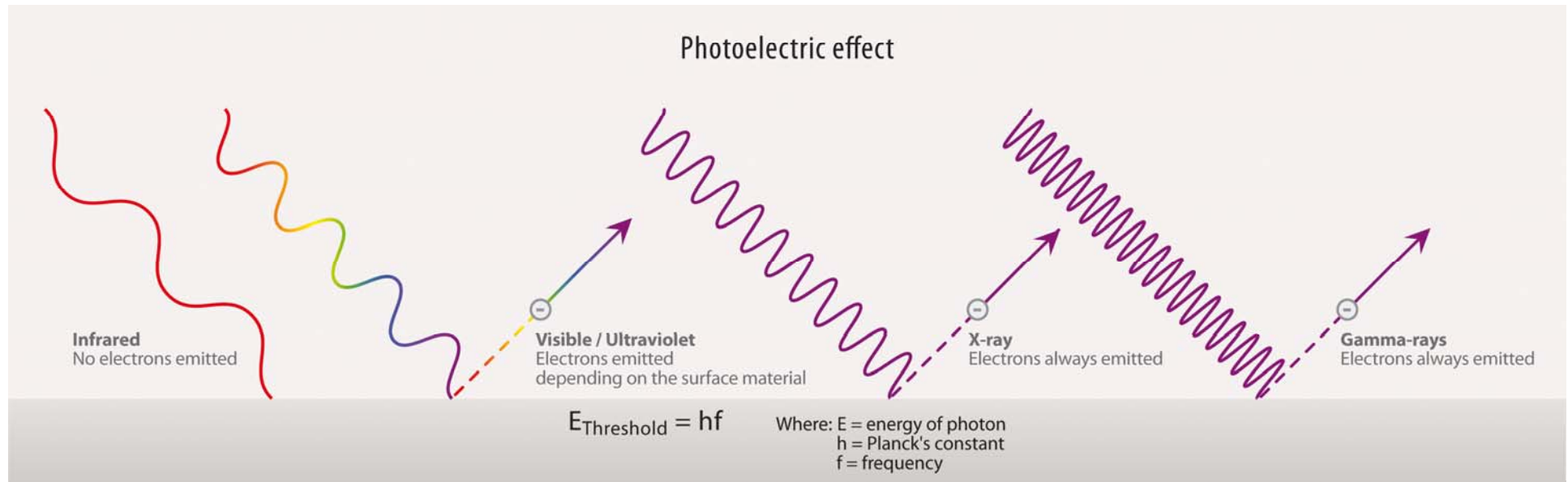


Photoelektrischer Effekt
Photoelektronen-Spektroskopie
Quantendetektor Auge
Wärmekapazität

Photoelektrischer Effekt

Thema Photoelektrischer Effekt

Experimente zum Photoeffekt



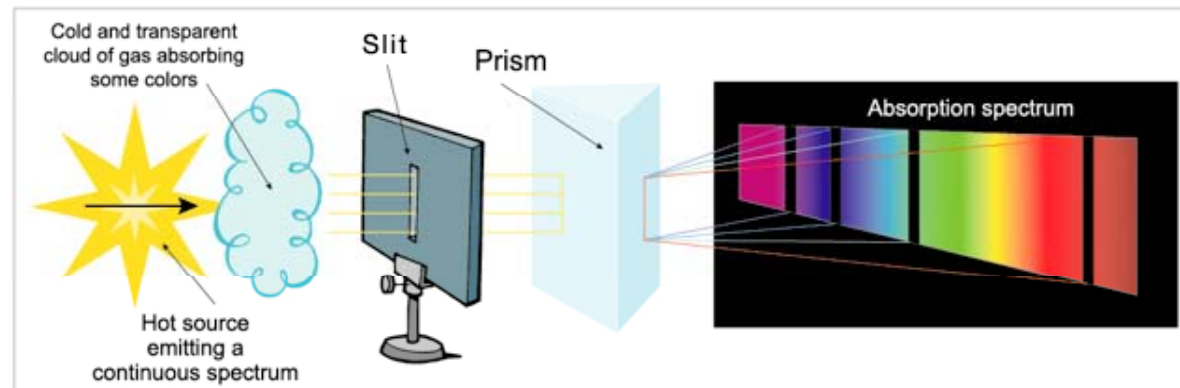
Photoelektrischer Effekt Historie

1805 William Wollaston

Entdeckung von Absorptionslinien im Sonnenspektrum

1817 Joseph von Fraunhofer

exakte Ausmessung der Absorptionslinien im Sonnenspektrum



1839 Alexandre Edmond Becquerel

Belichtung EINER Elektrode in Elektrolyten führt zu Potenzialdifferenz (Becquerel-Effekt)

1887 Heinrich Hertz

erste Beobachtung des Photoeffektes

1889 Wilhelm Hallwachs

Studien zum Photoeffekt

1900 Phillip Lennard

Messung des Photoeffekts im Vakuum zeigt, dass Elektronen emittiert werden

1905 Albert Einstein

theoretische Erklärung des Photoeffekts

1915 Robert Millikan

experimenteller Nachweis zeigt: Proportionalitätsfaktor ist die Plancksche Konstante

Historie Zitate

Heinrich Hertz in Annalen der Physik 31, 983 (1987)

Über den Einfluß des ultravioletten Lichtes auf die elektrische Entladung

Gelegentlich schloß ich den Funken B (induzierte sekundäre Schwingung) in ein dunkles Gehäuse ein, um die Beobachtungen Zu erleichtern, und dabei bemerkte ich, daß die maximale Funkenlänge im Inneren des Gehäuses entschieden kürzer war als zuvor.

Wilhelm Hallwachs

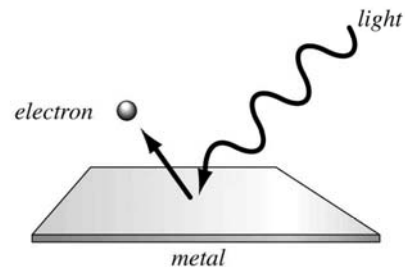
Annalen der Physik und Chemie 269, 301 (1888)

Ueber den Einfluss des Lichtes auf electrostatisch geladene Körper

Annalen der Physik und Chemie 270, 731 (1888)

Ueber die Electrisirung von Metallplatten durch Bestrahlung mit electrischem Licht

Angeregt durch die Versuche von Hrn. Hertz über die Wirkung des Lichtes auf den Inductionsfunken hatte ich vor einiger Zeit gezeigt, dass bei der Belichtung negativ electrischer, blanker Metallplatten mit geeignetem, ultravioletten Licht sich die negative Electricität den electrostatischen Kräften des Feldes folgend, zerstreut. . .



Albert Einstein in Annalen der Physik 322, 132 (1905)

Ueber einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt

...es scheint mir nun in der Tat, daßgewisse Effekte besser verständlich erscheinen unter der Annahme, daß die Energie des Lichtes diskontinuierlich im Raume verteilt sei. ...

es besteht aus einer endlichen Zahl von in Raumpunkten lokalisierten Energiequanten, welche sich bewegen ohne sich zu teilen und nur als Ganze absorbiert und erzeugt werden können.



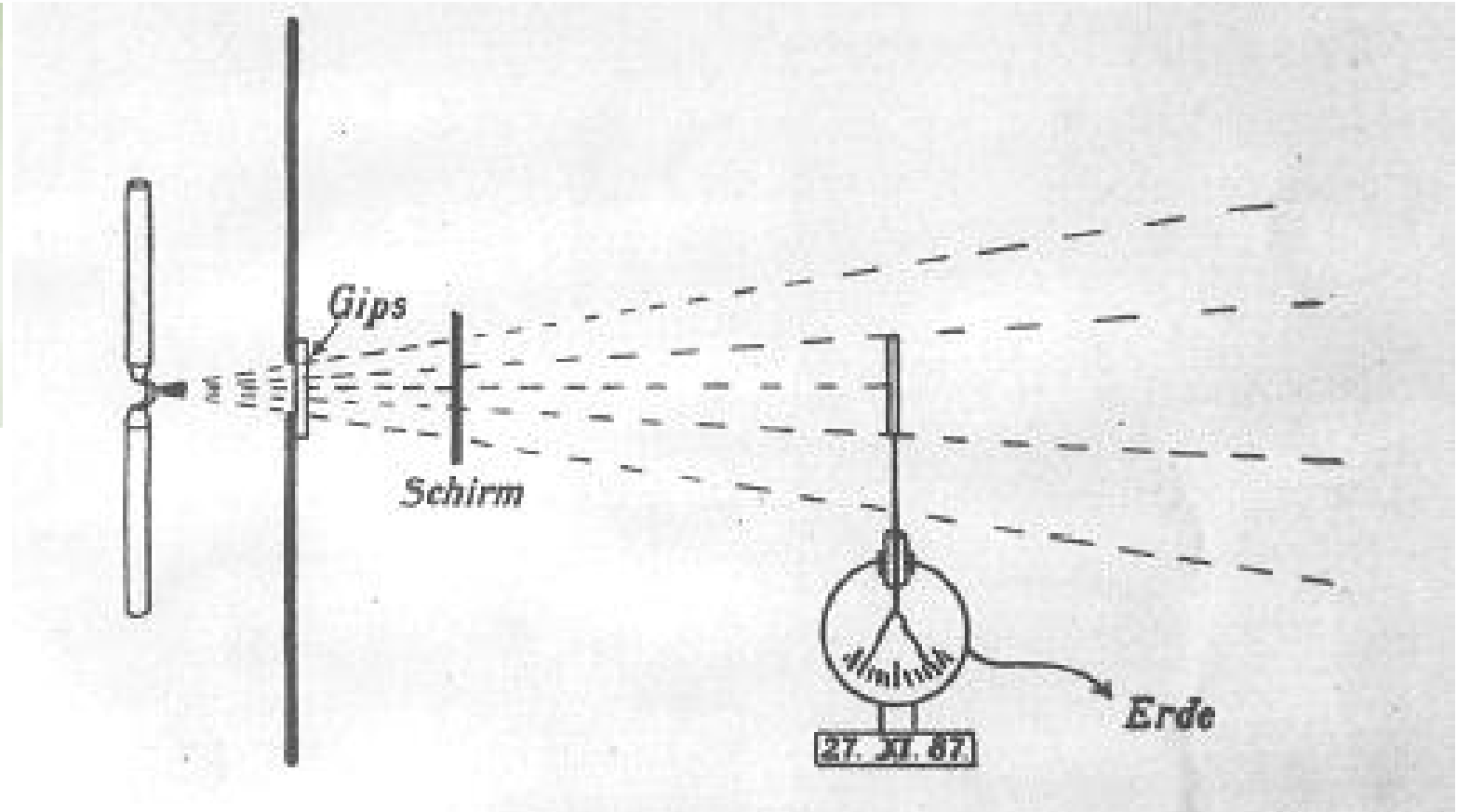
Photoelektrischer Effekt Hallwachs-Effekt

Symptome

Metalloberfläche wird mit Elektroskop verbunden und NEGATIV aufgeladen



Wilhelm Hallwachs
1859-1922



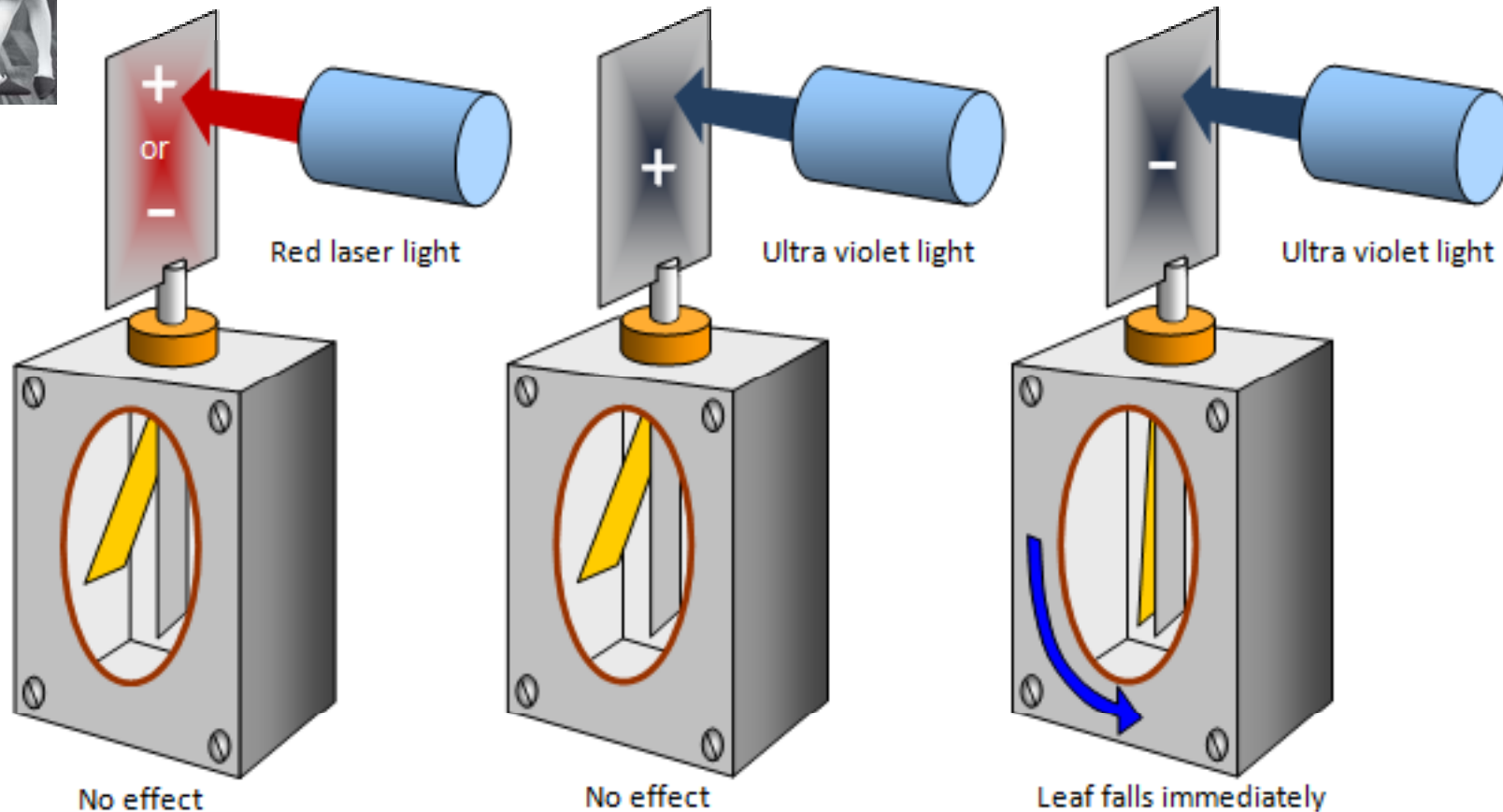
Diagnose

- bei Verwendung *ungeeigneter* Lichtquelle keine Entladung der Metallplatte
- Bestrahlung mit *geeignetem* Licht entlädt sich Elektroskop
- Lichteinstrahlung führt zu *Emission* von Ladungen von Metalloberfläche



Hallwachs-Effekt

DAS EXPERIMENT Photoeffekt



Diagnose

- Experiment mit positiv geladener Oberfläche scheitert unabhängig von Wellenlänge
- positive Ladung verbleibt auf Elektroskop
- positive Ladungen können Metall NICHT verlassen

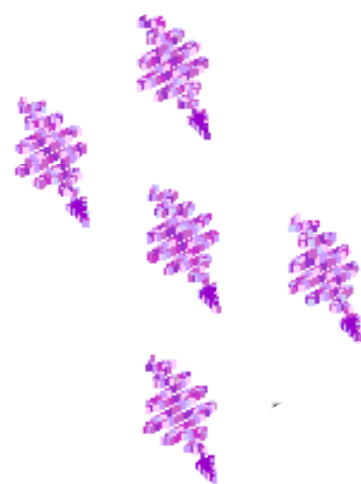
klassisch betrachtet

Photoemission als Welleneffekt

Symptome

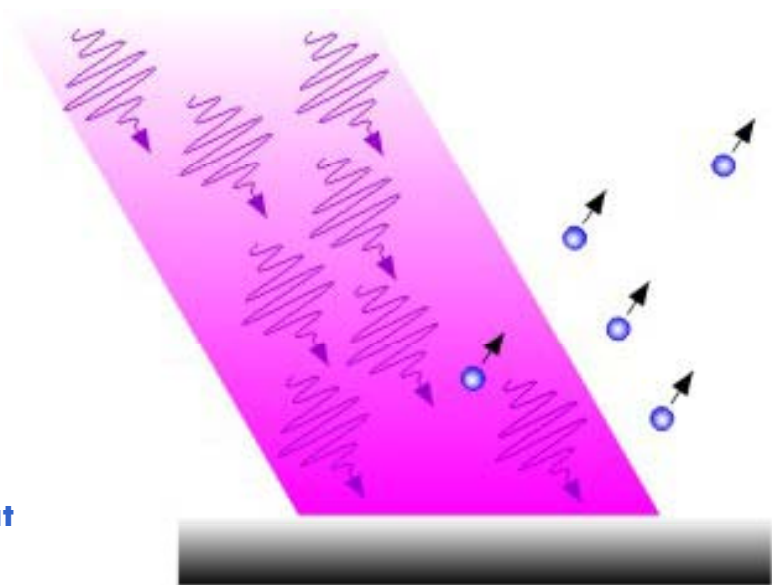
- elektromagnetische Welle regt Elektronen in Metall zu Schwingungen an
- Elektronenemission, wenn Energie gespeichert in Oszillation größer ist als Austrittsarbeit
- kinetische Energie der Elektronen $E_{\text{kin}} = E_{\text{osc}} - W_A$

hohe Lichtintensität



niedrige Lichtintensität

geeignetes Licht



Diagnose

- unabhängig von der Frequenz erfolgt Photoemission bei Zugabe ausreichender Energiemenge
- es gibt KEINE Grenzfrequenz, unterhalb der Photoemission nicht stattfindet
- da sich Energie der EM-Welle auf Raumgebiet verteilt, muss Energie sich erst aufschaukeln
- Photoemission sollte daher erst mit Zeitverzögerung erfolgen

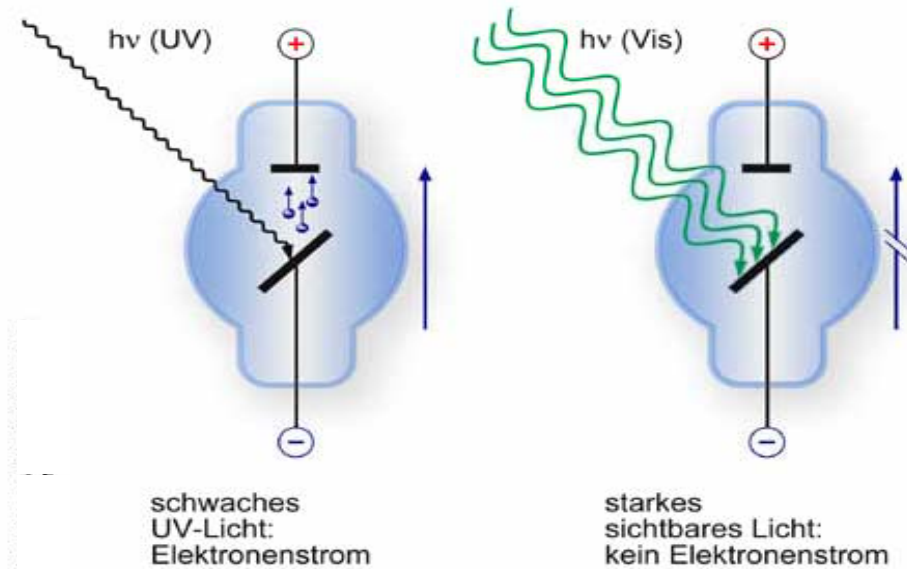
Experimentelle Beobachtung Photoelektrischer Effekt

Symptome

- bei sichtbarem Licht beobachtet man **KEINE** Ablösung von Elektronen
- Emission von Elektronen erfolgt **NUR** bei Einstrahlung ultravioletten Lichts
- unterhalb einer bestimmten Frequenz wird **KEIN** Elektron ausgelöst
- Phänomen hängt **NICHT** von der Intensität der Lichtquelle ab
- Energie der Elektronen ändert sich **NICHT** bei höherer Intensität
- kein thermischer Effekt, da Emission **OHNE** Zeitverzögerung einsetzt
- bei Ausschalten der Lichtquelle versiegt Photostrom **SOFORT**



Heinrich Hertz
1857-1894



Diagnose

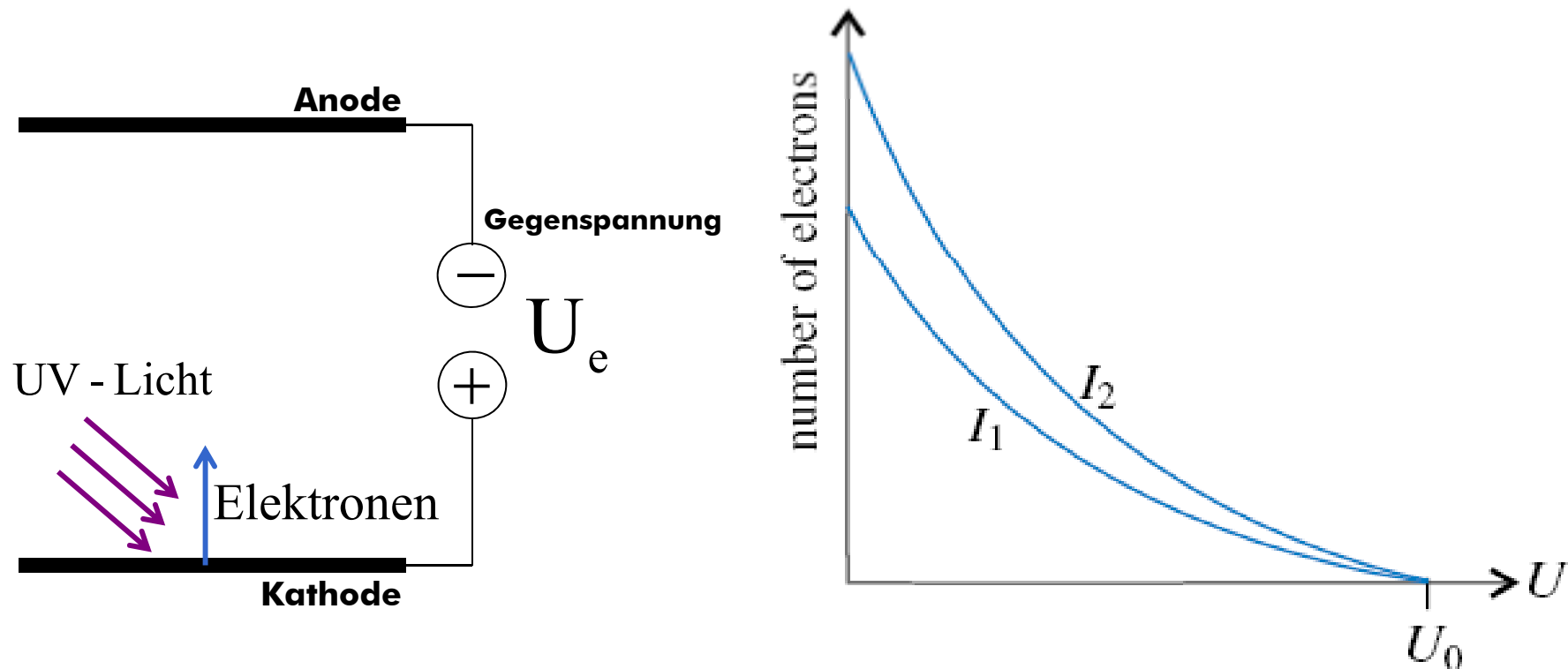
- Resultat von Hertz für Photoeffekt **NICHT** konsistent mit klassischer Vorhersage
- Phänomen kann **NICHT** durch Wellennatur des Lichts erklärt werden
- Didaktisch ist Photoeffekt im Vergleich zu Schwarzkörperstrahlung konzeptionell einfacher



Abhängigkeiten in Photoemission Intensität

Symptome

- Messung des Elektronenstroms auf Anode als Funktion der Gegenspannung
- langsame Elektronen erreichen nicht den Detektor



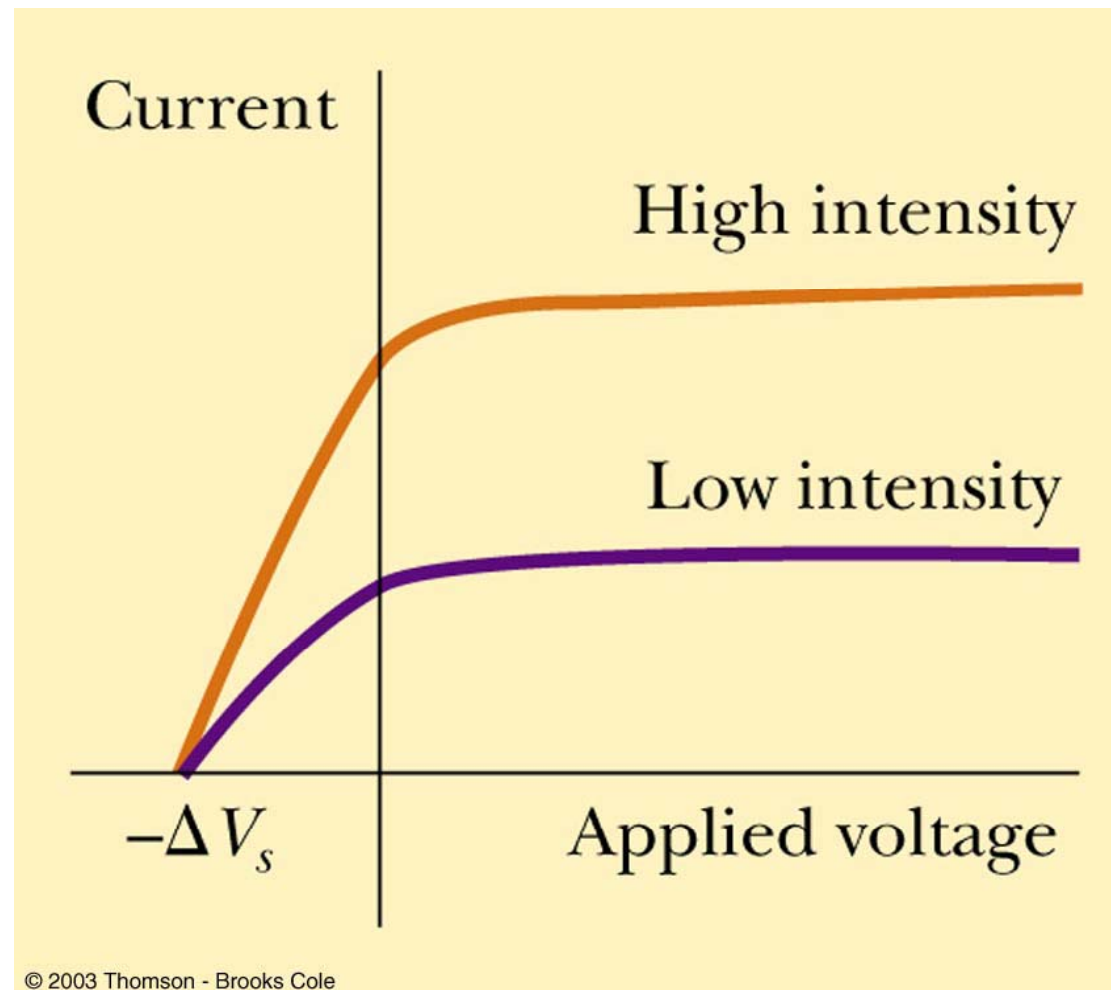
Diagnose

- bei höheren Lichtintensitäten steigert sich Photostrom
- Grenzspannung verschiebt sich allerdings NICHT
- kinetische Energie der Elektronen ändert sich NICHT bei Erhöhung der Intensität der Lichtquelle

Charakteristika Photostrom

Symptome

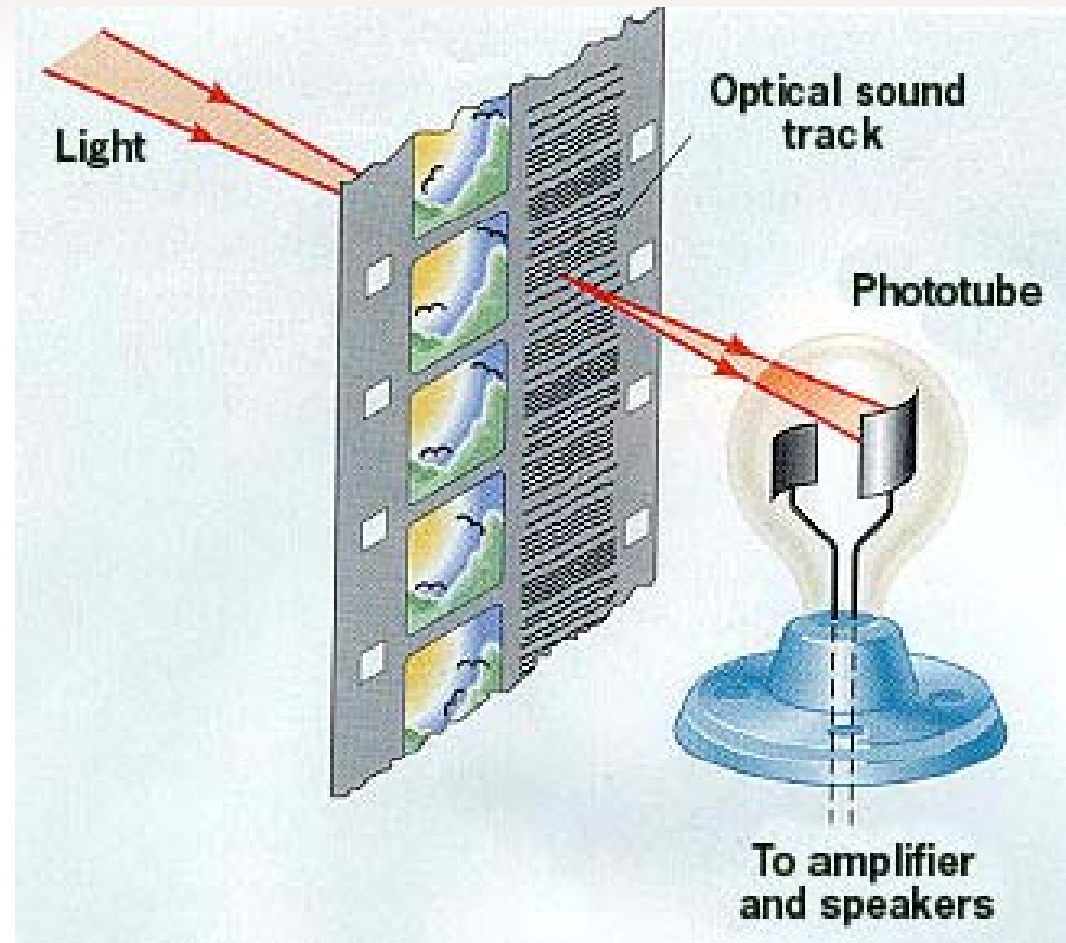
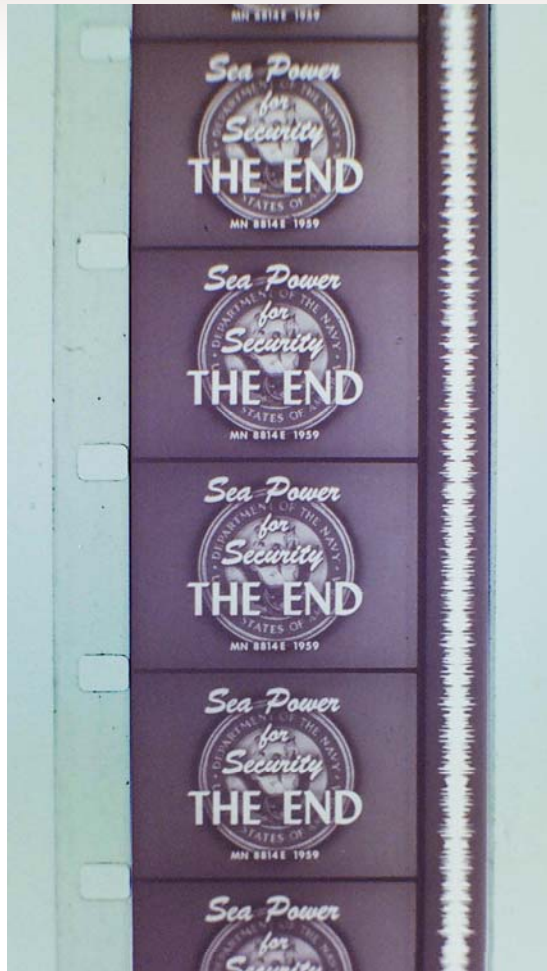
- Photostrom steigt mit Intensität der Lichtquelle an und sättigt für höhere Intensitäten
- KEIN Photostrom bei Anlegen EINER bestimmten NEGATIVEN Gegenspannung
- elektrische Gegenspannung bei der Photostrom versiegt unabhängig von Intensität Lichtquelle



Optical Sound Track

Symptome

Licht wird von den dunkeln Bereichen auf Film absorbiert und erreicht nicht mehr Photozelle



Diagnose

Intensitätsschwankungen werden über Photoeffekt registriert und in Audiosignale umgewandelt

Extrablatt



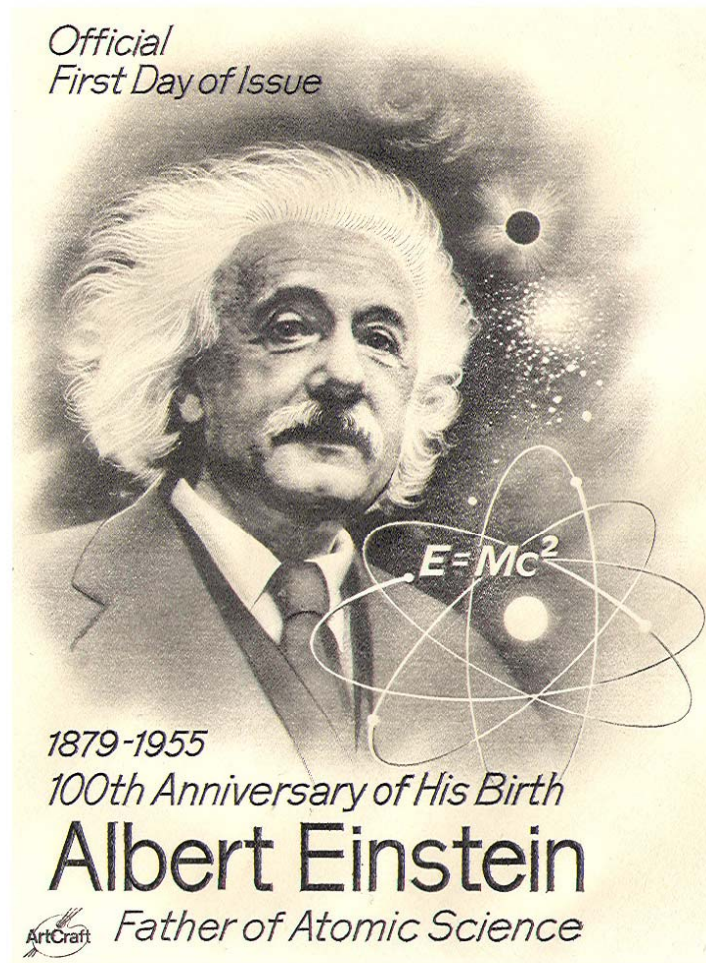
Photoeffekt Posterfarben

Diagnose

Photoeffekt sorgt dafür, dass Farben, die ultraviolette Licht absorbieren, stärker ausbleichen

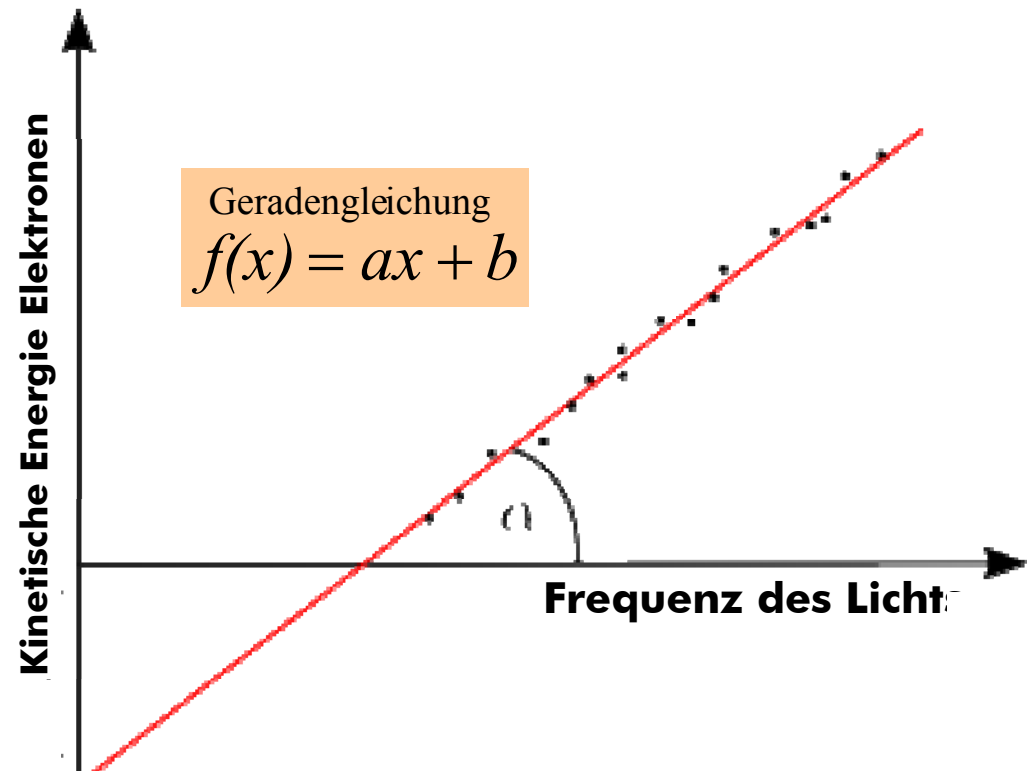
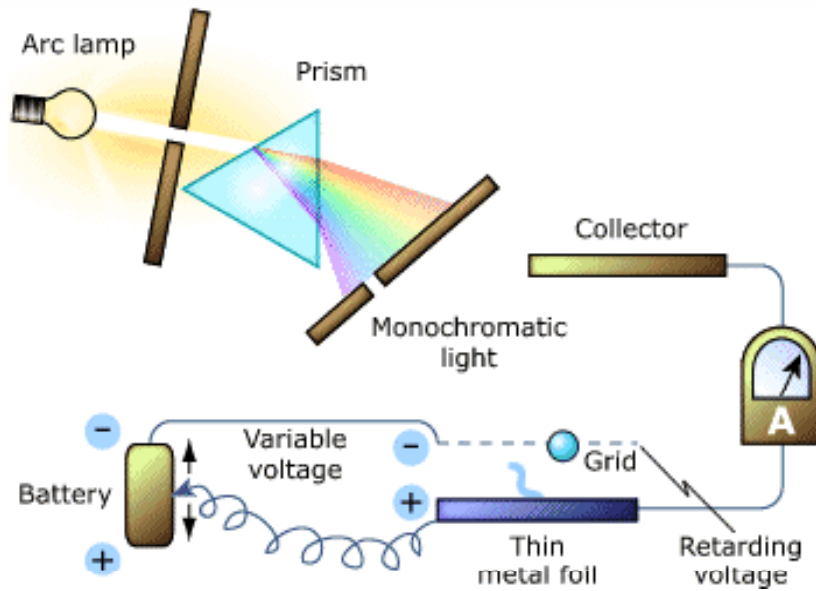
Thema Photoelektrischer Effekt

Theorie zum Photoeffekt



Photoelektrischer Effekt im Vakuum Philipp Lenard 1900

Experimenteller Aufbau



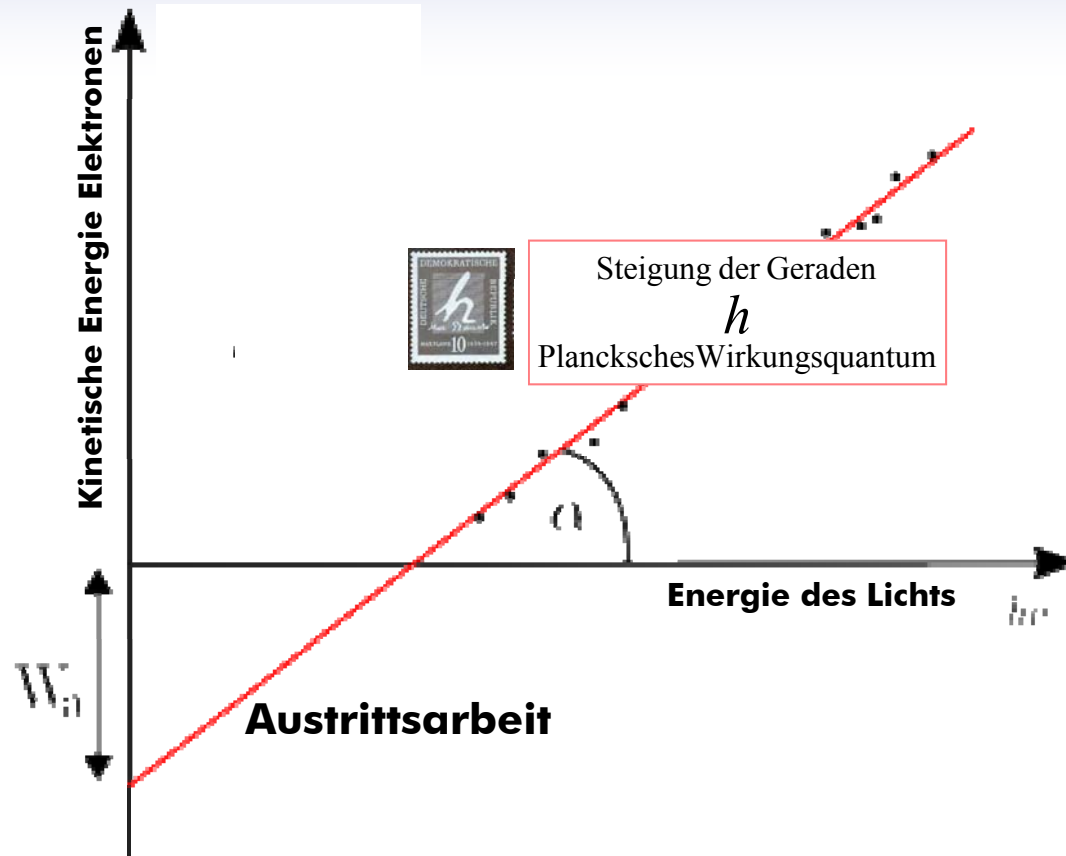
Diagnose

- Emission von Elektronen erst oberhalb bestimmter Lichtfrequenz
- kinetische Energie der Elektronen nimmt linear mit der Frequenz der Strahlung zu
- photoelektrischer Effekt kann durch Gleichung einer Geraden beschrieben werden



Einstein 1905

Photoelektrischer Effekt



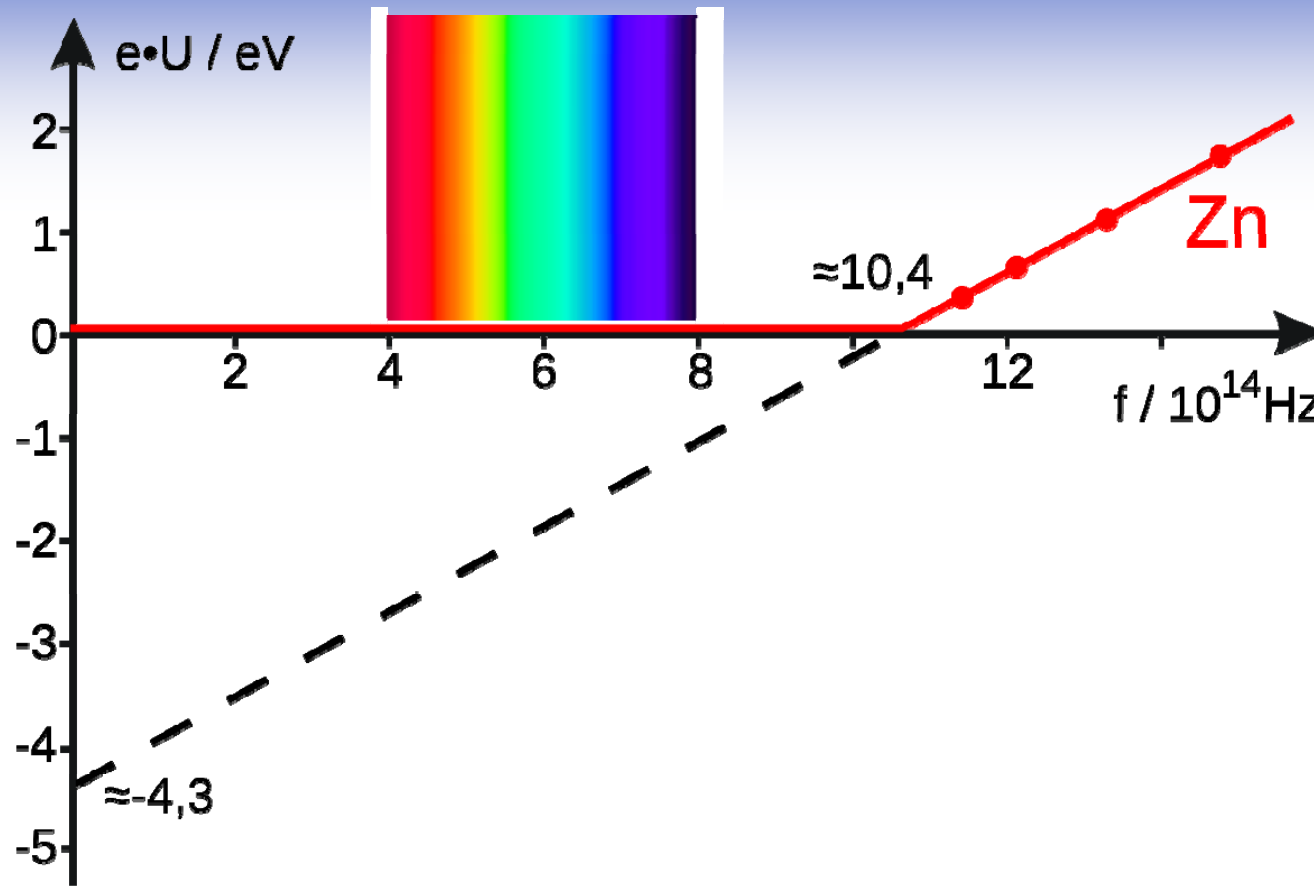
$$E_{kin} = h\nu_{ph} - W_a$$

Austrittsarbeit

Einsteingleichung für Photoeffekt

Diagnose

- LICHT HAT AUCH EIGENSCHAFTEN VON TEILCHEN
- Steigung der Geraden ist proportional dem Planckschen Wirkungsquantum
- Kinetische Energie der Elektronen ist proportional der Frequenz der Photonen
- definierte minimale Energie ist notwendig, um Elektron aus Festkörper auszulösen
- Elektronenemission erfolgt ohne Zeitverzögerung, auch bei geringsten Intensitäten



Albert Einstein

Ist die abgeleitete Formel richtig, so muss V_0 , als Funktion der Frequenz des erregenden Lichtes in kartesischen Koordinaten dargestellt, eine Gerade sein, deren Neigung von der Natur der untersuchten Substanz unabhängig ist.

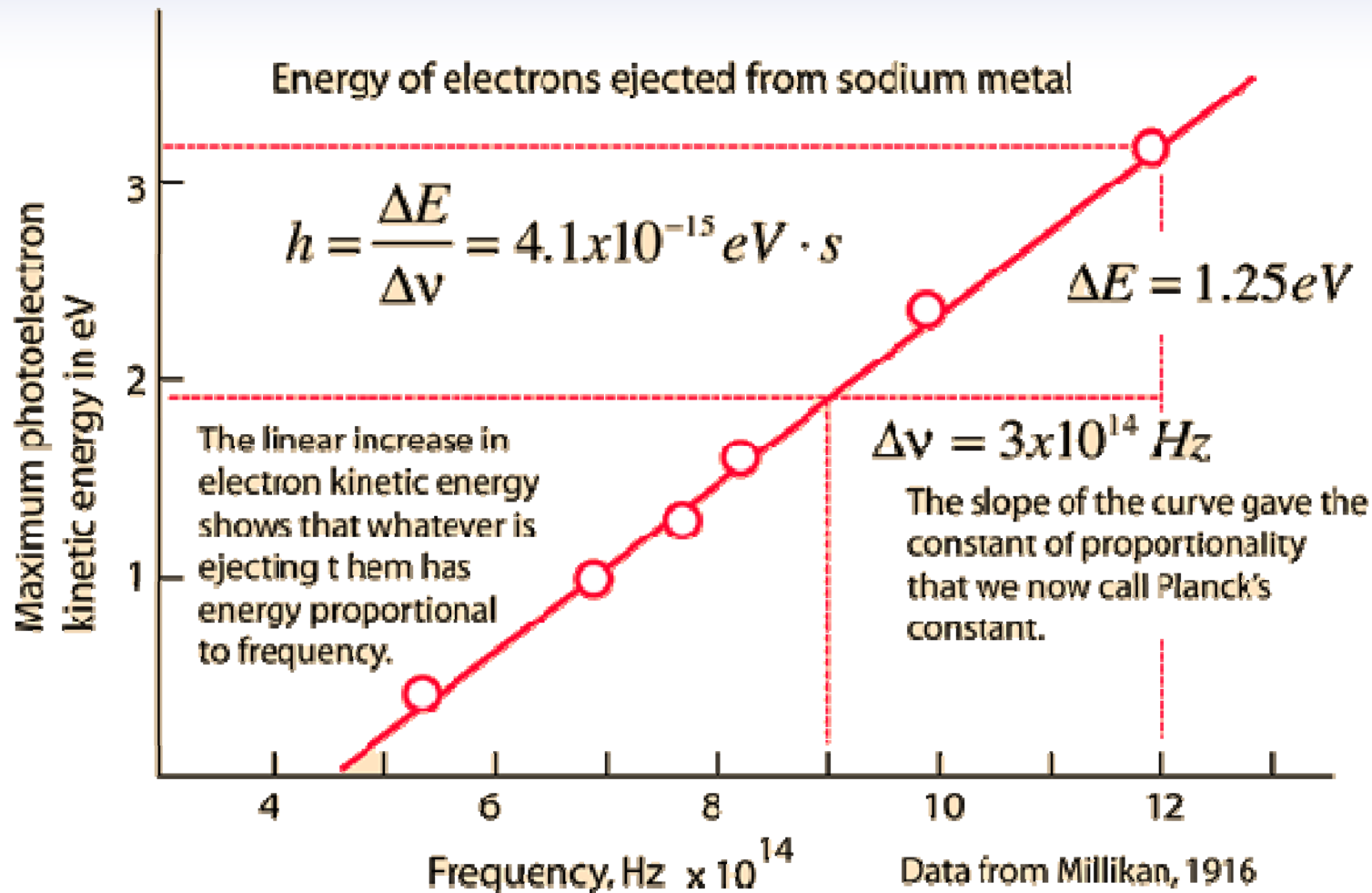


**The Nobel Prize in Physics 1921 was awarded to Albert Einstein
for his services to Theoretical Physics,
and especially for his discovery of the law of the photoelectric effect**



The Nobel Prize in Physics 1923 was awarded to Robert A. Millikan for his work on the elementary charge of electricity and on the photoelectric effect

Millikan Experiment Plancksche Konstante



Diagnose

Experimenteller Fehler in Bestimmung der Planckschen Konstante gegenüber heute nur 1.5%



Photoelectric effect



Infrared
No electrons emitted

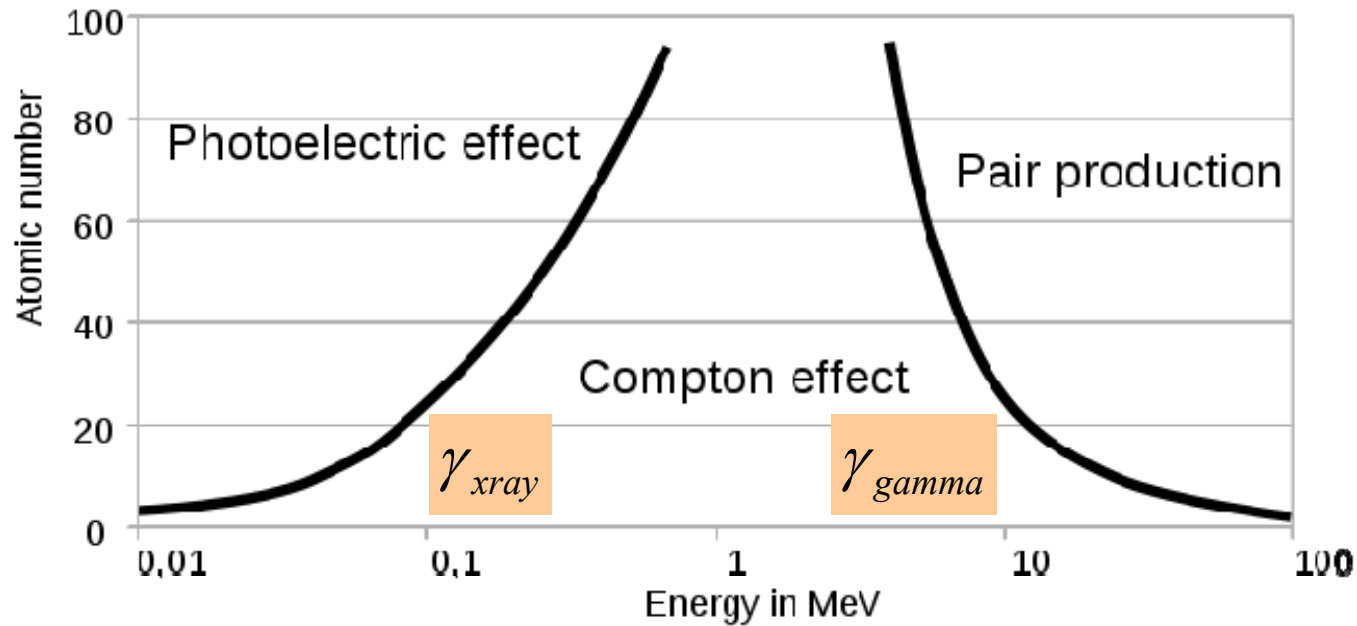
Visible / Ultraviolet
Electrons emitted
depending on the surface material

X-ray
Electrons always emitted

Gamma-rays
Electrons always emitted

$$E_{\text{Threshold}} = hf$$

Where: E = energy of photon
h = Planck's constant
f = frequency



Diagnose
Photoeffekt spielt bei auch bei hochenergetischer Strahlung eine wichtige Rolle

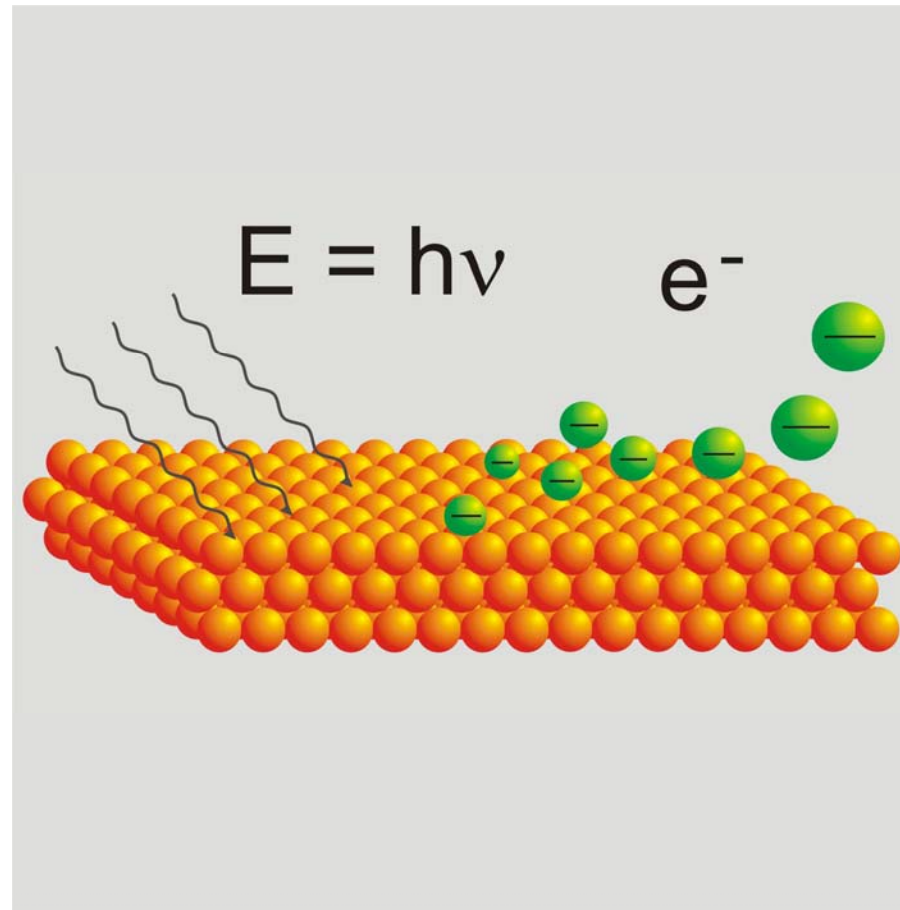
relativistisch betrachtet Impuls

Symptome

- Photon besitzt einen Impuls, der bei der Emission übertragen wird
- Impulserhaltungssatz muss auch beim Photoeffekt erfüllt sein

Ergebnis SRT

$$p_{\lambda} = \frac{\hbar\omega_{\lambda}}{c}$$



Diagnose

Impulse der emittierten Elektronen werden von Metallplatte aufgenommen



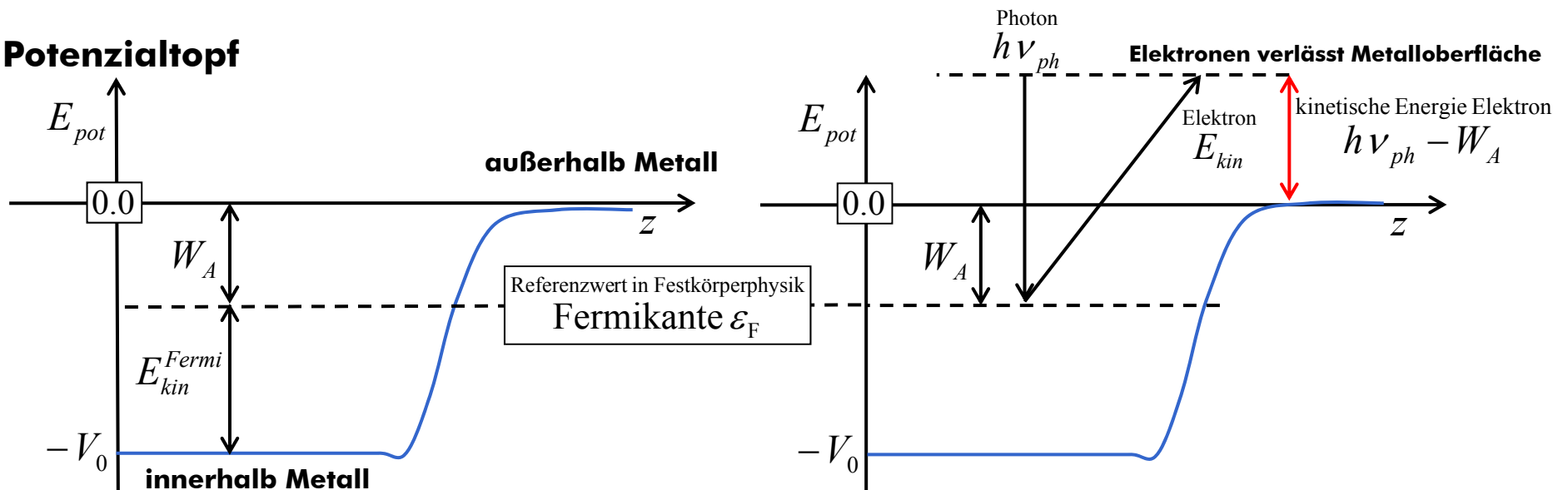
Photoeffekt

Austrittsarbeit und Potenzial

Symptome

- nähert sich freies Elektron einer Metalloberfläche, wirkt anziehende Kraft
- Elektron wird beschleunigt und gewinnt kinetische Energie

Potenzialtopf

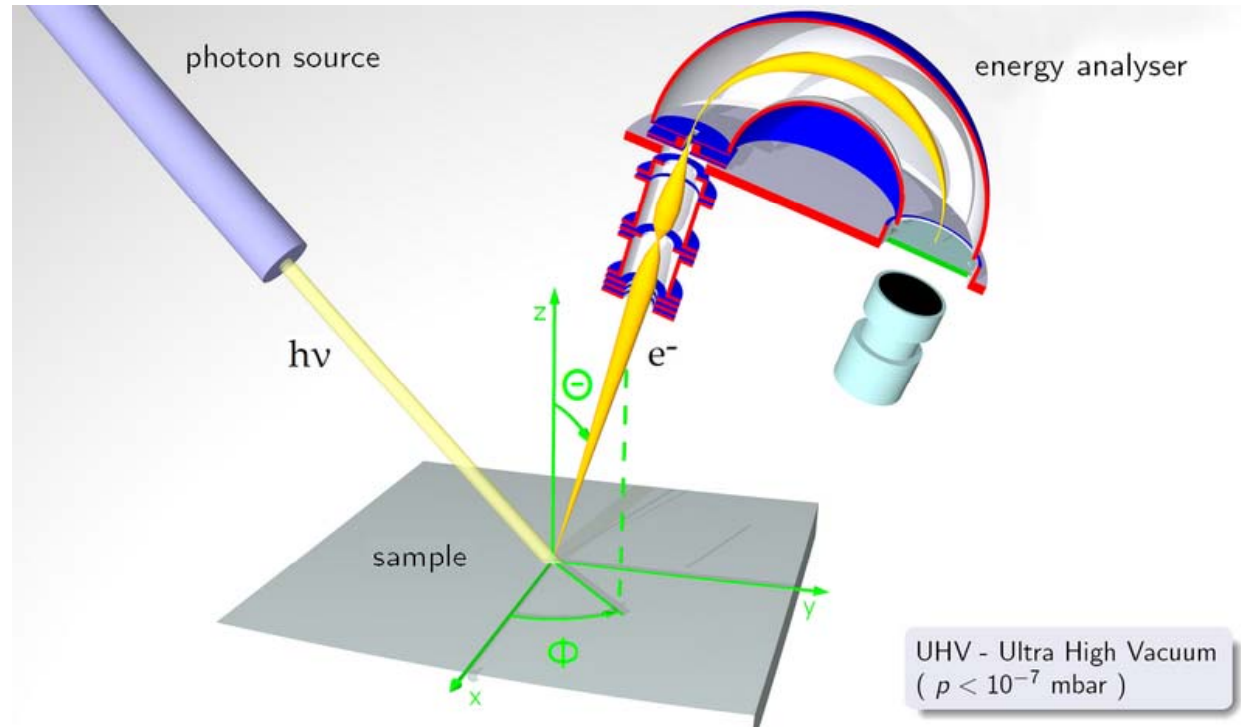
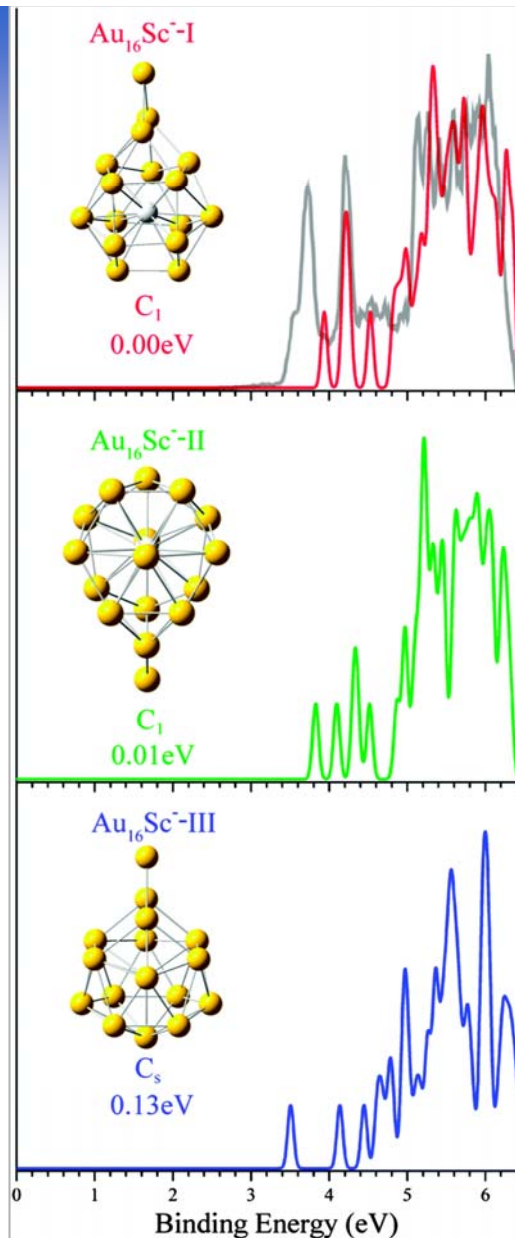


Emission von Photoelektronen aus Metall

Diagnose

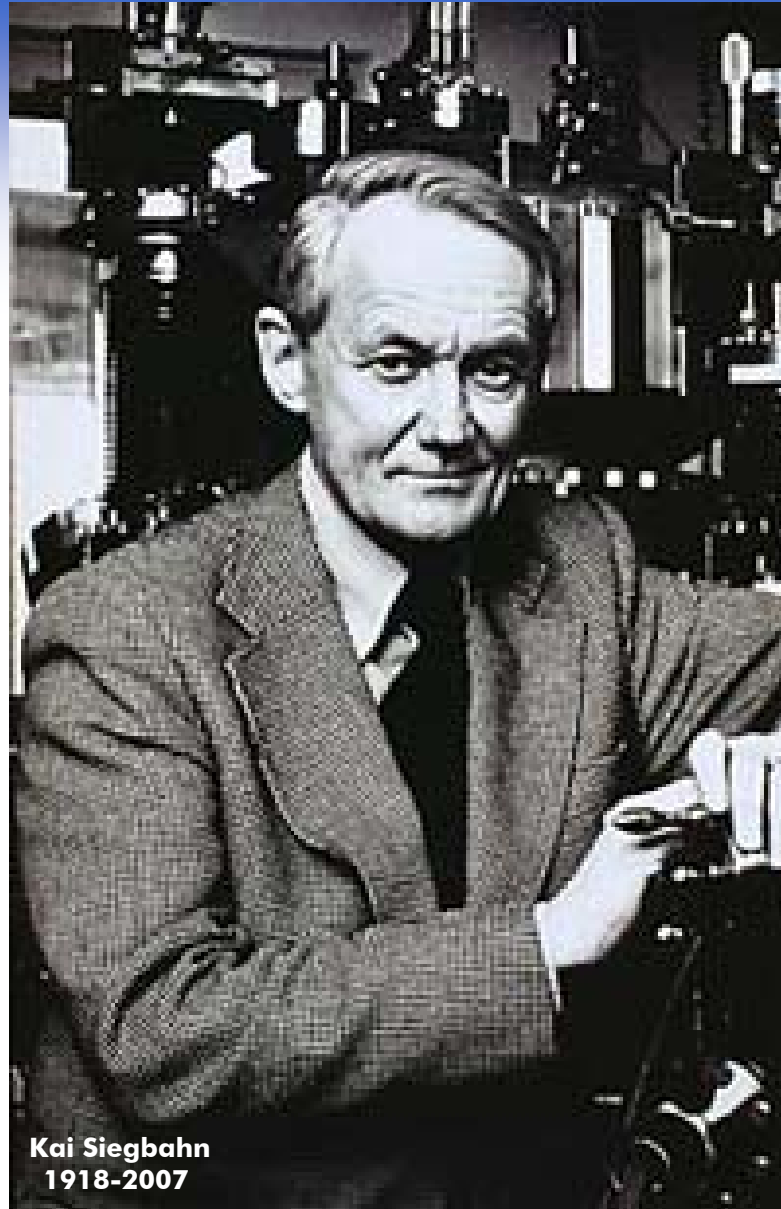
- Elektronen in Metallen können sich im Potenzialtopf frei bewegen
- kinetische Energien der Elektronen im Bereich 0 eV bis Fermienergie
- Erhöhung Energie eines Elektrons an Fermikante um W_a erlaubt Austritt aus Metall

Photoemission Elektronenspektroskopie



Diagnose

- photoelektrischer Effekt ist Grundlage der Elektronenspektroskopie mit Photonen
- Informationen über elektronische und strukturelle Verhältnisse im Festkörper

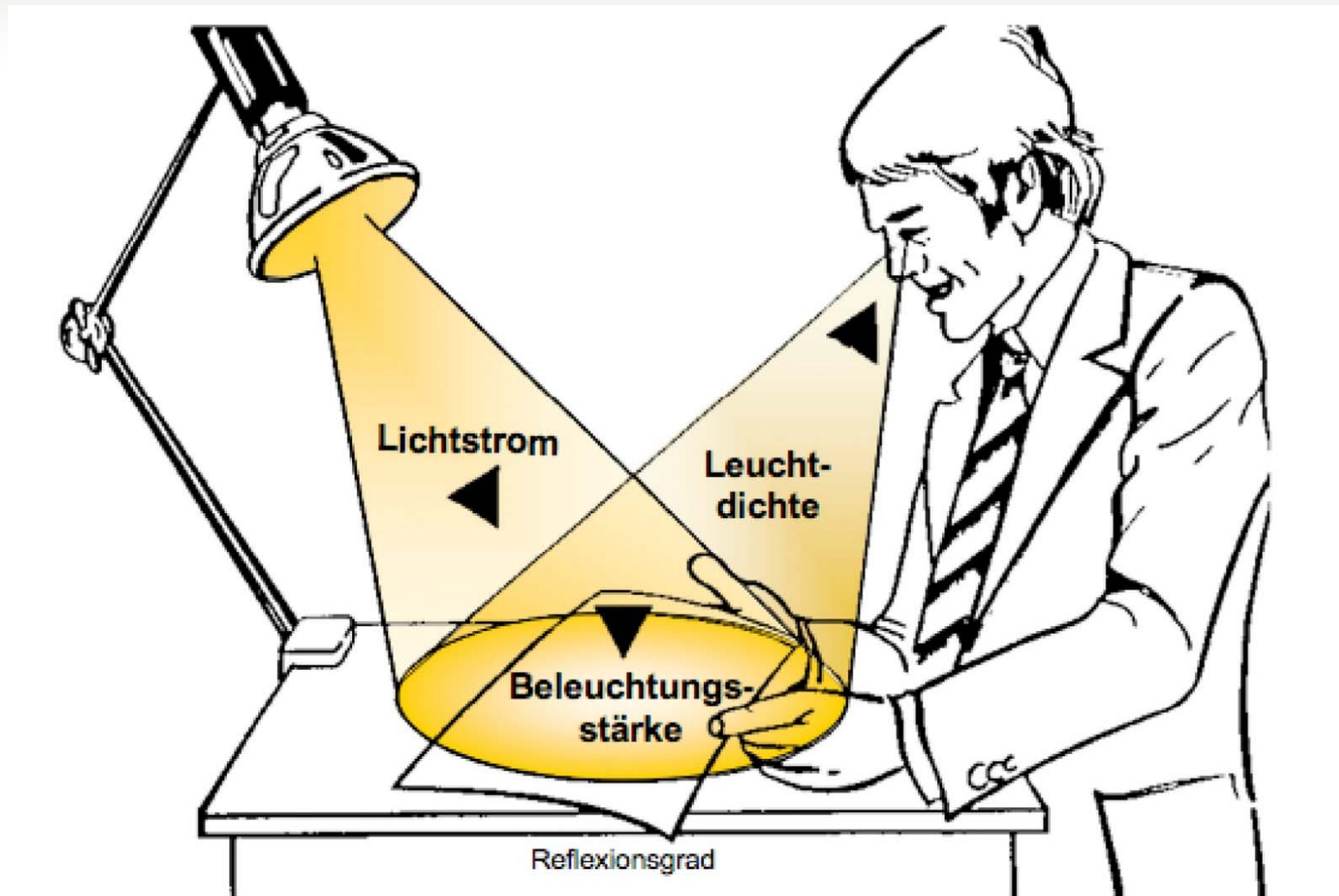


Kai Siegbahn
1918-2007

The Nobel Prize in Physics 1981 was divided, ...the other half to Kai M. Siegbahn for his contribution to the development of high-resolution electron spectroscopy

Thema Photoelektrischer Effekt

Auge



Ostsee-Zeitung 15.2.2015

Leuchtturm



» Lampenwechsel auf der Greifswalder Oie

Extrablatt

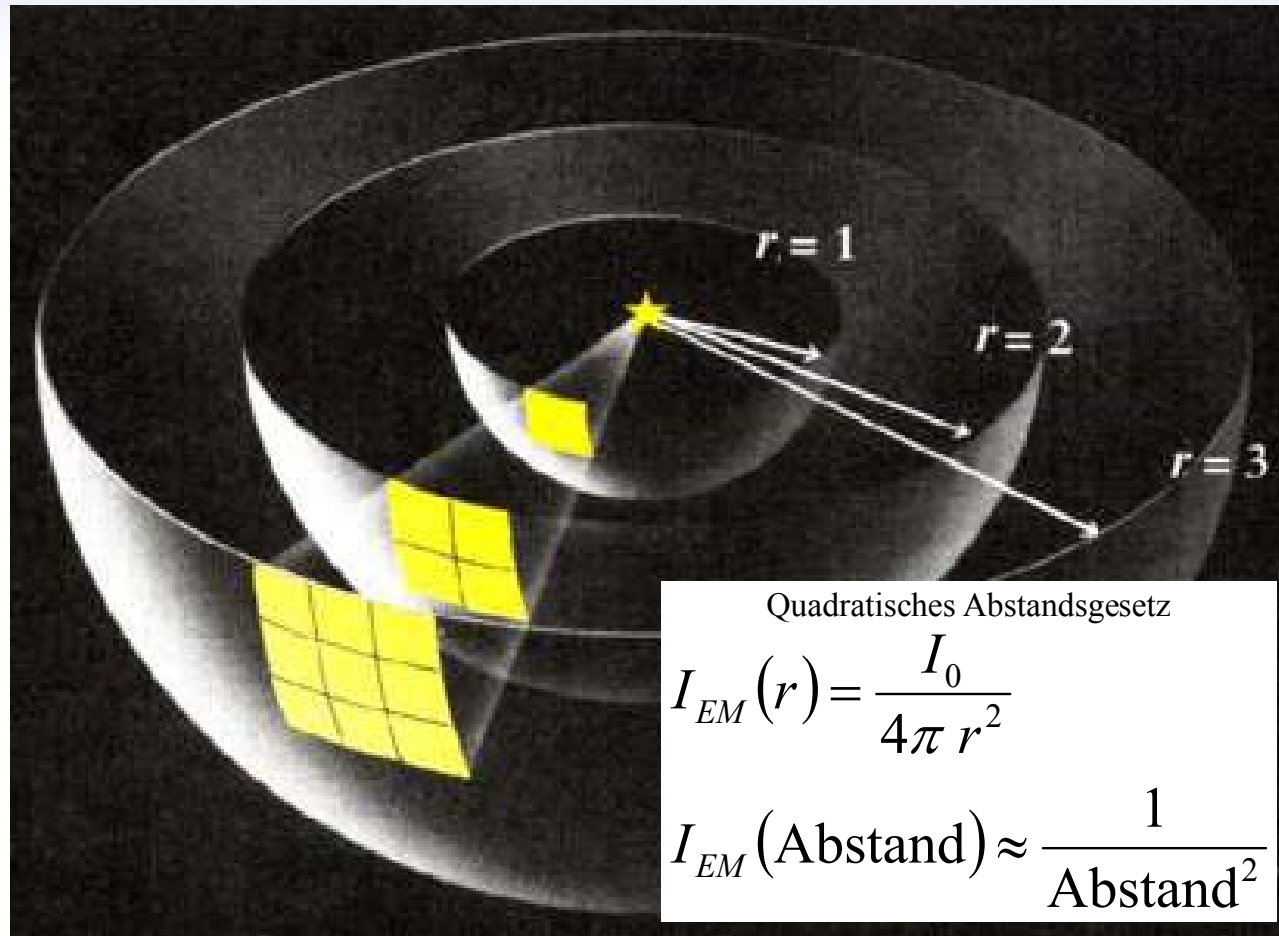
Dieses Licht strahlt 48 Kilometer

Greifswald – Leuchtturm-Wärter – das war einmal. Auf den Leuchtturm der Insel Greifswalder Oie in der Pommerschen Bucht steigt Tino Chust (43) nur ab und zu für einen Funktions-Check und wie hier zum Lampenwechsel. Der Mann ist Kommunikationselektroniker beim Wasser- und Schiffsamt

Stralsund. Beim letzten Besuch gab es für das 48 Meter hohe Leuchtfeuer eine neue Halogenmetall-dampflampe mit 2000 Watt Leistung. Deren Licht ist noch in 48 Kilometern Entfernung zu sehen. Als letzter Wärter hatte Heinz Mai 1978 den 1855 erbauten Turm verlassen.

Foto: Dietmar Lilienthal

quadratisch betrachtet Abstandsgesetz



Diagnose

- quadratisches Abstandsgesetz gilt für alle Arten von Energie, die isotrop abgestrahlt wird
- Beispiele sind Röntgenstrahlung oder energiereiche Produkte aus radioaktivem Zerfall
- Gravitation und Coulombgesetz folgen ebenfalls diesem Verhalten



Lichtdetektor Auge

Symptome

Nachweisgrenze des Auges ist Kerze (1 Watt) in etwa 40 km Entfernung



quadratisches Abstandsgesetz

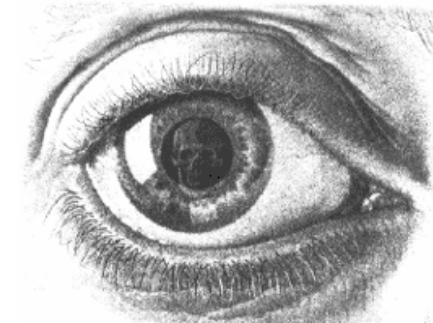
$$I_{\text{Auge}} = \frac{A_{\text{Pupille}}}{A_{\text{OF-Kugel}}^{40\text{km}}} I_{\text{Kerze}}$$

$$I_{\text{Auge}} = \frac{\pi r_{\text{Pupille}}^2}{4\pi r_{\text{Kugel}}^2} I_{\text{Kerze}}$$

$$I_{\text{Auge}} = \frac{\pi(4 \cdot 10^{-3} \text{ m})^2}{4\pi(4 \cdot 10^4 \text{ m})^2} I_{\text{Kerze}}$$

$$I_{\text{Auge}} = 2.5 \cdot 10^{-15} \text{ W}$$

$$I_{\text{Auge}} = 2.5 \cdot 10^{-15} \frac{\text{J}}{\text{s}}$$



Größter Durchmesser der Pupille

$$r_{\text{pupille}} = 4 \text{ mm}$$

$$A_{\text{Pupille}} = \pi r_{\text{Pupille}}^2$$

Fläche der Pupille

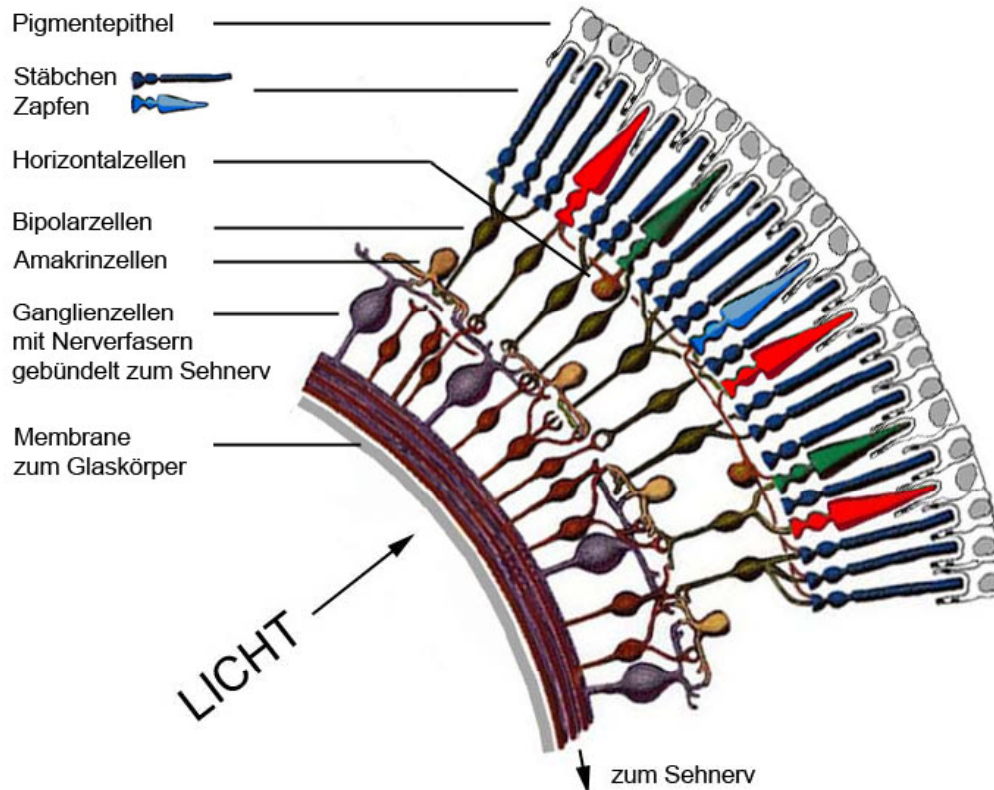
Lichtintensität, die aus 40 km Entfernung durch voll geöffnete Pupille auf Retina trifft

Diagnose

Geringste Lichtmengen, die Retina erreichen können Nervenimpulse auslösen

Thomas Young 1807 Zäpfchen und Stäbchen

As it is almost impossible to conceive each sensitive point of the retina to contain an infinite number of particles, each capable of vibrating in perfect unison with every possible undulation, it becomes necessary to suppose the number limited, for instance to the three principal colors.



Diagnose

- Zapfen sind für Farbsehen verantwortlich
- Stäbchen können nur Helligkeitsunterschiede wahrnehmen
- spektrale Empfindlichkeit Zapfen deutlich geringer im Vergleich zu den Stäbchen

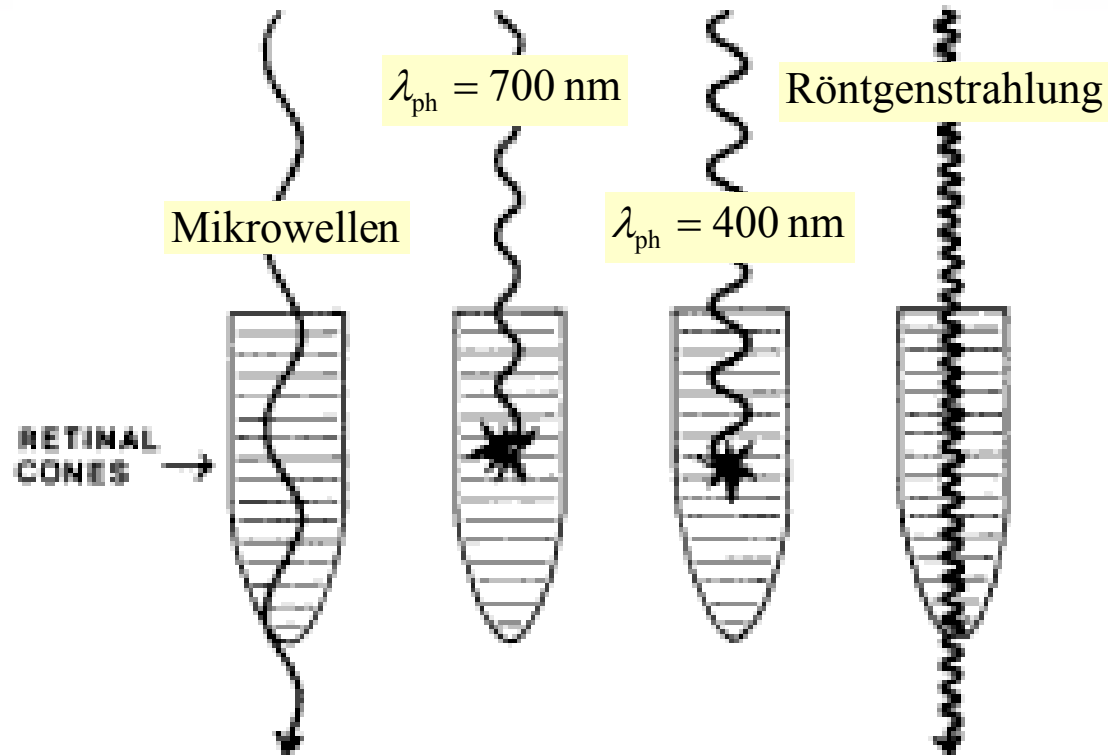


Photoeffekt

Photorezeptoren

Symptome

Mikrowellen und Röntgenstrahlen durchdringen Bereich des Auges nahezu ohne Wechselwirkung



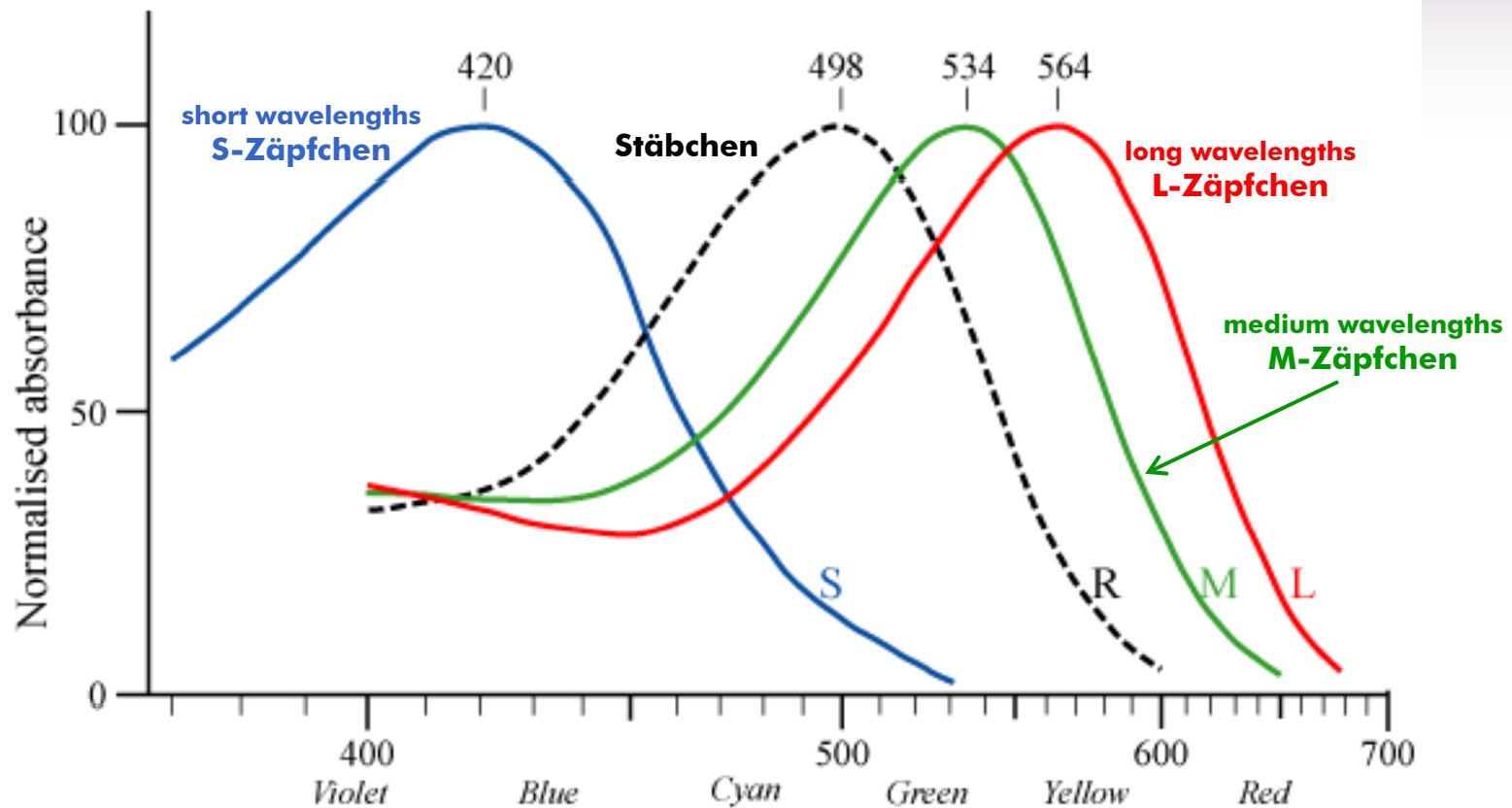
Diagnose

- Rezeptoren im Auge absorbieren Photonen mit Wellenlängenbereich von 400 and 700 nm
- Absorption von Lichtquanten führt zur optischer Wahrnehmung

elektromagnetische Strahlung sichtbar für Auge

Zäpfchen und Stäbchen

NORMALISIERTE spektrale Empfindlichkeit von Zapfen und Stäbchen

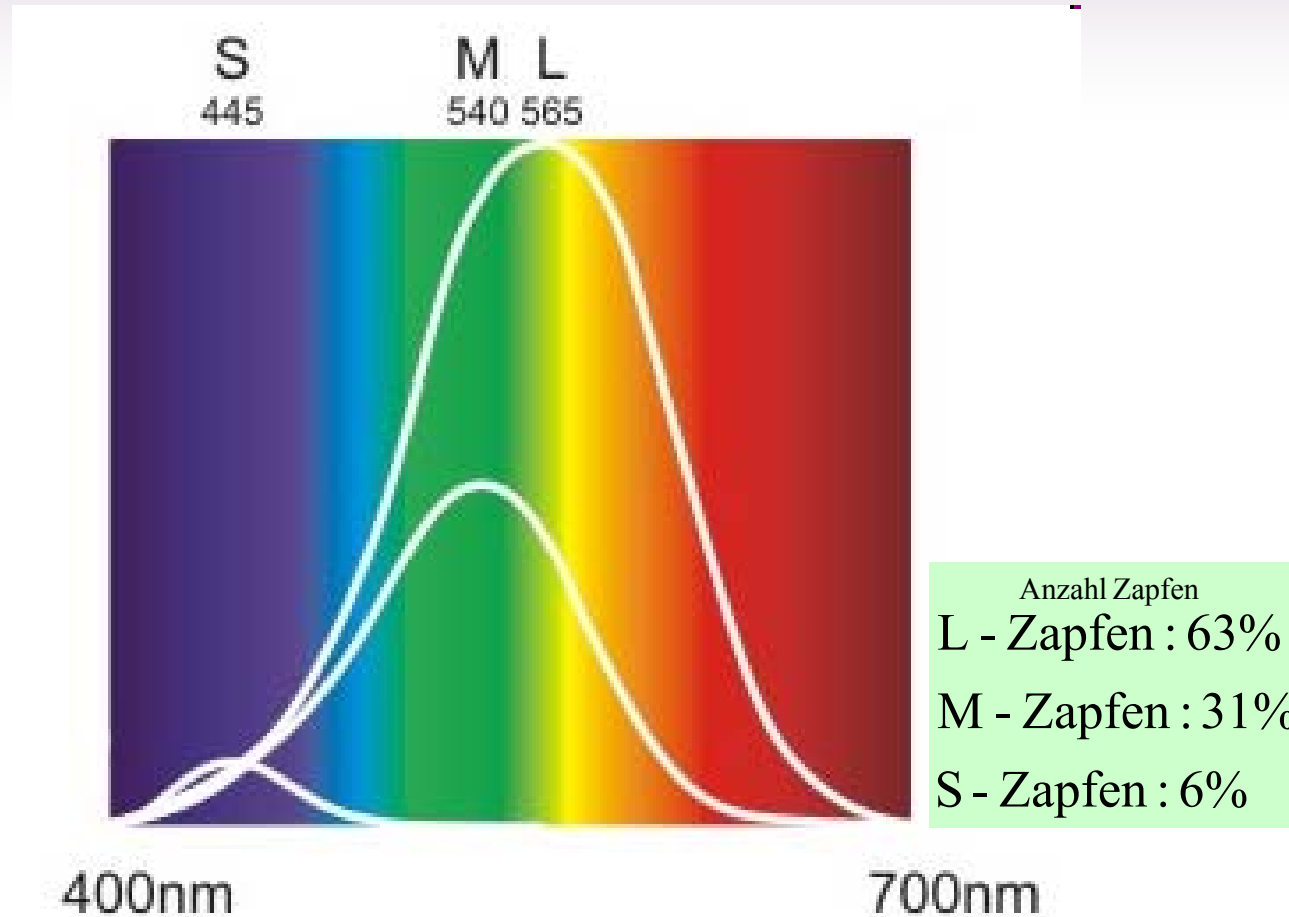


Diagnose

- Auge hat unterschiedliche Photosensoren
- Zapfen für Farbsehen verantwortlich
- Stäbchen können nur Helligkeitsunterschiede bestimmen

Farbsehen Bunte Tage

Spektrale Empfindlichkeit **GEWICHTET** mit Anzahl S-, M- und L-Zapfen



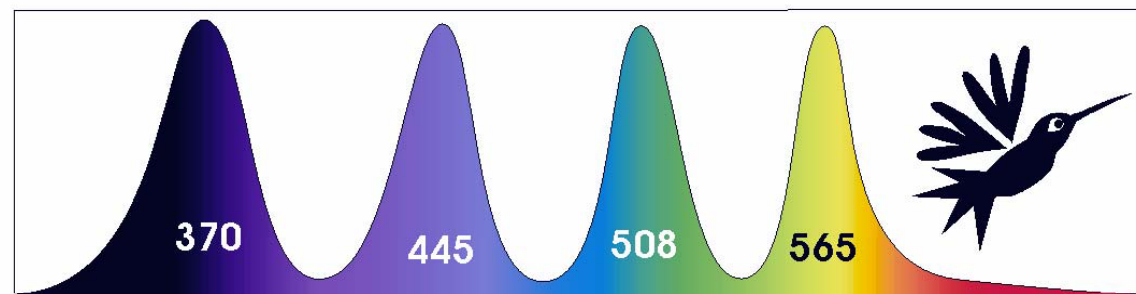
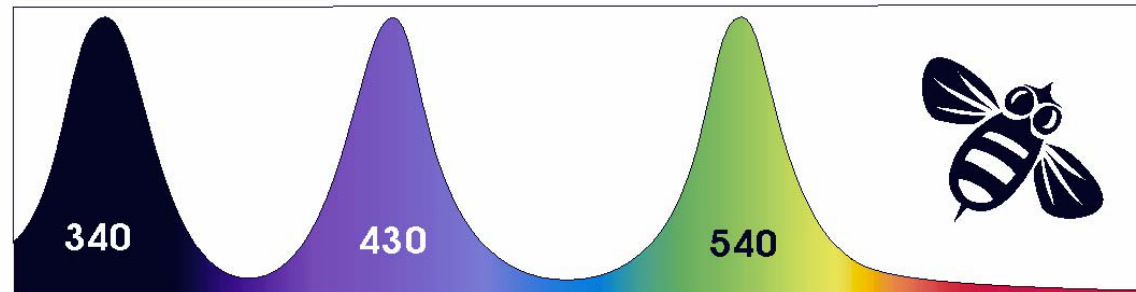
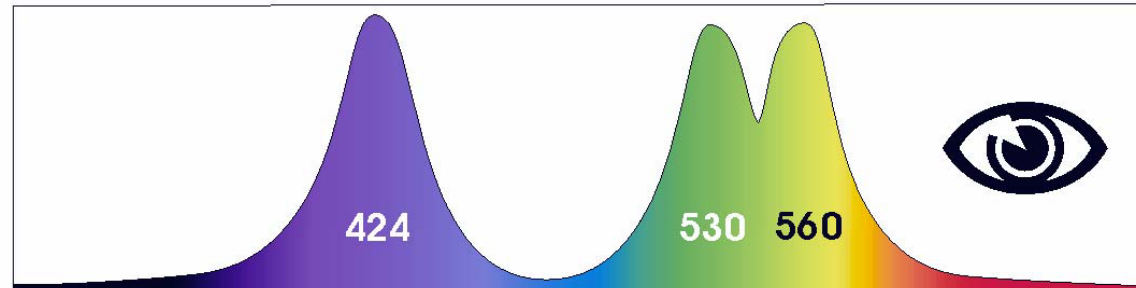
Diagnose

Auge ist besonders empfindlich im spektralen Bereich der L- und M-Zapfen

Jede Jeck es anders

... und jeder sieht es anders

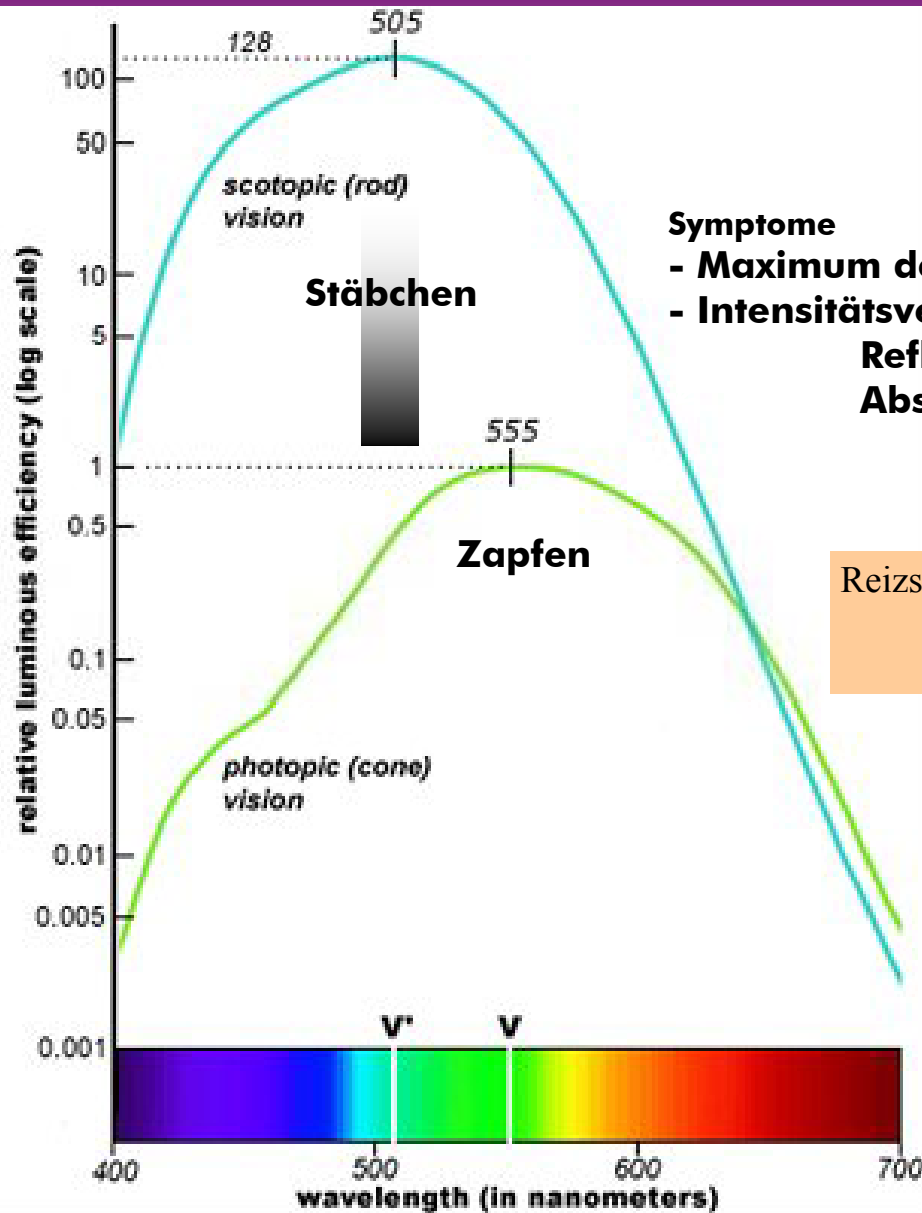
nm 350 400 450 500 550 600 650



Diagnose

Insekten sehen insbesondere im Ultravioletten und reagieren auf entsprechende Lichtquellen

Lichtdetektor Auge



Symptome

- Maximum der Empfindlichkeit des Auges bei 510 nm
- Intensitätsverluste im Auge

Reflektion an Oberflächen 4%

Absorption optische Medien 50 %

Reizschwelle Retina für Lichtdetektion durch adaptiertes Auge

$$E_{threshold}^{510nm} = 4 \cdot 10^{-17} \text{ J}$$

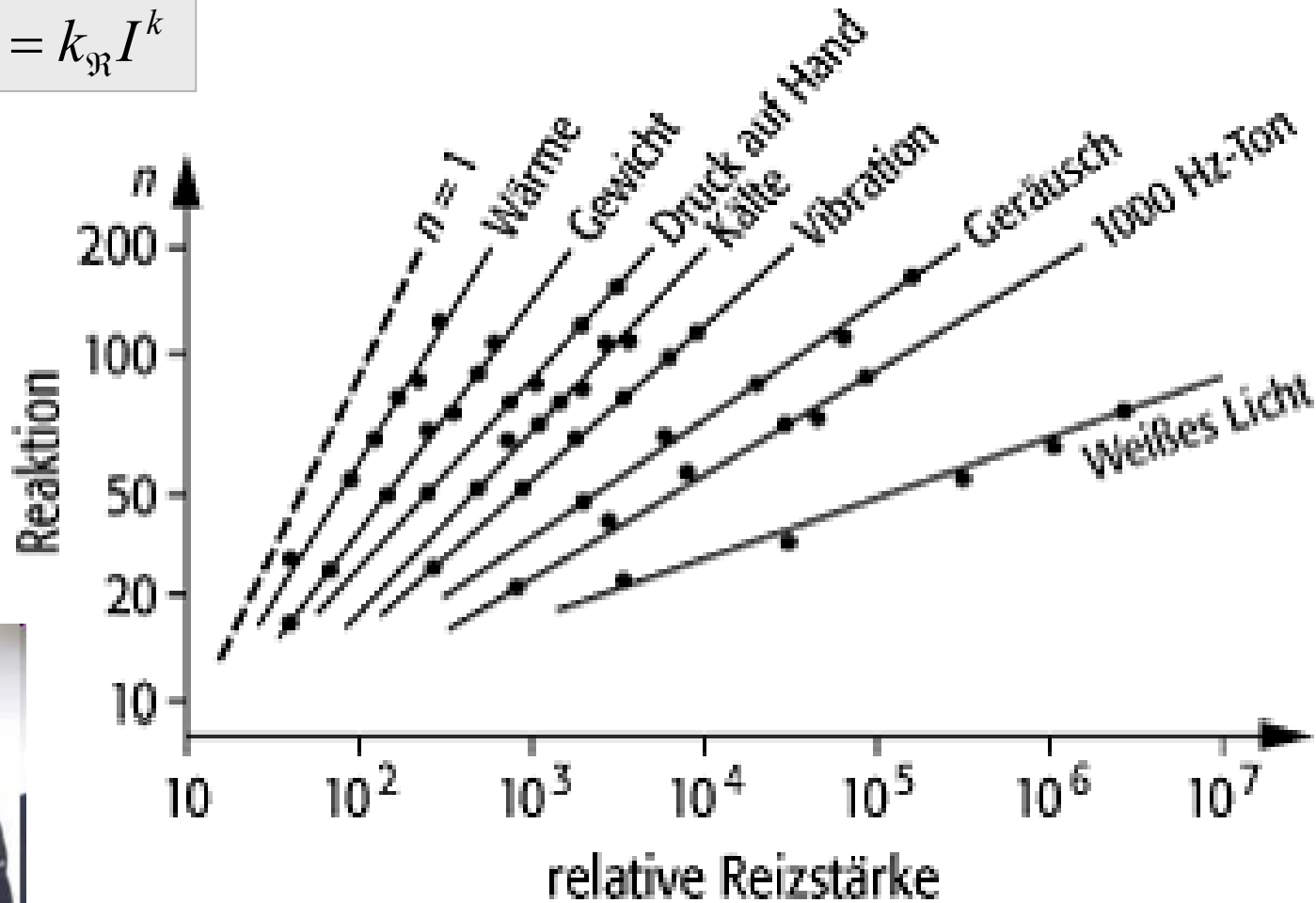
Diagnose

- Empfindlichkeit des Auges überstreicht 12 Größenordnungen
- Physiologie beschreibt allgemein subjektive Reizempfindlichkeit über das Stevens-Gesetz

Subjektive Reizempfindung Gesetz von Stevens

Potenzgesetz von Stevens

$$\mathcal{R}_{Stevens} = k_{\mathcal{R}} I^k$$



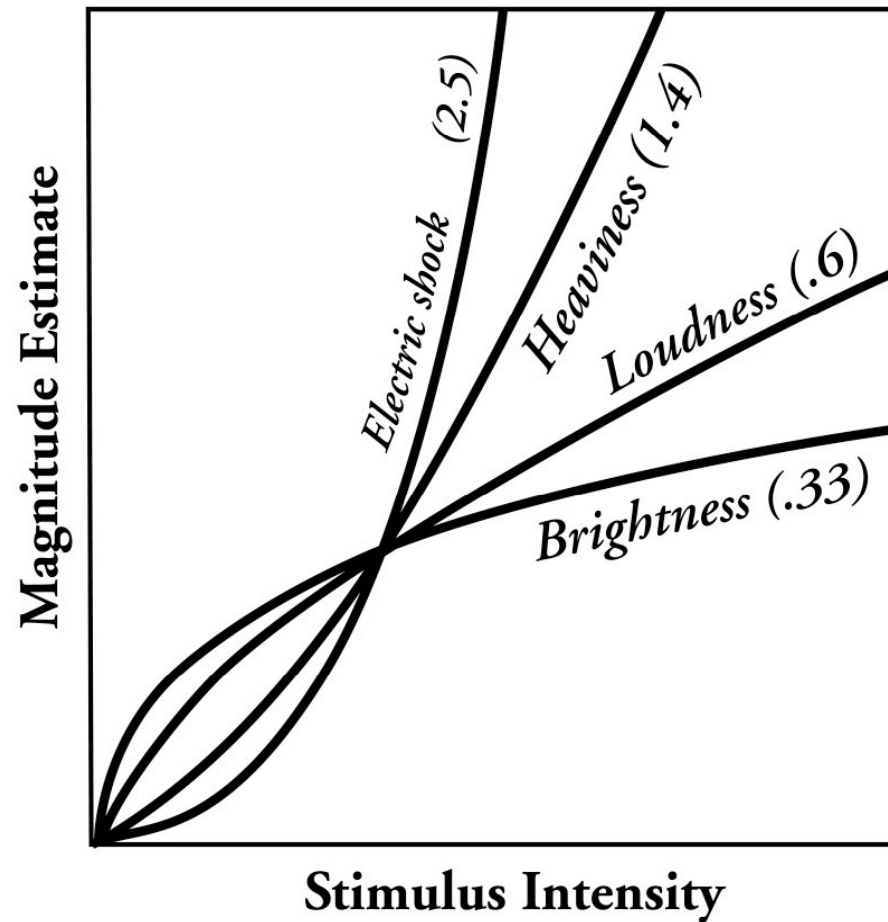
Diagnose

Sensorik des Körpers kann oft durch Potenzverhalten nach Stevens beschrieben werden

Subjektive Reizempfindung Gesetz von Stevens

Potenzgesetz von Stevens

$$\mathcal{R}_{Stevens} = k_{\mathcal{R}} I^k$$



Subjektive Reizempfindung Gesetz von Stevens

Potenzgesetz von Stevens

$$\mathcal{R}_{Stevens} = k_{\mathcal{R}} I^k$$

Continuum	Measured exponent	Stimulus condition
Loudness	0.67	Sound pressure of 3000 - Hz tone
Vibration	0.95	Amplitude of 60 Hz on finger
Vibration	0.6	Amplitude of 250 Hz on finger
Brightness	0.33	5° target in dark
Brightness	0.5	Point source
Brightness	5	Brief flash
Brightness	1	Point source briefly flashed
Lightness	1.2	Reflectance of gray papers
Visual length	1	Projected line
Visual area	0.7	Projected square
Redness (saturation)	1.7	Red - gray mixture

Wellenlänge vs Farbe

Farbe	ultraviolett	violett	blau	grün
Wellenlänge	< 400 nm	400 – 440 nm	440 – 500 nm	500 – 560 nm
Photonenenergie	> 3.1 eV	3.1 - 2.81 eV	2.81 - 2.48 eV	2.48 - 2.21 eV

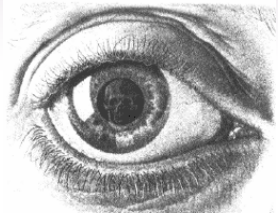


**J.W. von Goethe
Farbenkreis
1809**

Farbe	gelb	orange	rot	infrarot
Wellenlänge	560 – 590 nm	590 – 625 nm	625 – 700 nm	> 700 nm
Photonenenergie	2.21 – 2.10 eV	2.10 – 1.98 eV	1.98 – 1.77 eV	< 1.77 eV

Quantenphänomene

Photonendetektor Auge



Reizschwelle der Retina für Detektion von Licht durch adaptiertes Auge

$$E_{threshold}^{510nm} = 4 \cdot 10^{-17} \text{ J}$$



$$E_{ph}^{510nm} = h \nu_{ph} = h \frac{c}{\lambda_{ph}}$$

$$E_{ph}^{510nm} = 3.89 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Energie Photon im Maximum Empfindlichkeit des Auges

Planckkonstante

$$h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$



$$N_{ph} = \frac{\overset{\text{Anzahl Photonen}}{E_{threshold}^{510nm}}}{E_{ph}^{510nm}} \approx \frac{4 \cdot 10^{-17} \text{ J}}{4 \cdot 10^{-19} \text{ J}} = 100$$

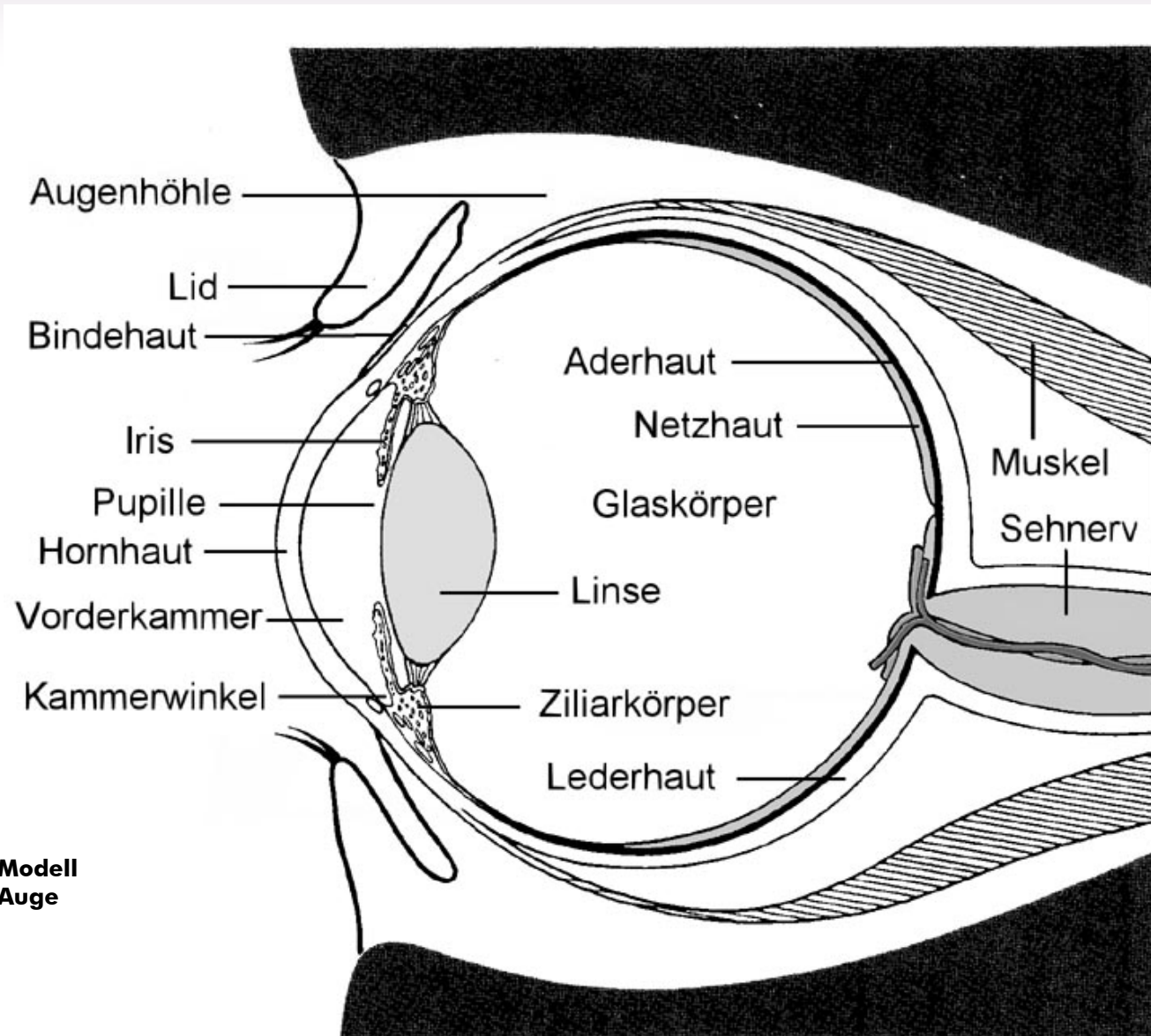
die aus 40 km Entfernung durch Pupille auf gesamten Bereich der Retina verteilt ankommen

Diagnose

- nur wenige Photonen erreichen die **GESAMTEN** Bereich der Netzhaut
- **EINZELNE** Lichtquanten lösen über den Photoeffekt ein Reizsignal aus



Aufbau des Auges



DAS EXPERIMENT

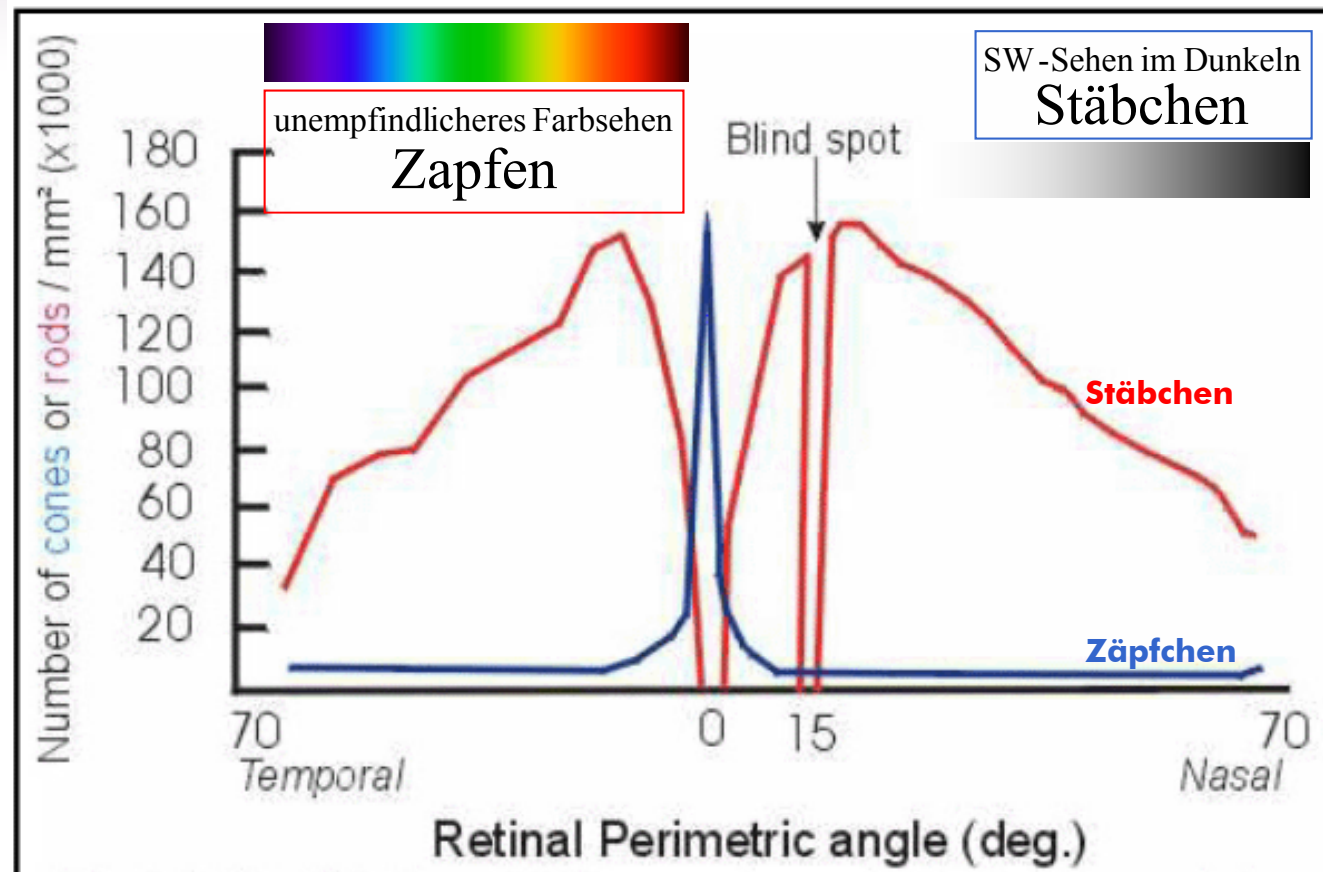
Modell
Auge



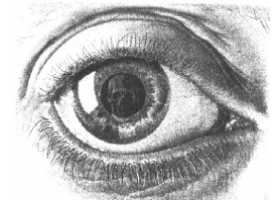


Quantenphänomene

Photonendetektor Auge



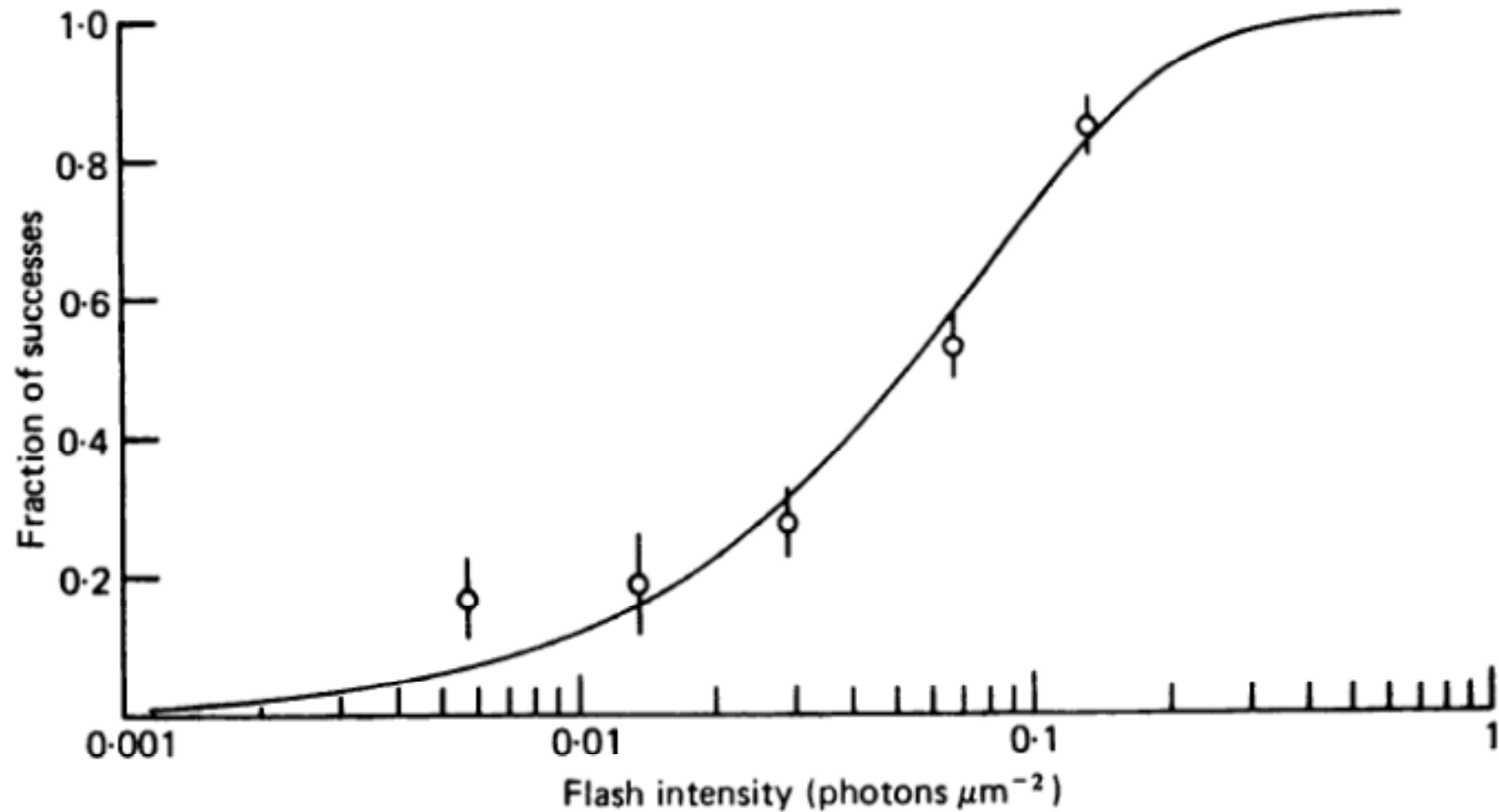
Anzahl Photonen
 $N_{ph} = 100$
Bereich der Retina



Diagnose

- Anzahl der Rezeptoren etwa 100 000 pro mm²
- im Mittel trifft also WENIGER ALS EIN PHOTON einen der Rezeptoren
- Quanteneffizienz der Stäbchen etwa 20 % (zum Vergleich CCD-Chip 35%)
- nahezu jedes Photon wird von Stäbchen auf Retina registriert

frequency of seeing experiment photon counting



Diagnose

Nahezu jedes auftreffende Photon wird durch die Rezeptoren auf Retina detektiert

Augenblick

Symptome

- **Lichtblitz erzeugt ein Bild auf Retina**
- **aufgrund roter Blutgefäße auf Netzhaut erscheint menschliches Auge rot**



Diagnose

Keine weitere Optimierung der Sensoren möglich, da jedes Photon vom Auge registriert wird

Evolutionäre Strategie Wildblick

Symptome

- **NACHTAKTIVE TIERE** müssen unter stark licht-reduzierten Bedingungen sehen
- **Sensitivität in der Wahrnehmung** muss so hoch wie möglich sein
- **Wahrscheinlichkeit erhöhen**, dass **Photonen Sensoren der Netzhaut** treffen

$$f^{\#} - \text{Zahl} = \frac{f_{\text{linse}}}{d_{\text{pupille}}}$$

große Pupille bedeutet geringe $f^{\#}$ -Zahl



Vögel, Fische, Reptilien, Landtiere

$$f^{\#} \approx 2.1$$

human eye: $f^{\#} = 20 \text{ mm} / 8 \text{ mm} = 2.5$

nachtaktive Tiere haben geringeres $f^{\#}$

$$f^{\#} \approx 0.95$$

Diagnose

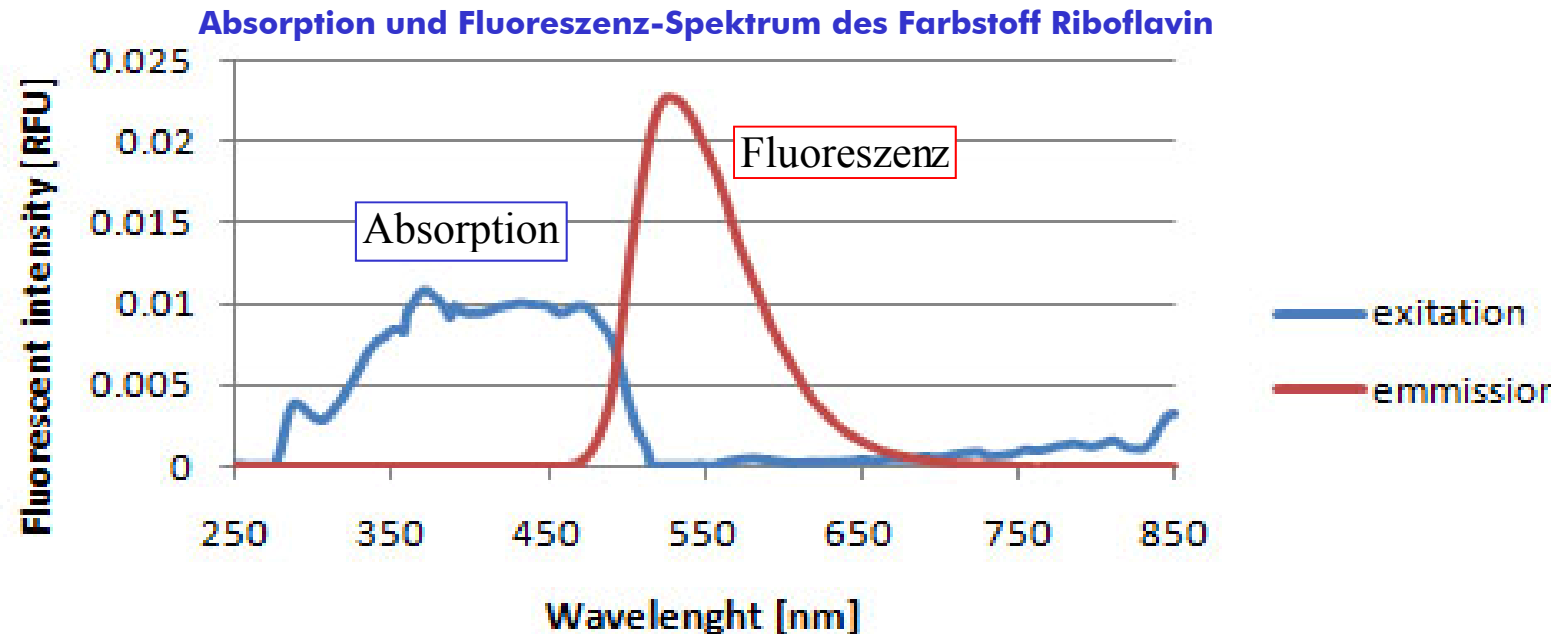
Aufgrund der geringeren $f^{\#}$ -Zahl registrieren nachtaktive Tiere viermal soviel Licht

Optimierung durch photoelektrischen Effekt

Wildblick

Symptome

- reflektierende Schicht auf Rückseite Netzhaut schickt Photonen zurück Richtung Lichtsensoren
- Farbstoff Riboflavin verantwortlich für optische Wahrnehmung



Diagnose

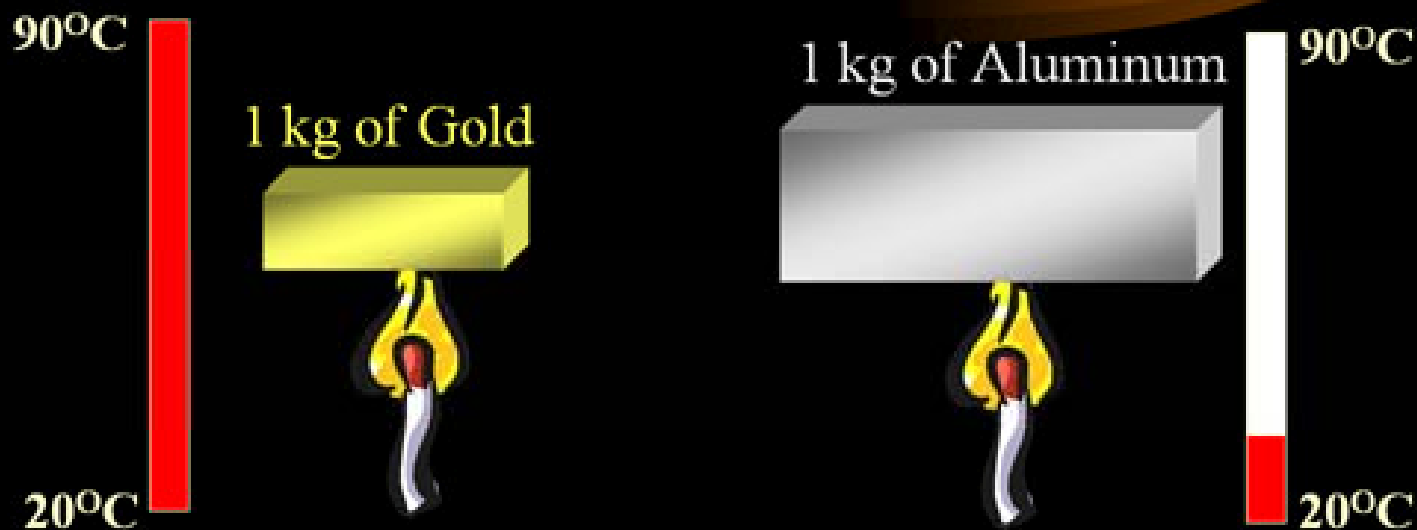
- Riboflavin absorbiert blaue Photonen, die von Sensoren kaum nachgewiesen werden
- Fluoreszenz verschiebt Wellenlängen in roten Spektralbereich, der besser nachgewiesen wird

Thema Photoelektrischer Effekt

Wärmekapazität

Observation:

Different materials heat up at different rates.



Gold heats up about 7 times faster than Aluminum

SI Einheit

Mol

Following proposals by the IUPAP, the IUPAC, and the ISO, the CIPM gave a definition of the mole in 1967 and confirmed it in 1969. This was adopted by the 14th CGPM (1971, Resolution 3; CR, 78 and *Metrologia*, 1972, **8**, 36):

- 1. The mole is the amount of substance of a system which contains as many elementary entities as there are atoms in 0.012 kilogram of carbon 12; its symbol is “mol”.**
- 2. When the mole is used, the elementary entities must be specified and may be atoms, molecules, ions, electrons, other particles, or specified groups of such particles.**

It follows that the molar mass of carbon 12 is exactly 12 grams per mole, $M(^{12}\text{C}) = 12 \text{ g/mol}$.

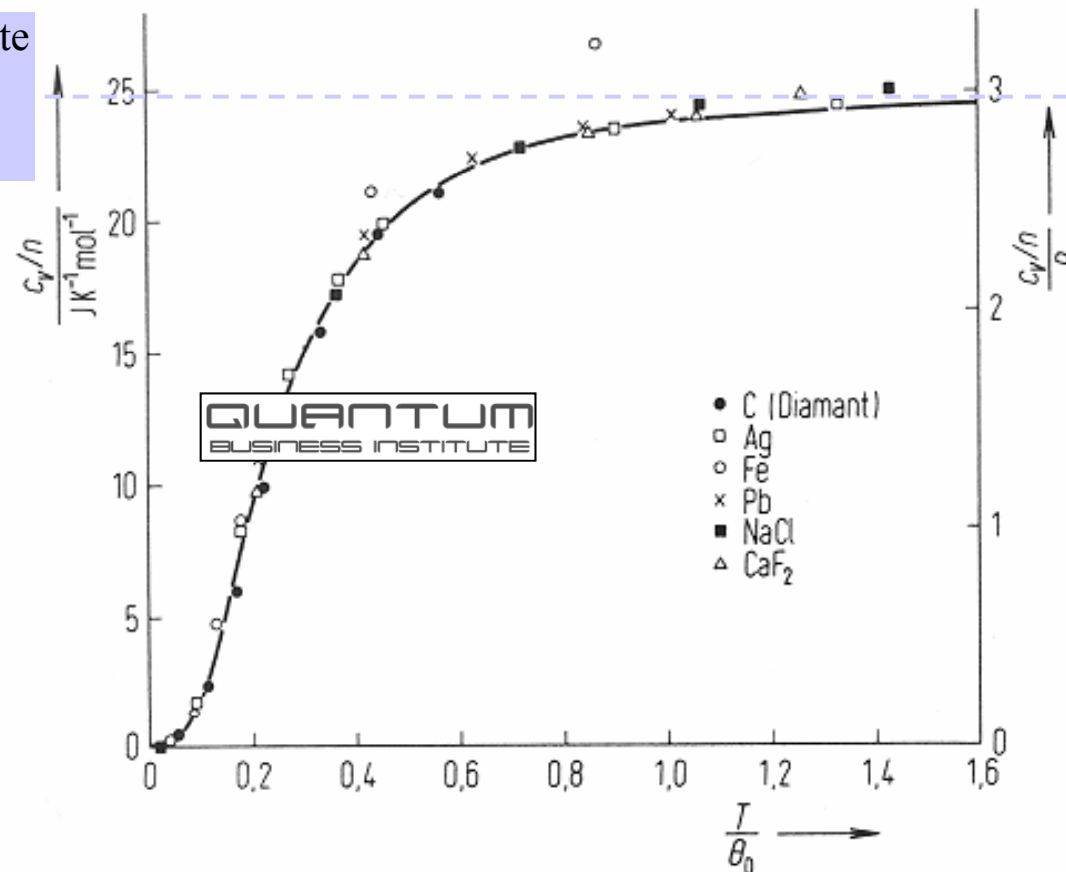
Wärmekapazität Gesetz von Dulong-Petite

thermoE

Spezifische Wärmekapazität eines Festkörpers ändert sich NICHT mit Temperatur der Probe

Universelle Gaskonstante

$$R_G = 8.314 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

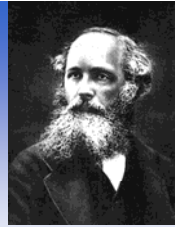


Diagnose

- Wert der **MOLAREN** spezifischen Wärmekapazität beträgt nach Dulong-Petite Gesetz $3R_G$
- bei niedrigeren Temperaturen weicht Experiment stark vom Dulong-Petite Gesetz ab

Innere Energie als Energiespeicher THEOREM von Maxwell

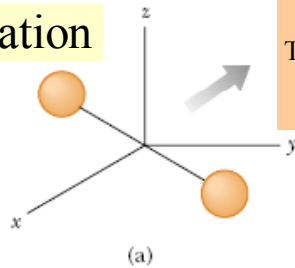
James Maxwell
(1831-1879)



Gleichverteilungssatz der Energie

- Molekül hat Freiheitsgrade, die unabhängig voneinander Energie speichern
- jeder Freiheitsgrad verfügt im Mittel über gleichen Energiegehalt von $1/2 k_B T$

Translation

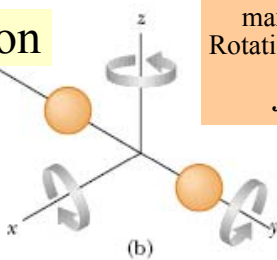


maximale Anzahl
Translationsfreiheitsgrade
 $f_{trans} = 3$

Gesamtanzahl Freiheitsgrade
in thermischen System

$$f_{FG} = f_{trans} + f_{rot} + f_{vib}$$

Rotation

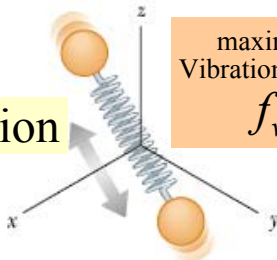


maximale Anzahl
Rotationsfreiheitsgrade
 $f_{rot} = 3$



physikalisch
 $E_{avg}^{phys} = \frac{1}{2} k_B T_K$
Energie pro Molekül

Vibration



maximale Anzahl
Vibrationsfreiheitsgrade
 $f_{vib} = 3$

chemisch
 $E_{avg}^{chem} = \frac{1}{2} R_G T_K$
Energie pro Mol



Zusammenhang der Naturkonstanten

Universelle Gaskonstante	=	n_{Avo}	Boltzmannkonstante
R_G		Avogadrozahl	k_B

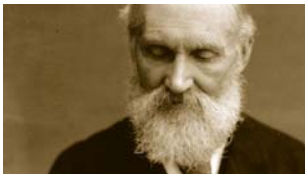
Diagnose
Moleküle haben eine höhere Wärmekapazität als Atome

Maxwell und nochmal Einstein Wärmekapazität

Temperaturerhöhung ΔT_K durch Energieeintrag ΔQ_{th}

$$\Delta Q_{th} = C_{th} \cdot \Delta T_K$$

thermische Materialkonstanten C_{th} : V konstant C_V , p konstant C_p



molare innere Energie U_{th} eines Festkörpers bei einer Temperatur T_K

$$U_{th} = \underset{\substack{\text{Freiheitsgrade} \\ 3 \times \text{Translation} \\ 3 \times \text{Vibration}}}{6} \cdot \underset{\substack{n_{Avo} \\ \text{Avogadrozahl}}}{n_{Avo}} \left(\frac{1}{2} k_B T_K \right) = 3 n_{Avo} k_B T_K$$

$$C_V = \frac{dU_{th}}{dT_K} = 3 n_{Avo} k_B = 3 R_G$$

molare Wärmekapazität eines Festkörpers bei Temperatur T_K

Universelle Gaskonstante

R_G

$=$

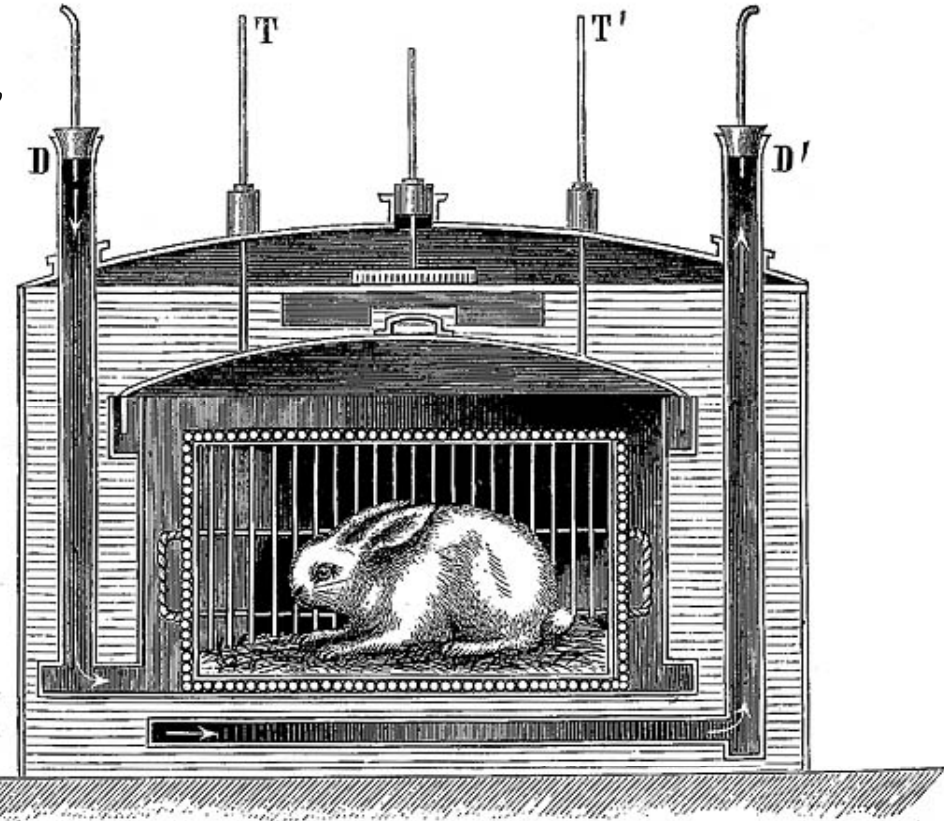
n_{Avo}

Avogadrozahl

Boltzmannkonstante

k_B

Kalorimeter von Depretz und Dulong

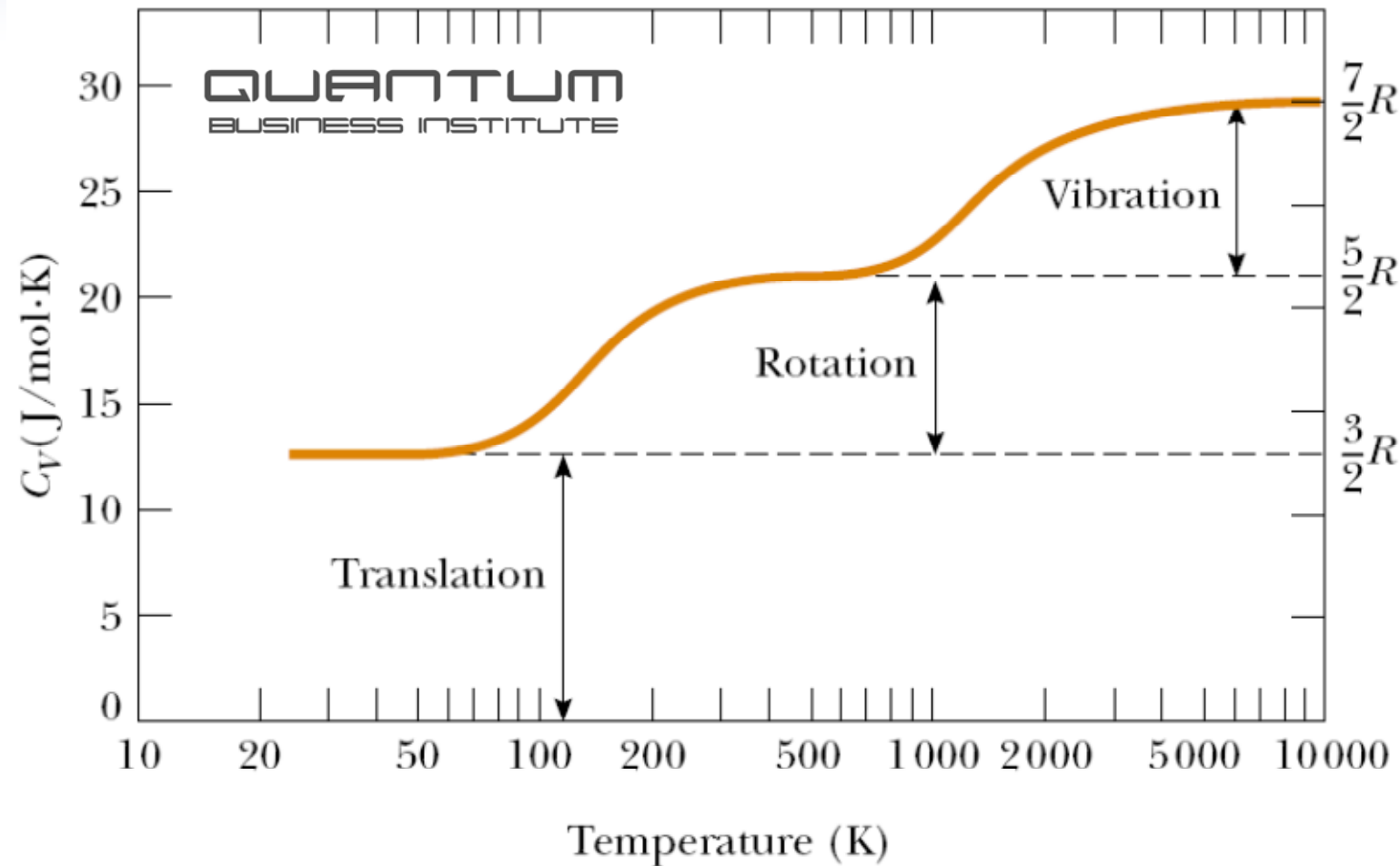


Diagnose

- **Maxwellscher Gleichverteilungssatz** gibt jedem der sechs Freiheitsgrade $\frac{1}{2} k_B T$
- **Dulong-Petit Gesetz** gibt Verhalten **NUR** bei hohen Temperaturen gut wieder
- bei niedrigeren Temperaturen fällt molare Wärmekapazität stark ab
- Verhalten kann mit klassischer Physik **NICHT** erklärt werden

Innere Energie als Energiespeicher

Freiheitsgrade der Bewegung



Diagnose

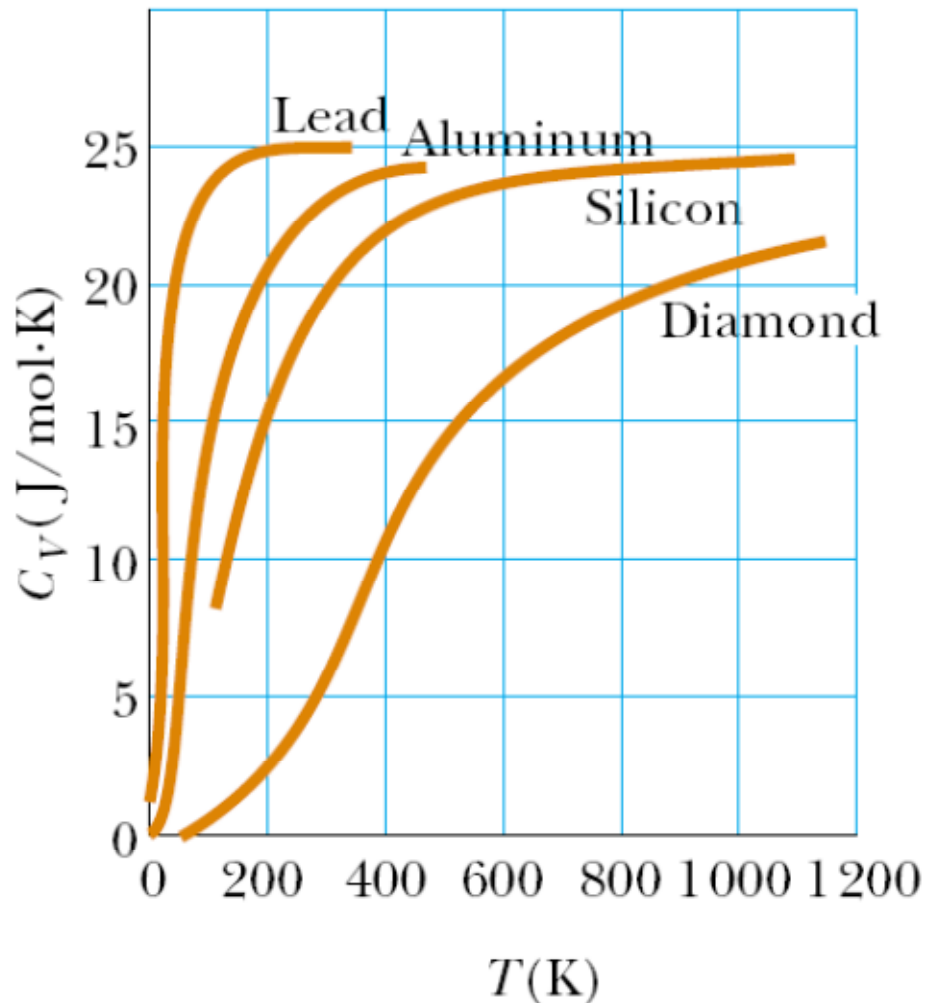
- im Gegensatz zur klassischen Mechanik sind Energiezustände in Quantenphysik diskret
- bei tiefen Temperaturen frieren Schwingungs- und Rotations-Freiheitsgrade ein

nochmal Einstein

Wärmekapazität

Symptome

- Einstein wendet Plancks Hypothese auf Wärmekapazität an
- Schwingungen der Atome im Festkörper (Phononen) ist quantisiert



Einsetzen des Planckschen Ergebnisses
in Dulong-Petit Gesetz

$$E_{avg}^{phonon} = \frac{h\nu_{phonon}}{\exp\left(-\frac{h\nu_{phonon}}{k_B T_K}\right) - 1}$$

molare innere Energie nach Dulong-Petit

$$U_{th}^{DP} = 3n_{Avo} k_B T_K$$

$$U_{th}^{Einstein} = 3n_{Avo} \frac{h\nu_{phonon}}{\exp\left(\frac{h\nu_{phonon}}{k_B T_K}\right) - 1}$$

$$U_{th}^{Einstein} = 3n_{Avo} k_B T_K \frac{\frac{h\nu_{phonon}}{k_B T_K}}{\exp\left(\frac{h\nu_{phonon}}{k_B T_K}\right) - 1}$$

molare innere Energie nach Einstein

nochmal Einstein

Wärmekapazität



molare innere Energie nach Dulong-Petit

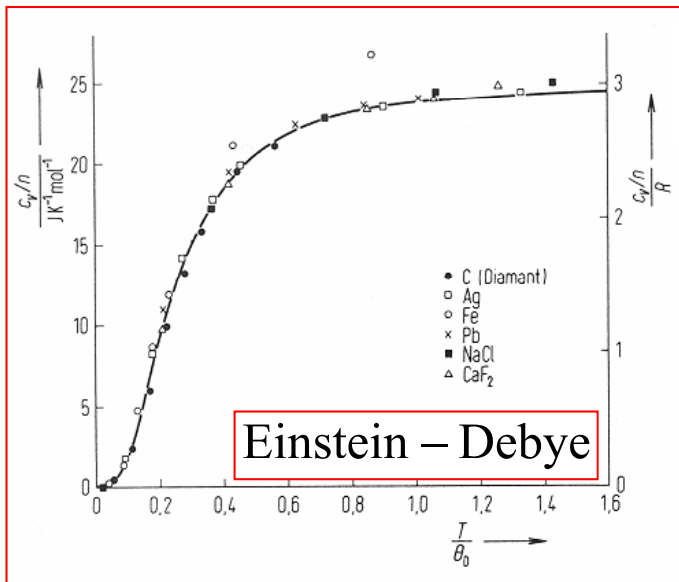
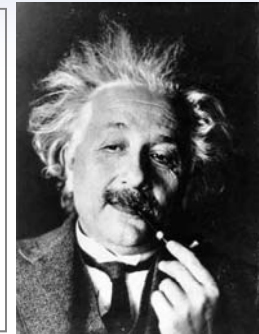
$$U_{th}^{\text{Dulong-Petit}} = 3n_{\text{Avo}} k_B T_K$$

$$\iff$$

$$U_{th}^{\text{Einstein}} = 3n_{\text{Avo}} k_B T_K \frac{\frac{h\nu_{\text{phonon}}}{k_B T_K}}{\exp\left(\frac{h\nu_{\text{phonon}}}{k_B T_K}\right) - 1}$$

molare innere Energie nach Einstein

$$\frac{h\nu_{\text{phonon}}}{k_B T_K} \exp\left(\frac{h\nu_{\text{phonon}}}{k_B T_K}\right) - 1$$



molare spezifische Wärmekapazität nach Dulong-Petit

$$C_V^{\text{Dulong-Petit}} = \frac{dU_{th}^{\text{Dulong-Petit}}}{dT_K} = 3n_{\text{Avo}} k_B = 3R_G$$

konstant für alle Temperaturen

$$C_V^{\text{Einstein}} = \frac{dU_{th}^{\text{Einstein}}}{dT_K} = 3n_{\text{Avo}} k_B \frac{\left(\frac{h\nu_{\text{phonon}}}{k_B T_K}\right)^2 \exp\left(\frac{h\nu_{\text{phonon}}}{k_B T_K}\right)}{\exp\left(\frac{h\nu_{\text{phonon}}}{k_B T_K}\right) - 1}$$

Temperaturabhängigkeit

molare spezifische Wärmekapazität nach Einstein

Diagnose

- Peter Debye verbessert Einstein Analyse (EINE Phononen-Frequenz -> Phononen-SPEKTRUM)
- Debysche Gleichung gibt Verhalten der Wärmekapazität bei geringeren Temperatur gut wieder
- für hohe Temperaturen ergibt sich Gesetz von Dulong-Petit