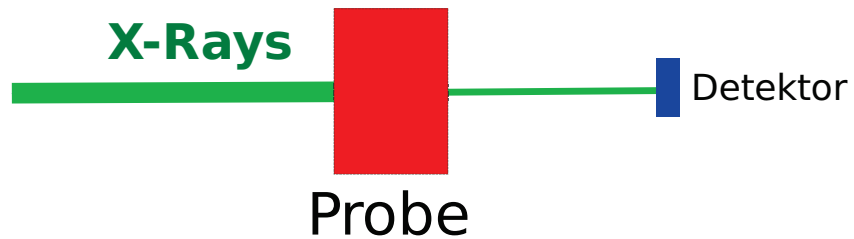


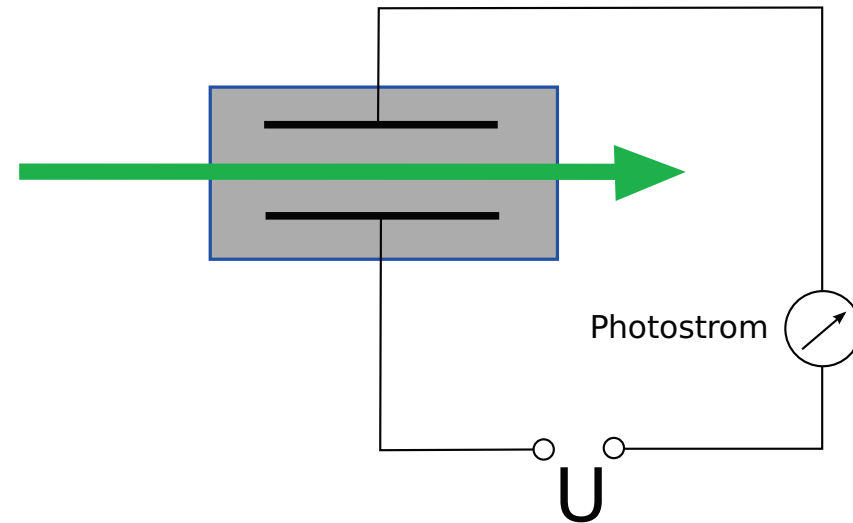
- Nachweis der möglichen Produkte nach der Photoionisation

# Experimentelle Methoden – XAS

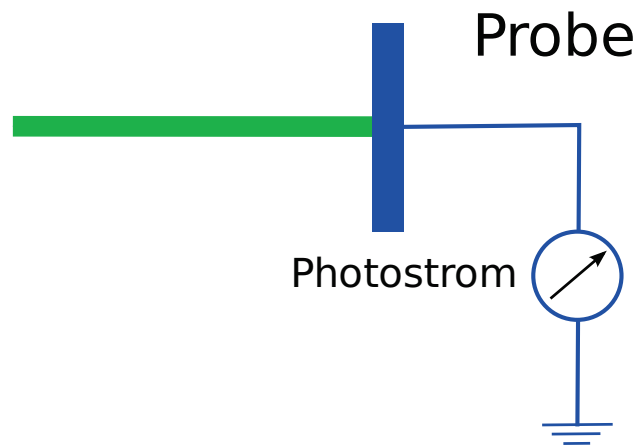
## Klassische Absorption



## Gaszelle



## Total Electron Yield (TEY)

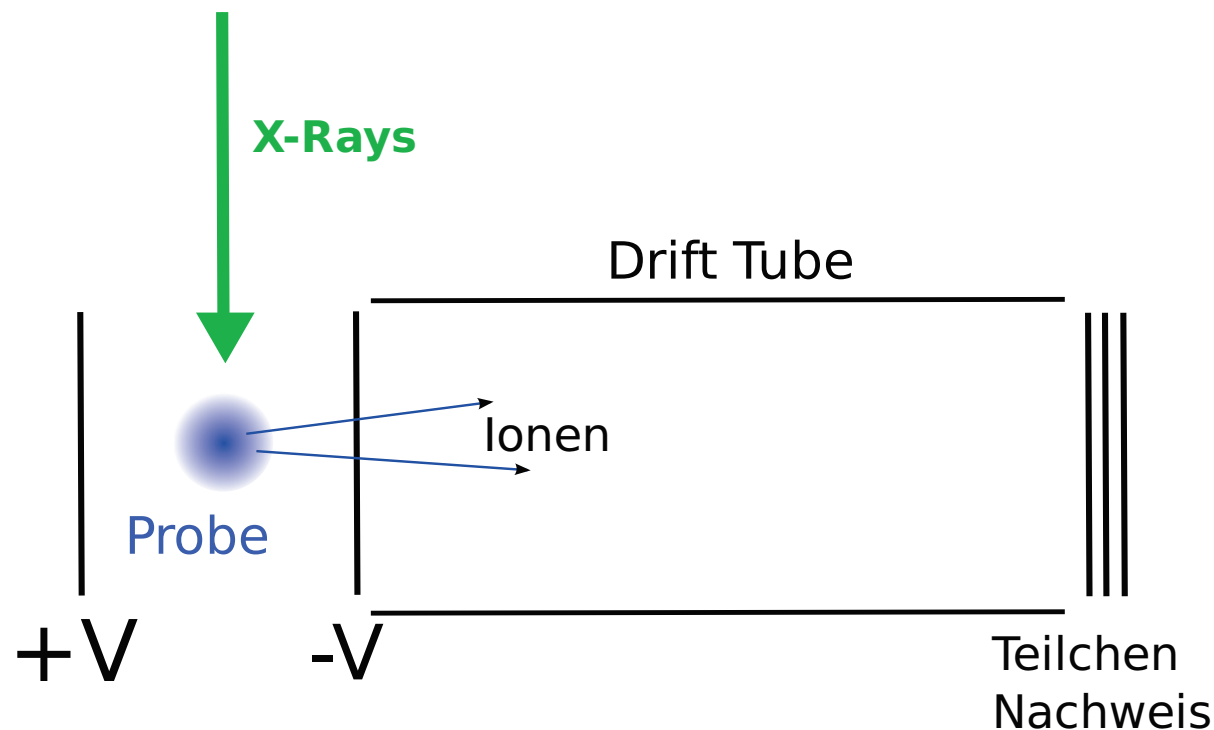


Lambertsches Gesetz  $I = I_0 e^{-\alpha X}$

# Experimentelle Methoden – Ionen

- Nachweis verschiedener Ionen über Massenspektroskopie
- Flugzeitmassenspektrometer (**T**ime **O**f **F**light – TOF)
- Arbeiten in einem gepulsten Betrieb

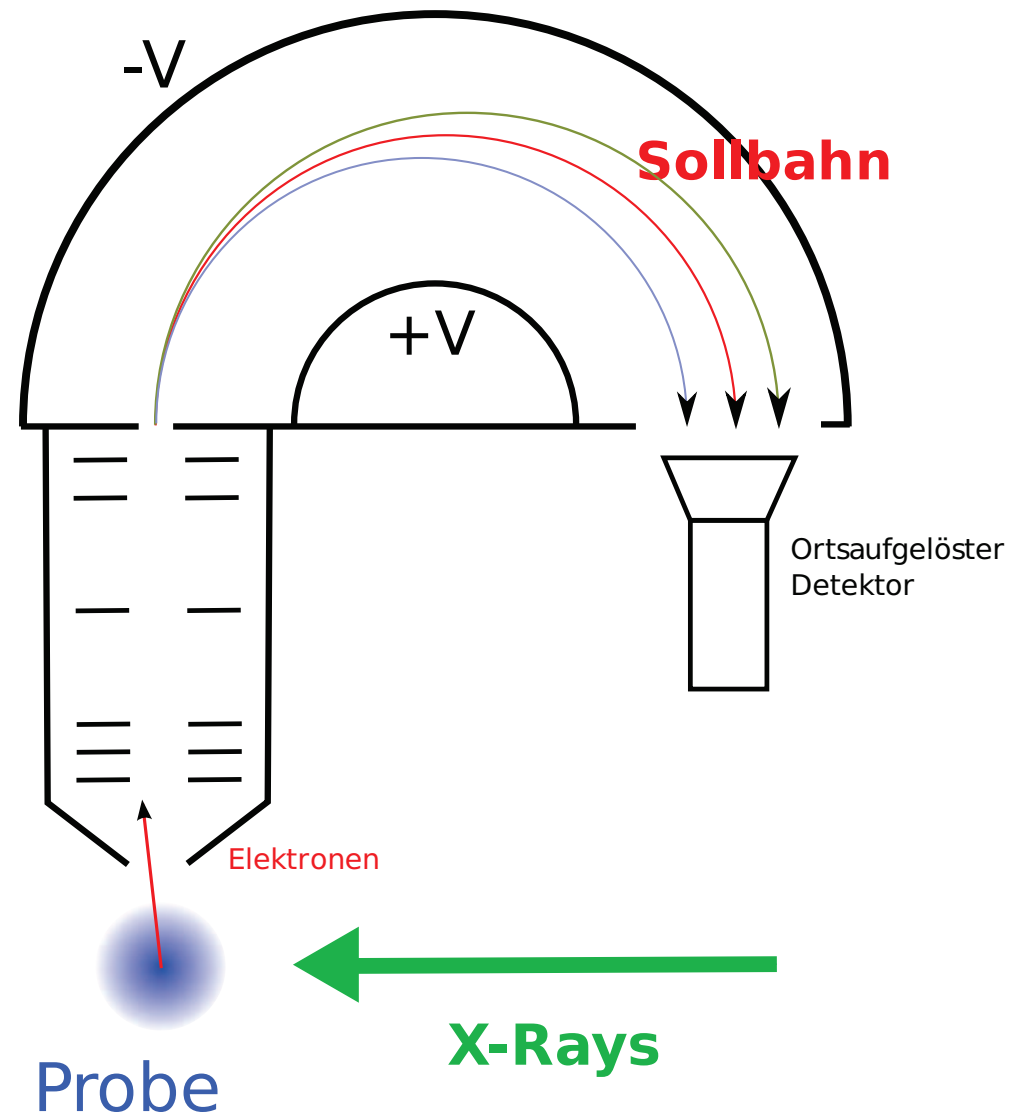
$$E_{kin} = \frac{1}{2} Mv^2 = \frac{1}{2} M \frac{s^2}{t^2} \Rightarrow M = \frac{2E_{kin}t^2}{s^2}$$



# Experimentelle Methoden – Elektronen

- Verschiedene Analysatoren für Elektronen
  - Flugzeitelektronenspektrometer  
Funktion, wie bei Ionen, nur wird jetzt die Energie bestimmt und nicht die Masse  
Auflösungsvermögen  $E/\Delta E \approx 100$
  - Hemisphärische Analysatoren  
Auflösungsvermögen  $E_s/\Delta E_s \approx 1000$  der Sollbahnenergie  $E_s$   
Elektronenoptik retardiert oder beschleunigt die Elektronen auf eine definierte Sollbahnenergie

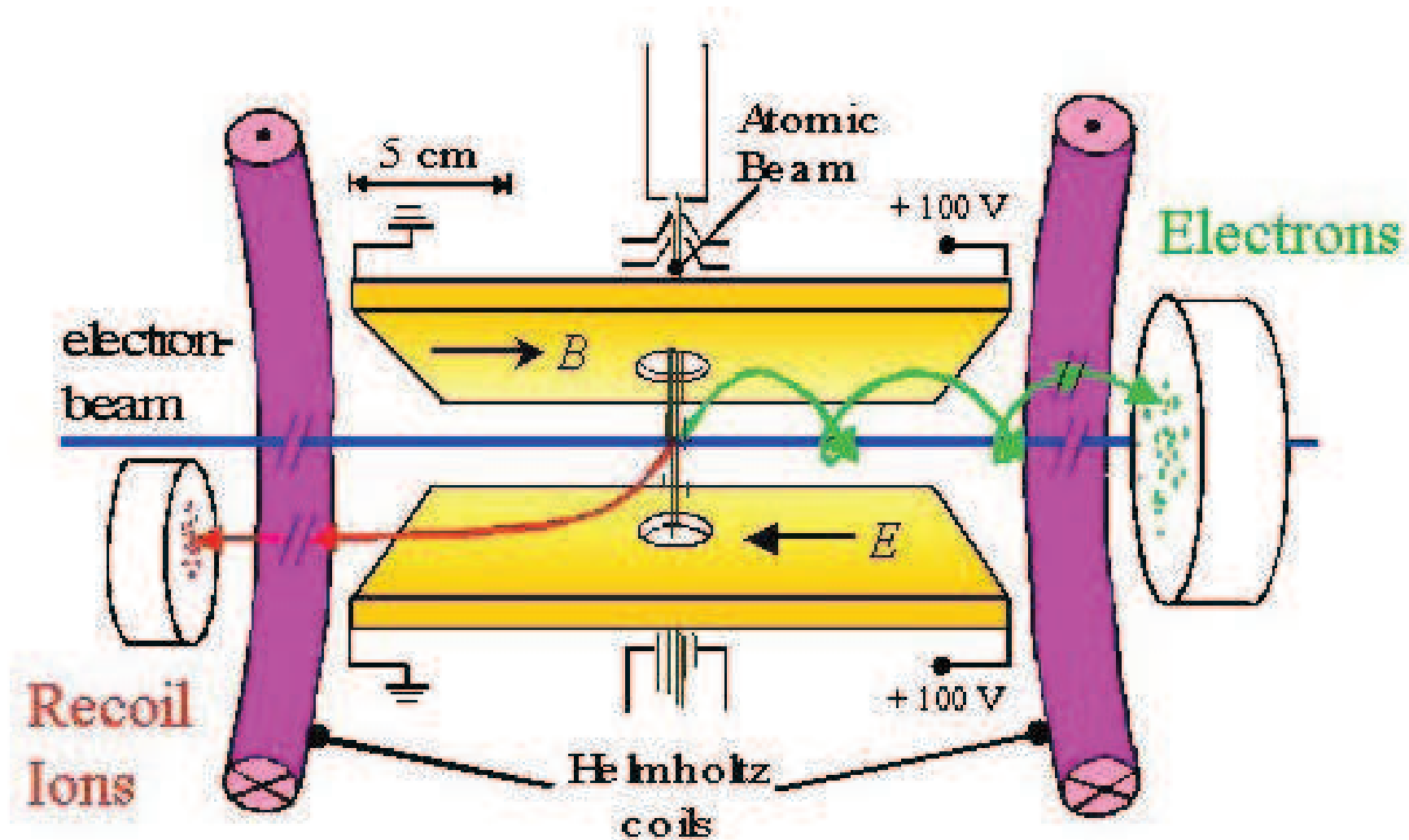
# Experimentelle Methoden – Elektronen



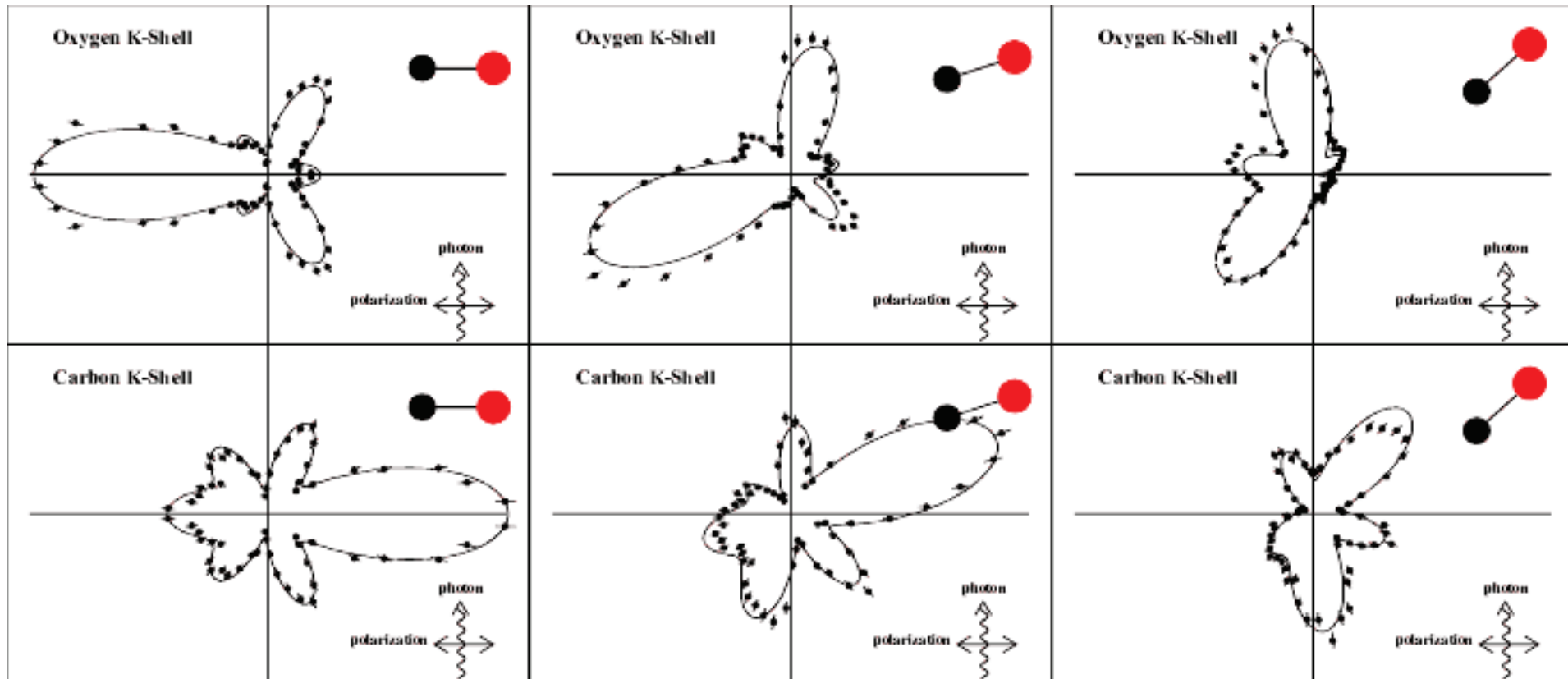
# Reaktionsmikroskop

- Ein Reaktionsmikroskop (COLTRIMS) stellt ein sehr spezielles Mikroskop dar, um Reaktionen in Atomen und Molekülen vollständig, kinematisch zu messen
- Koinzidenter Nachweis aller Teilchen (Ionen, Elektronen), die bei dem Ionisationsprozeß entstehen
- Kombination aus einem Flugzeitelektronen und Flugzeitionenspektrometer
- Nachweis des Auftreffortes und der Flugzeit der Teilchen erforderlich
- Rückberechnung des Anfangsimpulses und der Anfangsenergie der Teilchen möglich
- Es darf immer nur ein Ionisationsprozeß im Wechselwirkungsvolumen auftreten

# Reaktionsmikroskop – Prinzip



# Reaktionsmikroskop – Beispiel





# Teilchennachweis

- Wie können die entstehenden Elektronen, Ionen oder auch Photonen nachgewiesen werden ?
- Abhängig vom Experiment müssen einzelne Teilchen oder aber sehr viele gemessen werden
- Bis auf Photonen sind die Teilchen geladen → Strommessung
- Bei vielen Teilchen kann eine Strommessung mit einem modernen Elektrometer (Picoamperemeter) vorgenommen werden. Ströme bis ca. 10 fA ( $10^5$  Elektronen) können gemessen werden, jedoch ist hier keine Zeitauflösung möglich (keine TOF's !)
- Bei einzelnen Teilchen muß eine Verstärkung erfolgen

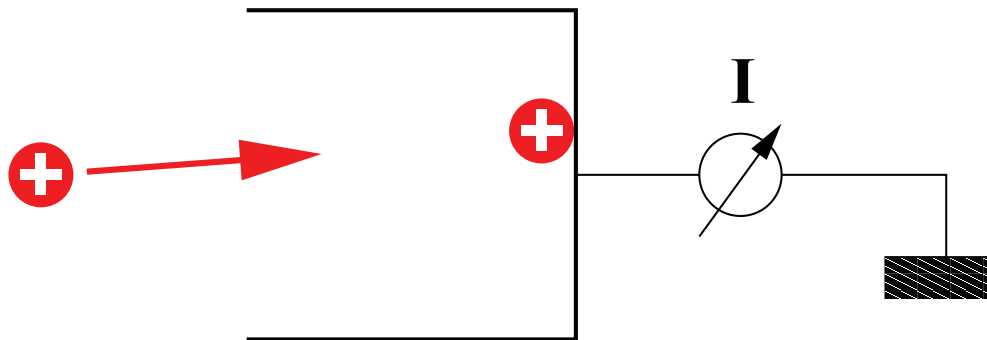
# Detektoren

## Typische Teilchendetektoren

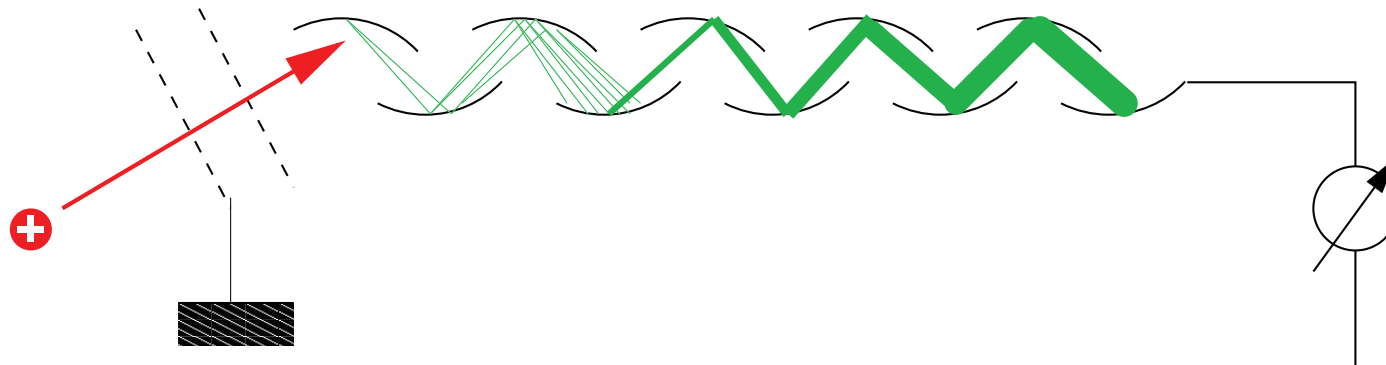
- Auffängerdetektor
- Sekundärelektronenvervielfacher
- Channeltron
- Mikrokanalplatte (Micro channel plate MCP)
- Konversionselektrode
- Delay Line-Detektor

# Auffängerdetektor

- Einfachste Form des Nachweises
- Häufig wird eine Ausführung als *Faraday Becher* verwendet
- Mit diesen Detektoren können nur “viele” Teilchen nachgewiesen werden



# Sekundärelektronenvervielfacher

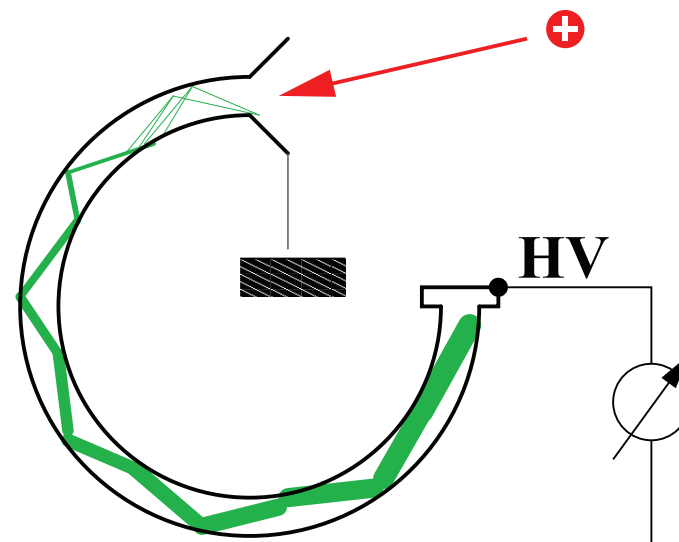


- Das einfallende Ion, Elektron oder auch Photon löst aus einer ersten Dynode Elektronen aus
- Die erste Dynode kann entsprechend beschichtet werden, daß sie besonders empfindlich auf Photonen (Photomultiplier) oder aber geladene Teilchen ist
- Die entstehenden Elektronen werden in einem elektrischen Feld zur nächsten Dynode beschleunigt und lösen dort weitere Elektronen aus . . .
- Bei  $n$  Dynoden ergibt sich typisch eine Verstärkung von  $3^n$
- Typische Verstärkungen sind  $10^6 - 10^9$

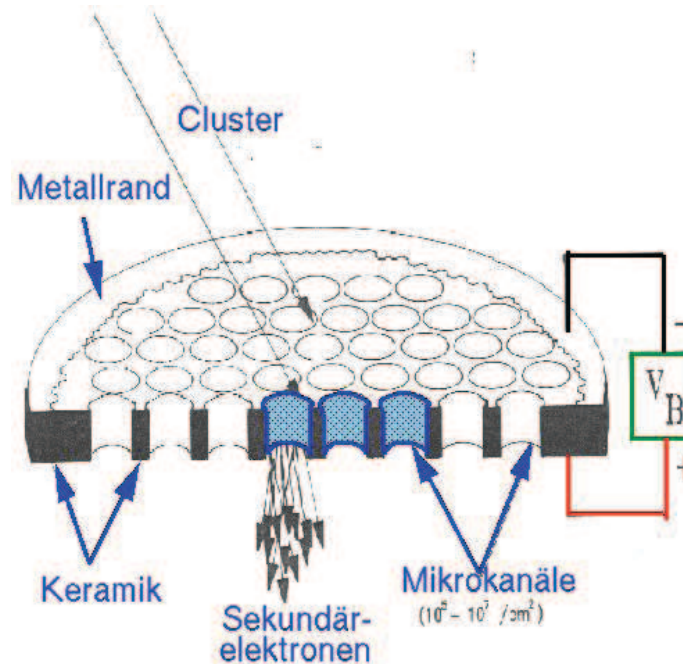
# Channeltron

- Ein Channeltron ist eine spezielle Version eines Sekundärelektronenvervielfacher
- Dieses besteht nicht aus diskreten Dynoden, sondern aus einem Rohr, das mit einer hochohmigen Beschichtung versehen ist, aus der Sekundärelektronen emittiert werden können.
- Widerstand eines Channeltron liegt typisch bei  $10^9 \Omega$ , Typische Hochspannungen sind 3 kV

- Die Verstärkung liegt bei etwa  $10^8$
- Channeltrons sind i.A. recht robust und "preiswert"

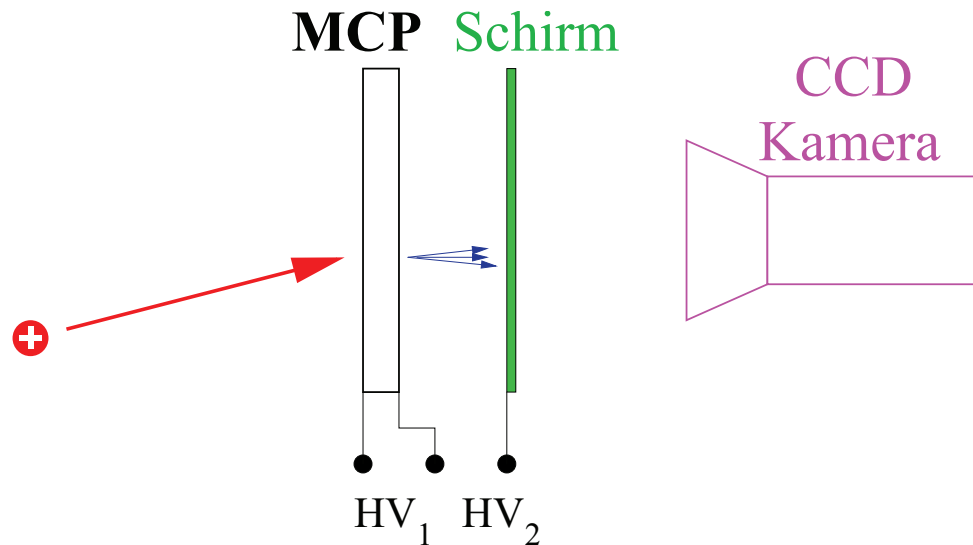


# Micro channel plate – MCP



- Ein MCP kann als eine parallele Anordnung vieler Channeltrons angesehen werden. Dadurch wird eine große, empfindliche Oberfläche erreicht
- MCP's werden häufig hintereinander geschaltet, um eine größere Verstärkung zu erzielen

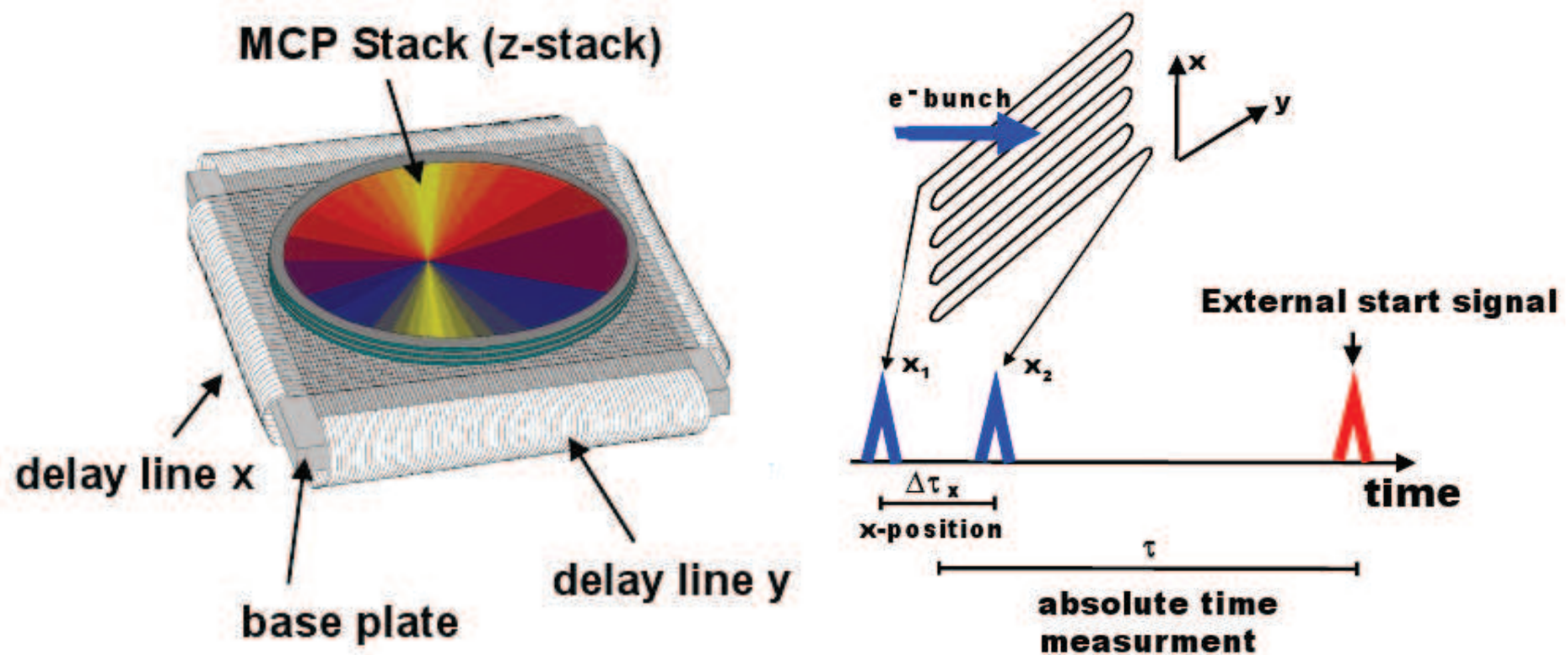
# Konversionselektrode



- Der von einem MCP erzeugte Elektronenschauer kann mittels einer weiteren Hochspannung  $HV_2$  auf einen schnellen Phosphorschirm beschleunigt werden.
- Ein nachgewiesenes Teilchen erzeugt einen Leuchtpunkt auf dem Schirm, der mit einer CCD Kamera nachgewiesen werden kann
- Es ist somit ein ortsempfindlicher Nachweis der Ionen möglich
- Prinzip des Nachtsichtgerätes
- Nachteil: keine gute Zeitauflösung durch die CCD Kamera

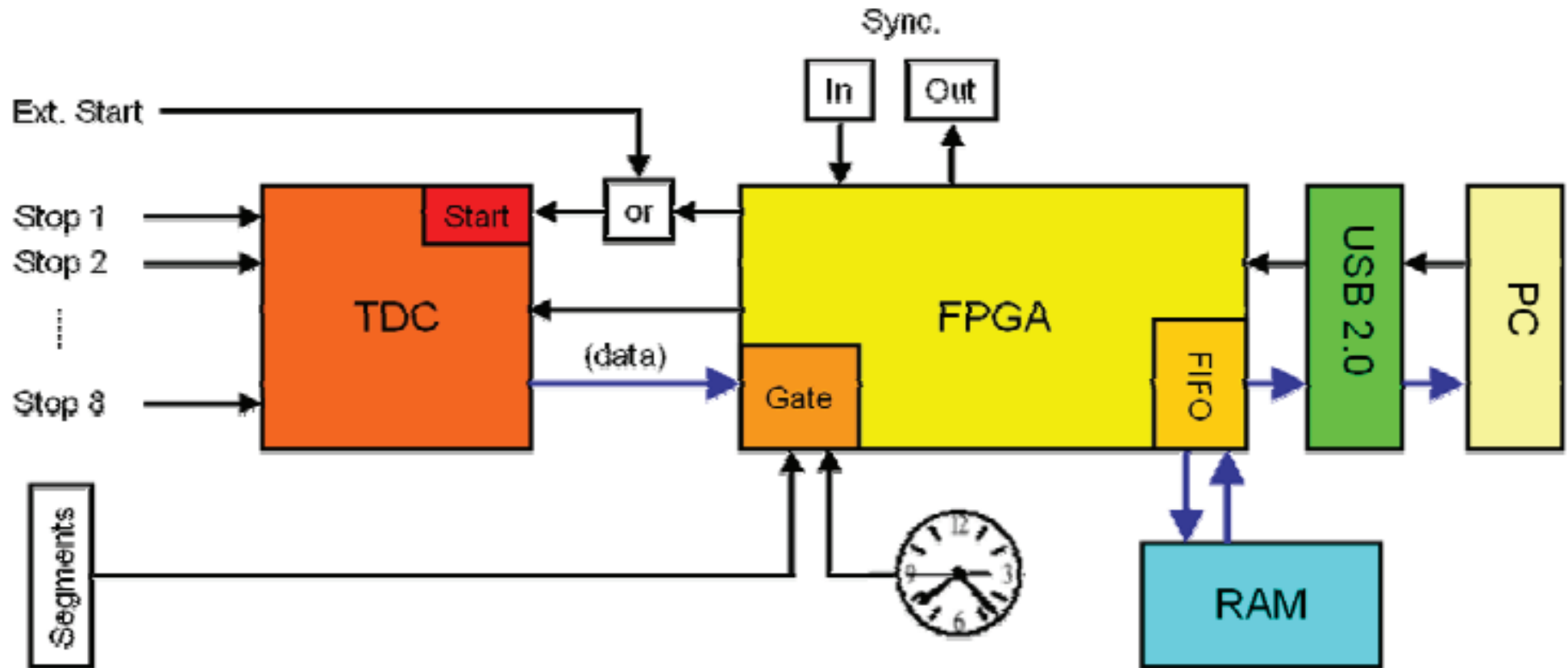
# Delay Line-Detektor

- Für, z.B., ein Reaktionsmikroskop wird ein sehr schneller, koinzidenzfähiger 2D Detektor benötigt
- Delay Line Detektoren

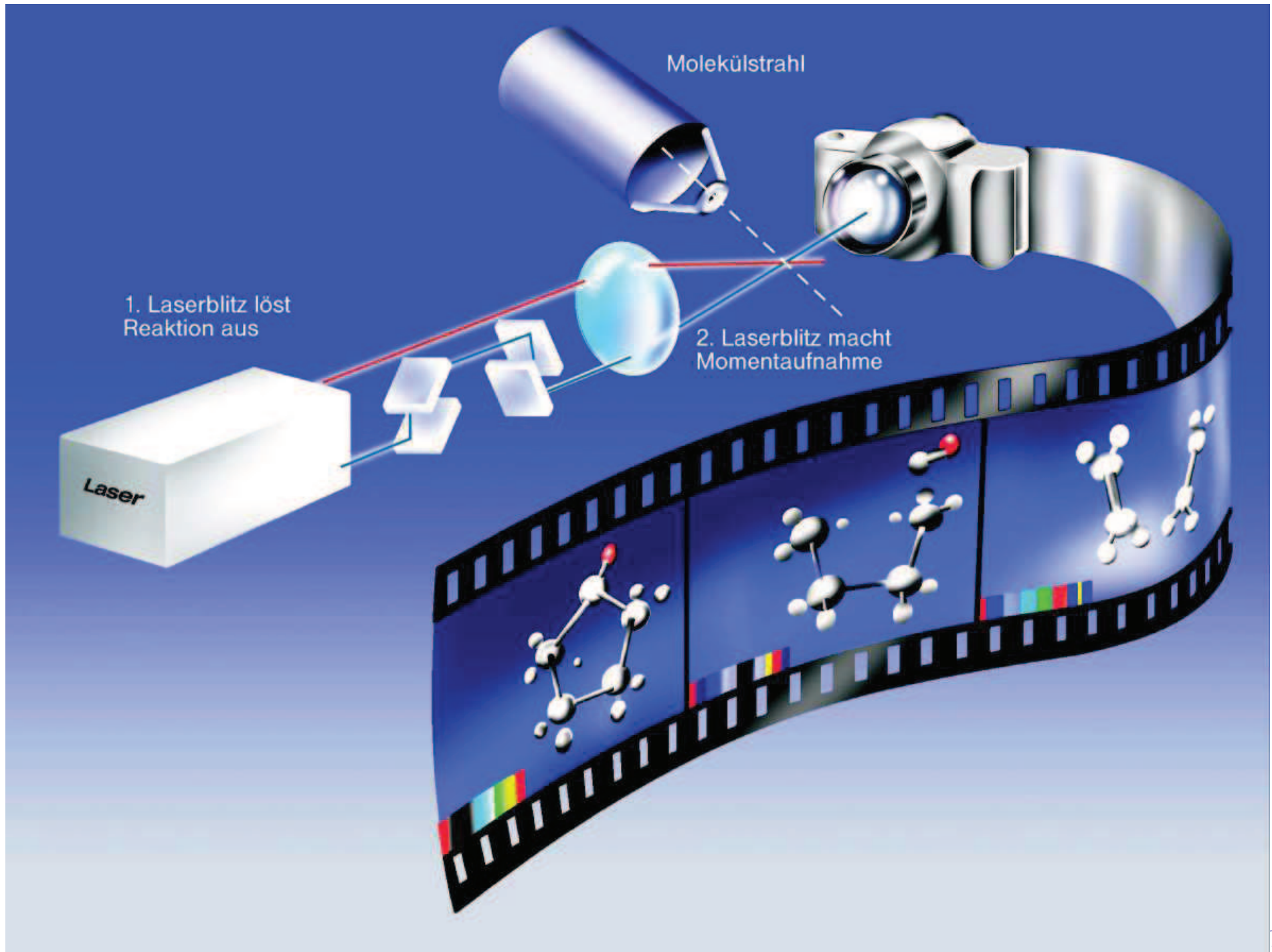




# Delay Line-Detektor – Elektronik



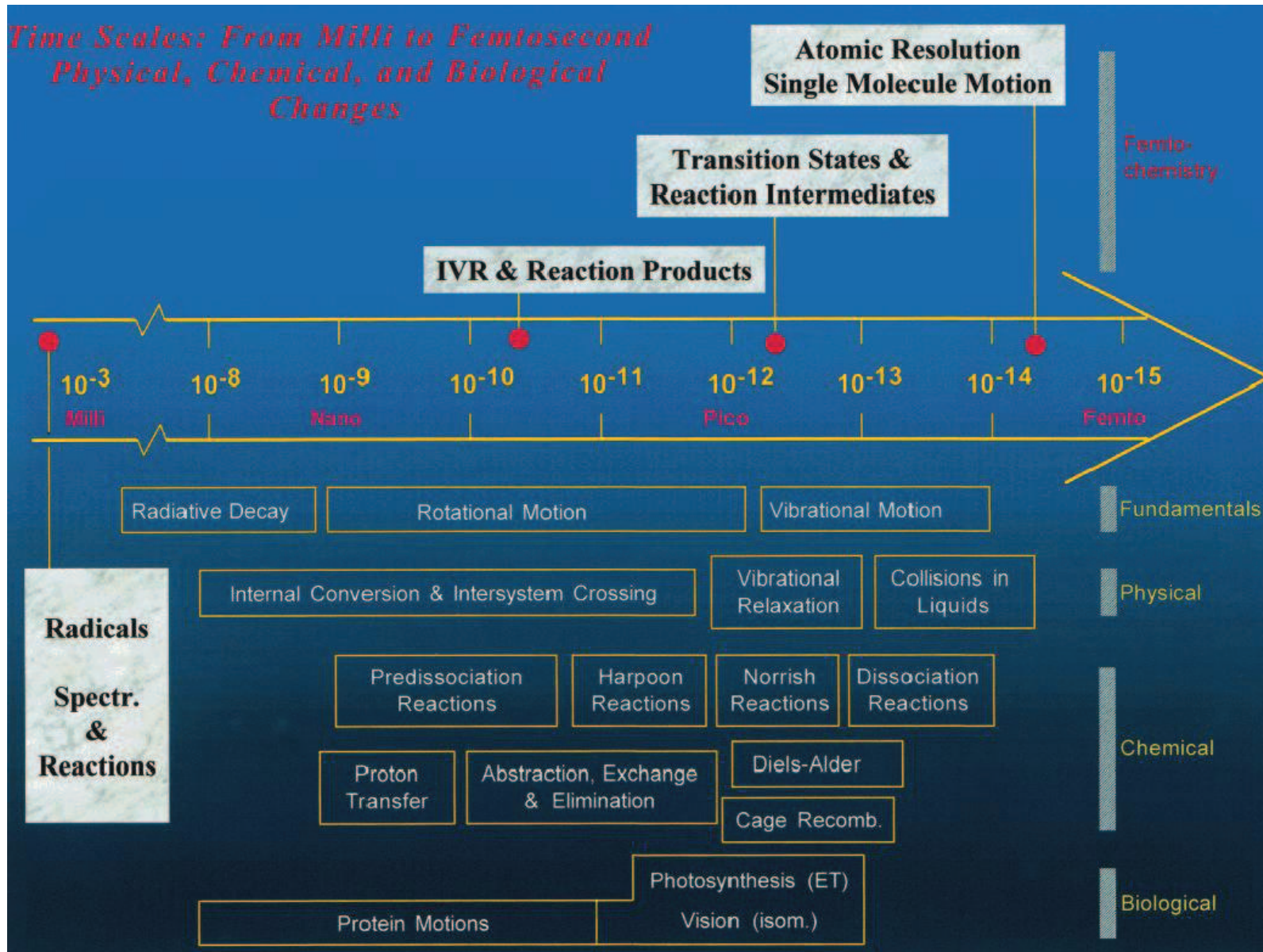
- Prinzip der Datenaufnahme mit einem Delay-Line Detektor der Firma Surface Concept



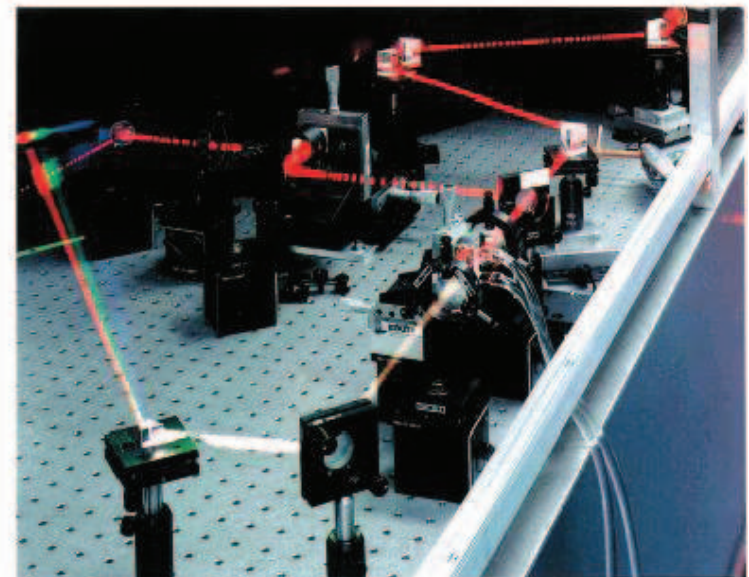
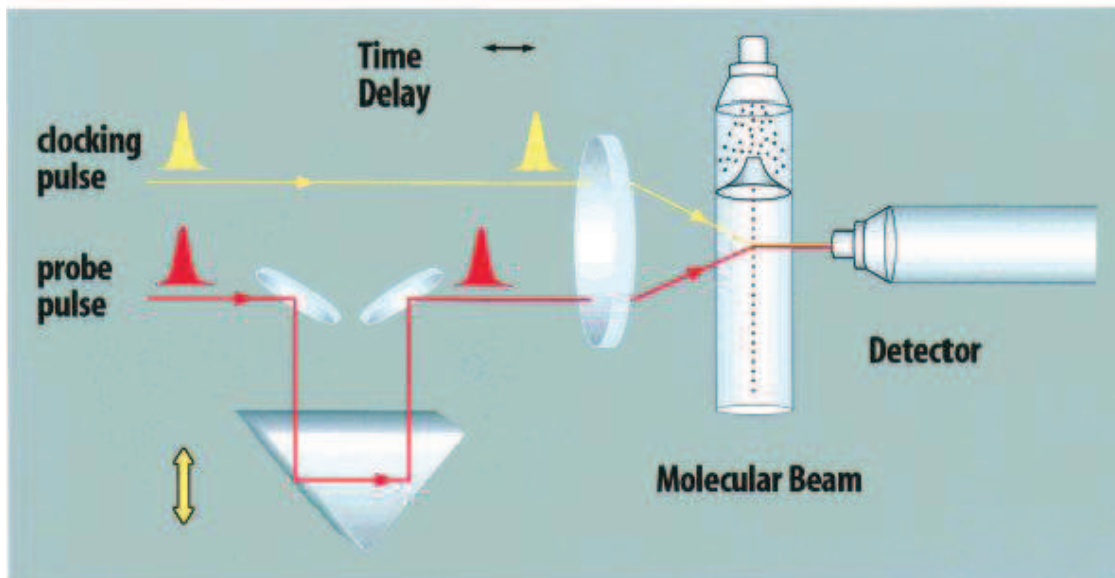
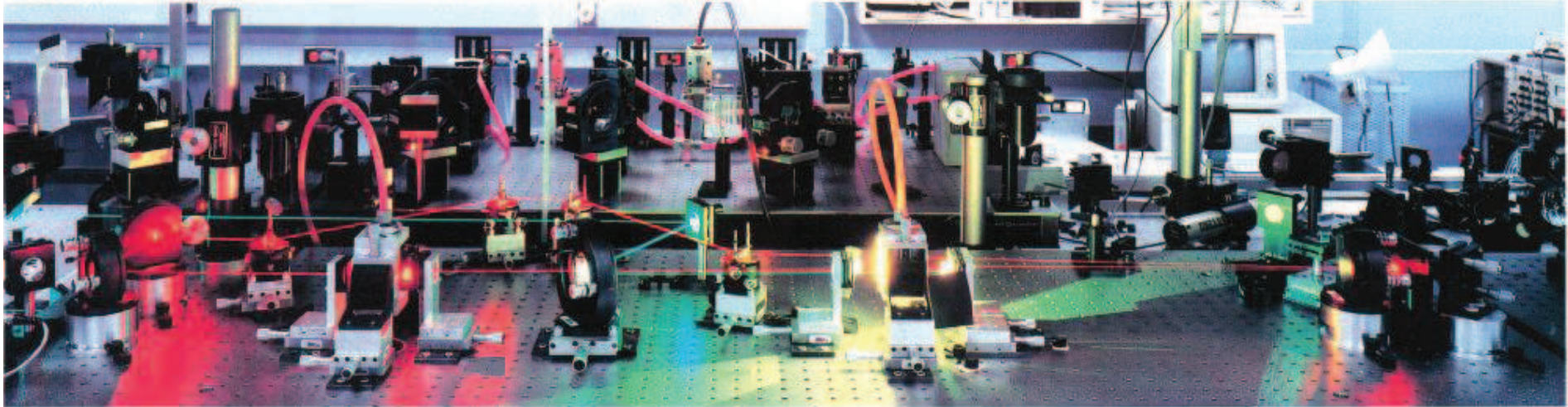
# Pump-Probe Spektroskopie

- Untersuchung dynamischer Prozesse, die auf einer Zeitskala von  $10^{-10}$  –  $10^{-16}$  s ablaufen
- ⇒ Chemische Reaktionen
- Nobel-Preis 1999 für die Entwicklung diese Methode an A. Zewail
  - Nutzung von Lasern mit ultrakurzen Pulsen im ps und fs Bereich

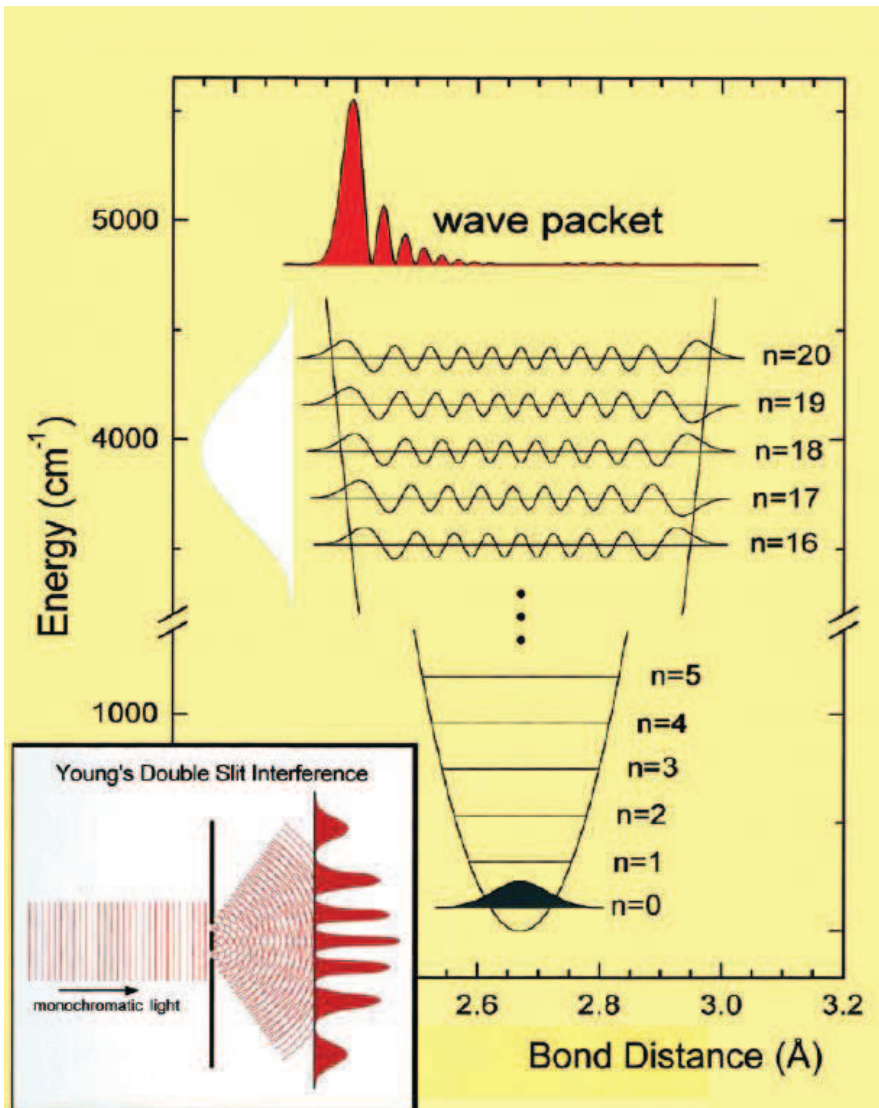
# Pump-Probe Spektroskopie



# Pump-Probe Spektroskopie

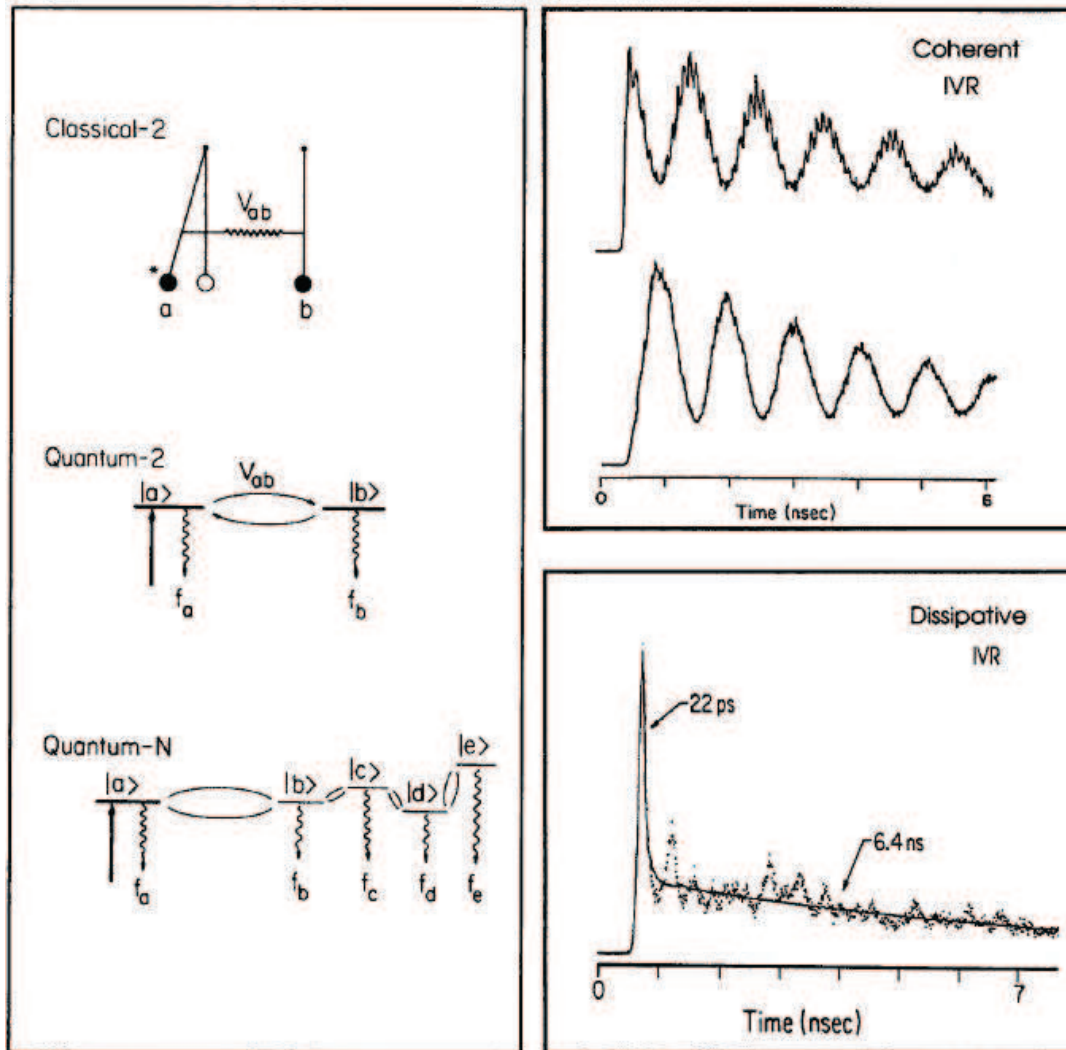


# Pump-Probe Spektroskopie



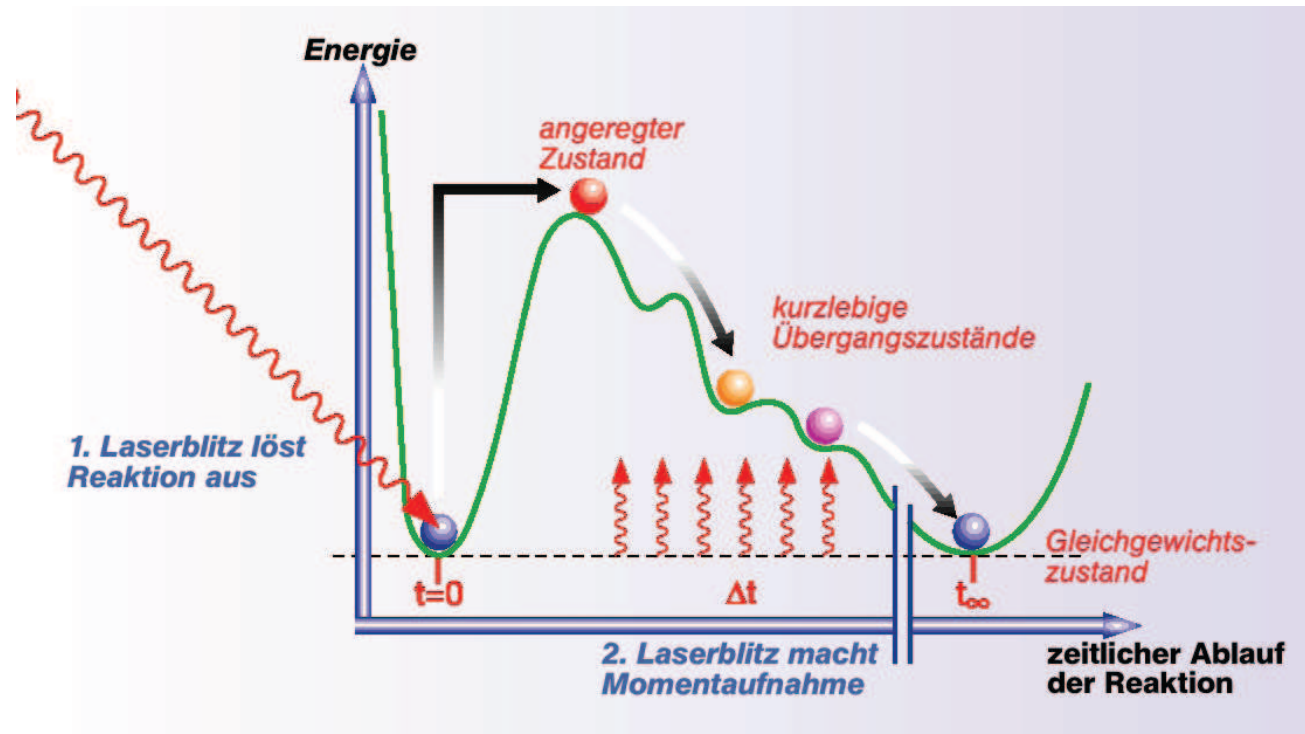
- Anregung eines Wellenpaketes durch kohärente Überlagerung von Eigenzuständen
- Wellenpaket oszilliert in dem Potential

# Pump-Probe Spektroskopie



- Vergleich mit einem klassischen Oszillator
- Quantenmechanisches Analogon

# FEL – Pump-Probe Spektroskopie

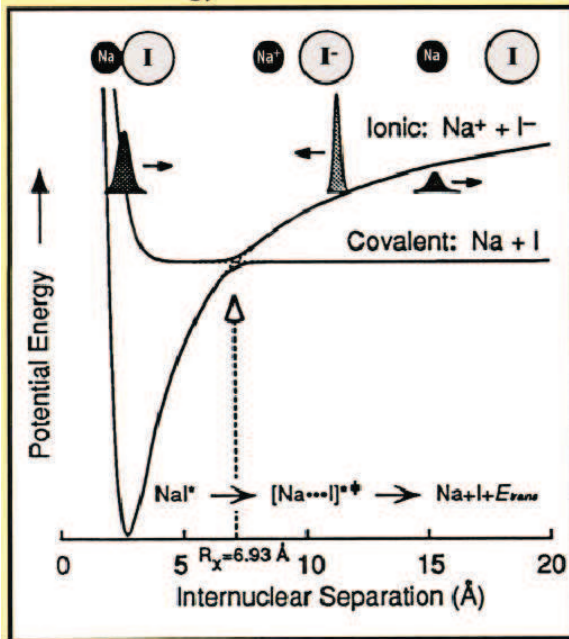


- System wird mit einem ersten Pumpulse angeregt und der Zustand des angeregten mit einem Probepuls nach einer definierten Zeit abgefragt.  
Im optischen Bereich kann eine Zeitauflösung bis zu einigen fs erreicht werden.

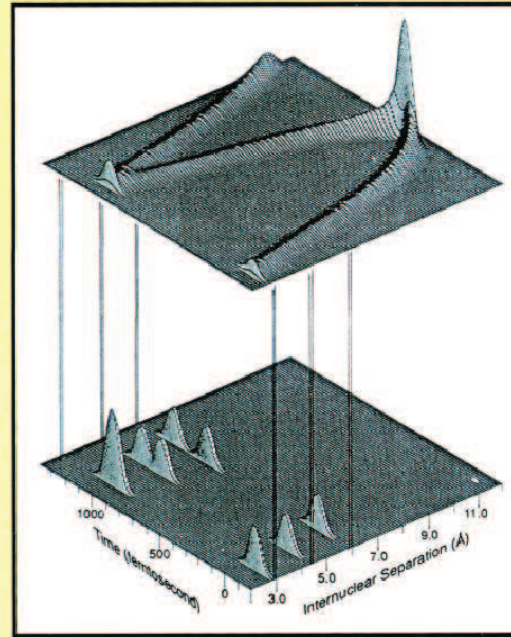


# Pump-Probe Spektroskopie – NaI Molekül

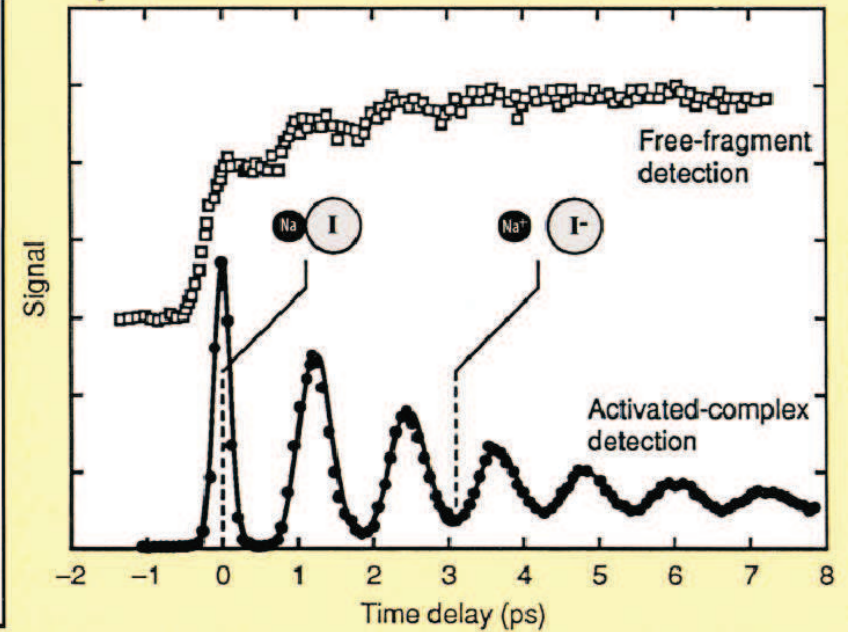
Potential Energy Surfaces



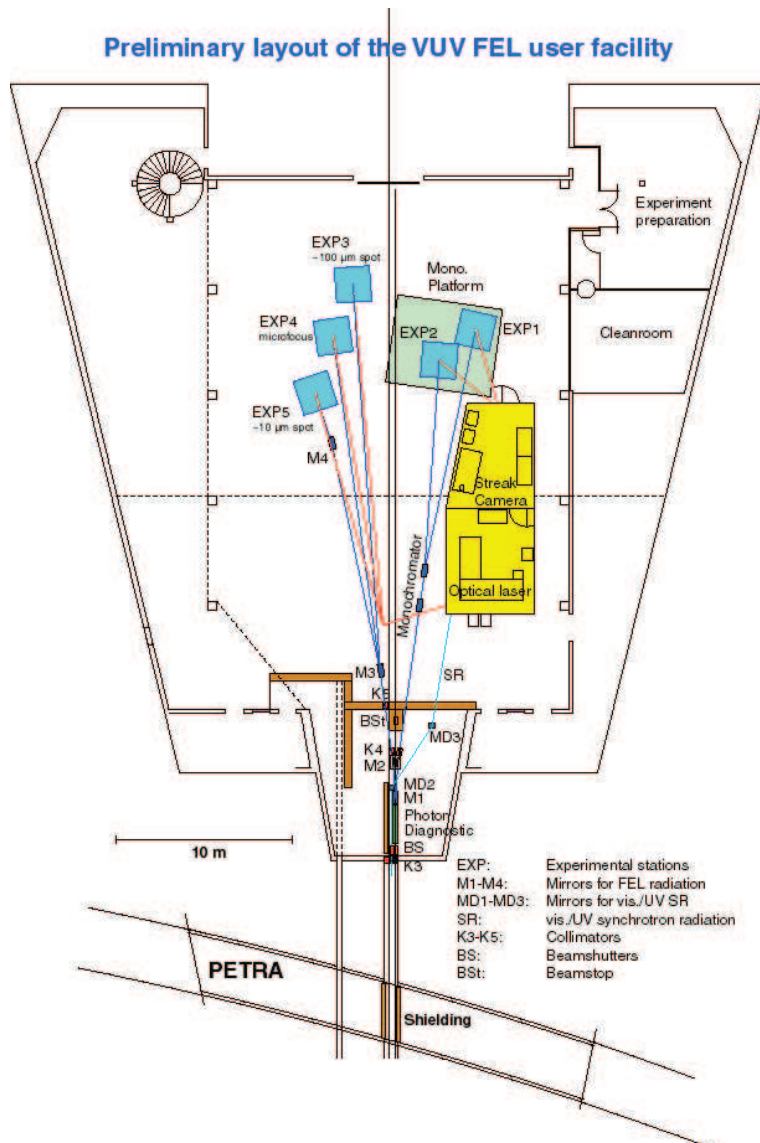
Trajectories R,t



Experimental



# FEL – Pump-Probe Spektroskopie

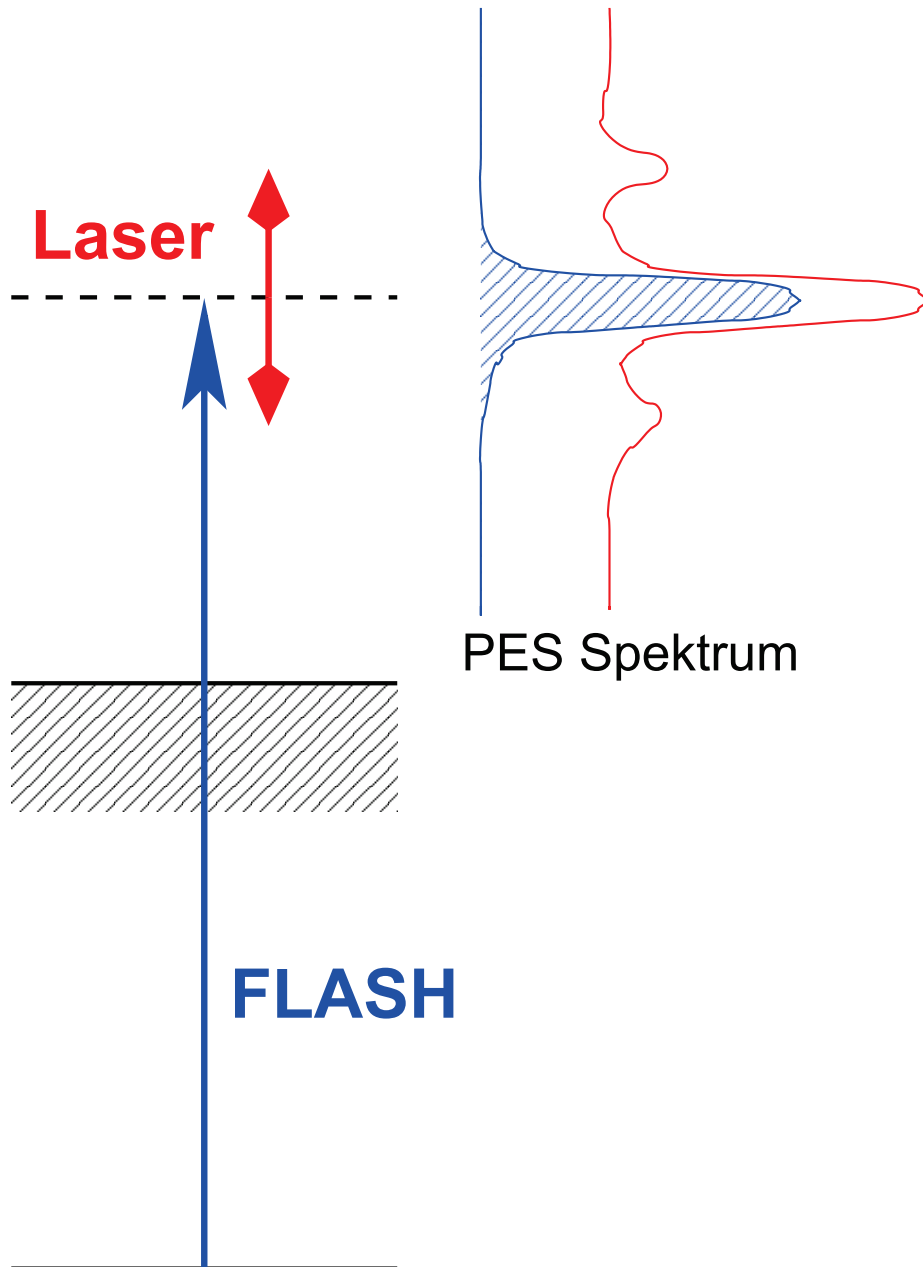


- FLASH hat eine Pulsdauer von ca. 10-100 fs
- Die FLASH Facility stellt einen zum FEL synchronisierten Femtosekundenlaser bereit
- Der fs-Laser ist im sichtbaren (VIS) und infraroten (IR) Bereich begrenzt durchstimmbar
- Pump-Probe Experimente mit XUV und VIS Licht werden möglich
- Für XUV-XUV Pump-Probe Experimente sind XUV Beamsplitter entwickelt worden

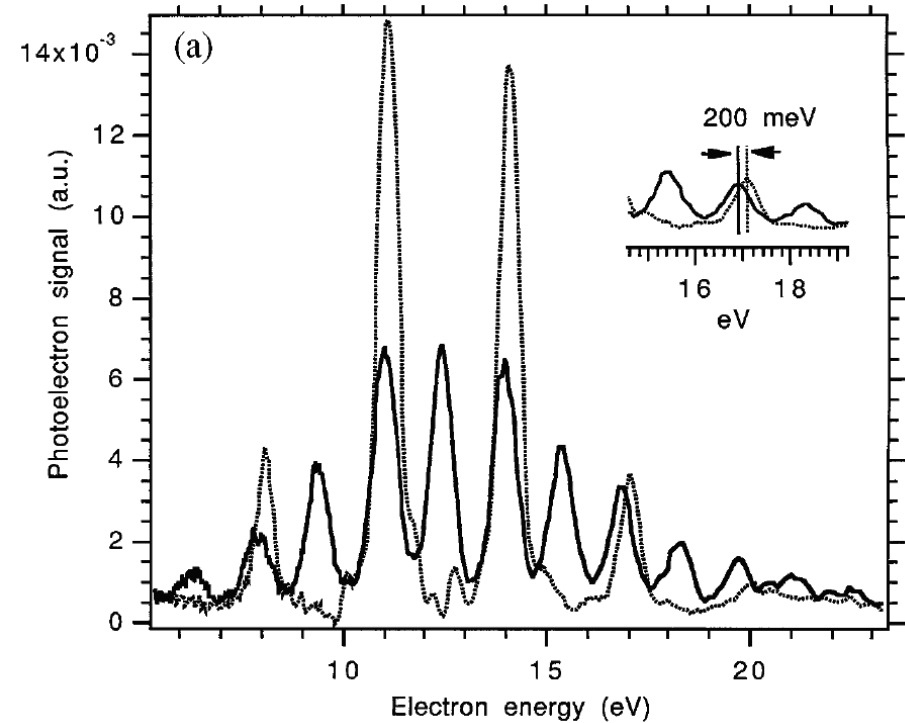
# FEL – Pump-Probe Spektroskopie

- **Problem:** Synchronisation von fs-Laser und FEL und Festlegen des Delays zwischen den Laserpulsen
- Beide verwenden die gleiche Masterclock, aber der FEL hat einen nicht vorhersagbaren Jitter
- Thermische Schwankungen können leicht ein Delay verursachen  
Abstand Elektronengun-Undulatorende:  $> 100$  m  
Abstand Undulatorende-Experiment: ca.  $70$  m  $100$  fs entsprechen  $3 \cdot 10^{-5} \mu\text{m}$
- Eine Entfernung von mehr als  $200$  m müsste somit auf besser als  $10 \mu\text{m}$  konstant gehalten werden.
- Elektronischer Jitter ist dann noch nicht enthalten
- Das Delay kann somit nicht eingestellt werden, wie bei *normalen* Pump-Probe Messungen, sondern muß nachträglich gemessen werden.
- **Wie ?**

# Side Bands



- ATI: Above Threshold Ionization
- Seitenbänder (Site bands) in den Photoelektronenspektren

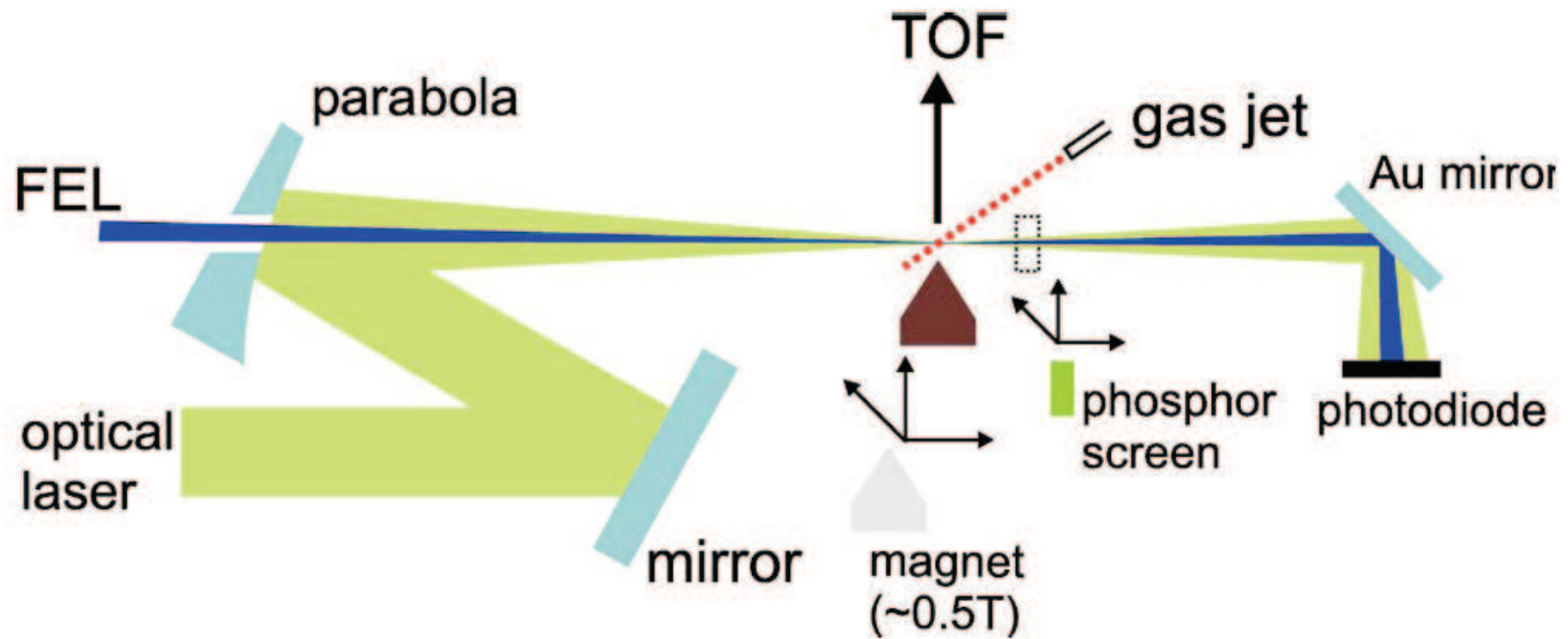


Glover

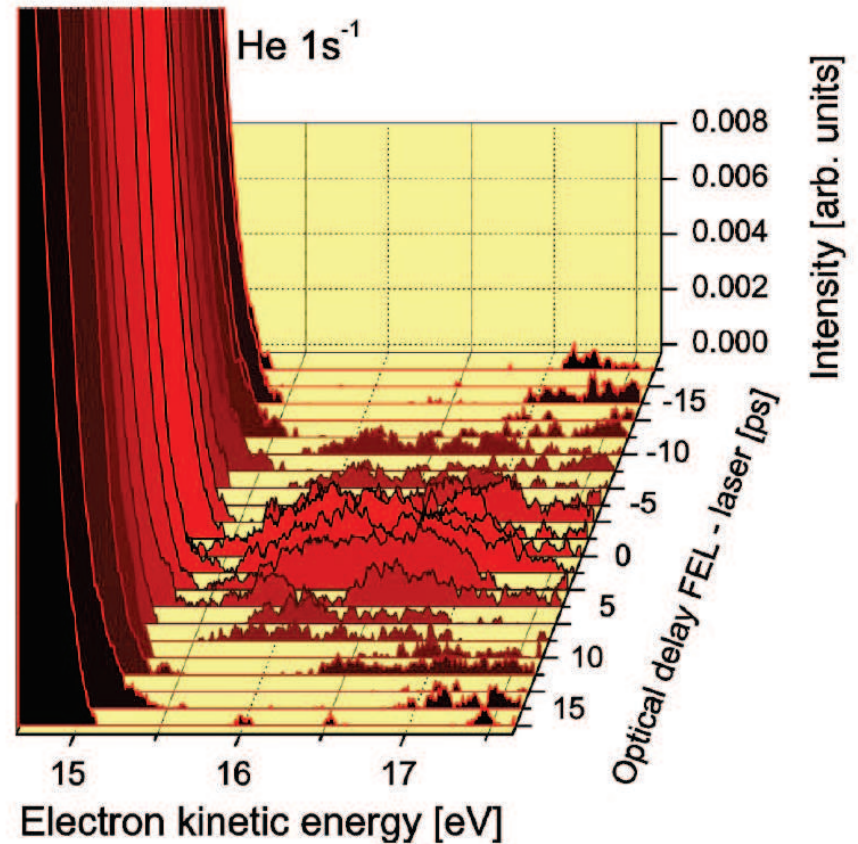
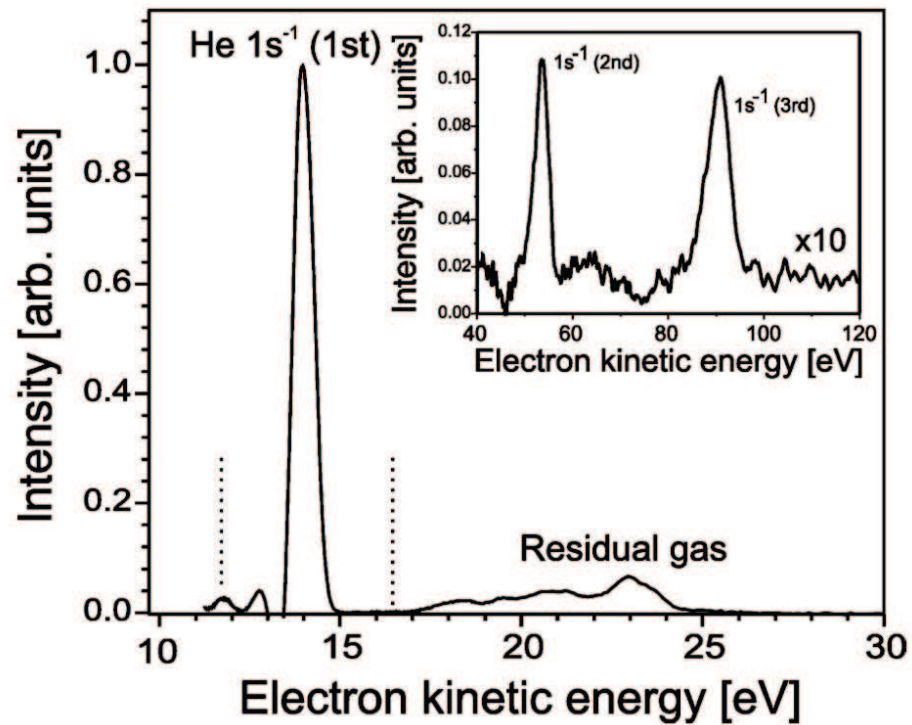
et al., Phys. Rev. Lett. **76**, 2468 (1996)

# FLASH – Side Bands

- Seitenbänder treten nur bei einem Überlapp der FEL und der Laser Strahlung auf
- Finde den Überlapp !



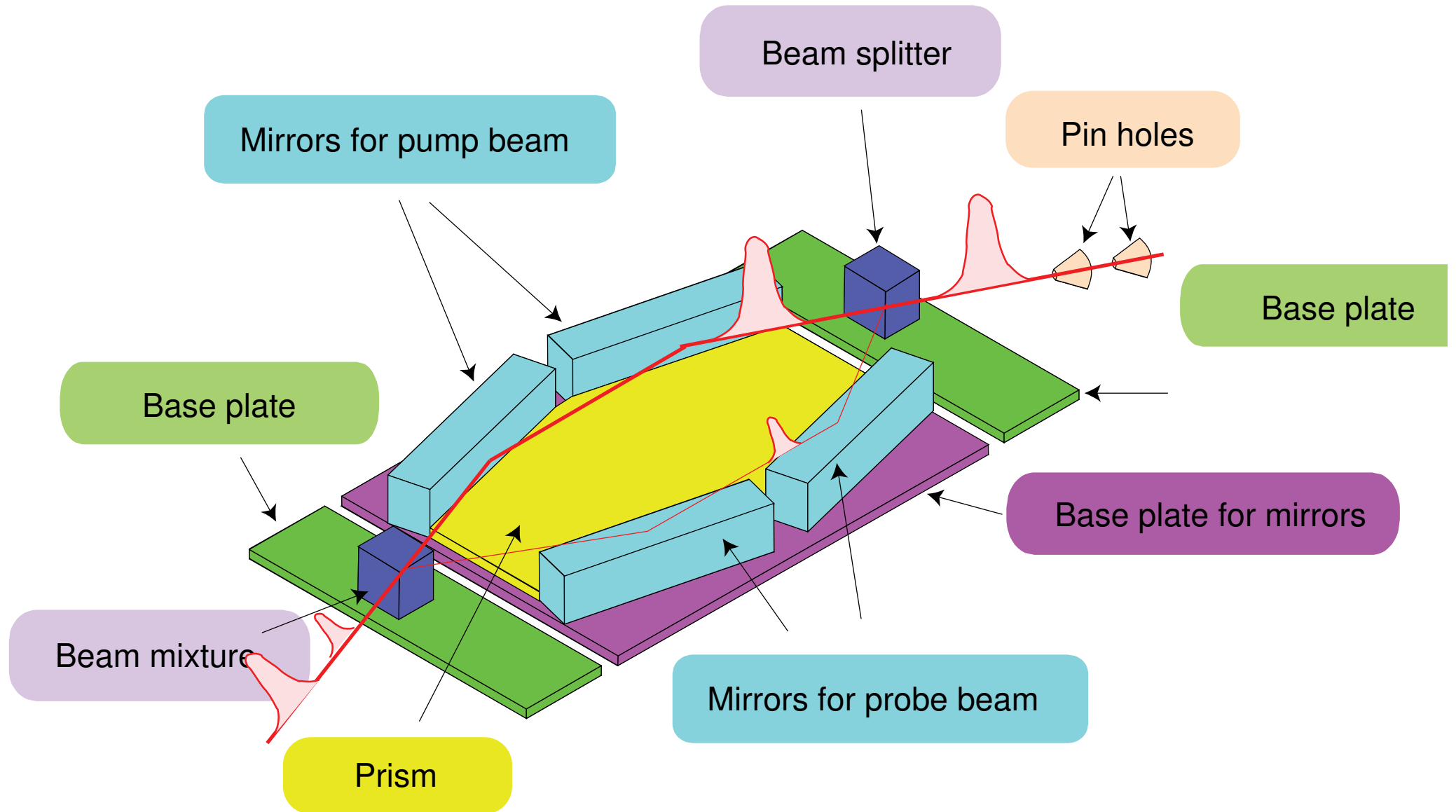
## FLASH – Side Bands



# FEL – Zeitaufgelöste Experimente

- Vorteil der Rumpfniveauanregung am FEL  
Im Idealfall kann bei kleinen Molekülen elementspezifisch der Zustand jedes einzelnen Atoms abgefragt werden.
  - VUV und XUV: elektronischer Zustand
  - Röntgenbereich: geometrische Struktur über Beugung
- An Synchrotrons waren bis jetzt nur Experimente mit ca. 50-100 ps Zeitauflösung möglich
  - Für die allermeisten Prozesse, die untersucht werden sollen, ist das viel zu langsam !
  - Slicing Projekte (ALS Berkeley, BESSY II): zu wenige Photonen
- Was wird nun am FEL möglich sein ?
  - Zeitaufgelöste Röntgenbeugung
  - Wie laufen chemische Reaktionen ab
  - Dynamik des Photoionisationsprozesses
  - Dynamik magnetischer Systeme

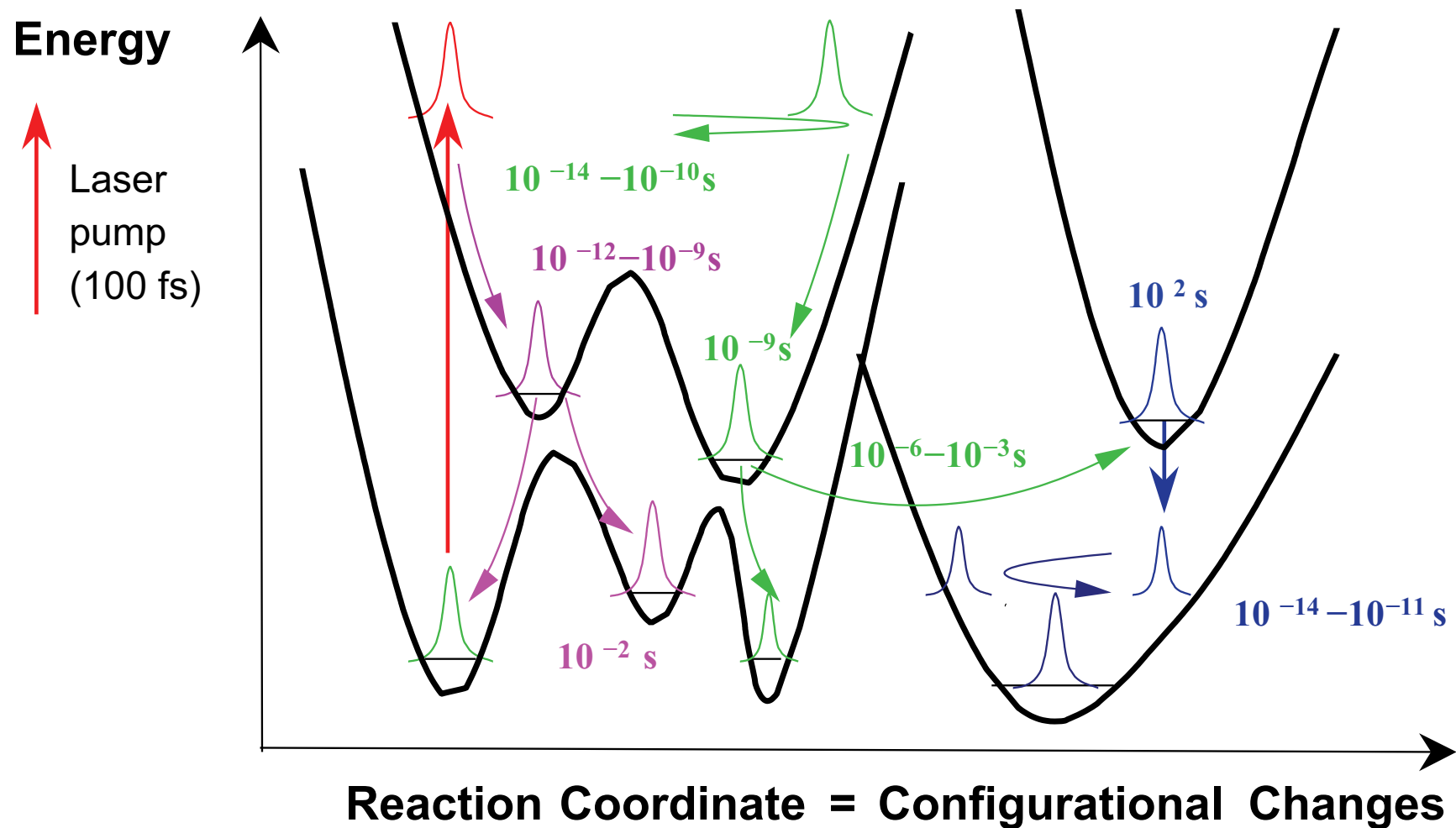
# XUV Beamsplitter





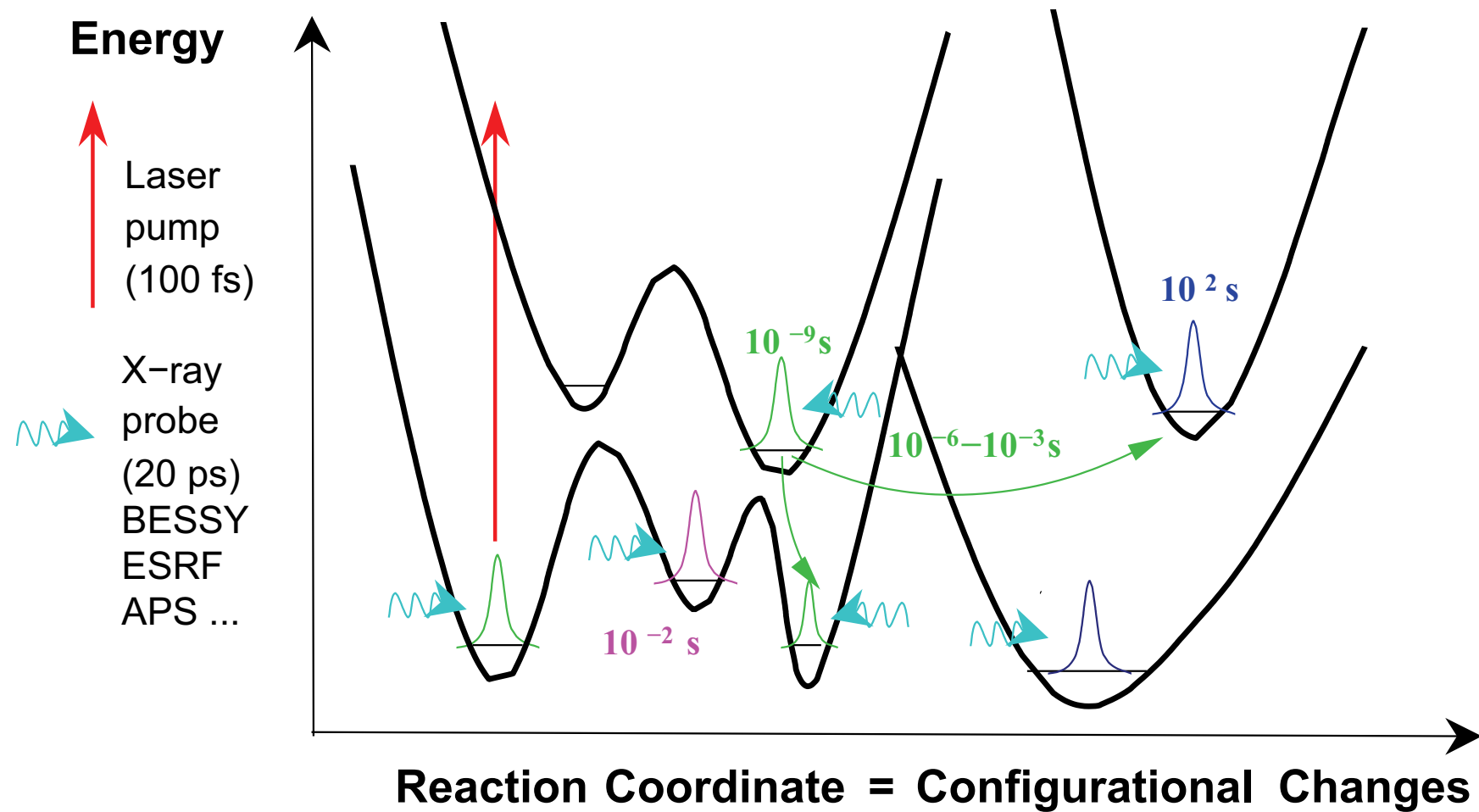
# FEL – Chemische Reaktionen

## In Situ Characterisation of a Chemical Reaction



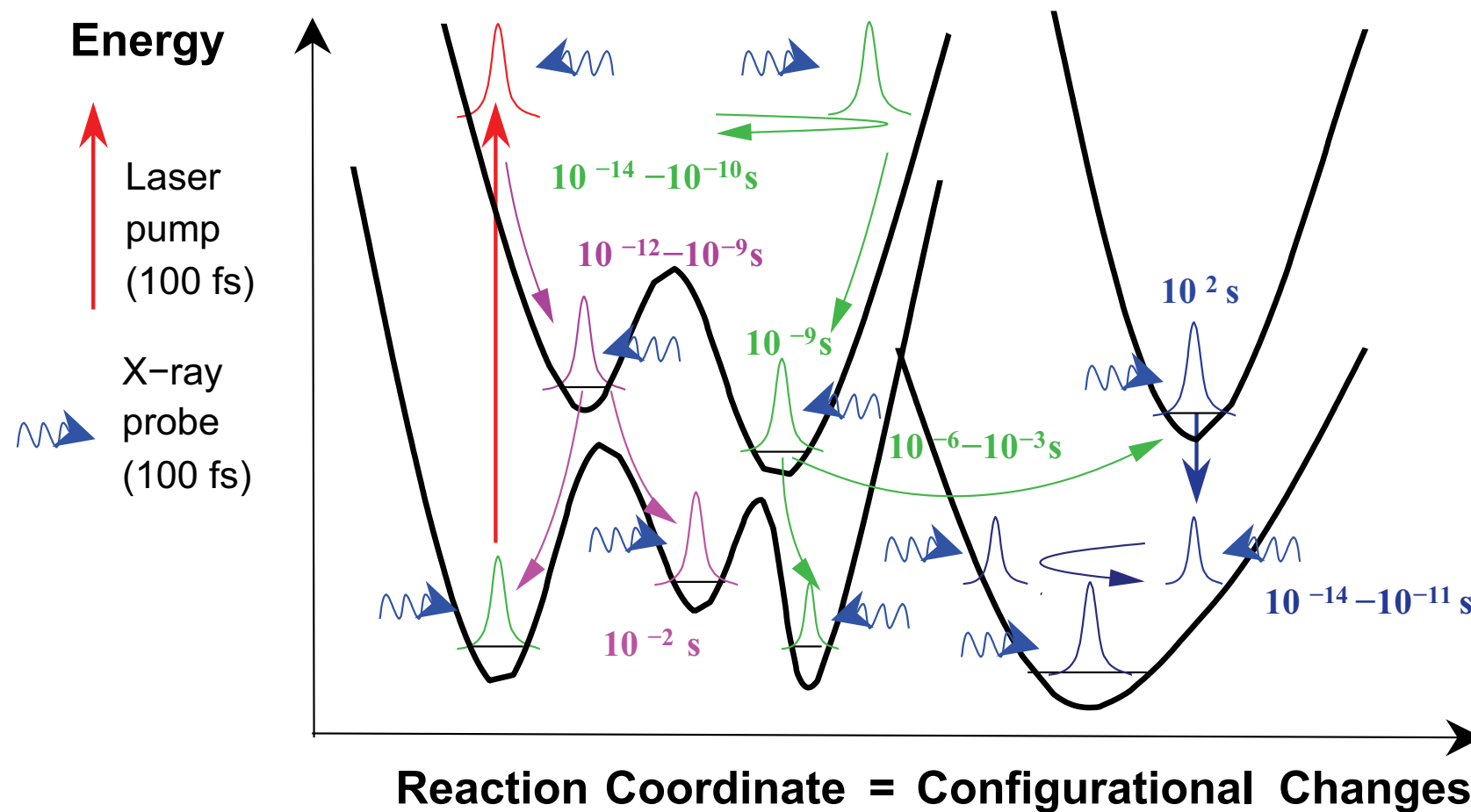
# FEL – Chemische Reaktionen

## In Situ Characterisation.... as seen by SR pulsed

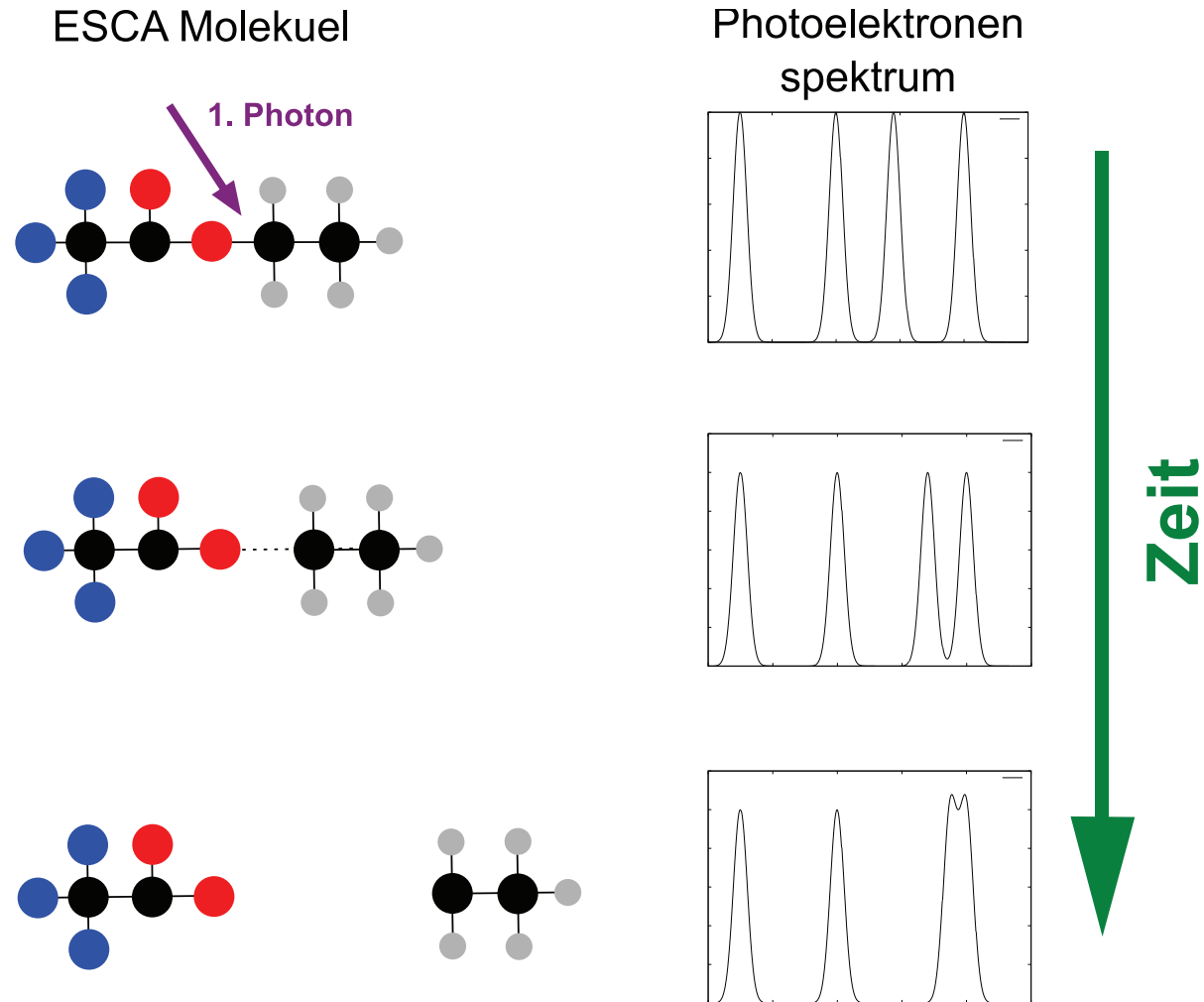


# FEL – Chemische Reaktionen

## In Situ Characterisation.... as seen by X-ray puls



# Zeitaufgelöstes ESCA



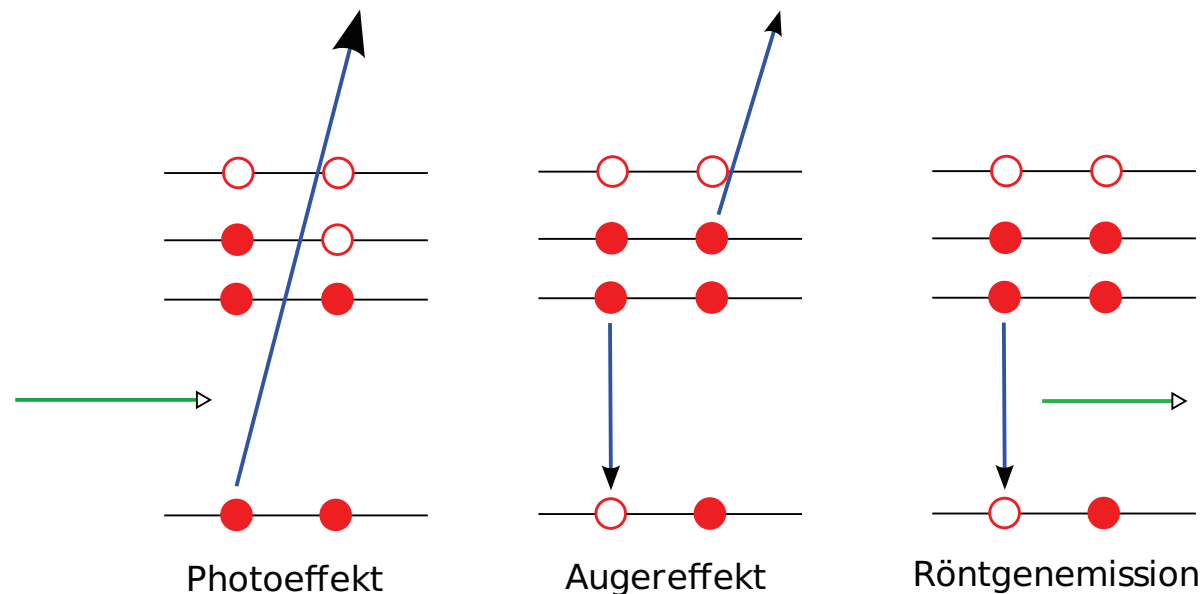
# Theorie der Photoionisation

# Photoionisation

## Wechselwirkung von Röntgenstrahlung mit Materie

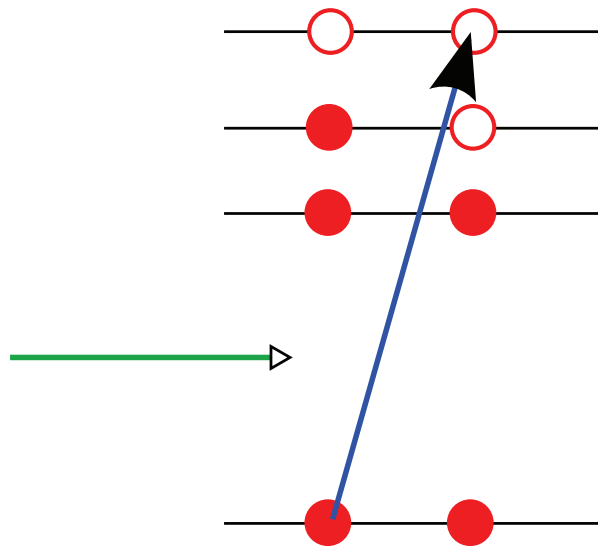
### Prozesse

- Photoeffekt (primär)  $A + \hbar\omega \rightarrow A^+ + e^-$
- Auger Effekt (sekundär)  $A^* \rightarrow A^+ + e^-$
- Röntgenemission (sekundär)  $A^* \rightarrow A + \hbar\omega$



# Photoionisation – XAS

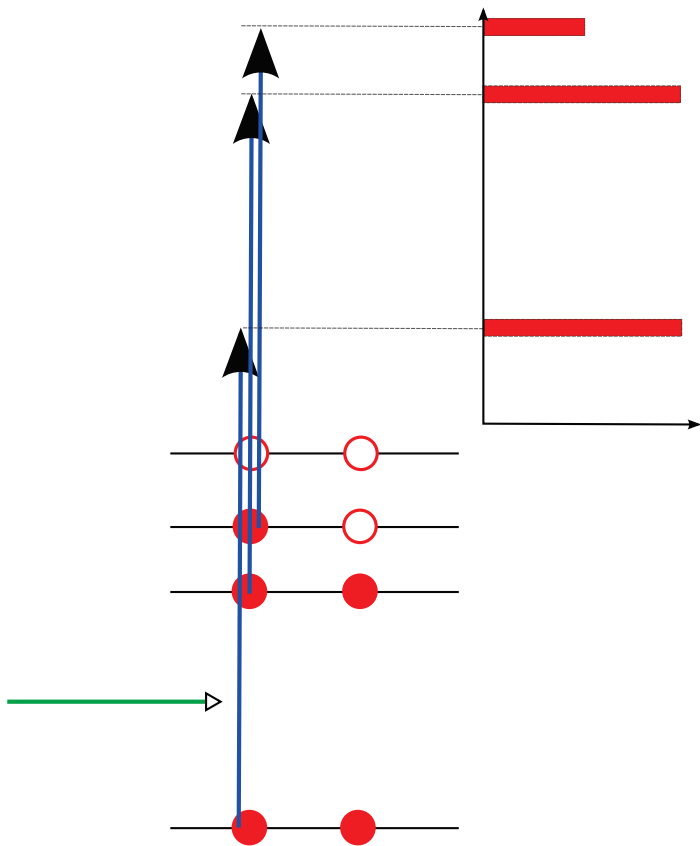
- XAS – X-ray Absorption-, Röntgenabsorption-Spektroskopie
- Anregung eines Elektrons aus einem Rumpfniveau in **unbesetzte** Zustände
- XAS liefert somit Aussagen über die unbesetzten Zustände



- Anregungsenergie  $\hbar\omega$  muß der Energiedifferenz der Zustände entsprechen
- Durchstimmen der Photonenenergie ist erforderlich

- NEXAFS (XANES): Near Edge X-ray absorption fine structure: Anregung im Bereich von Absorptionskanten
- EXAFS: Extended X-ray absorption fine structure: Anregung *weit* oberhalb von Kanten

# Photoionisation – PES



- PES – Photoelectron Spectroscopy
- Anregung eines Elektrons aus einem **besetzten** Zustand
- Messung der kinetischen Energie des Elektrons

$$E_{kin} = \hbar\omega - E_{bind}$$

- Abbildung der elektronischen Zustandsdichte DOS des Systems (Atom, Molekül, Festkörper)



# Photoionisation – PES

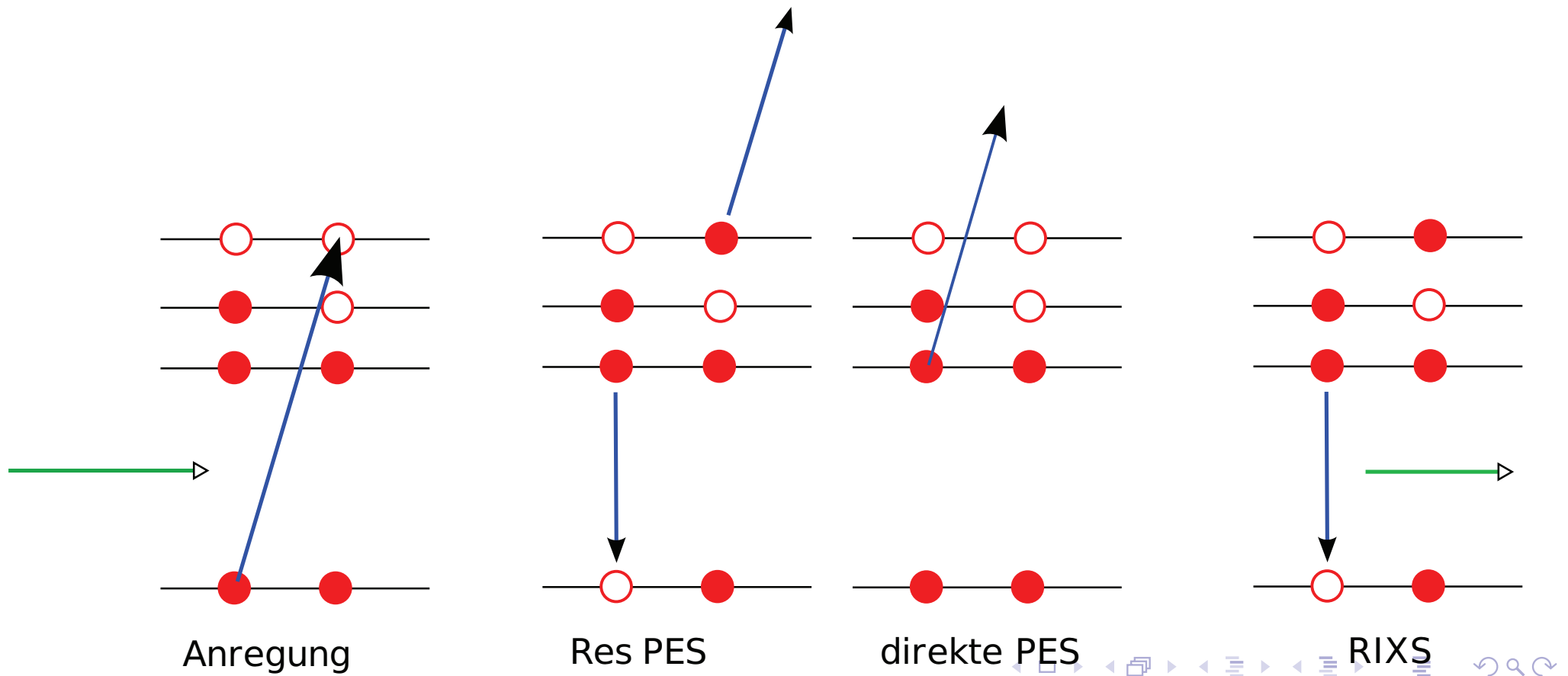
- **UPS** und **XPS**: Ultraviolet PES und X-ray PES
- **UPS** mit  $\hbar\omega < 100$  eV
- **XPS** mit  $\hbar\omega > 100$  eV
- **ARPES** – Angular Resolved PES - Winkel aufgelöste Photoelektronenspektroskopie  
Unter welchem Winkel werden die Photoelektronen von dem System emittiert.

# Photoionisation – XES

- XES – X-ray emission spectroscopy - Röntgenfluoreszenzspektroskopie
- Anregung eines Elektrons aus einem besetzten Zustand, Auffüllen des Rumpflochs durch ein Elektron und Nachweis des dabei emittierten Photons
- Ähnlicher Prozeß, wie der Auger Prozeß, bei dem jedoch kein Elektron emittiert wird
- Liefert wie PES Informationen über die besetzten Zustände, jedoch ist der Endzustand des Prozesses neutral und nicht wie im Fall der PES geladen
- Im weichen Röntgenbereich hat die Röntgenemission nur eine Wahrscheinlichkeit von 0.1-1% gegenüber der Photoelektronenemission

# Photoionisation – Resonante Methoden

- Resonante Anregung eines Rumpfelektrons in einen unbesetzten Zustand und nachfolgende Emission eines Elektrons oder Photons
- Großer Anregungswirkungsquerschnitt in Resonanzen



# NEXAFS

= Near Edge X-ray Absorption Fine Structure

Spektroskopie der unbesetzten  
Zustände

→ elektronisch Struktur

Elementspezifisch chemische Sonde

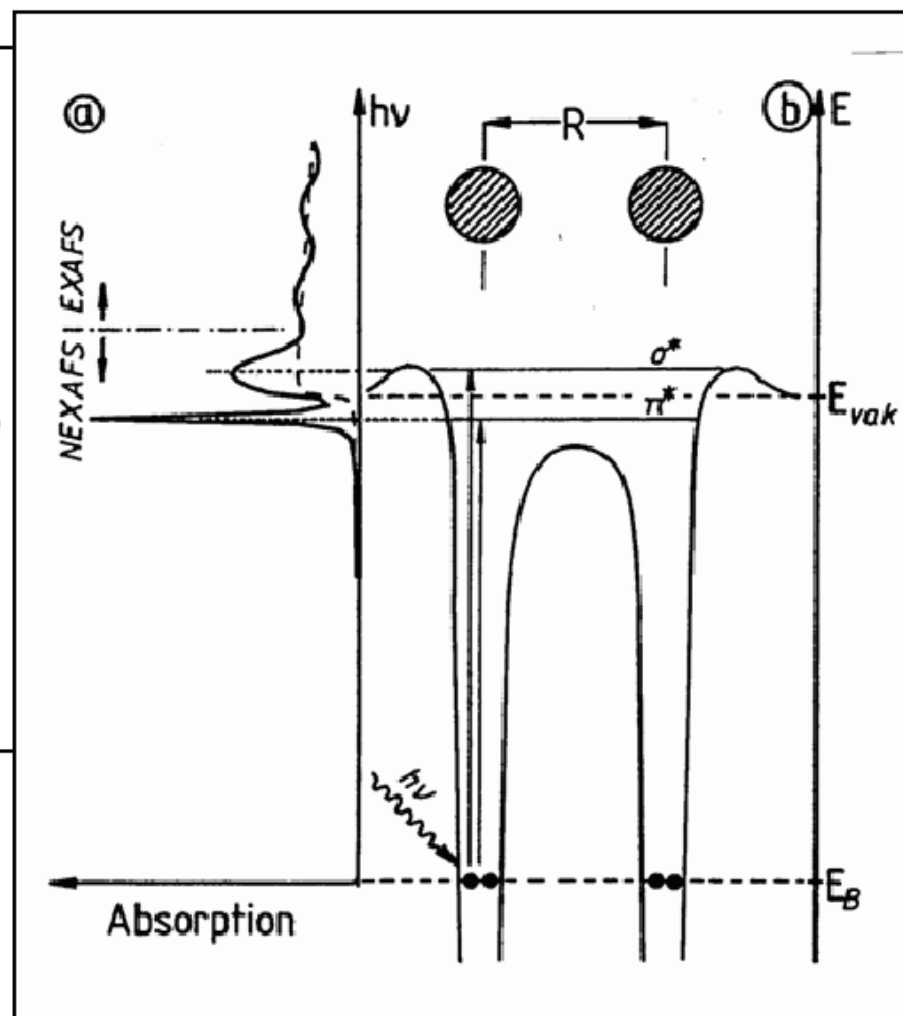
→ lokale Binding

Polarisationsabhängigkeit

→ Molekülorientierung

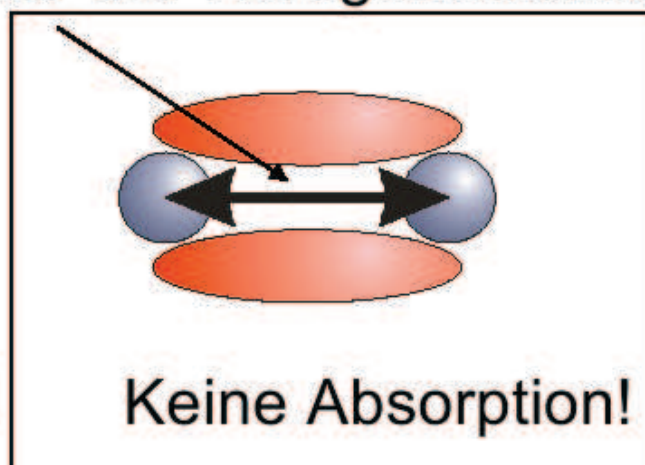
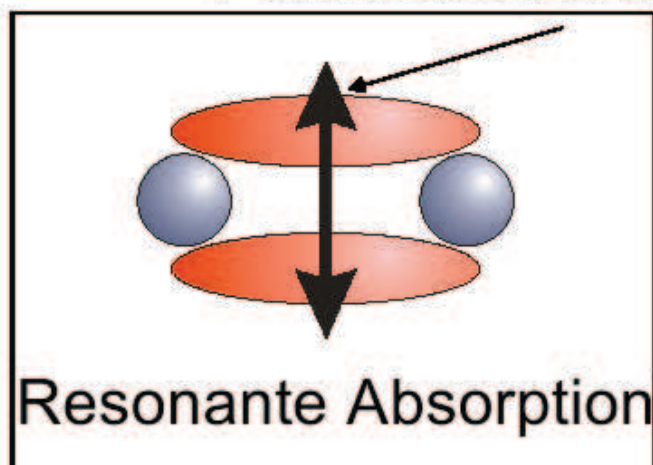
$$W_{if} = |\langle f | \vec{e} \cdot \hat{p} | i \rangle|^2 \cdot \rho(f)$$

„Fermi's goldene Regel“

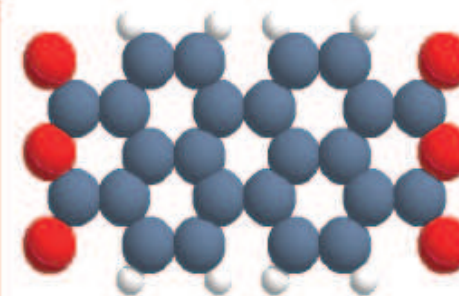
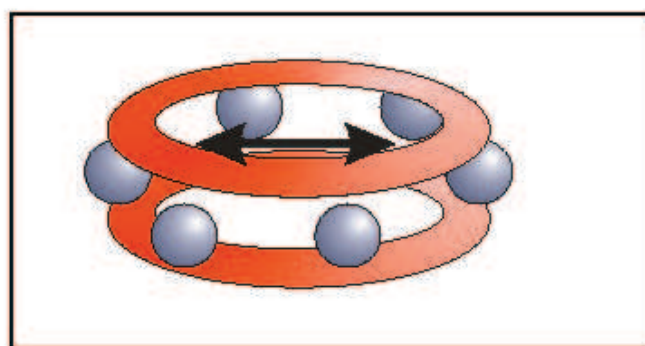
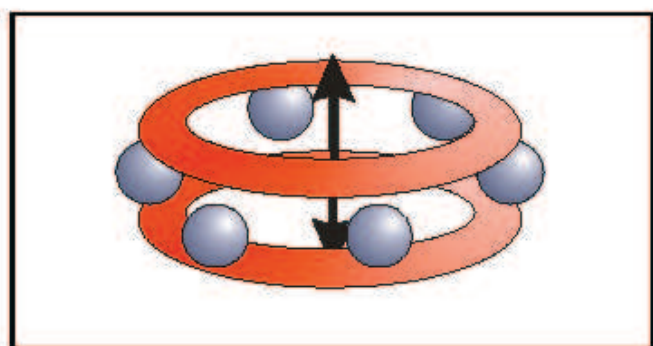


# Polarisation

## Polarisationsvektor der Röntgenstrahlung

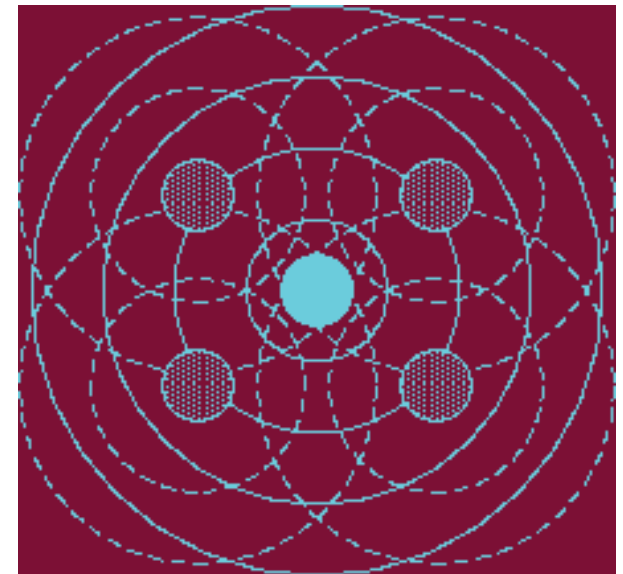
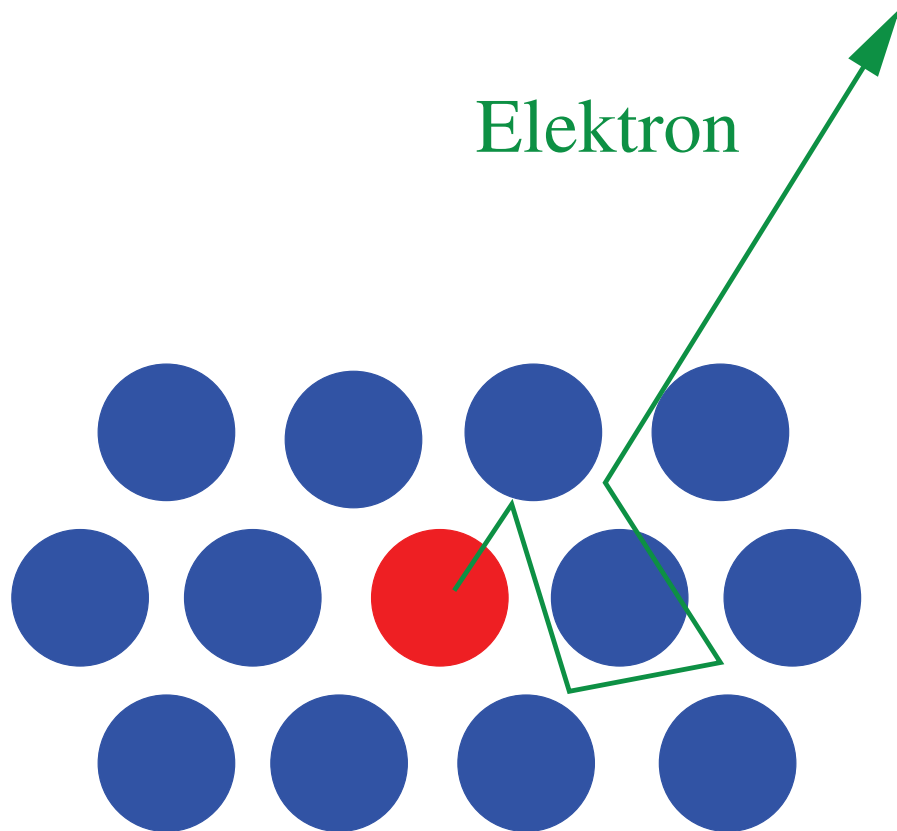


$C1s \rightarrow \pi^*$



**PTCDA (392 amu)**  
perylene-tetracarboxylicacid  
-dianhydride

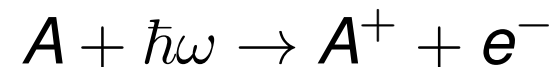
# EXAFS



- Vielfachstreuung eines Elektrons an den benachbarten Atomen in einem Festkörper oder Molekül
- Streuung hängt ab von der Geometrie des Materials

# Theorie der Photoionisation

- Einführung in die Theorie der Photoionisation eines freien Atoms
- Photoeffekt



- Partieller Wirkungsquerschnitt

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{4\pi^2\alpha}{\omega} |\mathcal{T}_{0f}|^2 \cdot \rho(f) \cdot \delta(E_f - E_0 - \hbar\omega)$$

mit dem Übergangsmatrixelement zwischen dem Grundzustand  $|0\rangle$  und dem Endzustand  $|f\rangle$

$$\mathcal{T}_{0f} = \langle f | e^{i\vec{k}\cdot\vec{r}} \vec{\epsilon} \cdot \vec{p} | 0 \rangle$$

# Theorie der Photoionisation

- Dieses Matrixelement kann in eine Reihe entwickelt werden

$$\begin{aligned} \mathcal{T}_{0f} &= \omega \langle f|z|0\rangle \\ &+ \frac{i\omega^2\alpha}{2} \langle f|xz|0\rangle \\ &- \frac{\omega\alpha}{2} \langle f|L_y|0\rangle + \dots \end{aligned}$$

- Operatoren

$\mathcal{E}_1$  = z elektrische Dipolstrahlung

$\mathcal{E}_2$  = xz elektrische Quadrupolstrahlung

$\mathcal{M}_1$  =  $L_y$  magnetische Dipolstrahlung

- Wirkungsquerschnitt

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \propto |\langle f|\mathcal{E}_1|0\rangle|^2 + |\langle f|\mathcal{E}_2|0\rangle|^2 + \langle f|\mathcal{E}_1 \cdot \mathcal{E}_2|0\rangle \langle f|\mathcal{E}_2 \cdot \mathcal{E}_1|0\rangle^* + \dots$$



# Drei Parameter Model

- Ionisation eines Elektrons mit Drehimpuls  $\hbar l$  im Rahmen der Dipolnäherung
- Auswahlregeln Dipolstrahlung
  - $\Delta l = \pm 1$
- Damit gibt es drei Parameter
  - 1 Dipolmatrixelement  $d_{l-1} = \langle \epsilon l - 1 | z | n l \rangle$
  - 2 Dipolmatrixelement  $d_{l+1} = \langle \epsilon l + 1 | z | n l \rangle$
  - 3 Phasedifferenz zwischen den auslaufenden Elektronenwellen  

$$\delta = \delta_{l+1} - \delta_{l-1}$$
- Was folgt darauß für den differentiellen Wirkungsquerschnitt ?

# Drei Parameter Model

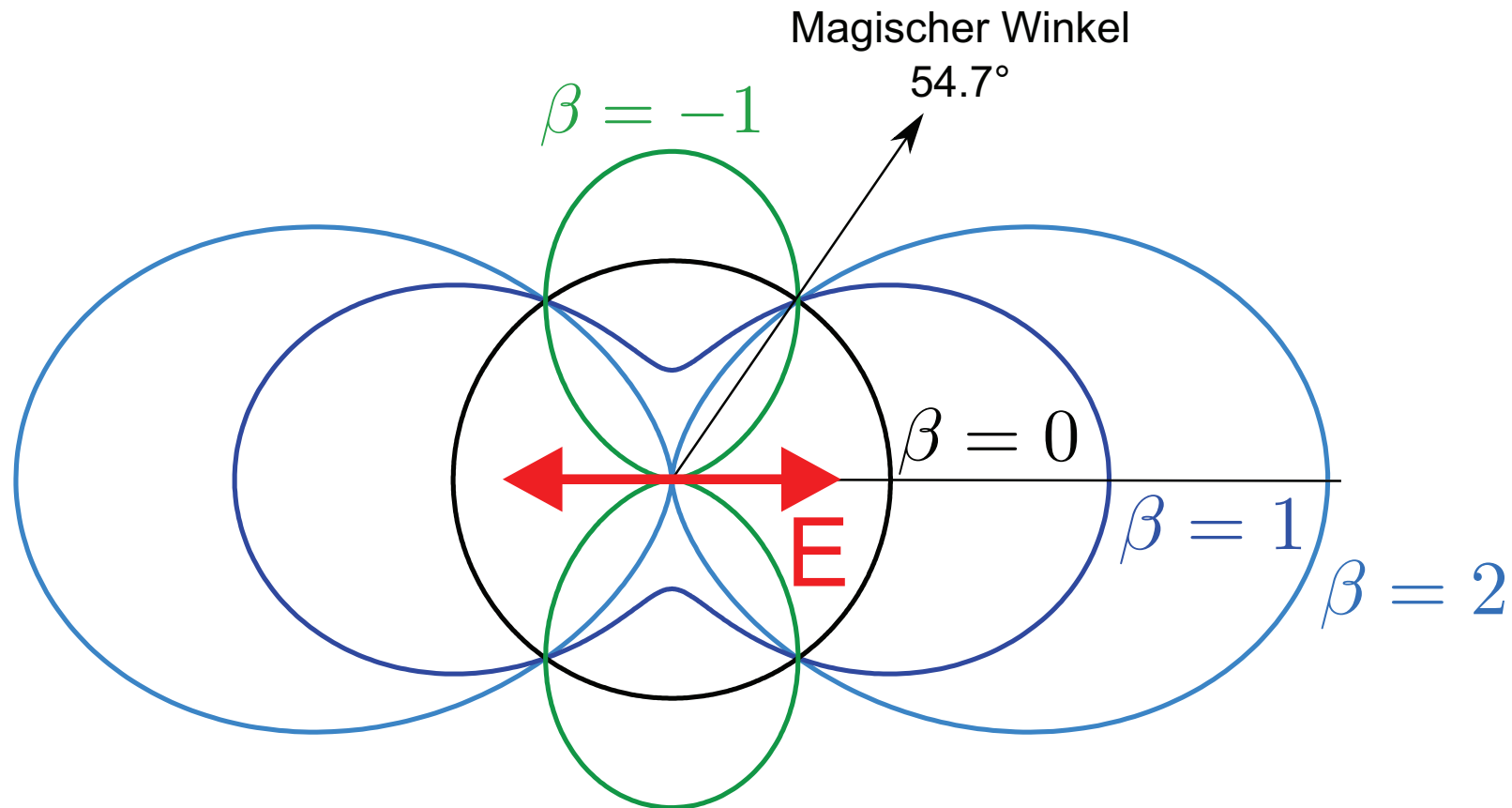
- Winkelverteilung der Photoemission

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\sigma_{iso}}{4\pi} (1 + \beta P_2(\cos \theta)) = \frac{\sigma_{iso}}{4\pi} \left( 1 - \frac{\beta}{2} (1 - 3 \cos^2 \theta) \right)$$

- Winkelverteilungsparameter  $\beta$
- In einem einfachen Modell, in dem man LS Kopplung annimmt gilt die Cooper-Zare Formel

$$\beta = \frac{l(l-1)d_{l-1}^2 + (l+1)(l+2)d_{l+1}^2 - 6l(l+1)d_{l-1}d_{l+1} \cos \delta}{(2l+1)[ld_{l-1}^2 + (l+1)d_{l+1}^2]}$$

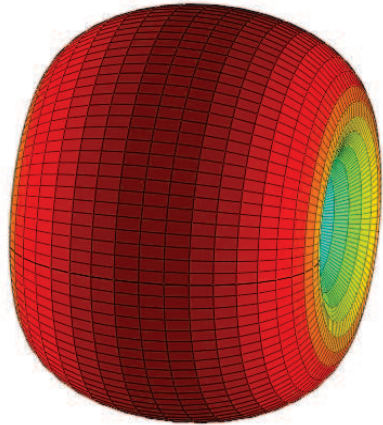
# Winkelverteilung in der Photoionisation



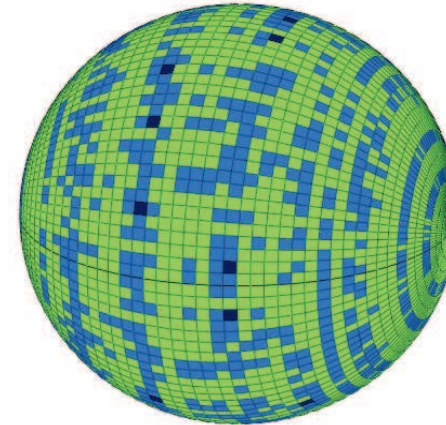
- $E$  Polarisationsrichtung der anregenden Strahlung

# Winkelverteilung in der Photoionisation

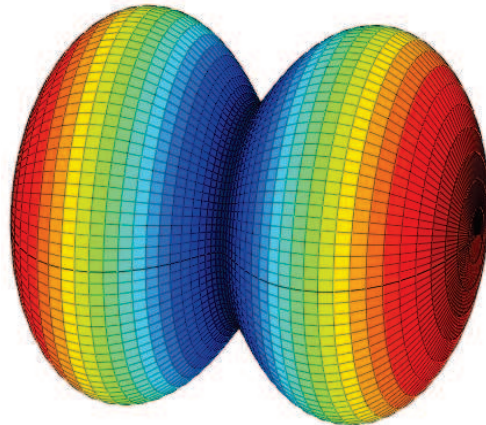
$$\beta = -1$$



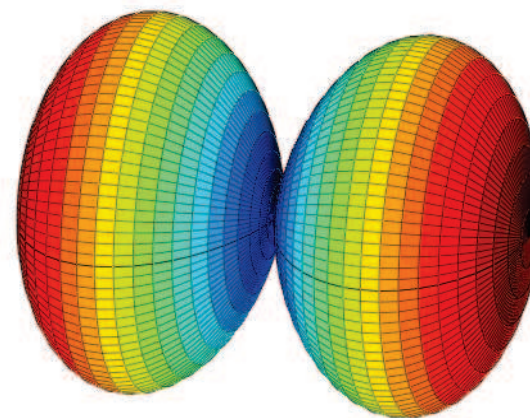
$$\beta = 0$$



$$\beta = +1$$



$$\beta = +2$$



# Satelliten

- Welche Auswirkungen hat die Erzeugung eines Rumpflochs auf die anderen Elektronen ?
- Berücksichtigung der Elektron-Elektron Wechselwirkung  
Coulomboperator

$$\langle \Psi_1 | \frac{1}{r_{ik}} | \Psi_2 \rangle$$

- Grenzfälle

**Frozen-Core:** Die Wellenfunktionen ändern sich nicht durch das Rumpfloch

**Sudden Approximation:** Die Wellenfunktionen relaxieren vollständig

# Satelliten

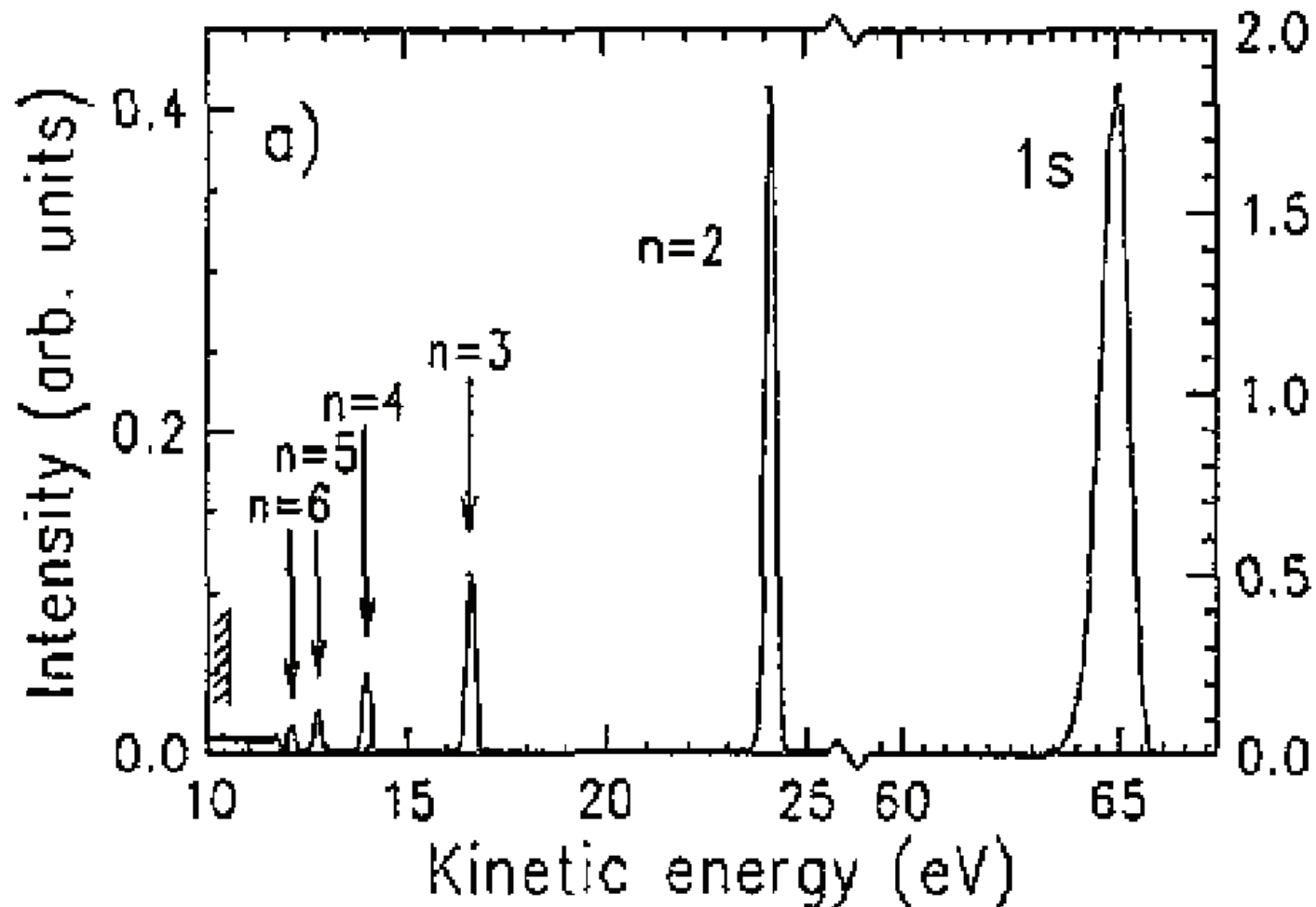
- Beschreibung eines Vielelektronensystems durch Einelektronenfunktionen ist nur eine Näherung
- Beispiel Helium Grundzustand

$$|\Psi_0\rangle = a_1|1s^2\rangle + a_2|1s2s\rangle + a_3|2s^2\rangle + a_4|2p^2\rangle + \dots$$

Beschreibung der “exakten” Lösung  $|\Psi_0\rangle$  durch eine Summe von Konfigurationen aus Einelektronenwellenfunktionen  
→ Configuration Interaction CI

# Photoionisationssatelliten I

- Photoelektronenspektrum von Helium  
Wehlitz et al., J.Phys.B **26**, L783 (1993)
- Beobachtung von *Satelliten* im Spektrum



# Photoionisationssatelliten II

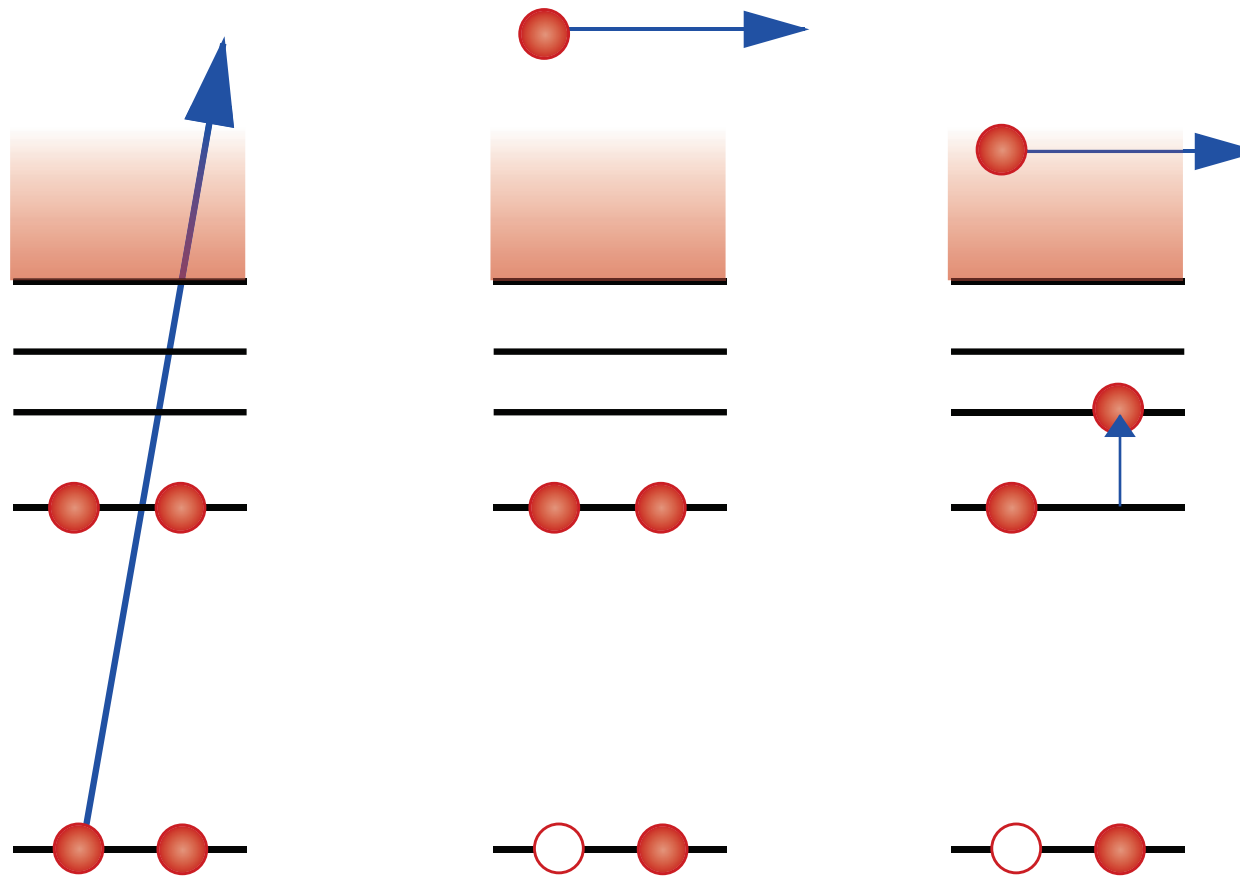
- Grundzustand  $a|\phi_1\phi_2\rangle + b|\phi_1\phi_3\rangle$
- Endzustand  $|\psi_1\psi_\epsilon\rangle$
- Dipolanregung

$$\begin{aligned}\langle 1|er|0\rangle &= \langle \psi_1\psi_\epsilon|er|a\phi_1 + b\phi_2\rangle \\ &= a\langle \psi_1|\phi_1\rangle\langle \psi_\epsilon|er|\phi_2\rangle + b\langle \psi_1|\phi_1\rangle\langle \psi_\epsilon|er|\phi_3\rangle\end{aligned}$$

- Satelliten durch CI im Grundzustand (GSCI)
- CI kann in allen möglichen Zuständen auftreten:  
Zwischenzustand (ISCI – Intermediate State CI) Endzustand (FISCI – Final Ionic State CI)
- Photoelektronenspektren liefern Daten über die Elektron-Elektron Wechselwirkung (Korrelationen)



# Photoionisationssatelliten III



- Shake-Up Prozeß: Auslaufendes Photoelektron regt ein Valenzelektron in eine höhere Schale an
- Shake-Off: Ein zweites Elektron wird ionisiert

# Shake-Up Satelliten

- Elektronenemission führt ein System mit  $N$  Teilchen in ein System mit  $N - 1$  Teilchen über.
- Sudden Approximation
- ⇒ Neuer  $N - 1$  Endzustand ist kein Eigenzustand des Hamiltonien
- ⇒ Darstellung als Linearkombination

$$a_i \Psi_0(N) = \sum_f c_{if} \Psi_f(N - 1)$$

- Vernichtungsoperator  $a_i$  ist bei der Photoionisation der Dipoloperator  $er$
- Übergangswahrscheinlichkeit in einen Zustand

$$c_{if} = \langle \Psi_f(N - 1) | a_i | \Psi_0(N) \rangle$$

$$P_{if} = |c_{if}|^2 = |\langle \Psi_f(N - 1) | a_i | \Psi_0(N) \rangle|^2$$

# Shake-Up Satelliten

- N Teilchenwellenfunktion  $\Psi(N)$  ergibt sich als Slaterdeterminante aus Einteilchenwellenfunktionen  $\psi_{nlj}$
- Berechnung der Shake-Up Wahrscheinlichkeit  $P_{0 \rightarrow f}$  ist dann

$$P_{0 \rightarrow f} = |\langle \psi_{n'lj}(f) | \psi_{nlj}(0) \rangle|^2$$

- $\psi_{n'lj}(f)$  Relaxiertes Atomorbital im Endzustand  
 $\psi_{nlj}(0)$  Atomorbital im Grundzustand
- Shake-Up Satelliten liefern Informationen über die Dynamik in der Elektronenschale eines Atoms oder auch Moleküls

*Brisk and Baker, J. Electron Spectroscopy and Related Phenomena 7 197 (1975)*

# Der Auger Prozeß

- Wie zerfällt ein Atom, bei dem ein Rumpfelektron angeregt worden ist ?

## Option 1 Röntgenfluoreszenz

$$A^* \rightarrow A + \hbar\omega$$

Beschreibung durch das Dipolmatrixelement  $\langle f | er | 0 \rangle$

## Option 2 Auger Prozeß: Energie des Elektrons wird auf ein zweites Elektron übertragen

$$A^* \rightarrow A^+ + e^-$$

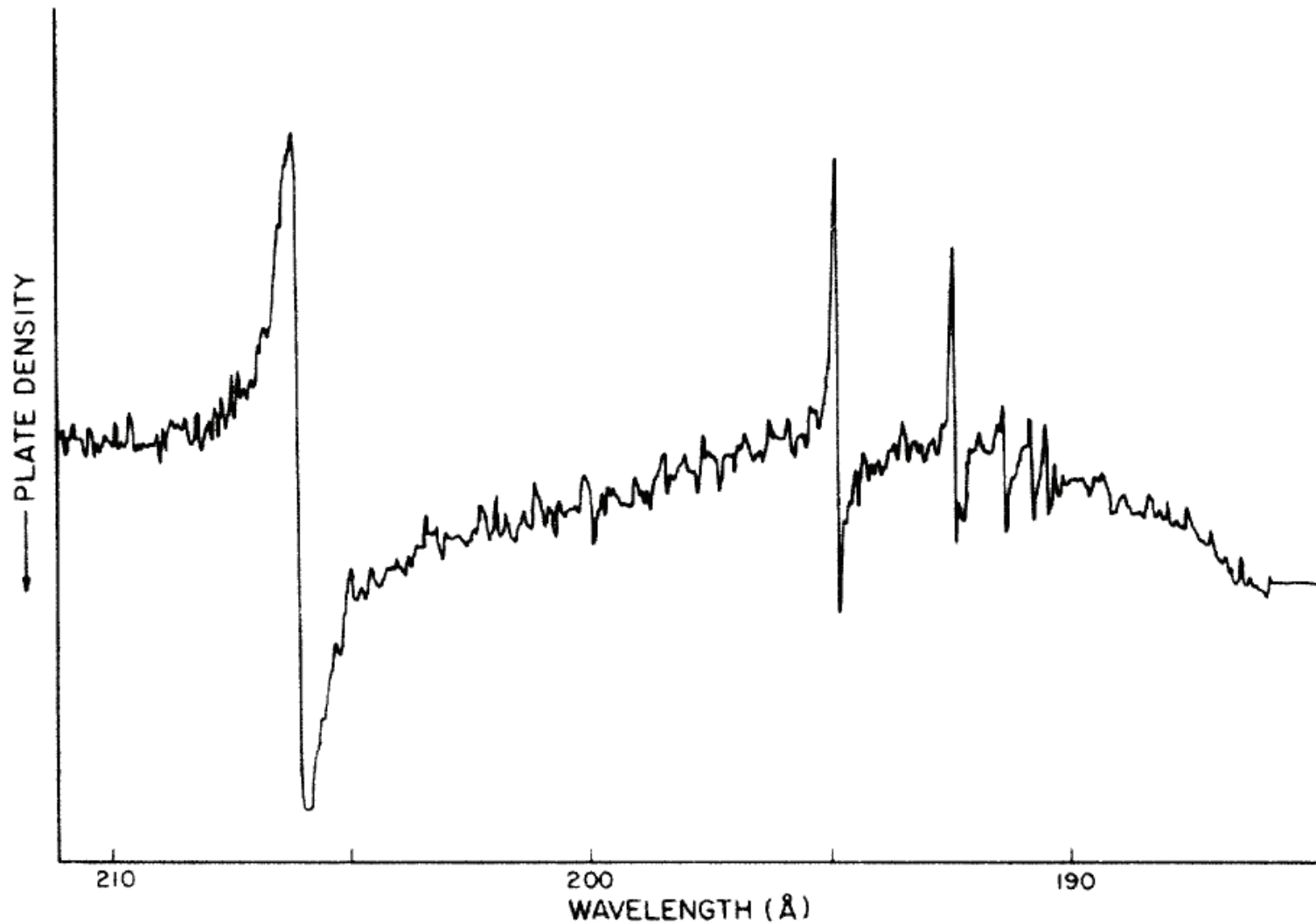
Beschreibung durch den Coulomboperator  $\langle ab | \frac{1}{r_{ik}} | cd \rangle$

Zweiteilchenoperator

Auswahlregeln des Coulomboperators:  $\Delta S = 0, \Delta L = 0$

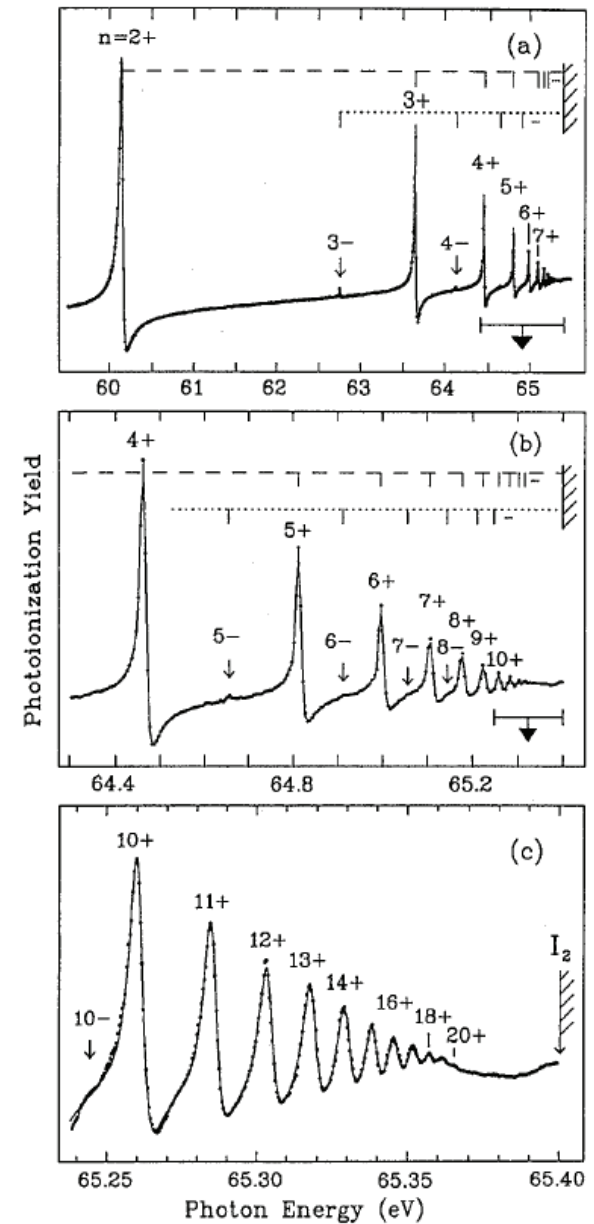
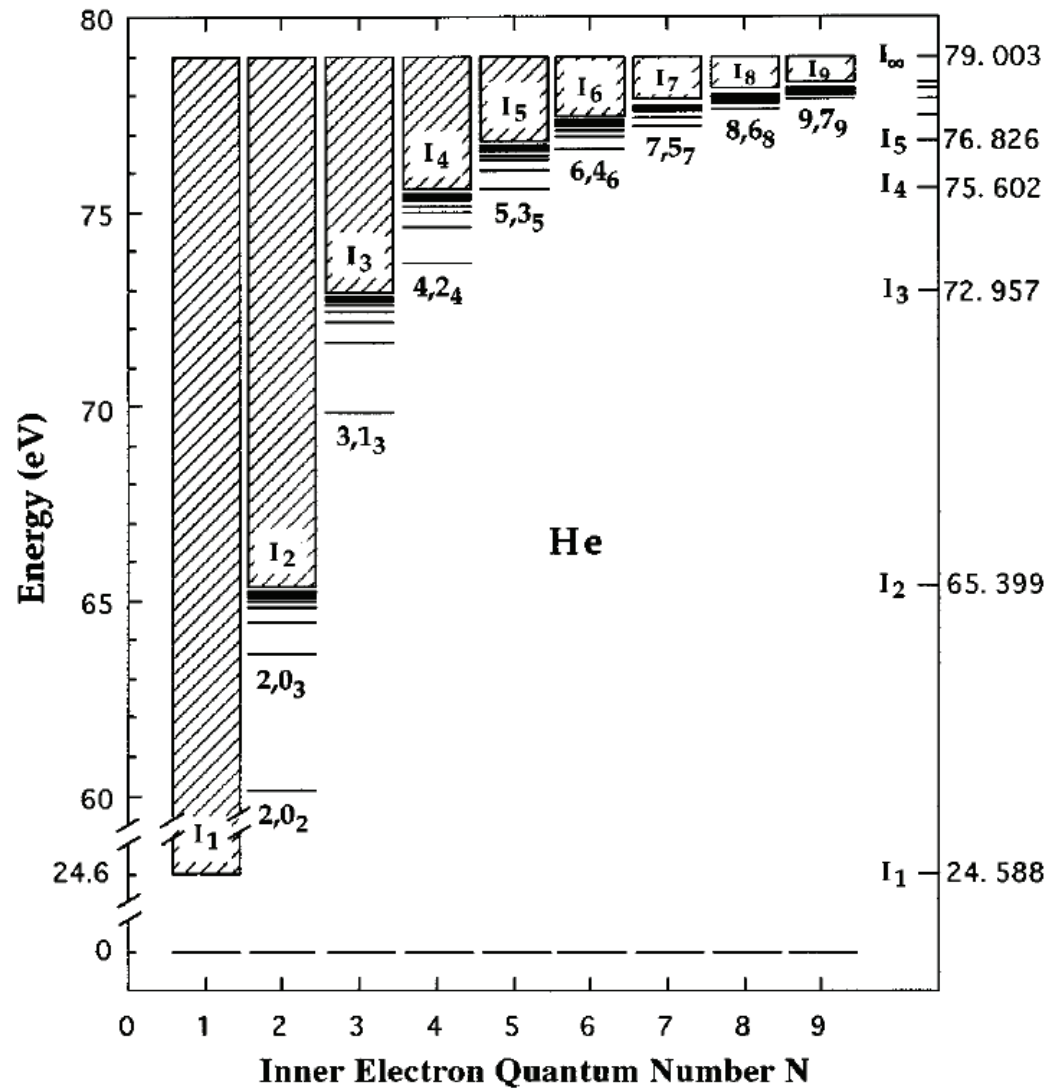
Parität bleibt erhalten

# Photoabsorption von Heliumatomen



Madden und Codling, Phys.Rev.Lett. **10**, 516 (1963)

# Das Helium Atom



# Fano Theory

- “Merkwürdige” Linienform
- Theorie von U. Fano  
Ein diskreter Eigenzustand eines Atoms  $|i\rangle$  ist in ein Kontinuum von freien Elektronen Zuständen  $|\epsilon\rangle$  eingebettet
- Wenn die Eigenzustände wechselwirken können (gleiche Quantenzahlen), muß der Zustand als Linearkombination dargestellt werden

$$|f_\epsilon\rangle = a_\epsilon |i\rangle + \int b_{\epsilon,\epsilon'} |\epsilon'\rangle d\epsilon'$$

# Fano Theory

- Ansatz führt zu der Fano-Formel für den Wirkungsquerschnitt

$$\sigma(\eta) \propto \frac{(q + \eta)^2}{1 + \eta^2}$$

mit

$$q = \frac{d_{dis}}{\pi d_{cont} V_\epsilon} \quad \text{und} \quad \eta = \frac{\hbar\omega - E}{\pi |V_\epsilon|^2}$$

und

$$d_{dis} = \langle i | \mathbf{x} | 0 \rangle$$

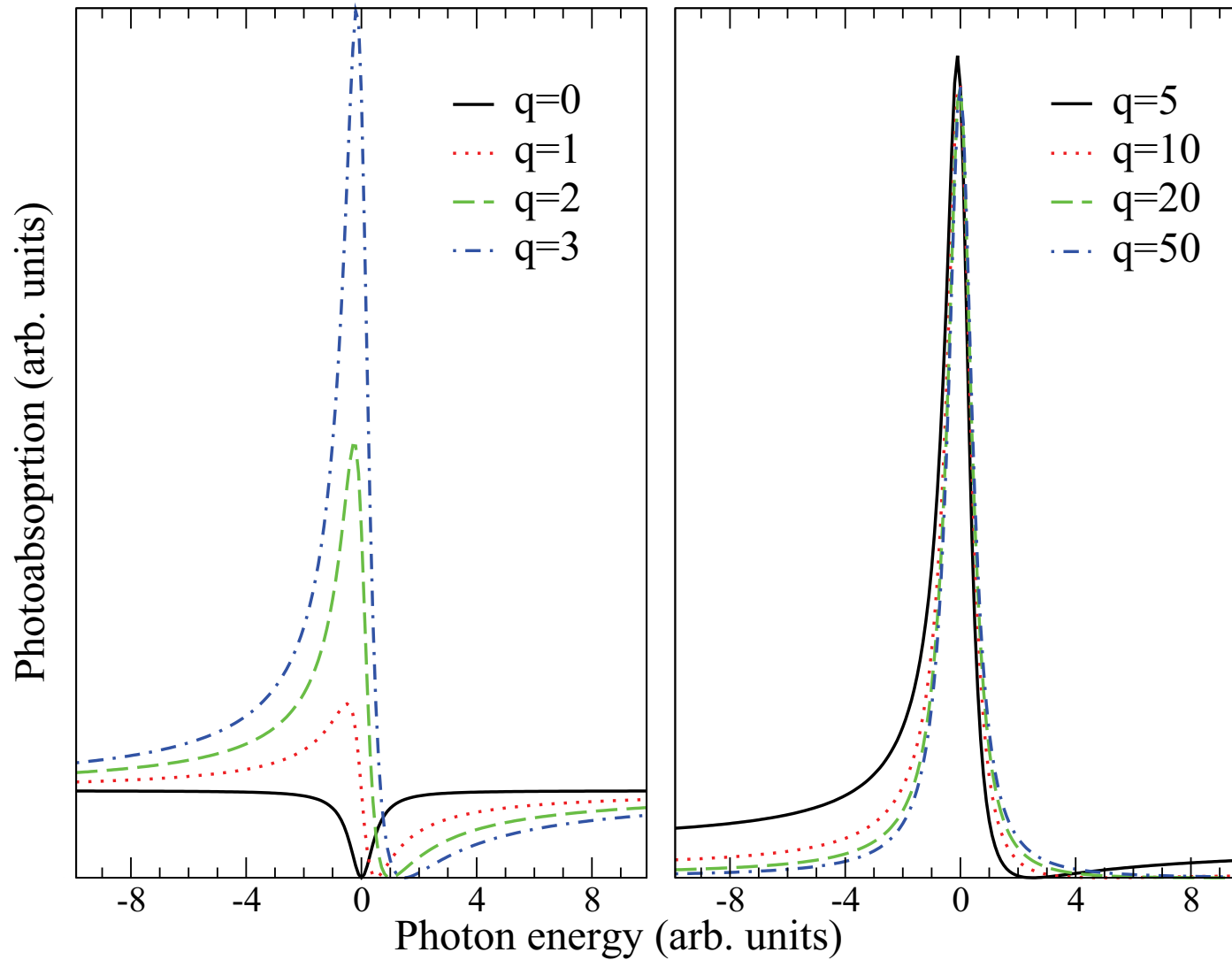
$$d_{cont} = \langle \epsilon | \mathbf{x} | 0 \rangle$$

$$V_\epsilon = \langle \epsilon | \mathcal{H}_{Coul} | i \rangle = \langle \epsilon | \frac{1}{r_{ik}} | i \rangle$$

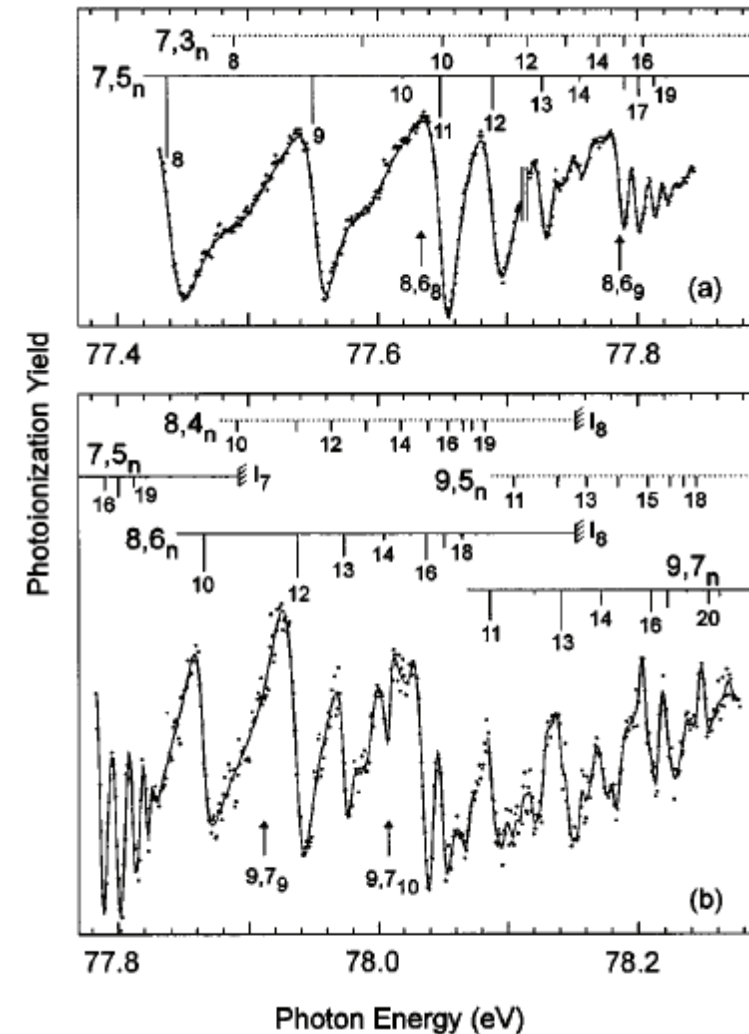
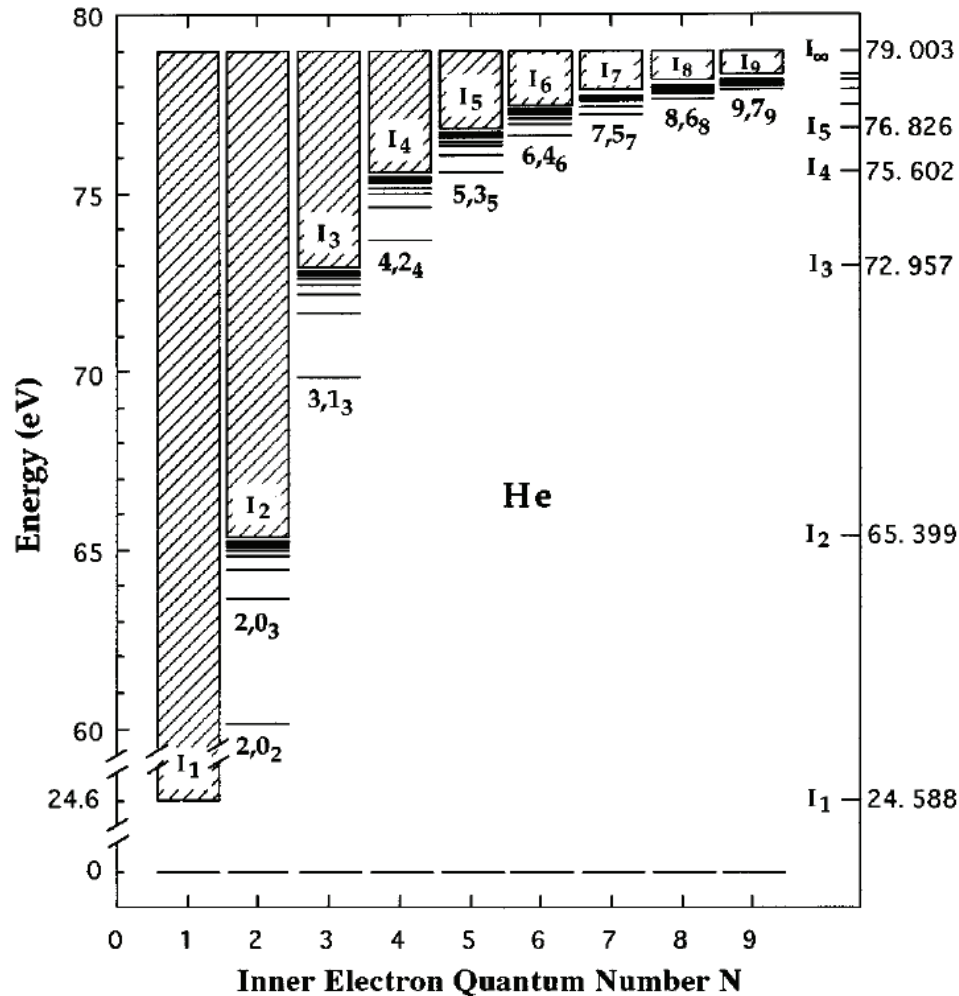
- Linienform entsteht durch einen quantenmechanischen Interferenzeffekt



# Die Fano Funktion



# Das Helium Atom



- Übergang in ein chaotisches System – Quanten Chaos