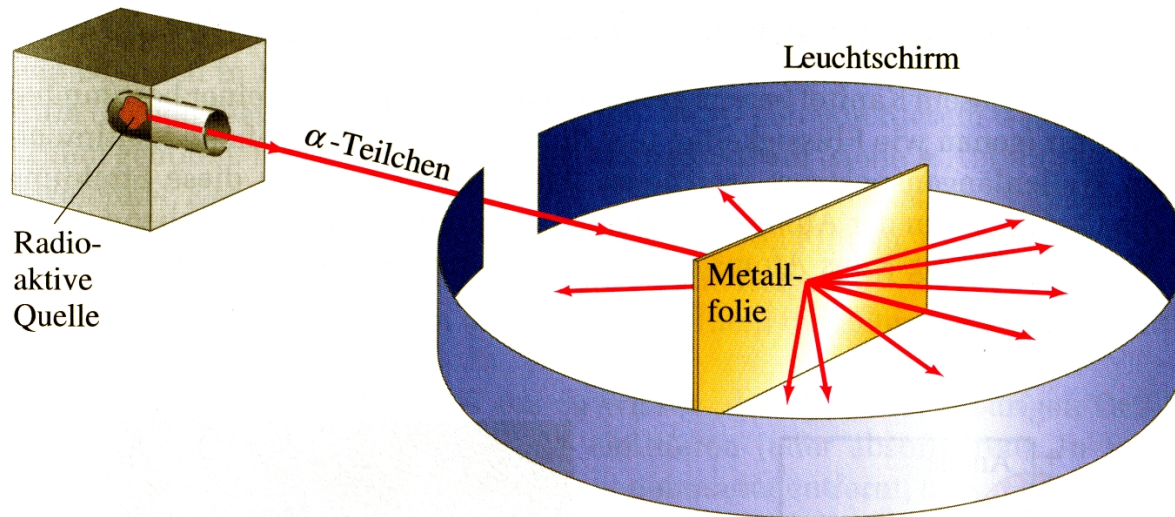
de-Broglie-Wellenlänge von Teilchen

Teilchen (Energie)	Masse	Geschwindigkeit	Wellenlänge
Elektron (1 eV)	$9 \cdot 10^{-31}$ kg	$6 \cdot 10^5$ m/s	$12.2 \cdot 10^{-10}$ m
Elektron (100 eV)	$9 \cdot 10^{-31}$ kg	$6 \cdot 10^6$ m/s	$1.2 \cdot 10^{-10}$ m
Elektron (10 keV)	$9 \cdot 10^{-31}$ kg	$6 \cdot 10^7$ m/s	$0.12 \cdot 10^{-10}$ m
Golfball	0.045 kg	25 m/s	$6 \cdot 10^{-34}$ m

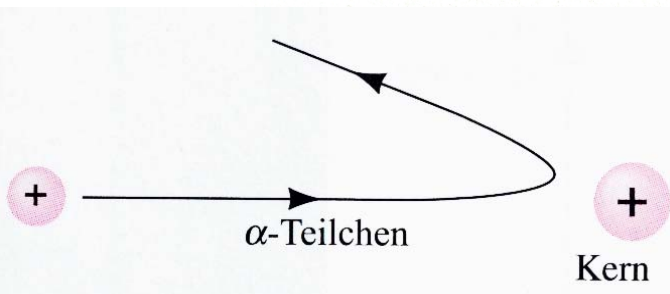
Anwendung:
Elektronenmikroskop

Struktur des Atoms

- Ende des 19. Jahrhunderts wurden Atome als die kleinsten, unteilbaren Bausteine der Materie angesehen: $\alpha\tau\omicron\mu\omicron\varsigma$ = unteilbar
- Experimenteller Nachweis für Aufbau eines Atoms aus **Atomkern und Elektronenhülle** durch Rutherford 1911:
Streuung von α -Teilchen (^4He -Kernen) an Au-Folie:



Ernest Rutherford
(1871-1937)

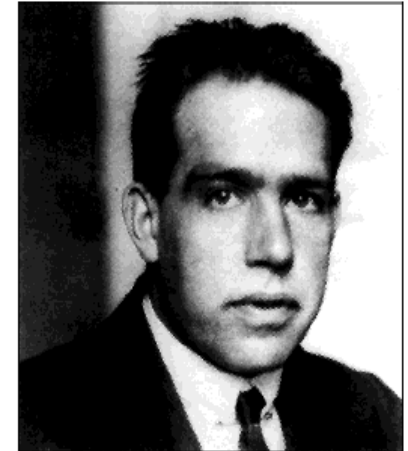


• Experimentelles Ergebnis:

die meisten α -Teilchen durchdringen die Folie, aber einige treffen den Atomkern und werden zurückgestreut. Die Masse des Atoms ist konzentriert in einem fast punktförmigen Kern.

Bohr'sches Atommodell (1914)

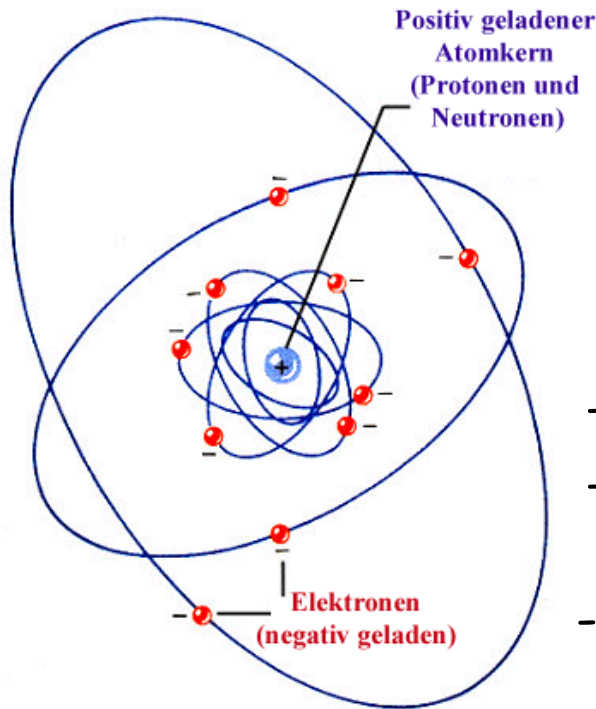
- fast die ganze Masse des Atoms ist im Kern konzentriert ($\varnothing \approx 10^{-14}\text{m}$)
- der Atomkern enthält Z positiv geladene Protonen
- ein neutrales Atom enthält Z Elektronen, die den Atomkern wie in einem Planetensystem umkreisen



Niels Bohr

1885 – 1962

Nobelpreis:1922



Bohrsche Postulate:

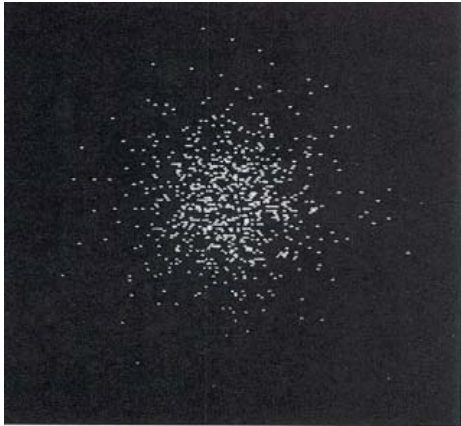
- nur bestimmten Bahnen (Schalen) sind erlaubt
- jeder Bahn entspricht ein bestimmter Energiezustand
- springt ein Elektron von einer äußeren zu einer inneren Bahn, so gibt es die Energiedifferenz ΔE als elektromagnetische Strahlung ab:

$$E_2 - E_1 = \Delta E = h \cdot f$$

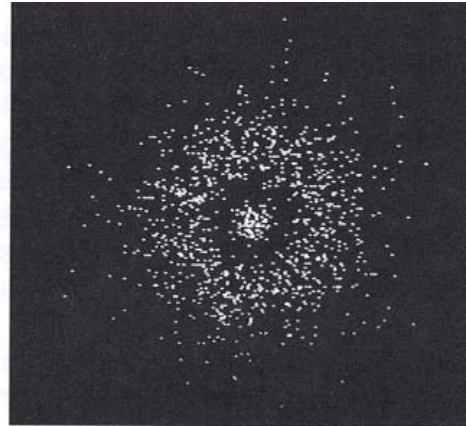
Elektronenwolken

- quantenmechanische Atommodelle:

Wir wissen heute, dass Elektronen nicht auf einfachen Bahnen fliegen. Die Quantenmechanik beschreibt das Atom durch Verteilungen („Wolken“) mit bestimmter Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Elektronen



(a)

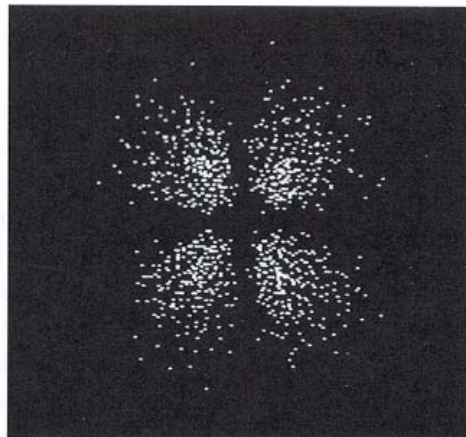


(b)

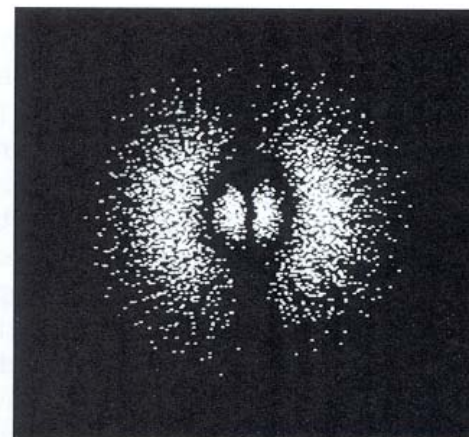


(c)

Ein Elektron hält sich an bestimmten Orten in der Umgebung des Kerns mit unterschiedlicher Wahrscheinlichkeit auf



(d)

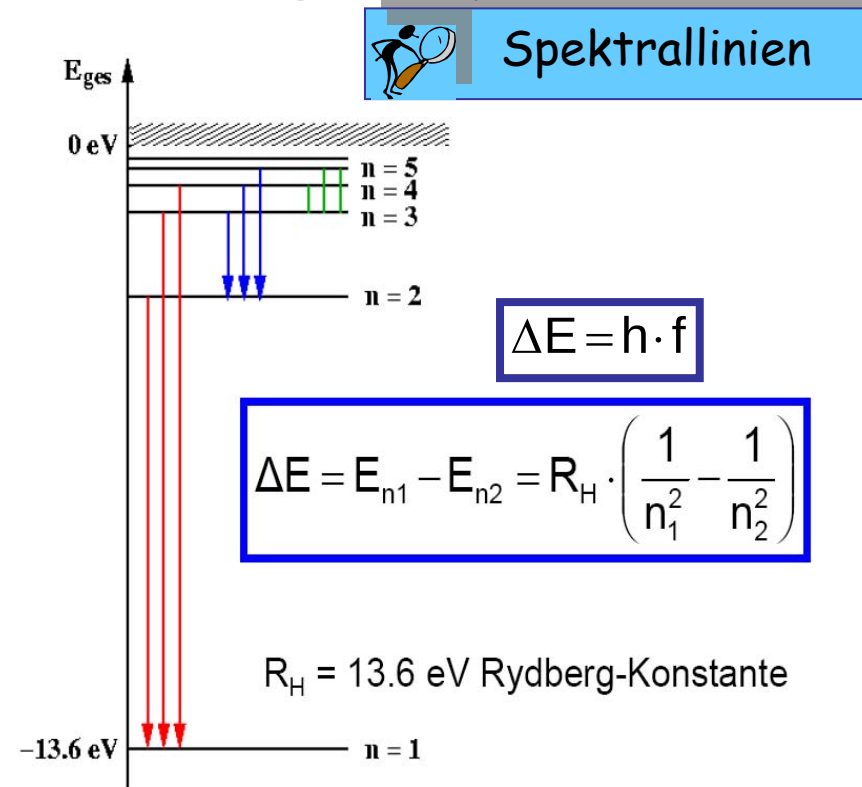
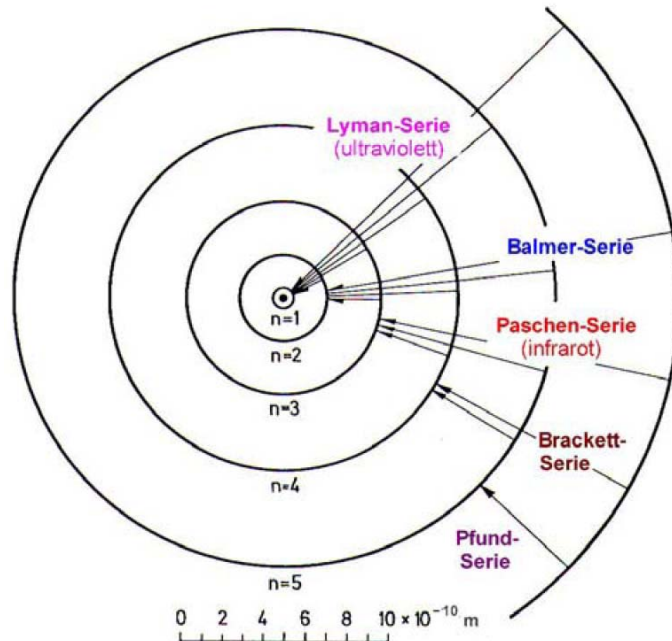


(e)

Energie-Niveaus und Linienspektren im Wasserstoffatom

- das Bohrsche Atommodell erklärt die Beobachtung von Spektrallinien

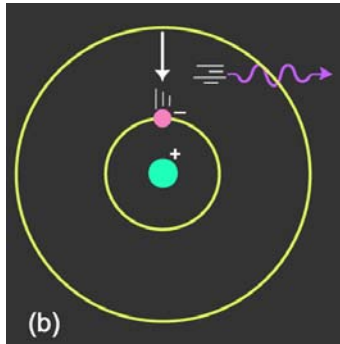
Energie der n-ten Bahn: $E_n \sim -\frac{\text{const}}{n^2}$



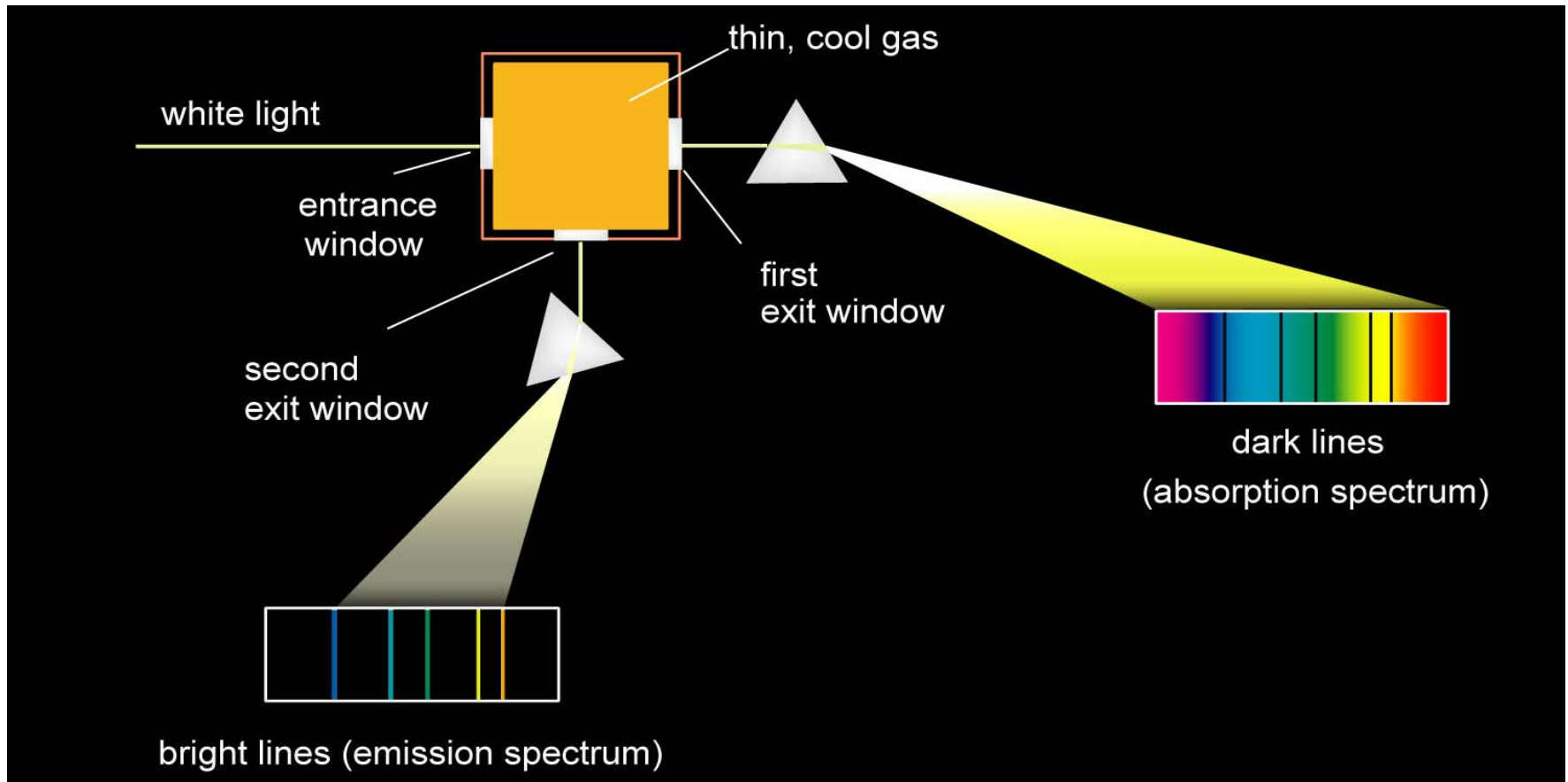
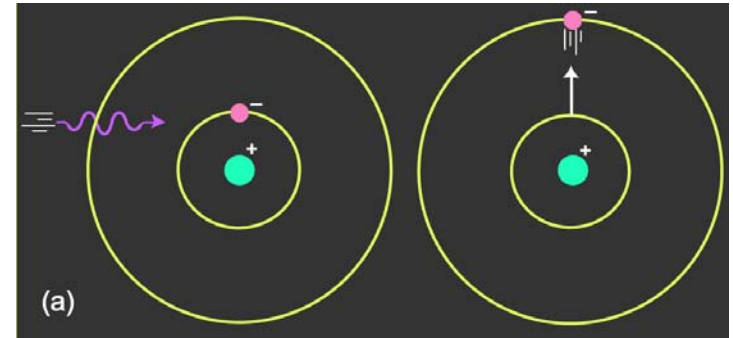
- Elektronische Übergänge durch Emission und Absorption von Licht**
 - Emission:** Elektron wechselt von angeregtem (höheren) Zustand in tieferen Zustand; Energiedifferenz ΔE wird als Photon der Energie $h \cdot f$ abgestrahlt
 - Absorption:** Energie des Photons $\Delta E = h \cdot f$ wird von Elektron aufgenommen, das auf höheres Energieniveau angehoben wird.

Absorption und Emission

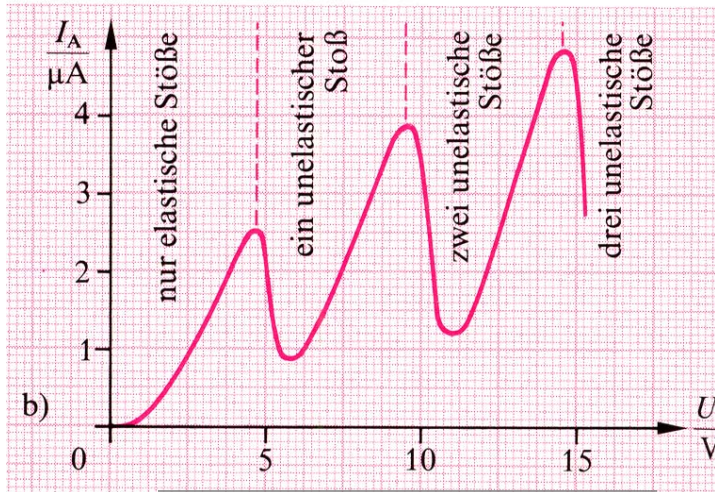
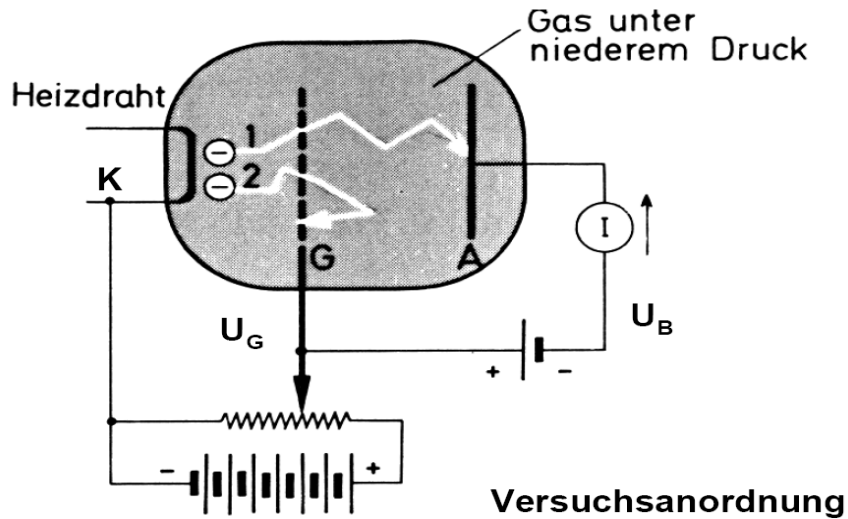
Emission:



Absorption:

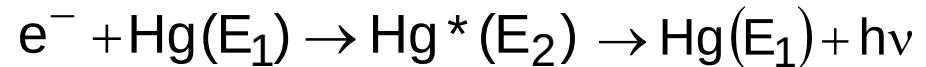
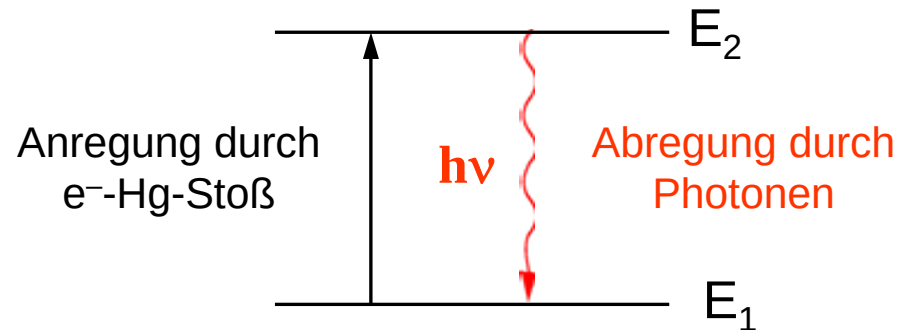


Nachweis quantisierter Energiezustände durch Franck und Hertz



Franck-Hertz

- **Beobachtung:** wird die Energie eines Elektronenstrahls hochgefahren, so sinkt der Strom bei gewissen Energien
- **Erklärung:** Energieübertragung von Elektron auf Hg-Atom **nur möglich**, wenn kinetische Energie des Elektrons der Anregungsenergie des Atomzustands entspricht:

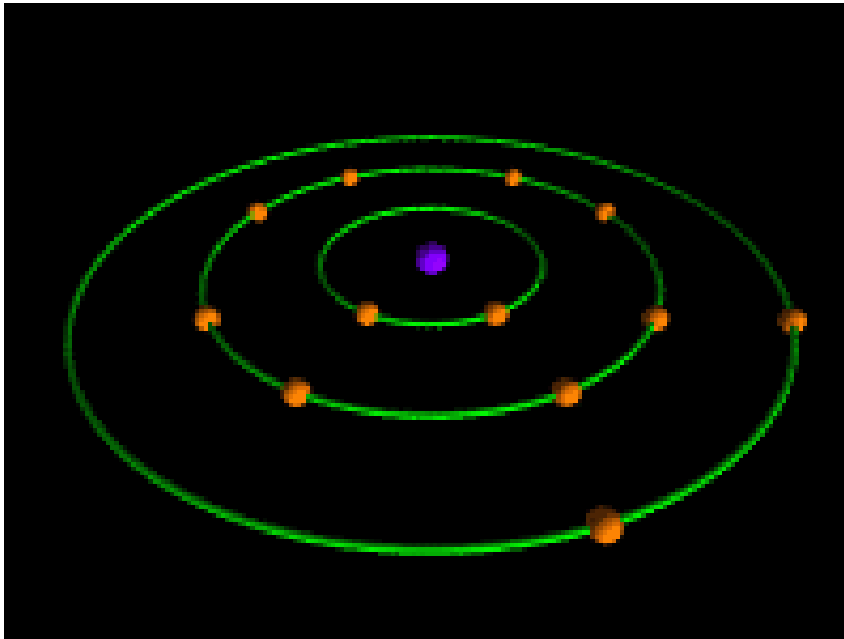


- **Absorption erfolgt quantisiert !**
Energiezustände im Atom quantisiert !

angeregte Hg-Atome (Hg^*) kehren durch Emission von elektromagnetischer Strahlung in den Grundzustand zurück

Aufbau von Atomen mit mehreren Elektronen

- bei Atomen mit mehreren Elektronen können sich nicht alle Elektronen auf der innersten Bahn befinden
- **Pauli-Prinzip: eine Schale der Hauptquantenzahl n kann maximal nur mit $2n^2$ Elektronen besetzt werden.** Ist eine Schale voll, so werden weitere Elektronen auf die nächst äußere Schale gesetzt.



Beispiel: Mg ($Z=12$);
12 Elektronen verteilt auf: $\begin{cases} n=1: 2 e^- \\ n=2: 8 e^- \\ n=3: 2 e^- \end{cases}$



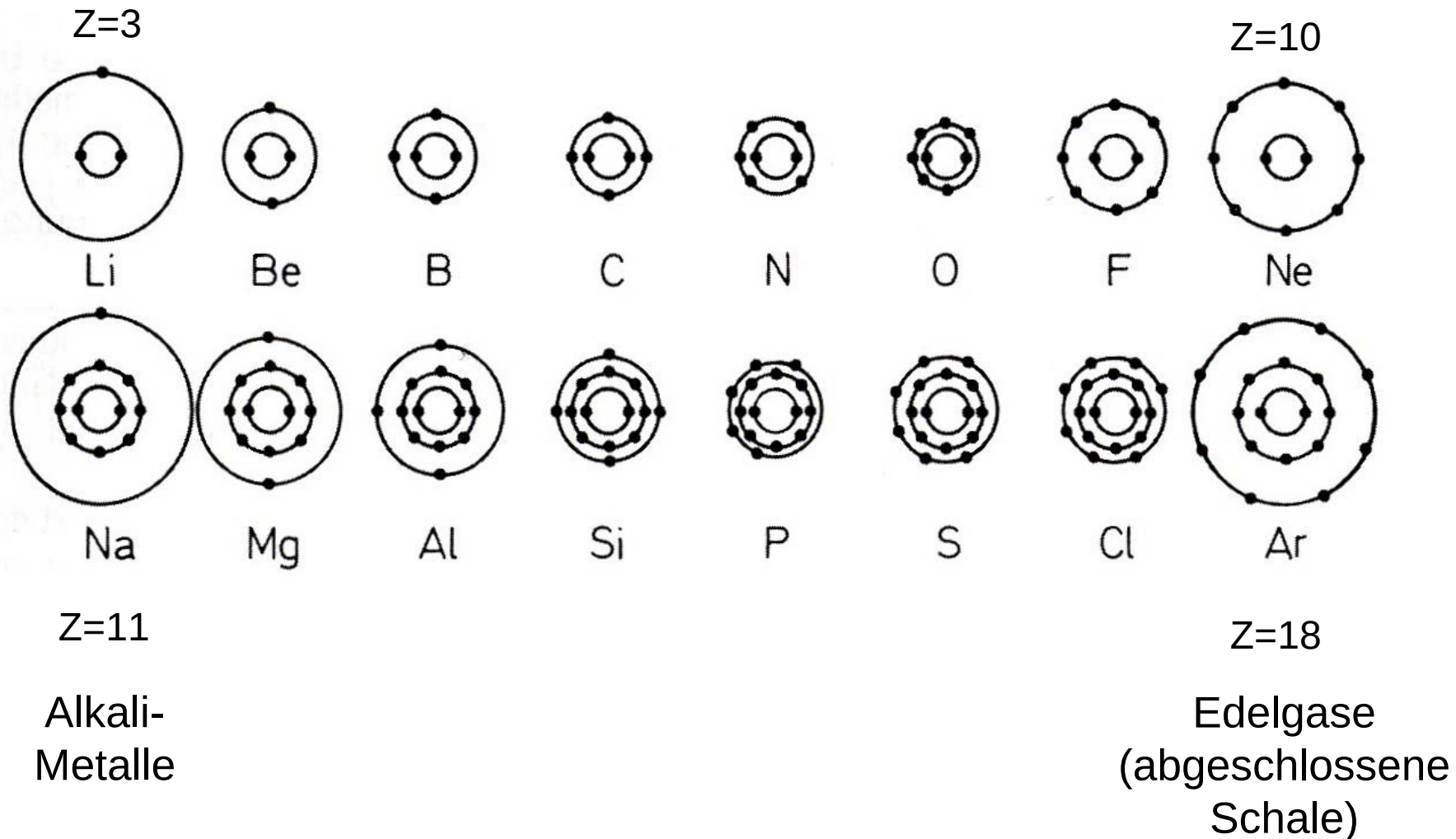
Wolfgang Pauli
1900 - 1958
Nobelpreis: 1945

Aufbau von Atomen mit mehreren Elektronen

Ordnungszahl = Kernladungszahl Z = Anzahl der Hüllenelektronen

Auffüllung der Elektronenschalen nach Pauli-Prinzip

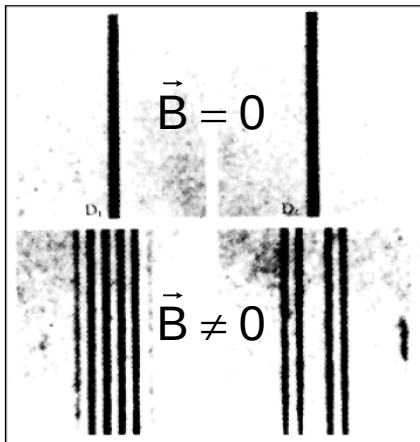
⇒ **periodisches System der Elemente**



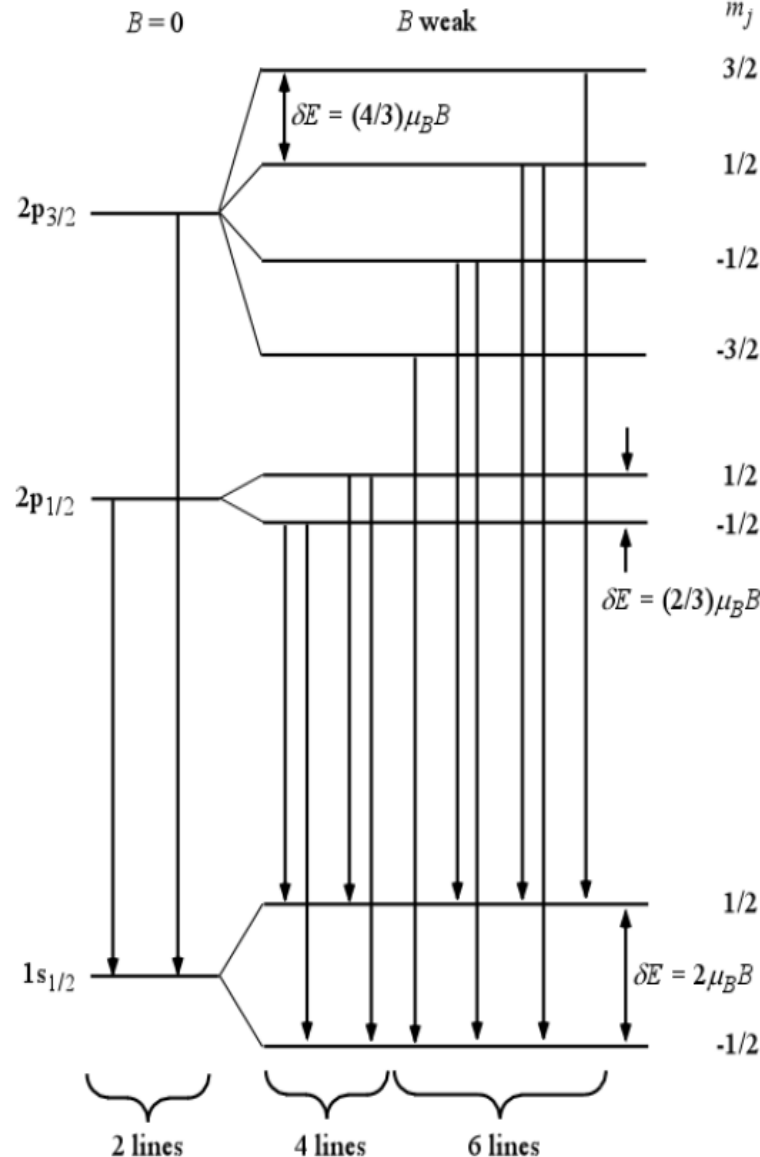
Drehimpuls, Spin – Zeemann-Effekt



Pieter Zeeman
(1865-1943)



Na D-Linien



- Elektronen auf Kreisbahnen haben ein magnetisches Moment. Hinzu kommt ein magnetisches Moment aufgrund des **Spins** (Eigendrehimpuls). Beide koppeln zu einem Gesamtdrehimpuls
- der Ausrichtung des magnetischen Gesamtmoments (parallel/antiparallel) im äußeren Magnetfeld entsprechen Zustände mit unterschiedlichen Energien
- Zeemann-Aufspaltung** der Spektrallinien



Röntgenstrahlung



Conrad Wilhelm Röntgen

1845-1923

Nobelpreis 1901

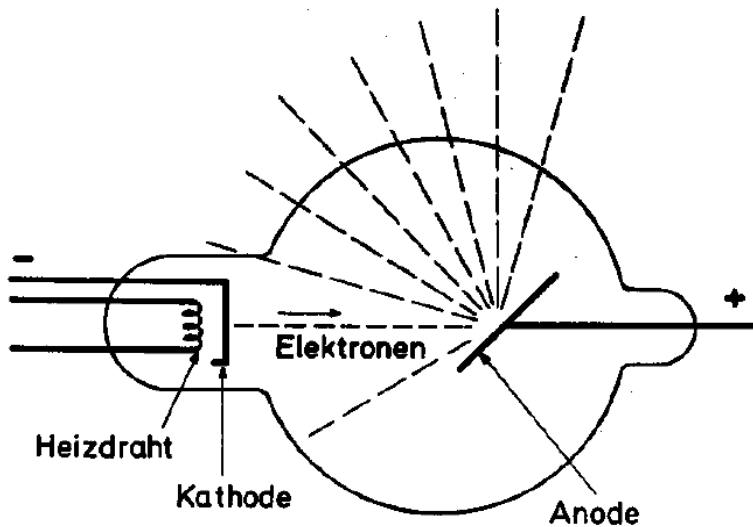
Prof. in Giessen: 1879-1888



Erste Röntgenaufnahme:
Hand von Röntgens Frau



Moderne Röntgenaufnahme
einer Hand



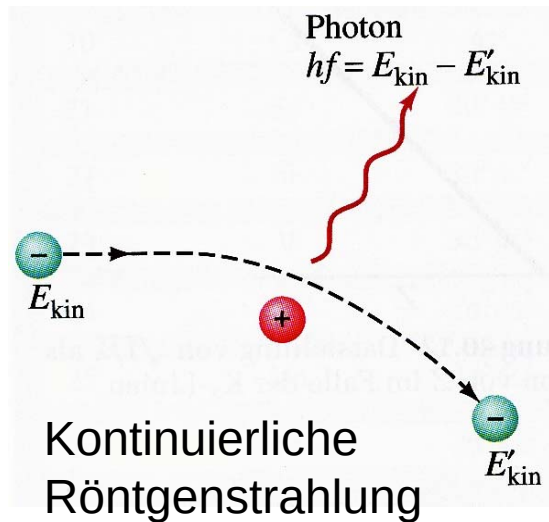
Aufbau und
Bauform
früher
Röntgenröhren



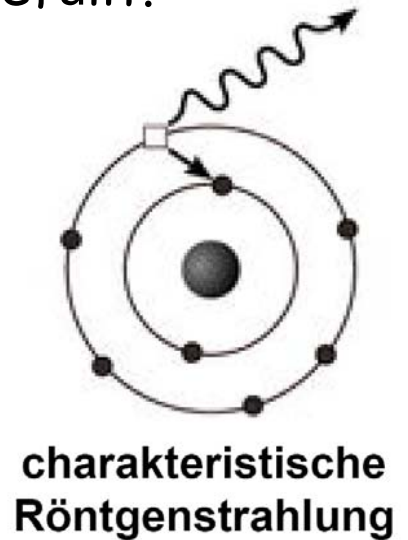
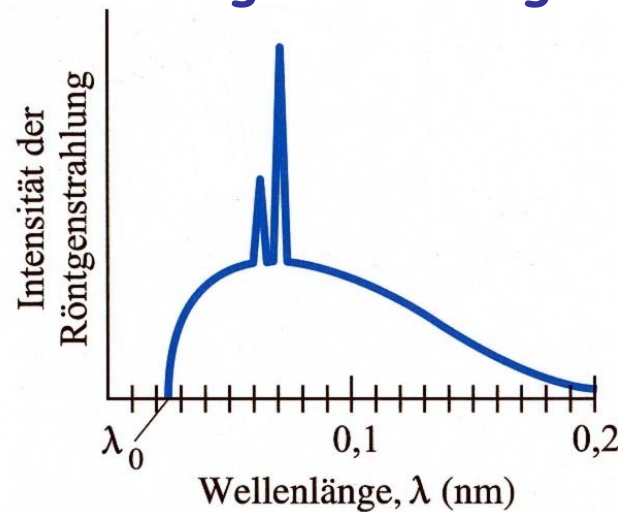
Entstehung von Röntgenstrahlung

Röntgenstrahlen (x-rays) entstehen beim Abbremsen energiereicher Elektronen in einer Metallanode: **zwei Komponenten**

- **kontinuierliche Bremsstrahlung:** Elektronen werden im elektrischen Feld der Atomkerne abgelenkt und abgebremst:
- **charakteristische Röntgenstrahlung:** Elektronen werden aus inneren Bahnen herausgeschlagen und die so entstandenen Löcher unter Emission diskreter Röntgenquanten gefüllt.



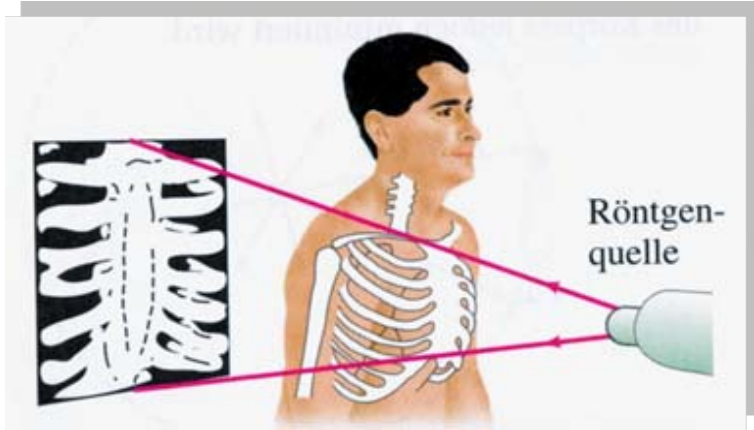
spektrale Verteilung der Röntgenstrahlung



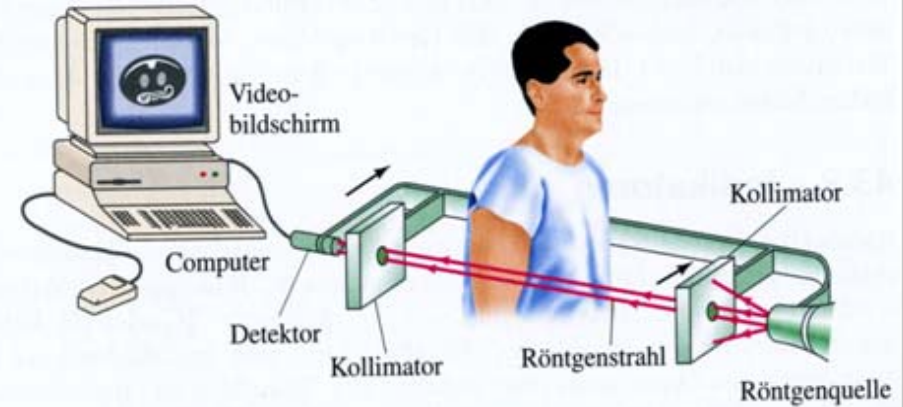
Grenzwellenlänge: gesamte kinetische Energie des Elektrons wird in genau ein Röntgenphoton umgewandelt: $E_{\text{kin}} = e \cdot U_0 = h \cdot f_{\text{max}} \Rightarrow \lambda_{\text{min}} = \frac{c}{f_{\text{max}}} = \frac{h \cdot c}{e \cdot U_0}$

Computertomographie

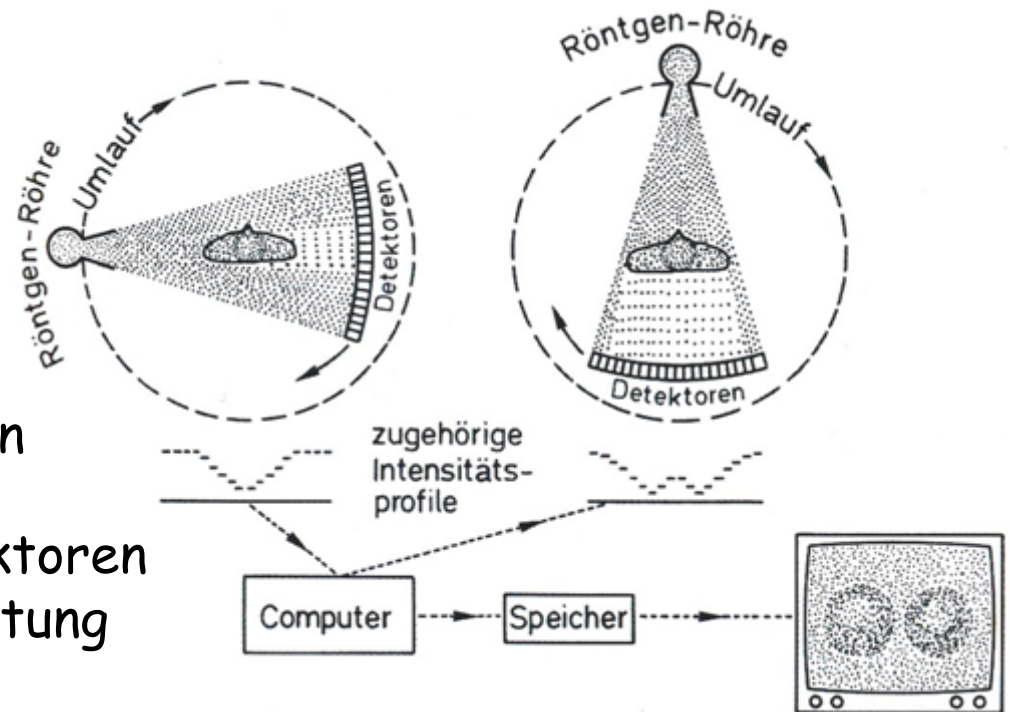
- Konventionelle Röntgenaufnahme
Speichermedium : Film



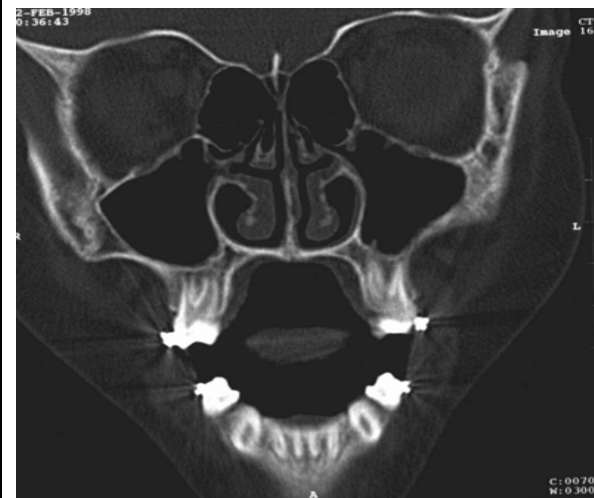
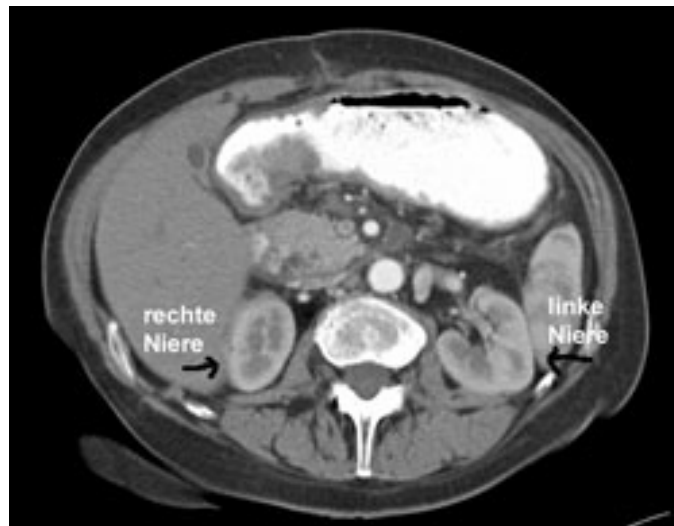
- Datenspeicherung im Computer



- **Computertomographie (CT)**
Röntgenröhre und Detektoren werden um den Patienten herum bewegt: Erfassung der Absorptionsverteilung in verschiedenen Schichten:
⇒ 3 dimensionale Rekonstruktion
- Entwicklung empfindlicher Detektoren zur Reduktion der Strahlenbelastung

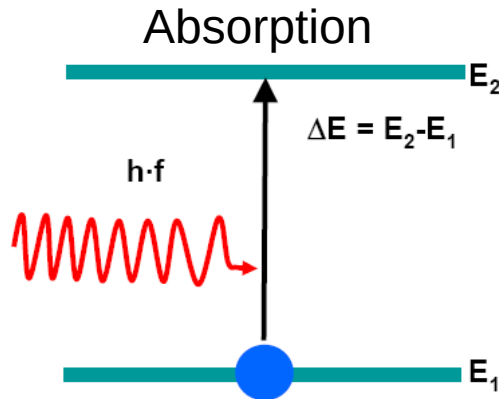


Computertomographie

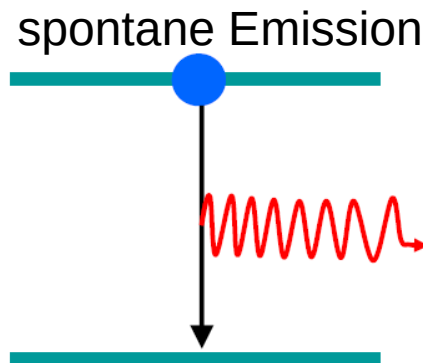


Laser

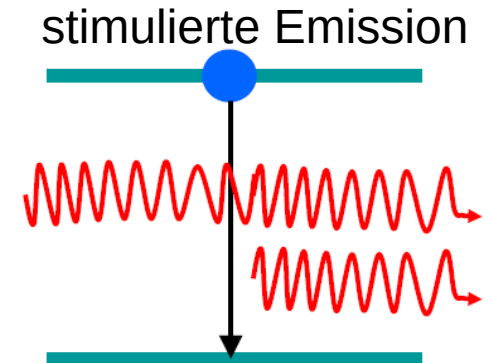
- **L**aser = **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation
- Wechselwirkung von Licht mit Materie



Photon der passenden Energie $h \cdot f = \Delta E$ wird **absorbiert** und Elektron in höheren Zustand gehoben



Elektron fällt aus angeregtem Zustand **spontan** in den Grundzustand unter Aussendung eines Photons der Energie $\Delta E = h \cdot f$

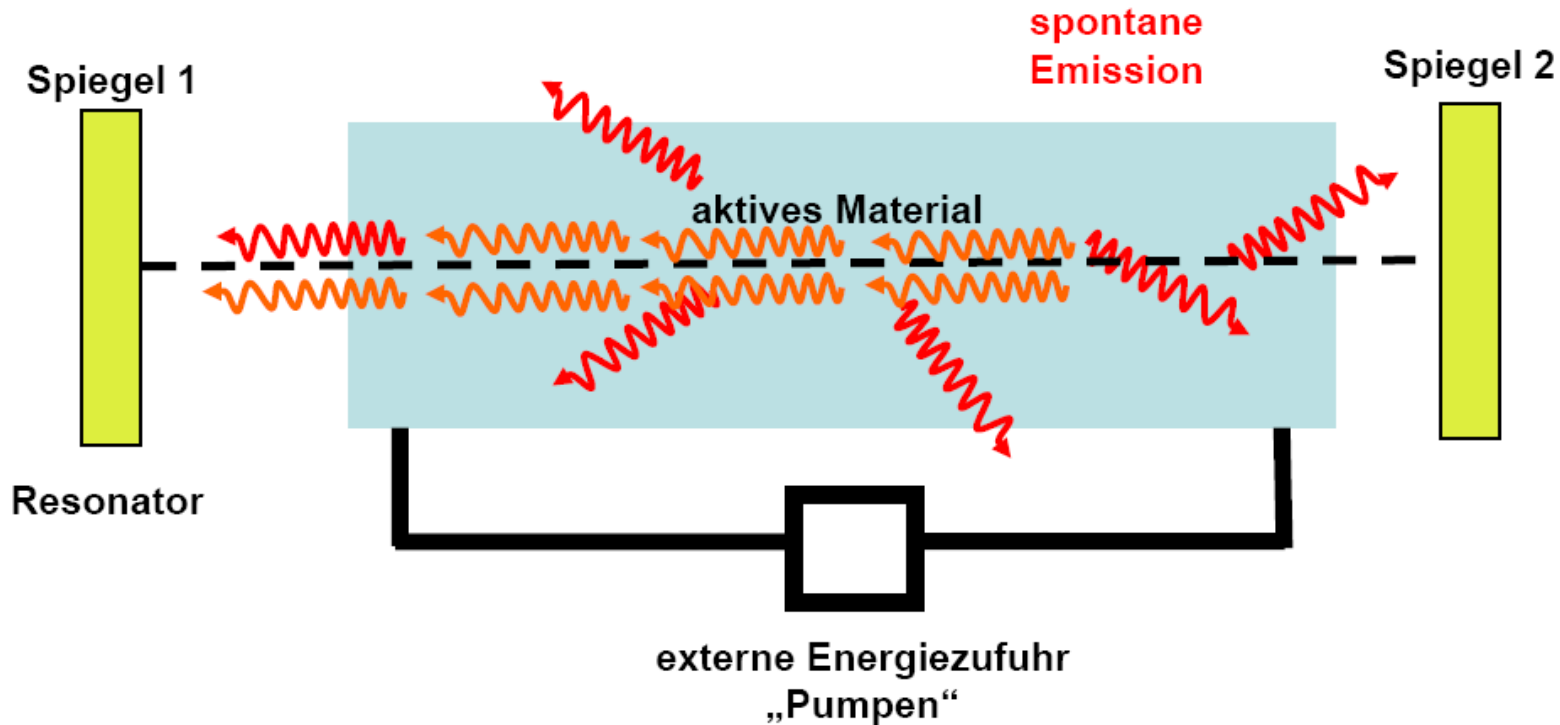


Elektron im angeregten Zustand wird durch Photon der passenden Energie zur Abregung **stimuliert**. Zweites Photon („Zwilling“) mit gleicher Frequenz, Richtung, Polarisation wird emittiert

- **stimulierte Emission** nur häufiger als spontane Emission bei **Besetzungsinversion** (mehr Elektronen im angeregten als im Grundzustand)

Grundprinzip des Lasers

- **Besetzungsinversion** durch externe Energiezufuhr: „**Pumpen**“
- Verstärkung der stimulierten Emission durch Resonator (zwei Spiegel, davon einer leicht durchlässig)

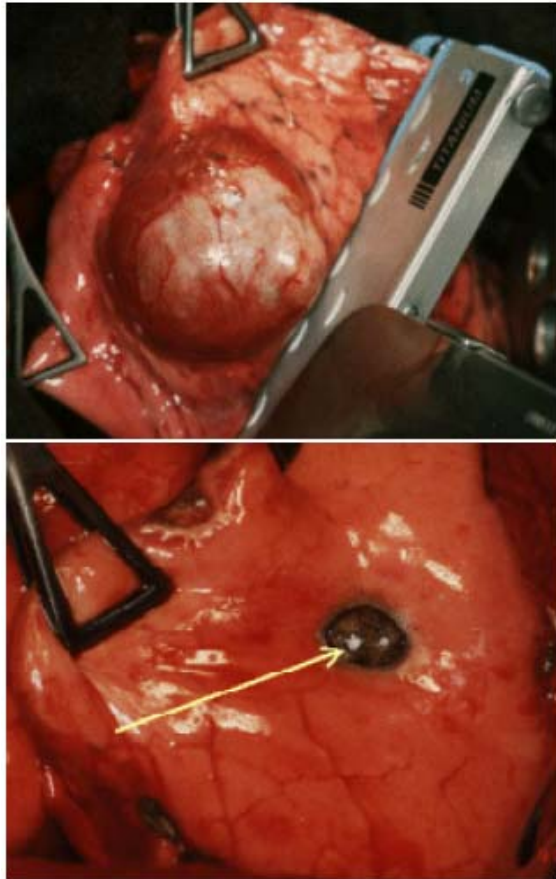


- stimulierte Emission tritt verstärkt auf entlang der Resonatorachse;
⇒ **Lichtverstärkung entlang der Laserachse**;
- Laserstrahl tritt durch halbdurchlässigen Spiegel aus.



Anwendung von Lasern in der Medizin

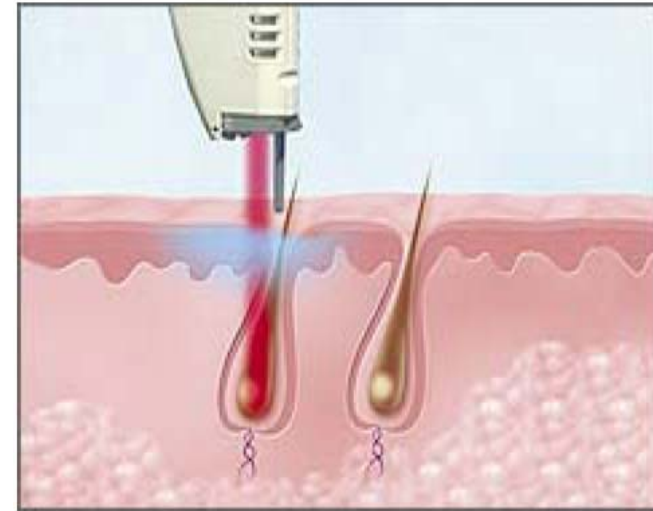
Laserchirurgie



Sehkorrekturen mit Lasern



Laserakupunktur



Entfernung von Haaren und Tätowierungen

Laser merzt die Tattoos aus

Tätowierungen lassen sich mit dem hochmodernen Gerät nahezu schmerzfrei entfernen

MÜNSTER • Christina Günter ist genervt. So sehr, dass sie sich nicht scheut, viele hundert Euro zu investieren – um ihren Seelenrieden wieder zu erlangen. Des Übels Ursache: eine große schwarze Tribal-Tätowierung, die sich vom Steißbein über ihren Rücken zieht. Rankenförmige, verschlungene Ornamente sind typisch für diese auffälligen Tattoos, deren Ursprung in traditionellen Samenzahlen liegt.

Für die Friseurin aus Münster ist klar: Der Steißbein-Schmuck, umgangssprachlich auch „Arschgeweib“ genannt, muss verschwinden – und zwar spürlos. Vor sechs Jahren hätte sich die heute 28-Jährige die Körperverletzung stechen lassen, ganz spontan, wie sie sagt. „Damals fand ich das einfach sehr hübsch, doch je älter ich wurde, desto weniger passte das Geweih zu mir“, erinnert sich die junge Frau, die auch ihren Oberarm verschöneren ließ. Nach drei Jahren reiflicher Überlegung hat sie sich nun entschieden, beide Tätowierungen vom Dermatologen Dr. Kai Rezaei per Laser entfernen zu lassen.

Die Gemeinschaftspraxis an der Windhorststraße verfügt über den Versa Pulse Pigmentlaser, in dem sich mehrere modernste Errungenschaften vereinen. Laser, die mit verschiedenen Wellenlängen arbeiten. „Dies ist das einzige Gerät auf dem Markt, das vier Wellenlängen hat, somit nahezu alle Farben abdeckt“, erklärt Rezaei. Der Mediziner hat sich seit zehn Jahren auf die Arbeit mit dem Laser spezialisiert.

Während der Tätowierungsentfernung setzt der Versa Pulse Energie frei, die von den Farbpigmenten in der Haut absorbiert wird. Das körpereigene Immunsystem

transportiert die zerstörten Pigmentkristalle anschließend ab. „Der Körper braucht vier bis sechs Wochen zur Regeneration. Die Laserbehandlung ist aber nahezu schmerzfrei“, sagt der Fachmann. Christina Günter wird aufgrund der Größe und Tiefe ihrer Tätowierung mehrere Sitzungen von etwa einer Stunde benötigen, um sich endlich wieder in ihrer Haut wohl fühlen zu können. „Besonders Leute um die 30 beneuen



Dr. Kai Rezaei verwendet einen neuartigen Pigmentlaser mit vier verschiedenen Wellenlängen, um das große Tribal-Tattoo am Rücken von Christina Günter zu entfernen. MG-Peter: Dendy

Münstersche Zeitung 24. Aug 2005

Zusammenfassung

- auf mikroskopischer Skala sind viele Größen (z.B. Energie) **quantisiert** (Schwarzkörperstrahlung, Photoeffekt)
- **Welle-Teilchen-Dualismus**: Elektronen und Licht können sowohl Wellen- als auch Teilchencharakter zeigen
- Atome sind aus einem positiv geladenen Atomkern und einer Hülle aus Elektronen aufgebaut. Das Bohrsche Atommodell erklärt die Existenz **diskreter Energiezustände** und die Emission von **Spektrallinien**
- die spektrale Verteilung von **Röntgenstrahlung** besteht aus einer kontinuierlichen Verteilung (Abbremsung der Elektronen) und diskreten Linien (Übergänge zwischen inneren Elektronenschalen)
- Anwendung der Licht- Materie-Wechselwirkung: **Laser**
Lichtverstärkung durch stimulierte Emission