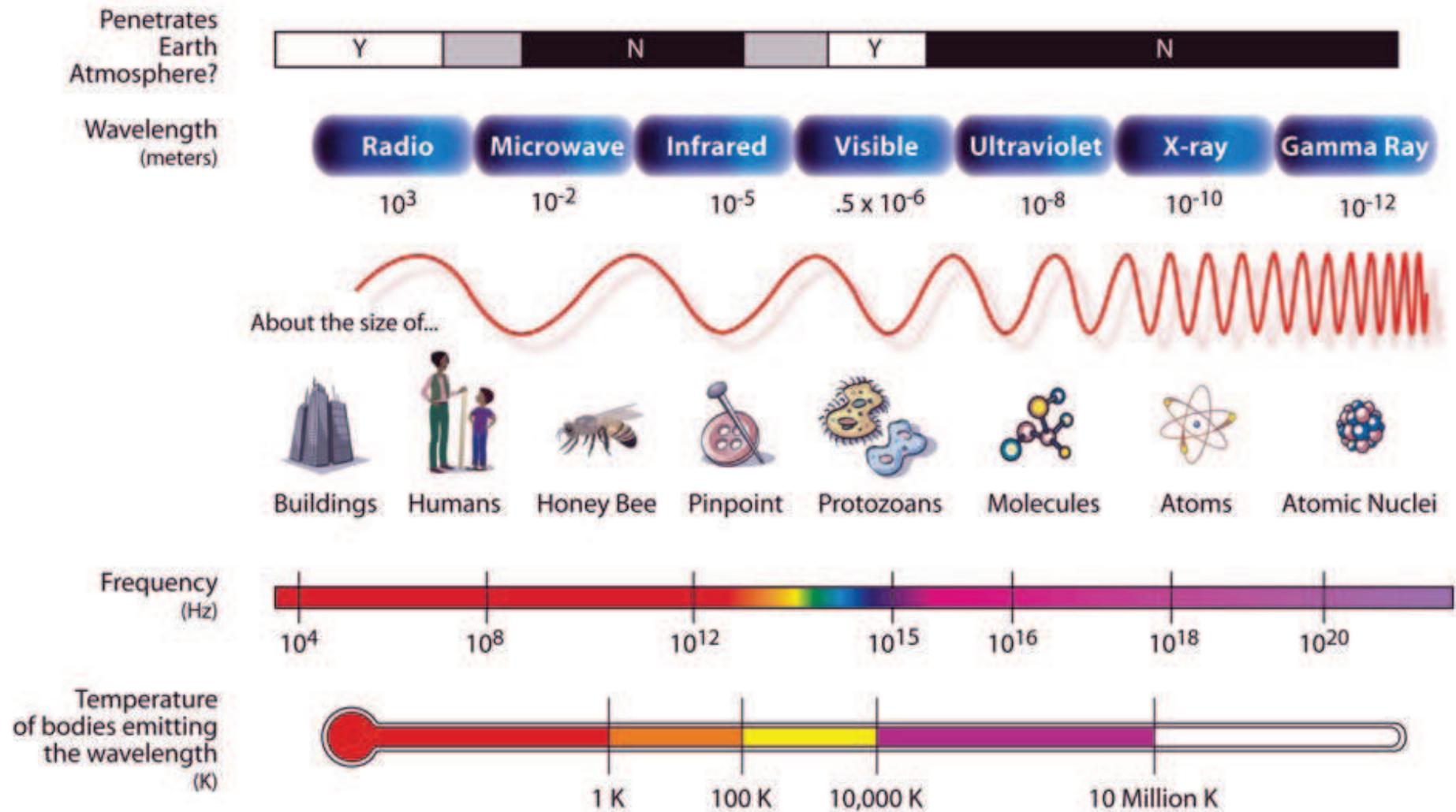


# Röntgenphysik

## Eine Einleitung

# THE ELECTROMAGNETIC SPECTRUM

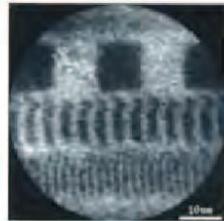
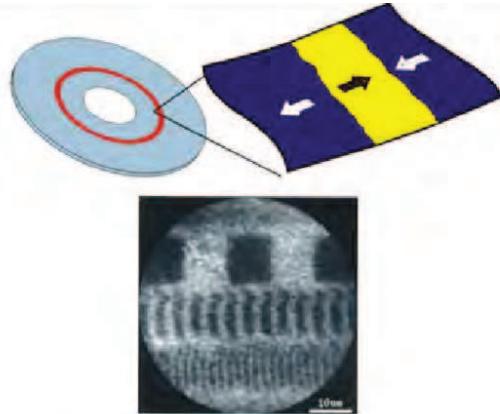


# Warum Röntgenphysik ?

Sehe das unsichtbare

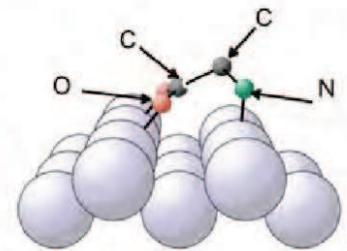


1895

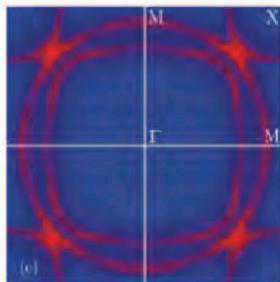
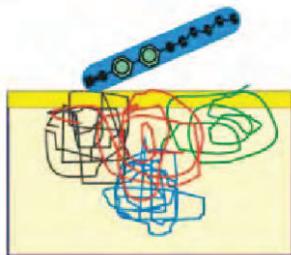
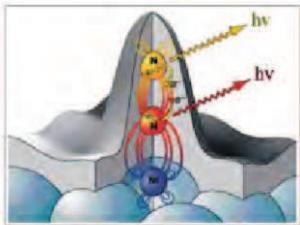


1993

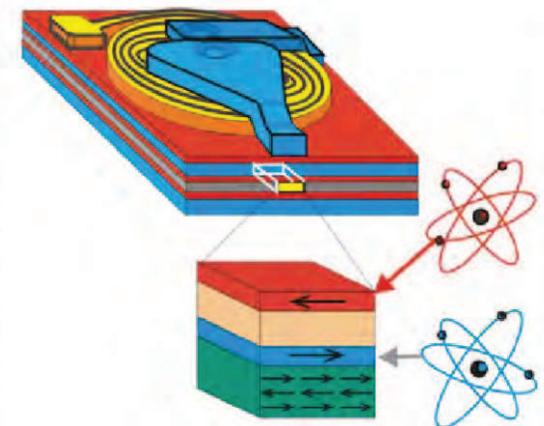
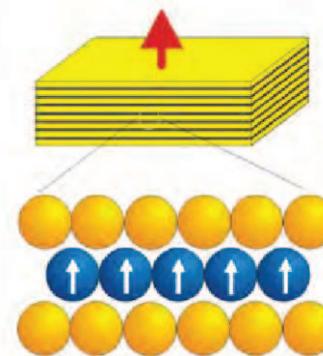
Wo sind die Atome



Wo sind die Elektronen



Wo sind die Spins

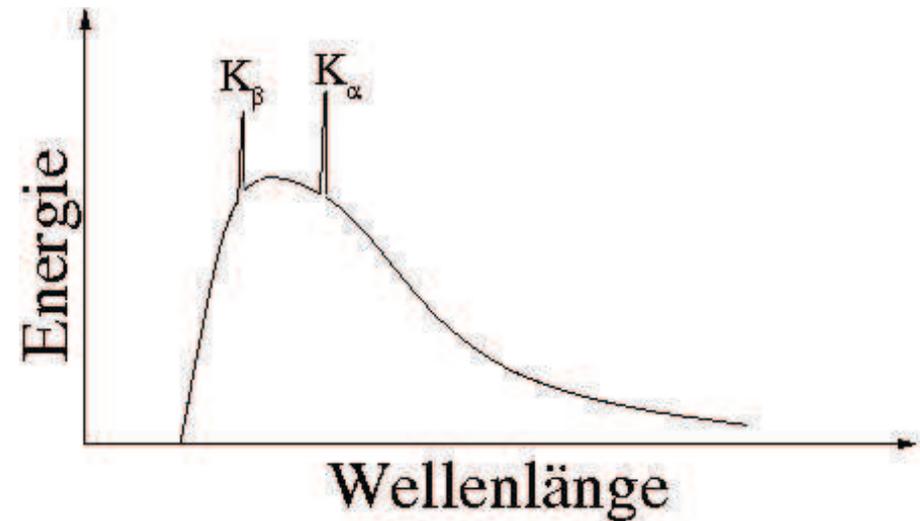
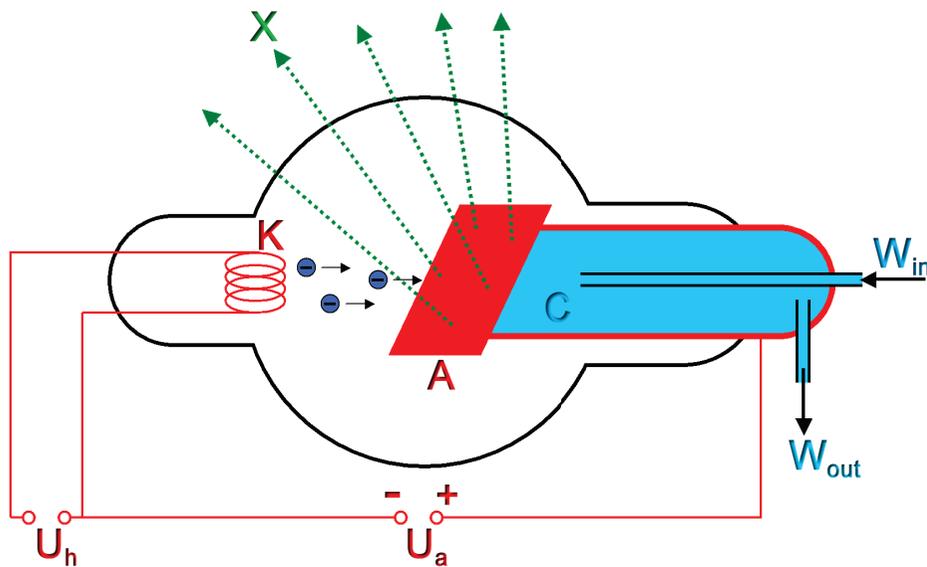


# Historisches

- Entdeckung der *X-Strahlen* durch Konrad Röntgen



# Funktion einer Röntgenquelle



- Bremsstrahlung: Strahlung beschleunigter, geladener Teilchen
- Charakteristische Röntgenstrahlung: Linienspektrum durch atomare Übergänge  
Strahlung ist elementspezifisch !

# Historisch: Synchrotronstrahlung

- Entdeckung der Synchrotronstrahlung an sogenannten Synchrotron's
- Strahlung eines hochrelativistischen Teilchens
- Erster experimenteller Nachweis 1947 an dem 70-MeV Synchrotron von *General Electric*
- Ärgernis für die Teilchenphysiker, da die abgestrahlte Energie nicht mehr zur Beschleunigung der Teilchen zur Verfügung steht
- **aber:** exzellente Quelle für Röntgenstrahlung
- Strahlung ist um ein vielfaches intensiver und brillanter als die "klassischer" Quellen
- Weitere Entwicklung: Röntgenlaser, Freie Elektronen Laser

# Moderne Röntgenquellen

## HochleistungsRöntgenröhren

- Einfach zu handhaben
- Einsetzbar in fast jedem Labor
- Typisch nur zwei Anregungsenergien:  
Mg  $K\alpha$  (1.2 keV) und Al  $K\alpha$  (1.4 keV)
- Nicht durchstimmbar
- geringe Leistung
- schlechte Auflösung;  $\Delta E$  1-2 eV (natürliche Linienbreite der atomaren Übergänge)

# Moderne Röntgenquellen

## Synchrotronstrahlung

- Photonenenergie *frei* wählbar zwischen dem Infraroten (THz Strahlung) und harter Röntgenstrahlung ( $> 100$  keV)
- Sehr hohe Photonenzahlen
- Polarisation der Strahlung frei wählbar
- Großgerät

## Freie Elektronen Laser (FEL)

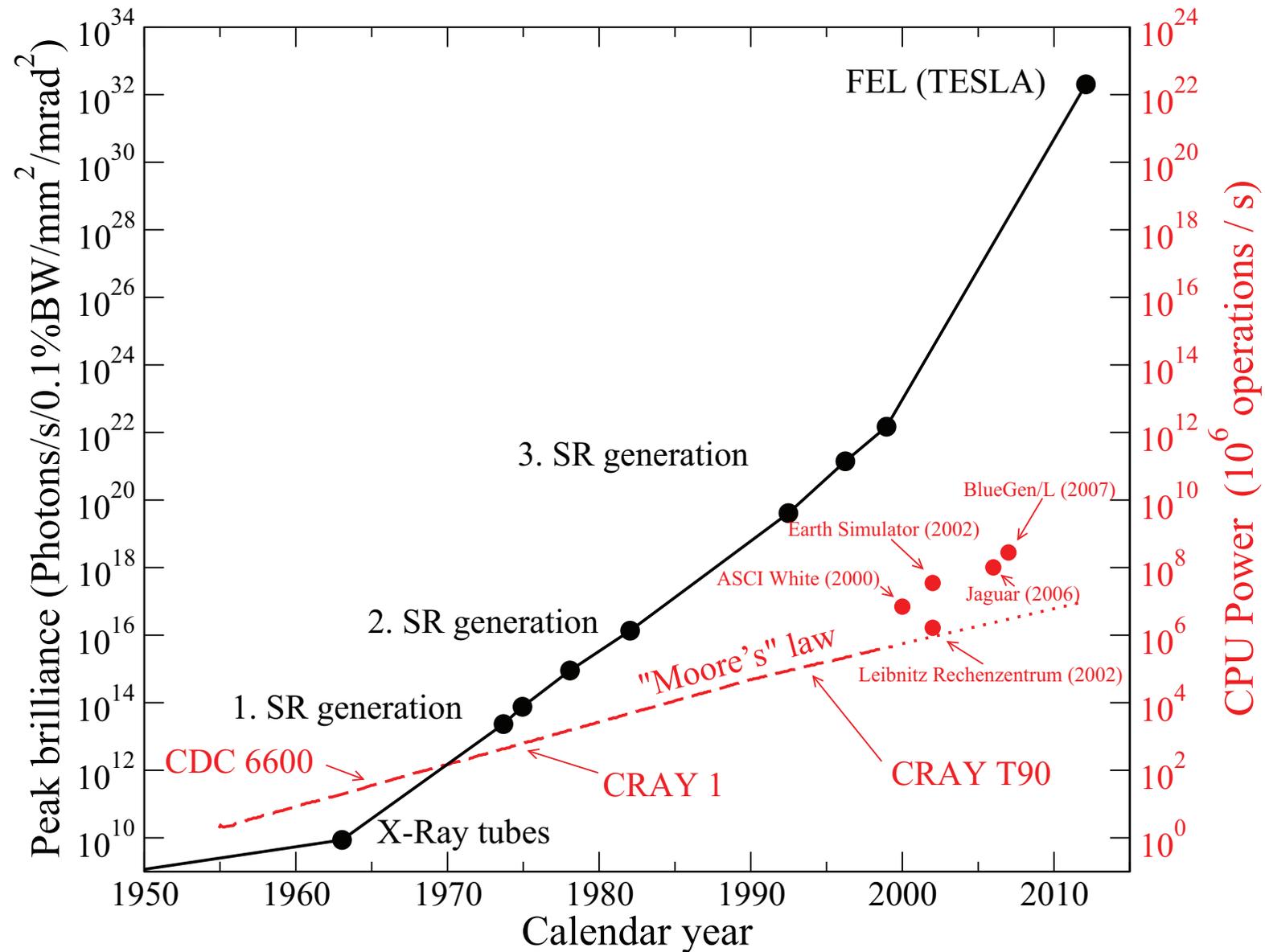
- Laserstrahlung im Röntgenbereich
- Extrem hohe Photonendichten
- Sehr kurze Lichtpulse (einige 10 fs)
- Photonenenergien in der Zukunft bis zu 14 keV

# Moderne Röntgenquellen

## Nichtlineare Laserprozesse

- **H**igh **H**armonic **G**eneration
- Extrem kurze Lichtpulse (Rekord 80 as)
- Photonenenergien bis ca. 100 eV (?)

# Fortschritt bei Röntgenquellen



# Anwendungen

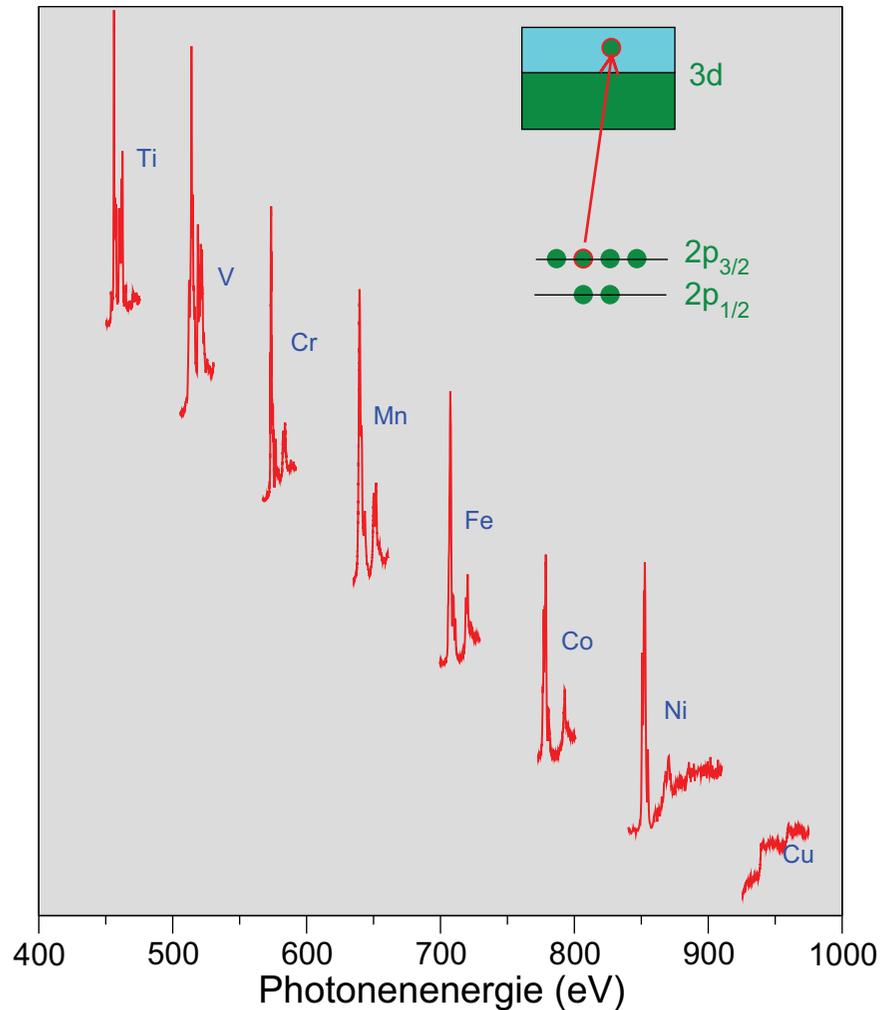
## Methoden

- Elementspezifische Analyse von Materie – Rumpfniveauspektroskopie
- “Imaging”: Abbildung

## Beispiele

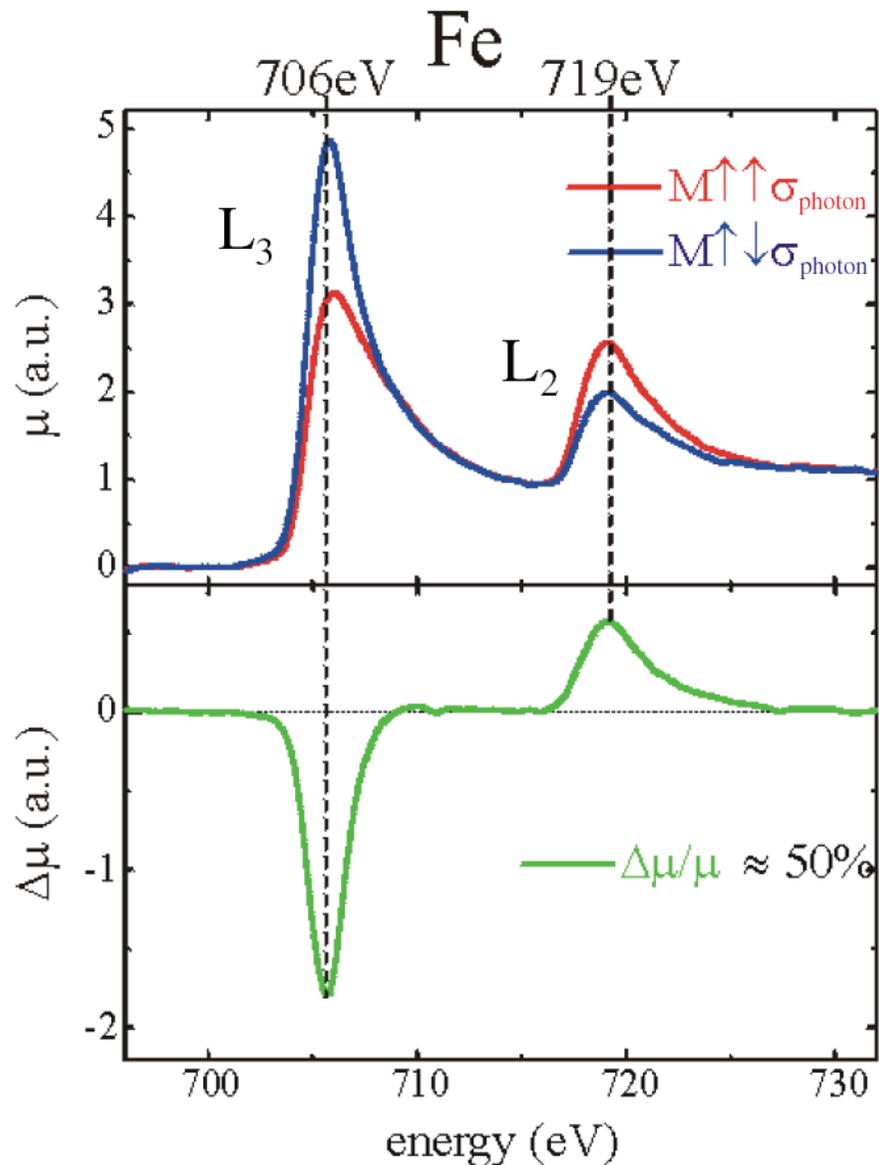
- Röntgenabsorptionsspektroskopie (NEXAFS, EXAFS)
- Magnetismus: Röntgenzirkulardichroismus (XMCD)
- Röntgenmikroskopie
- Elektronenspektroskopie (ESCA)
- Femto-Chemie – Molekulare Filme
- Tomographie und 3D Imaging komplexer Strukturen
- Lithographie – Halbleitertechnologie

# Rumpfniveauspektroskopie



- Lokale Anregung eines Systems
- Element selektive Anregung
- Beispiel:  
Anregung eines  $2p$  Elektrons in unbesetzte  $3d$  Zustände der Übergangsmetalle
- Photonenenergie: einige 100 bis 1000 eV abhängig vom Rumpfniveau
- Analyse von komplizierten Schichtsystemen, wie Sie z.B. in magnetischen Speichermedien verwendet werden.

# Anwendung – Magnetismus

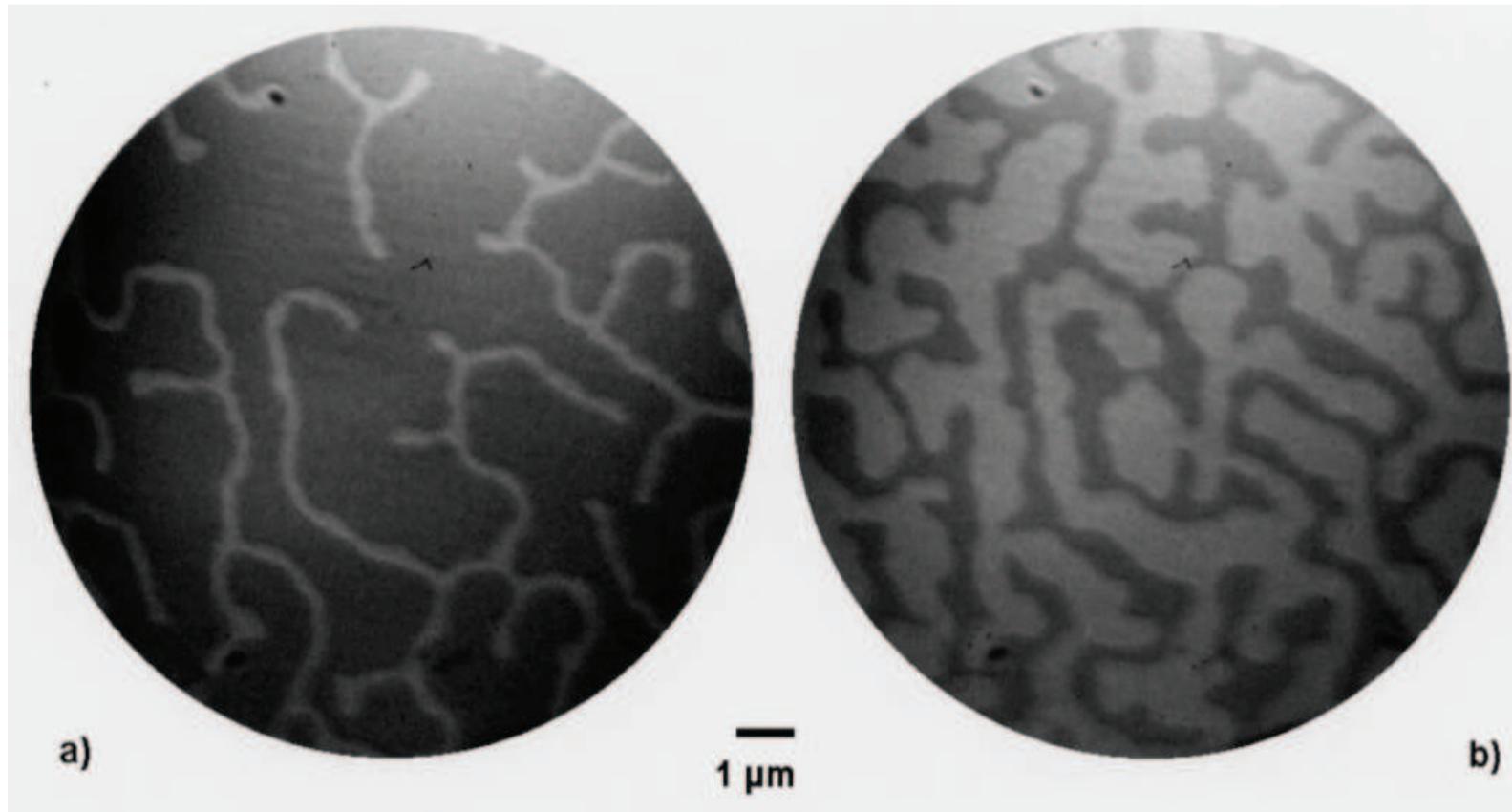


## Beispiel XMCD

Magnetismus von komplexen Materialien

- Rumpfniveauspektroskopie ist empfindlich auf den Magnetismus von Materialien
- Magnetischer Dichroismus

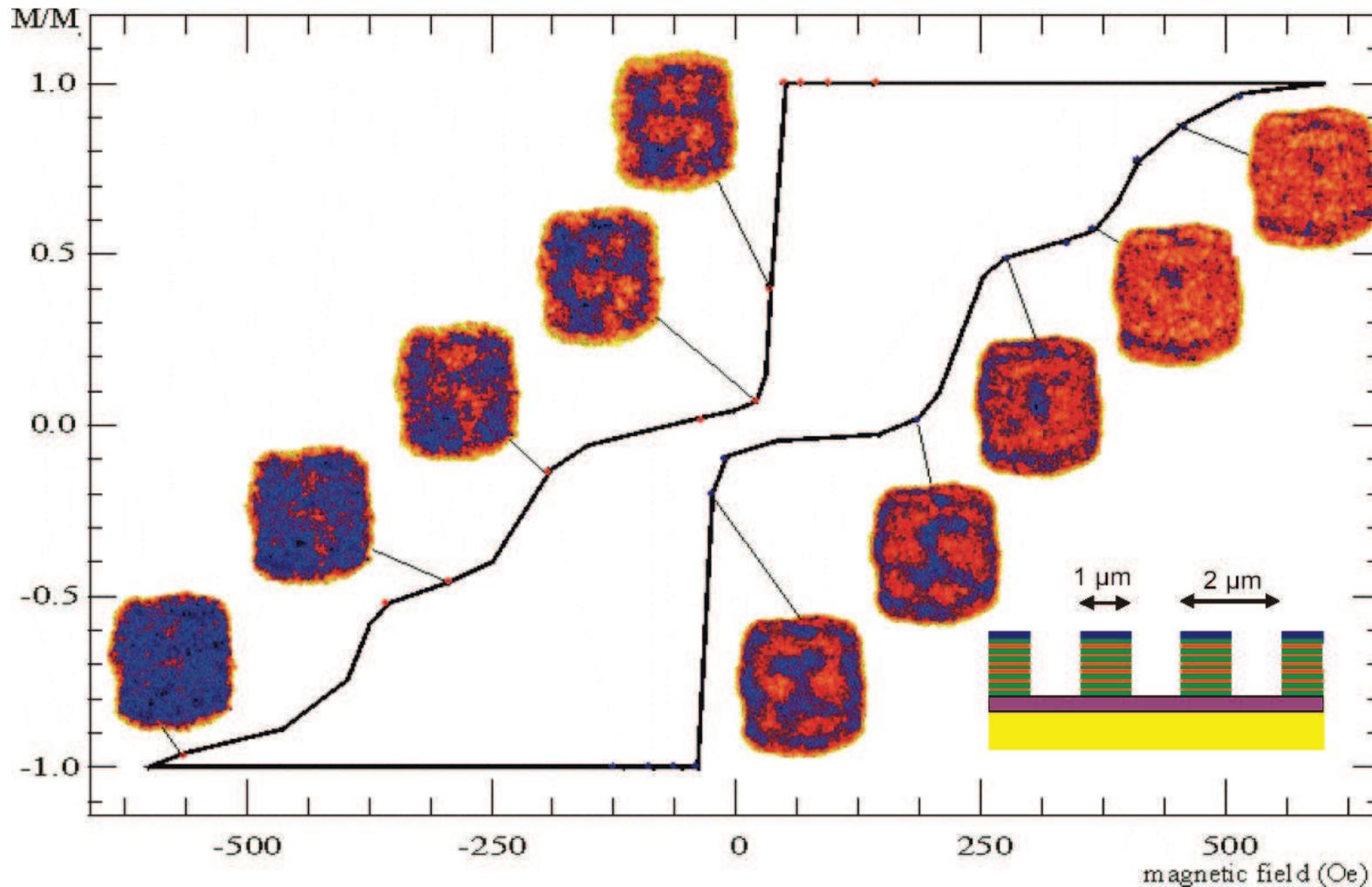
# Anwendung – Magnetismus



Magnetischer Kontrast eines Gd-Fe Schichtsystems in einem Röntgen-Transmissions-Mikroskop (TXM)

P. Fischer et al., Z. Phys. B **101**, 313 (1996)

# Anwendung – Magnetismus

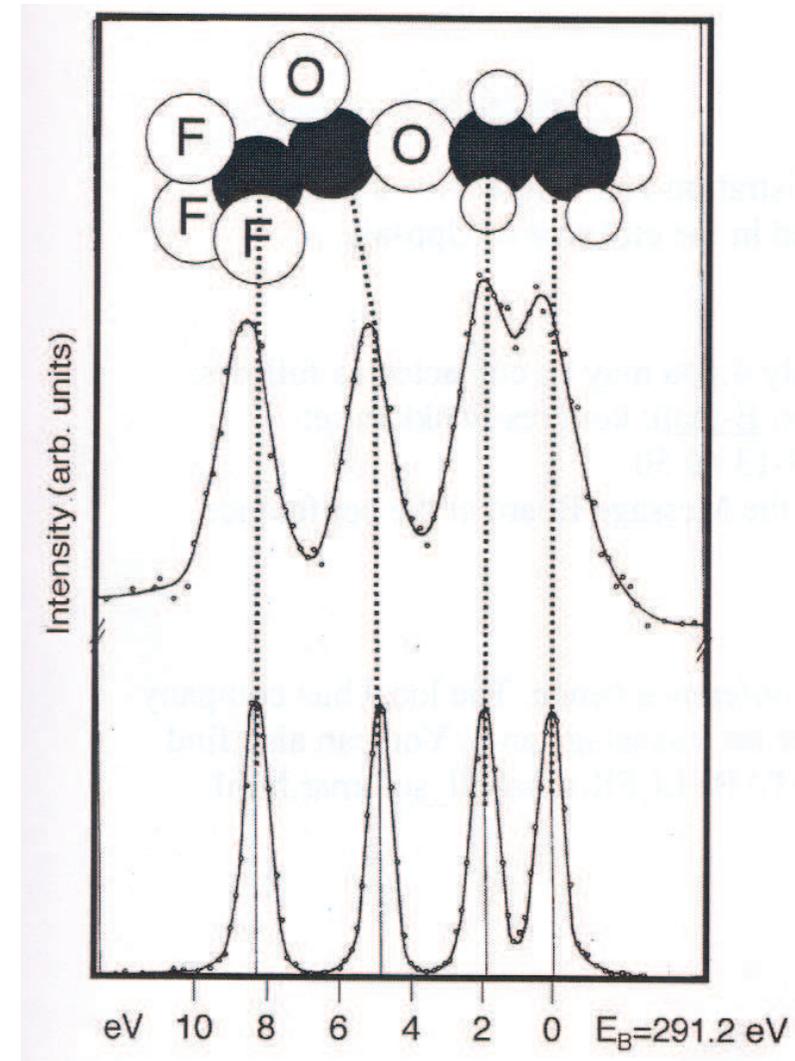


Schalten eines magnetischen Dots, T. Eimüller et al., J. Appl. Phys **89**, 7162 (2001)

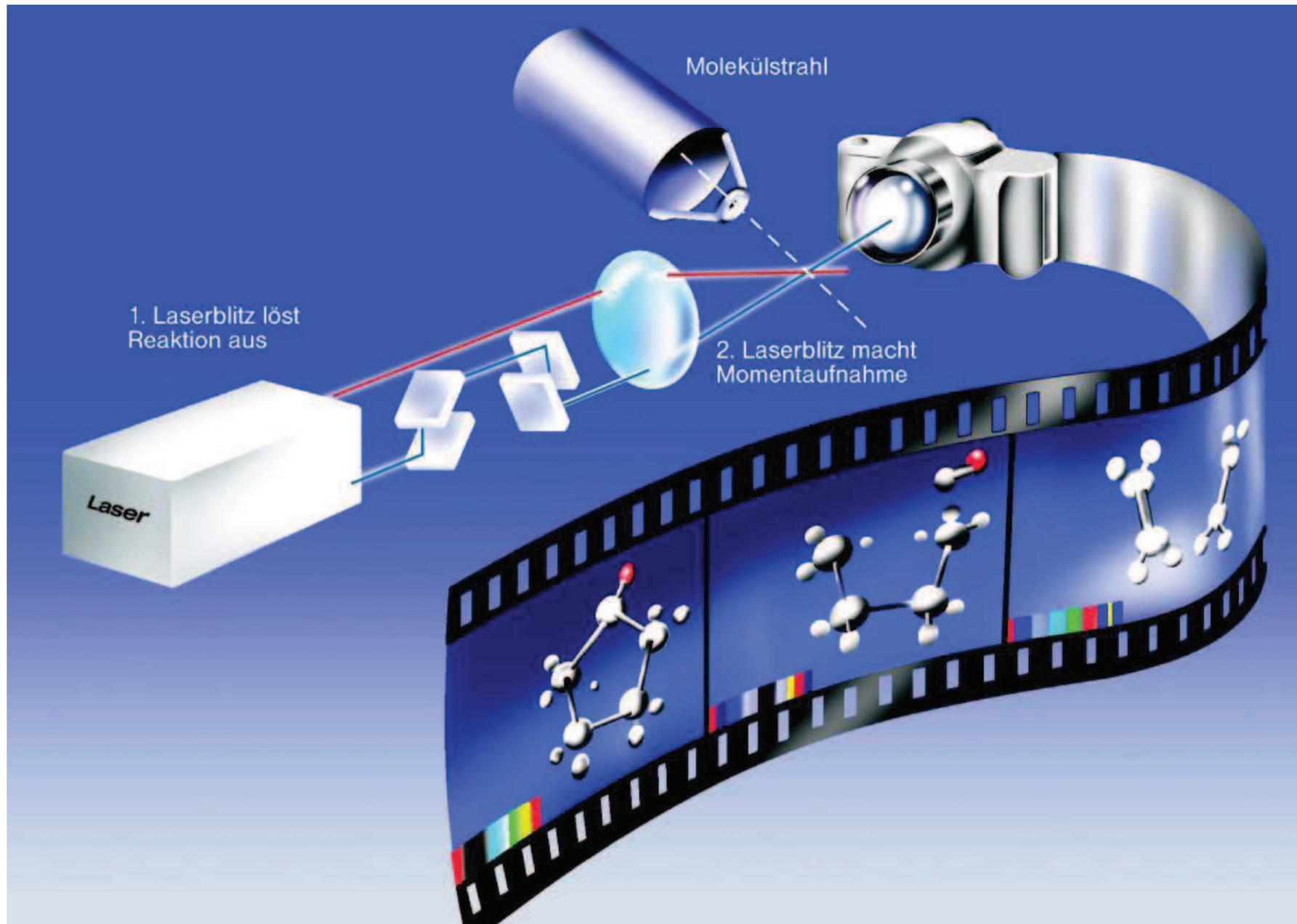
# Rumpfniveauspektroskopie

## ESCA

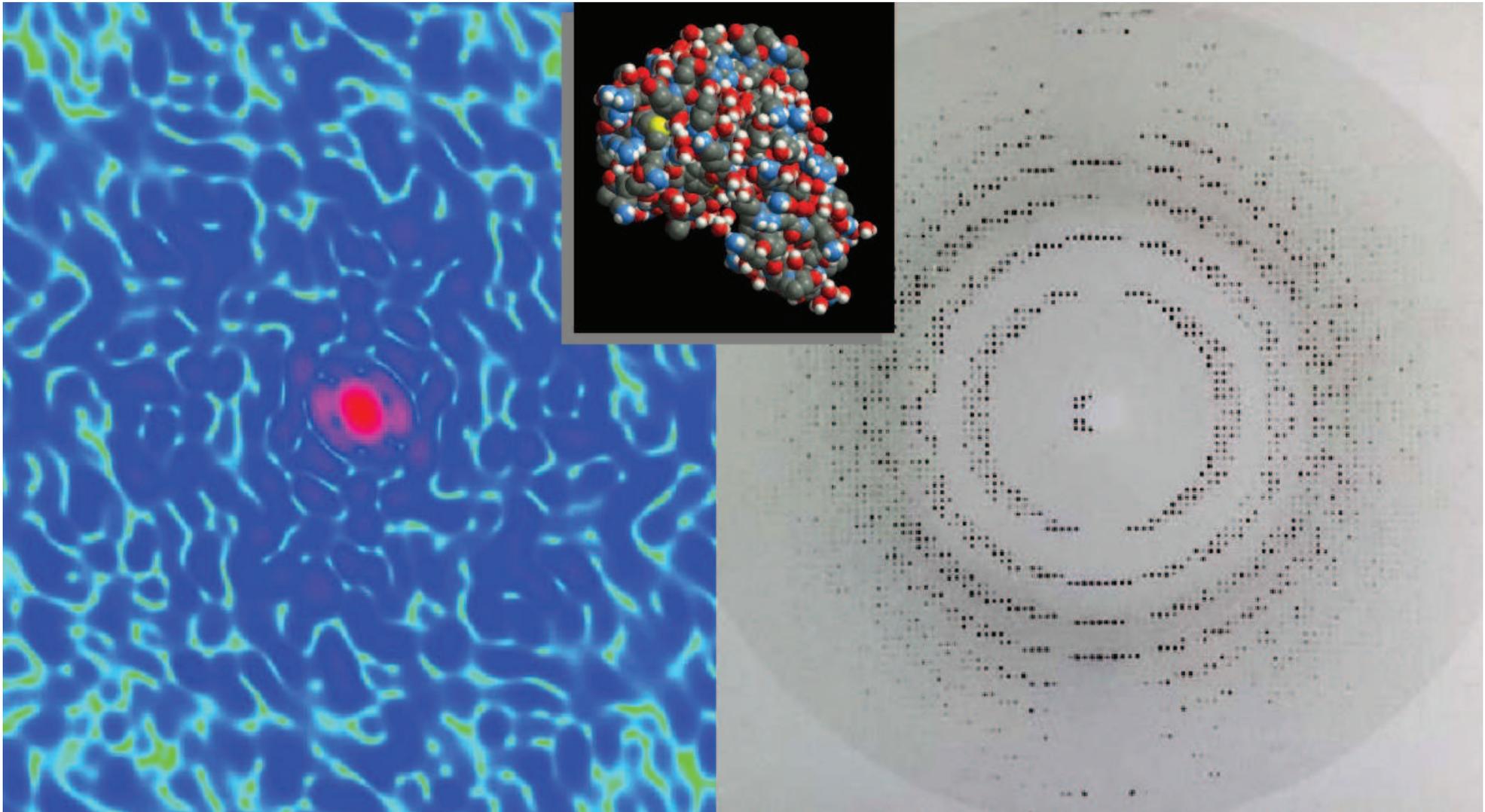
- Rumpfniveauspektroskopie ist auch sensitive auf die chemische Umgebung eines Atoms
- ESCA – Electron Spectroscopy for Chemical Analysis
- Nobelpreis 1981 an Kai Siegbahn



# FEL – Femto-Chemie



# FEL – Proteinstruktur und Dynamik

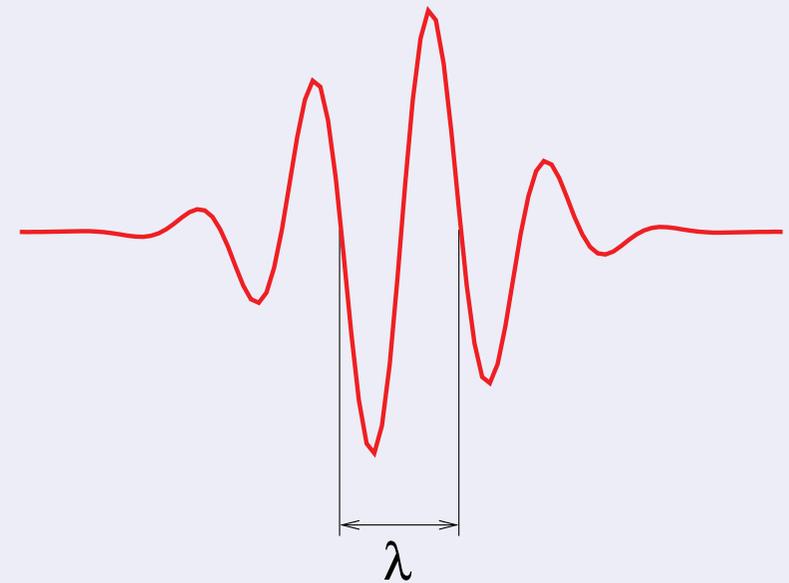


# Laser im Röntgenbereich ?

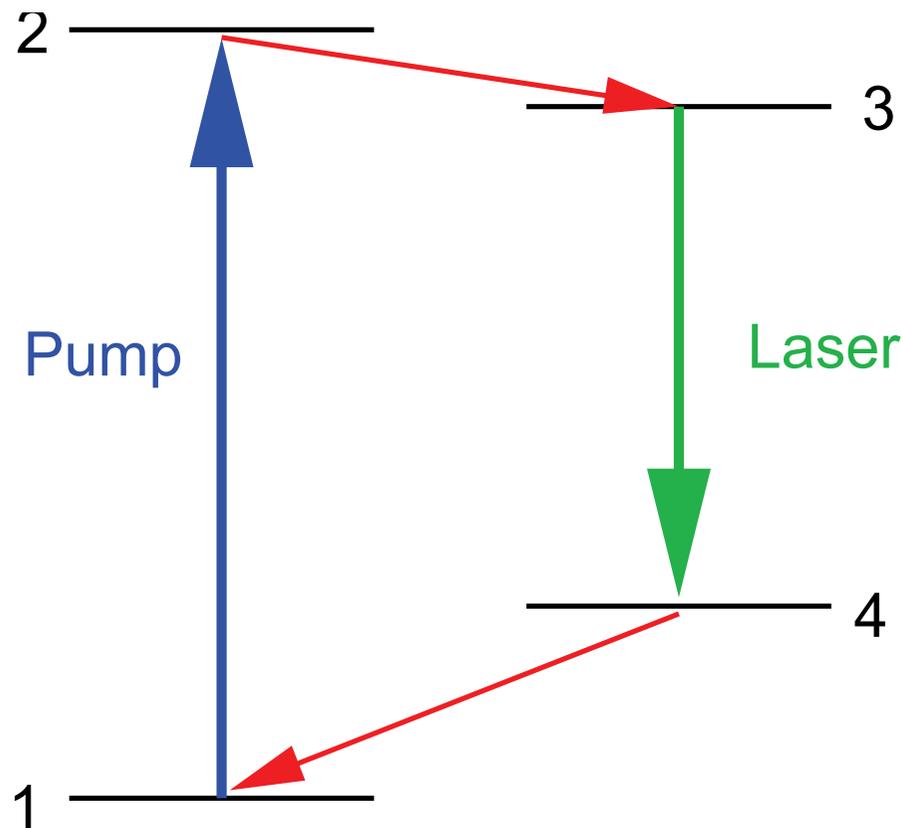
## Typische Eigenschaften von Lasern

	UV	Sichtbar	Infrarot
Spektralbereich	157-400 nm	400-800 nm	800 nm-10 $\mu$ m

- Sehr hohe Intensität  $> 10^{18} \text{W/cm}^2$  möglich
- Hohe Kohärenz der Strahlung, Beugungsbegrenzt
- Zeitlich sehr kurze Pulse von einigen fs bei gepulsten Lasern  
 $\lambda = 500 \text{ nm} \Rightarrow T = 1.6 \text{ fs}$
- Sehr hohe Energieauflösung mit CW Lasern



# Prinzip des Lasers

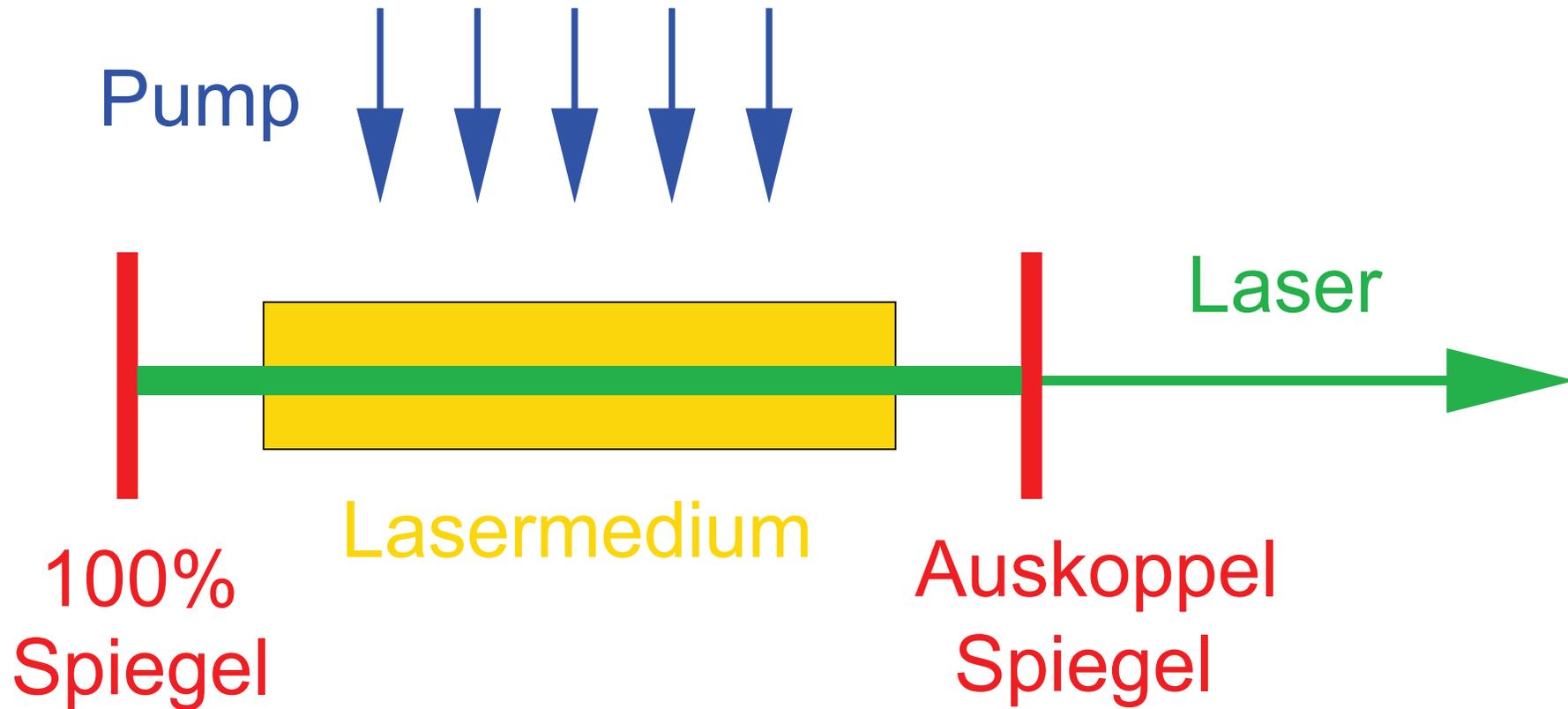


- Verstärkung von Licht durch induzierte Emission
- Beispiel: 4 Niveau Laser
- Pumpen des Überganges  $1 \rightarrow 2$
- Relaxation in den Zustand 3
- Schnelle Entvölkerung des Zustandes 4

- Voraussetzung des Laserprozeß: Besetzungsinversion des Übergangs  $3 \rightarrow 4$

⇒ Langlebiger (metastabiler) Zustand 3

# Aufbau eines Lasers



- Aufbau in Form eines Resonators
- Lasermedium zur Verstärkung des Lichts
- Röntgenlaser ?

# Röntgenlaser – Probleme

- Spontane Emission nimmt mit der 3. Potenz der Übergangsfrequenz  $\omega$  zu

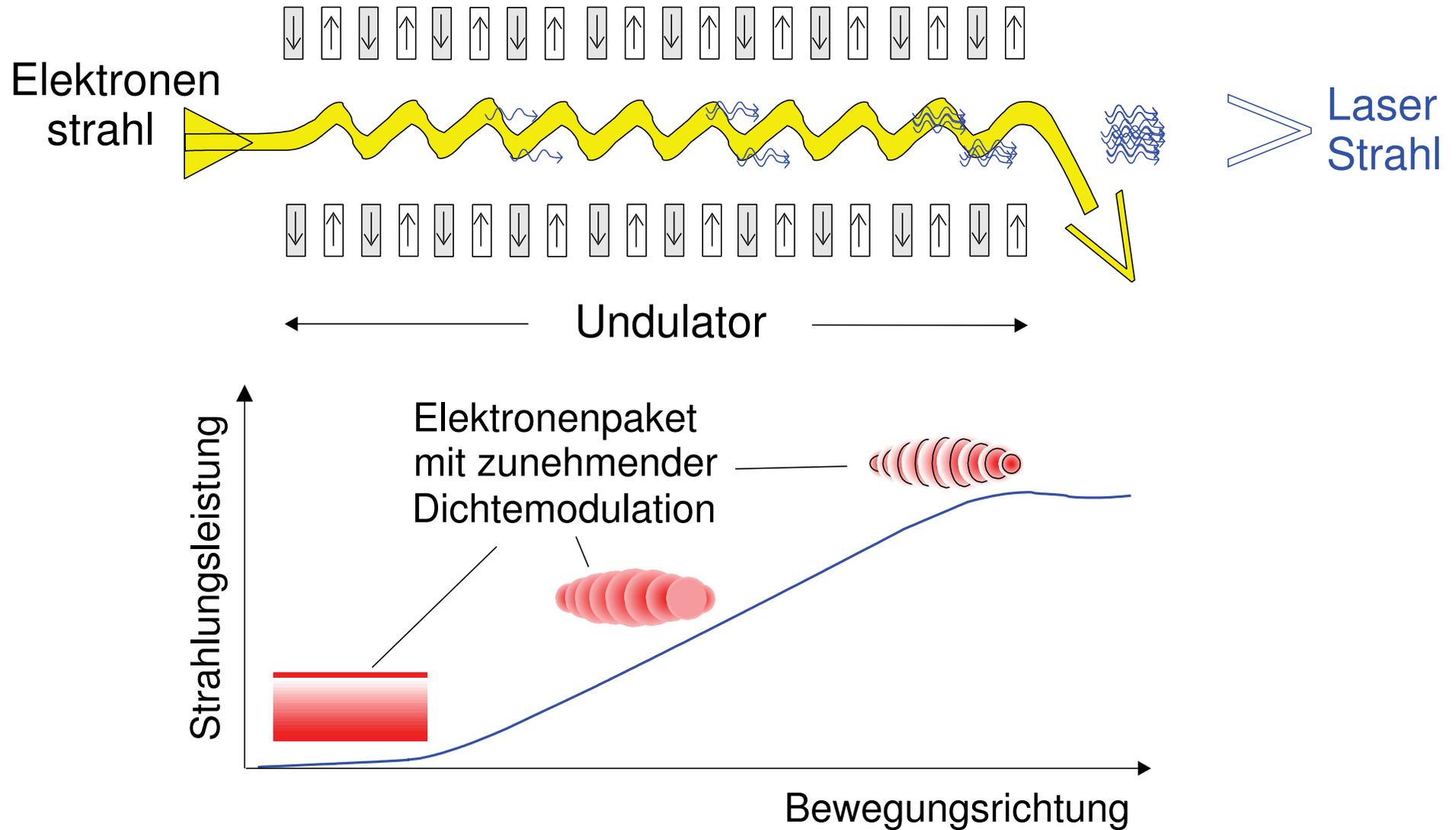
$$A_{ik} \propto \omega^3$$

- Zusätzlicher Zerfallskanal über den Augerprozeß
  - ⇒ Es gibt nur sehr wenige langlebige (metastabilen) Zustände
  - ⇒ Besetzungsinversion ist i.A. sehr schwer zu erreichen
  - Aufbau eines Resonators im Röntgenbereich kaum möglich, da es keine entsprechenden Spiegel gibt
- 
- Warum will man überhaupt einen im Röntgenbereich ( $\lambda < 100 \text{ nm}$ ,  $E > 10 \text{ eV}$ ) haben ?  
Was wären mögliche Quellen ?

# Das FEL Prinzip

- Nutze freie Elektronen als Verstärkungsmedium
- Beschleunigte Elektronen erzeugen Strahlung
- Elektromagnetisches Feld dieser Strahlung wirkt auf die Elektronen zurück
- Feld moduliert den Elektronenbunch und zwingt ihn zu kohärenter Bewegung

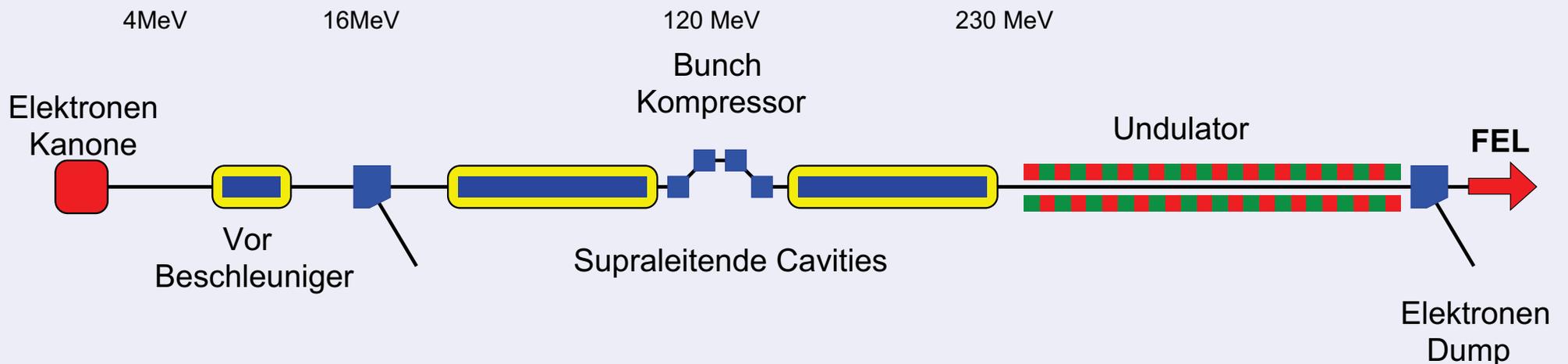
# Das FEL Prinzip



# Aufbau eines FEL

- Elektronenquelle: Erzeugung eines Elektronenbunches
- Beschleuniger: Beschleunigung auf relativistische Energien
- Magnetstruktur: Erzeugung der Röntgenstrahlung – Synchrotronstrahlung
- Röntgenoptik: Transport der FEL-Strahlung zum Experiment

## Experiment



# Realisierung eines FEL

## Erster VUV-FEL

FLASH am Hasylab/DESY

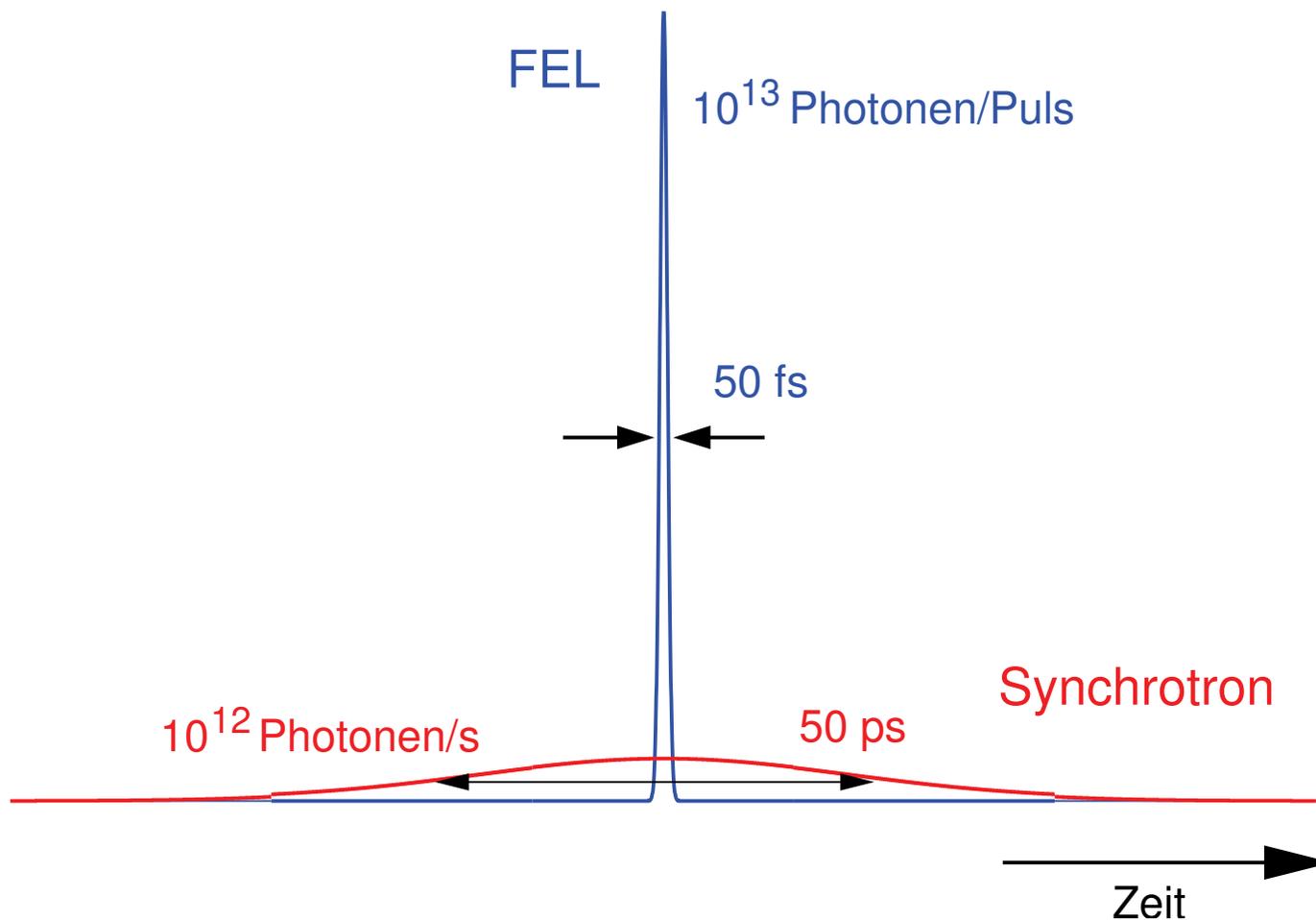
## Eigenschaften XFEL

- Typische Länge des Beschleunigers: 30-2000 m
- Länge der Magnetstruktur: 30-300 m
- Photonenenergiebereich 10 eV - 10 keV
- Pulslängen 10 – 100 fs (jetzt)



# Leistungsdaten von FEL's

- Zahl der Photonen, die man an aktuellen Synchrotronquellen in 1 s bekommt, erzeugt ein FEL in 50 fs !



# Anwendungen – FEL

Nutzung von FEL's zunächst primär für die Grundlagenforschung

## Prozesse in starken Feldern

- Verständnis von komplexen Vielteilchensystem und Prozessen
- Coulombexplosion
- Nichtlineare Prozesse

## Ultrakurzzeitphysik (einige 1 fs - 1 ps)

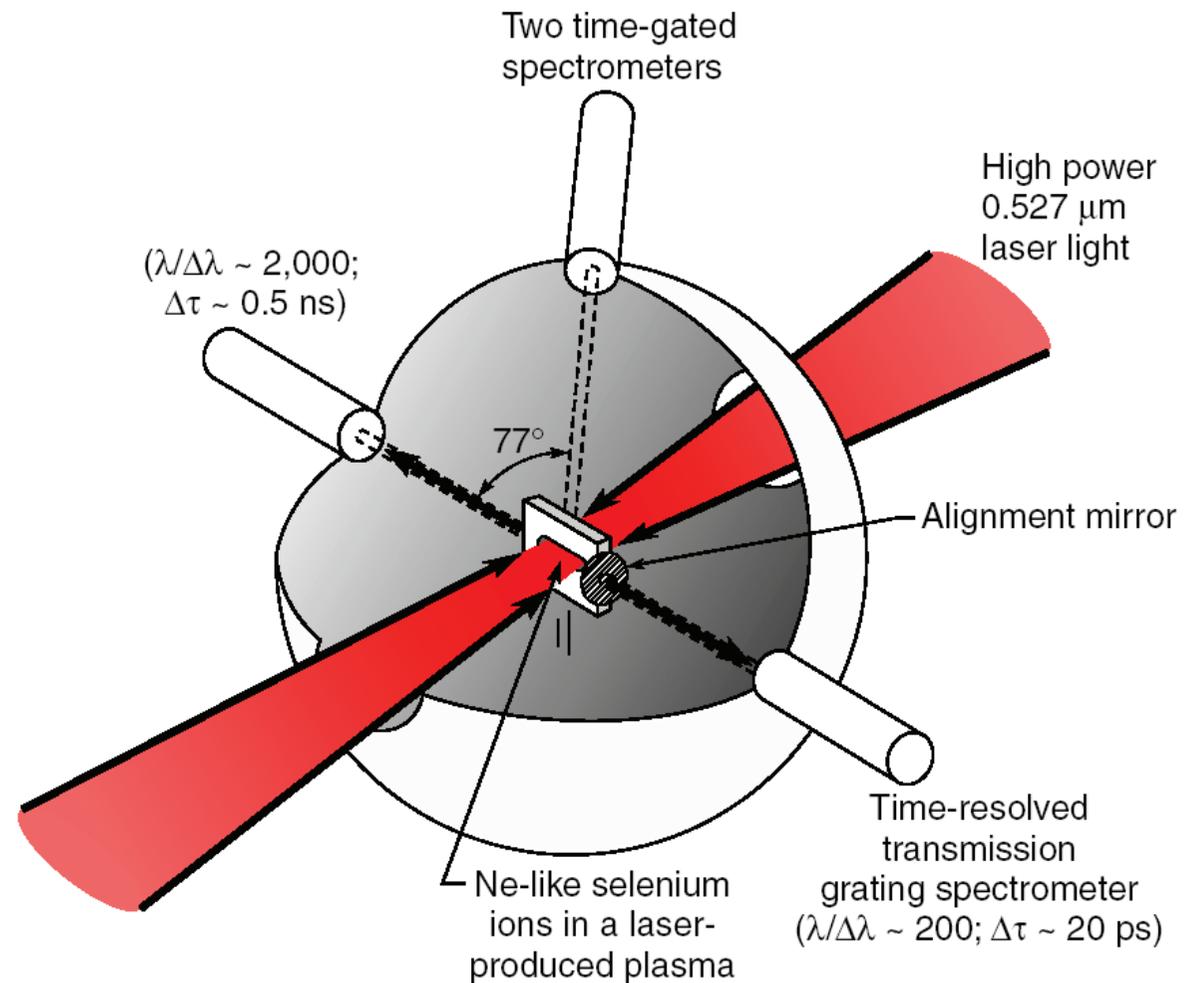
- Dynamik von chemischen Reaktionen (Kernbewegung)
- Dynamik von Elektronentransferprozessen

## Experimente an stark verdünnten Targets

- Einzelne Moleküle: freie Radikale, molekulare Ionen
- Massenselektierte Cluster

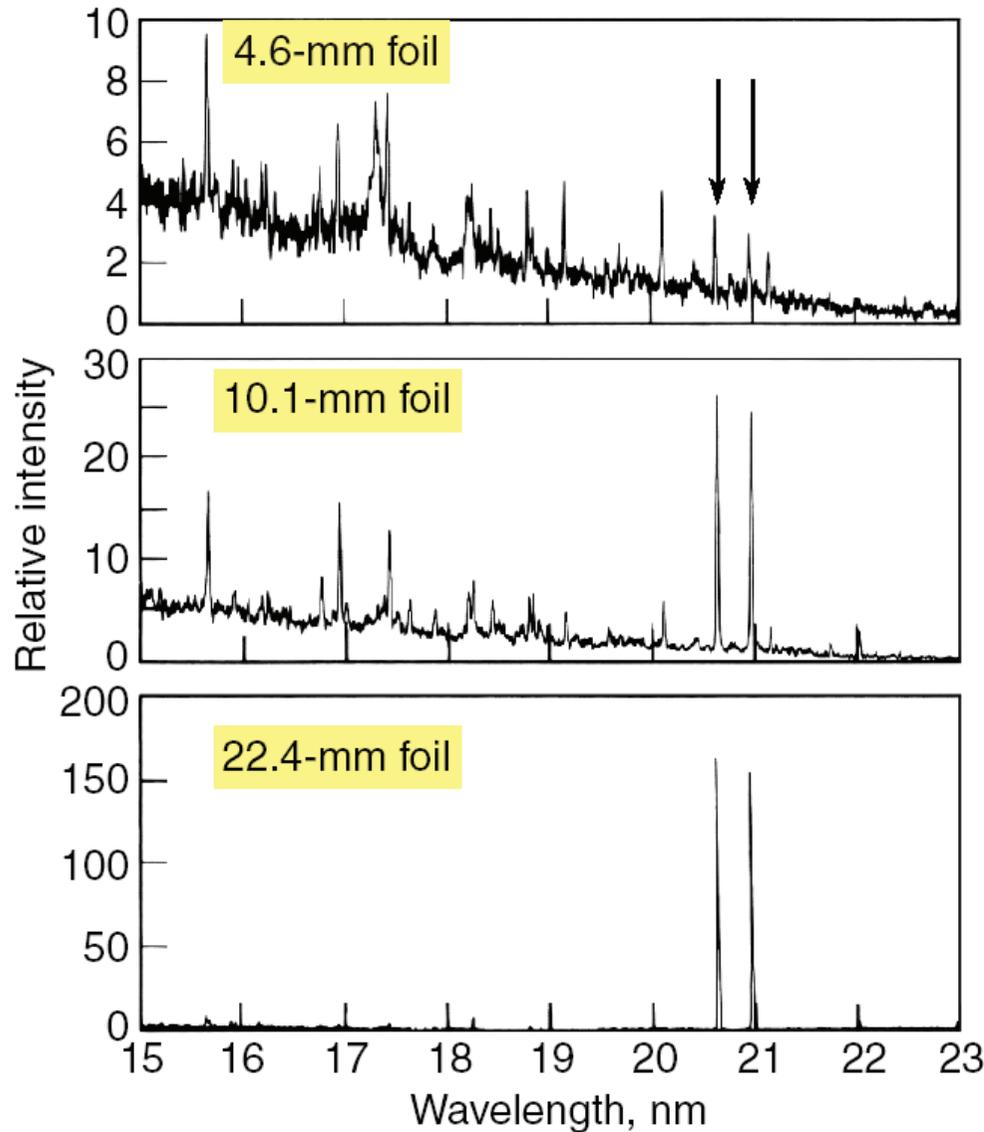
# Röntgenlaser

- Pumpen mit einem Höchstleistungslaser  
2.4 TW,  $2\omega$ , 450 ps,  
 $7 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$
- Dünne Selen Folie
- Spotgröße:  
 $200 \mu\text{m} \times 1.1 \text{ cm}$
- 20% Neon ähnliche Ionen
- Ionisationsenergie  
Fluor ähnlich:  $\text{Se}^{+23}$   
1036 eV  
Neon ähnlich: 2540 eV

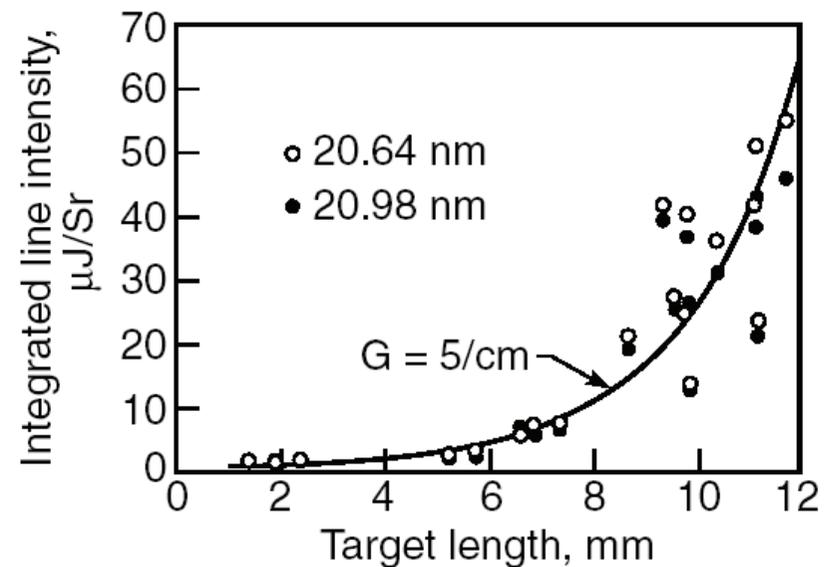


Following images by D. Attwood

# Röntgenlaser



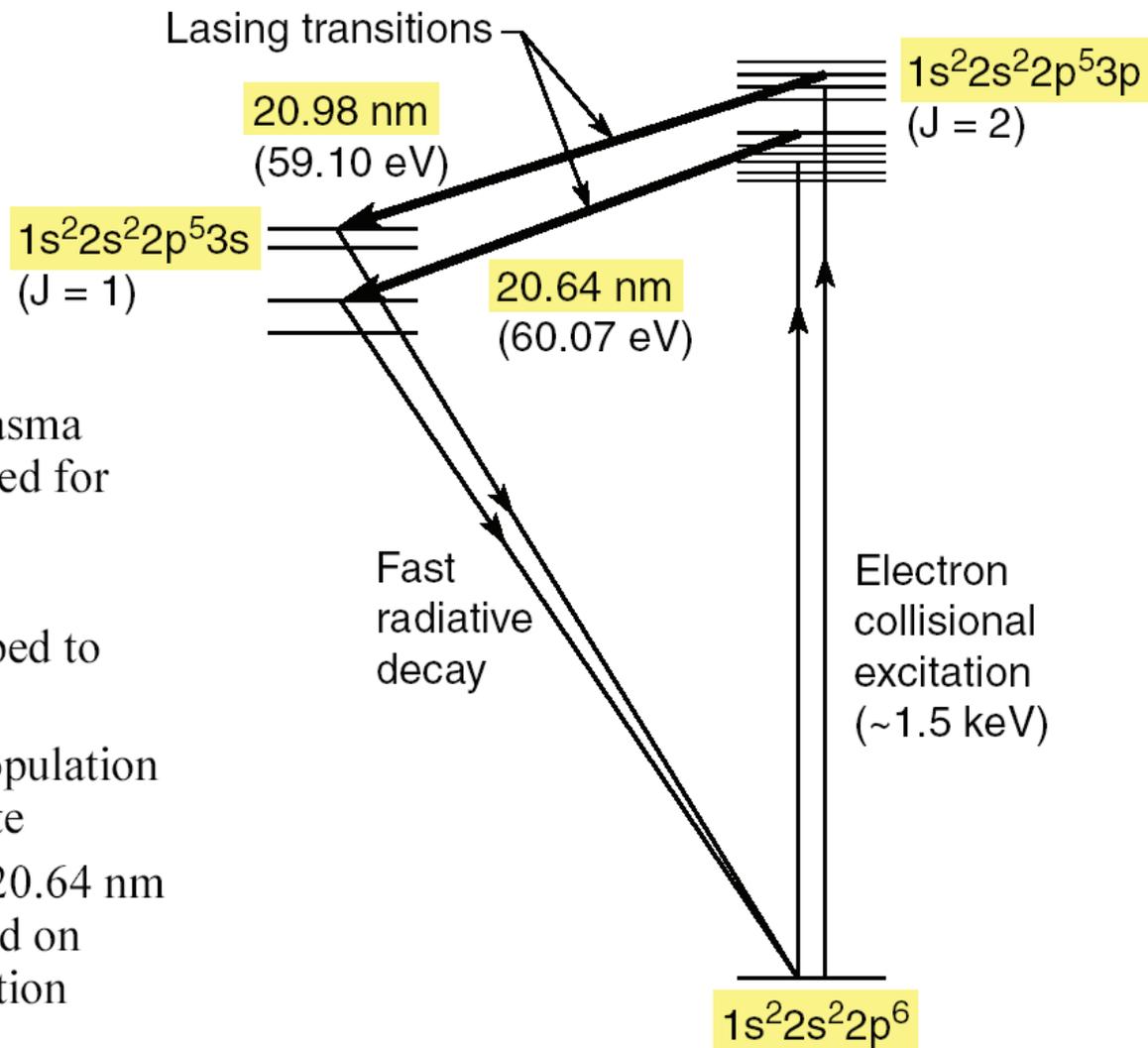
- Gain in axial direction only
- Use of on and off-axis time gated spectrometers
- $3p \rightarrow 3s$  lasing at 20.64 nm and 20.98 nm in Ne-like  $\text{Se}^{+24}$



Courtesy of D. Matthews et al. (LLNL)

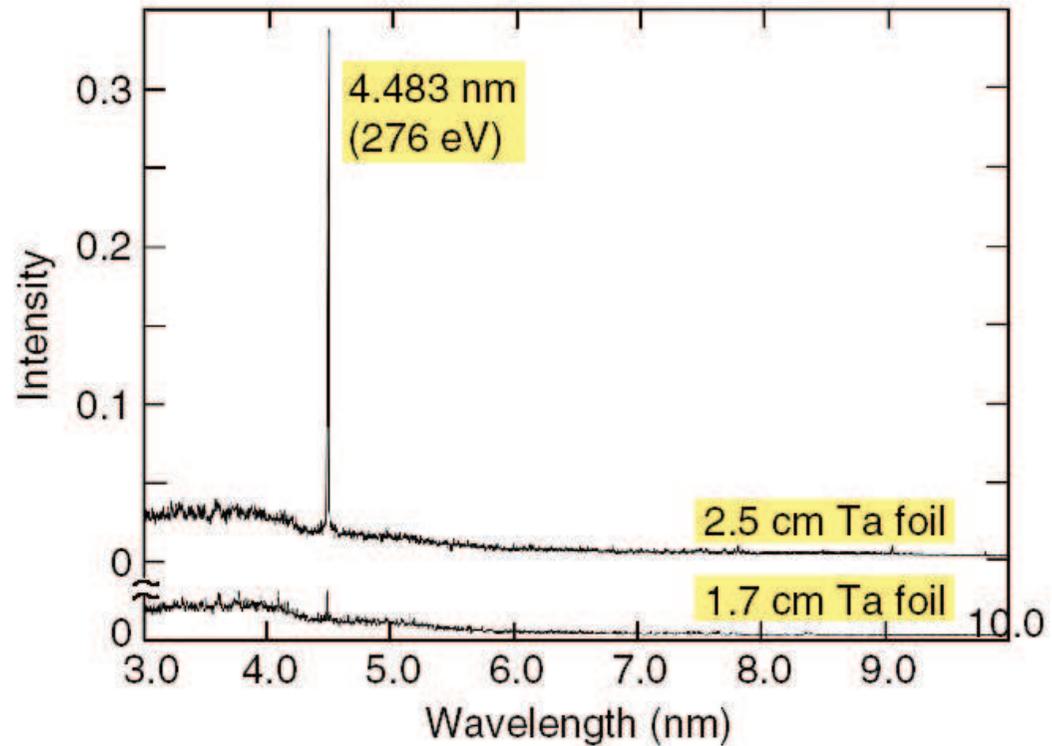
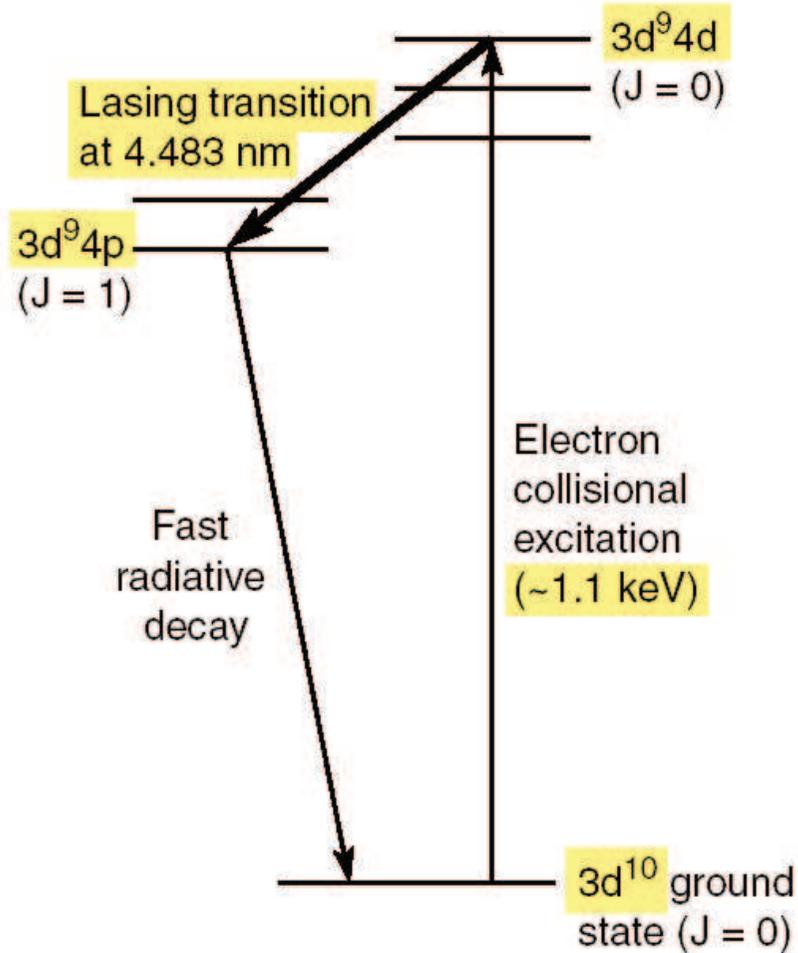
# Röntgenlaser

Simplified Energy Level Diagram for  $\text{Se}^{+24}$



- Laser produced plasma conditions optimized for dominant Ne-like ionization stage
- Collisionally pumped to a 3p excited state
- Fast radiative depopulation of the lower 3s state
- 3p  $\rightarrow$  3s lasing at 20.64 nm and 20.98 nm based on selective depopulation

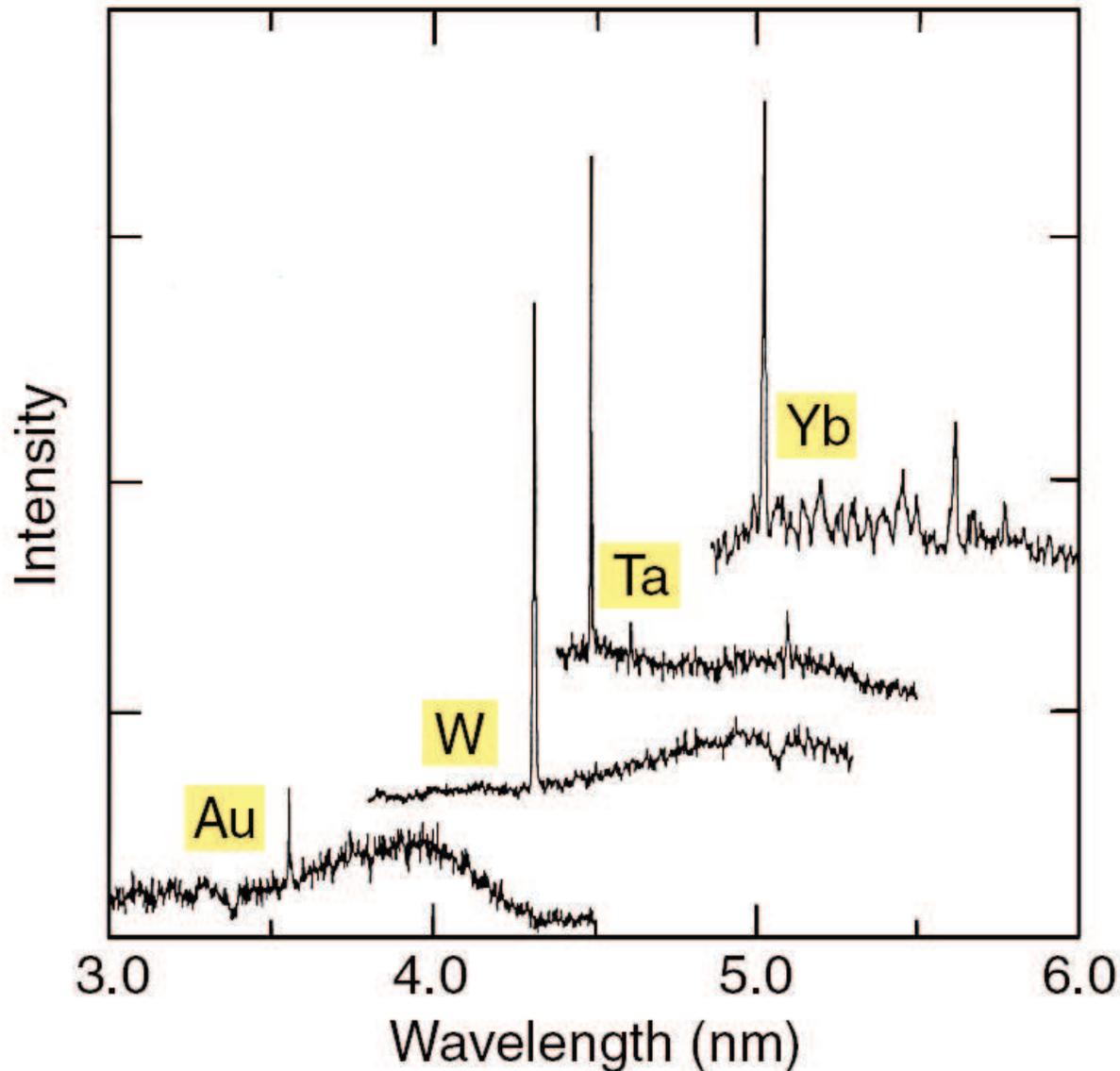
# Röntgenlaser



Courtesy of B. MacGowen et al. (1987), LLNL.

- Ni-like Ta ( $Z = 73, 28 e^-, +45$ )
- $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10}$  ground state ( $28 e^-$ )

# Röntgenlaser



## 4d → 4p lasing

- W at 4.318 nm
- Ta at 4.483 nm
- C-K at 4.36 nm

The water window is defined by the K-absorption edges of neutral carbon and oxygen.

# Nichtlineare Optik

- In nichtlinearen Kristallen können Laser “gemischt” werden
- Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen in Materie (linearer Ansatz)

$$\begin{aligned}\vec{D} &= \epsilon\epsilon_0\vec{E} \\ \vec{E} &= \vec{E}_0 \cos \omega_0 t\end{aligned}$$

gilt bei kleinem Feld  $\vec{E}_0$

- Für starke Felder gilt jedoch

$$\vec{D} = \sum_n \epsilon_n \epsilon_0 \vec{E}^n$$

- Ist  $\epsilon_n \neq 0$  werden somit in dem Material Frequenzen mit  $\omega_n = n \cdot \omega_0$  erzeugt.
- ⇒ High Harmonic Generation (HHG)
- Welche Frequenzen können erzeugt werden ?

# High Harmonic Generation (HHG)

PHYSICAL REVIEW A

VOLUME 57, NUMBER 4

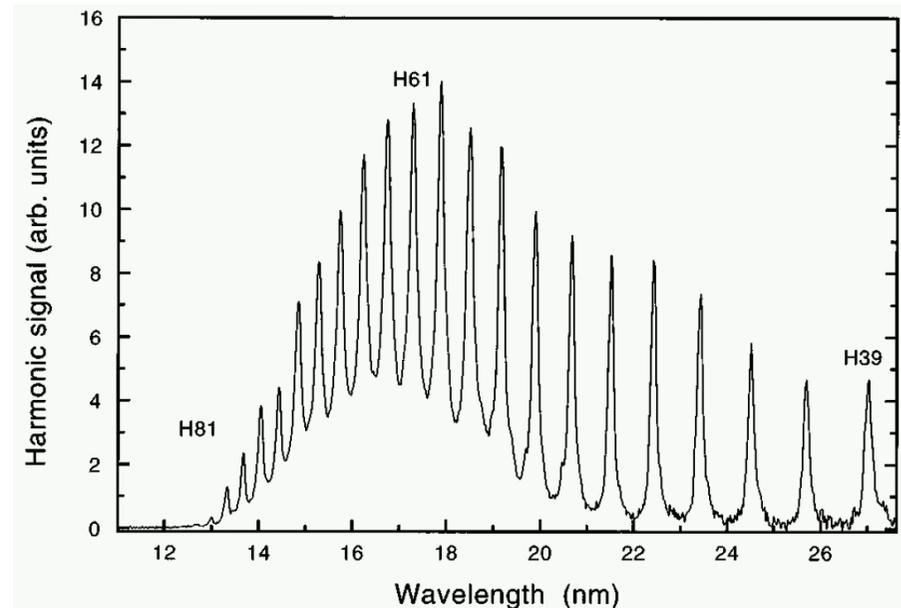
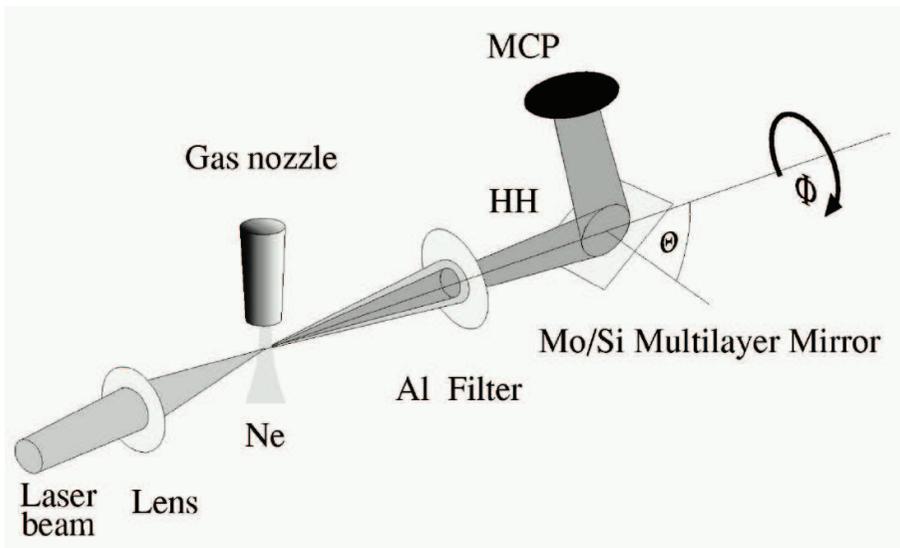
APRIL 1998

## Polarization of the 61st harmonic from 1053-nm laser radiation in neon

D. Schulze, M. Dörr, G. Sommerer, J. Ludwig, P. V. Nickles, T. Schlegel, and W. Sandner  
*Max-Born-Institut, D-12474 Berlin, Germany*

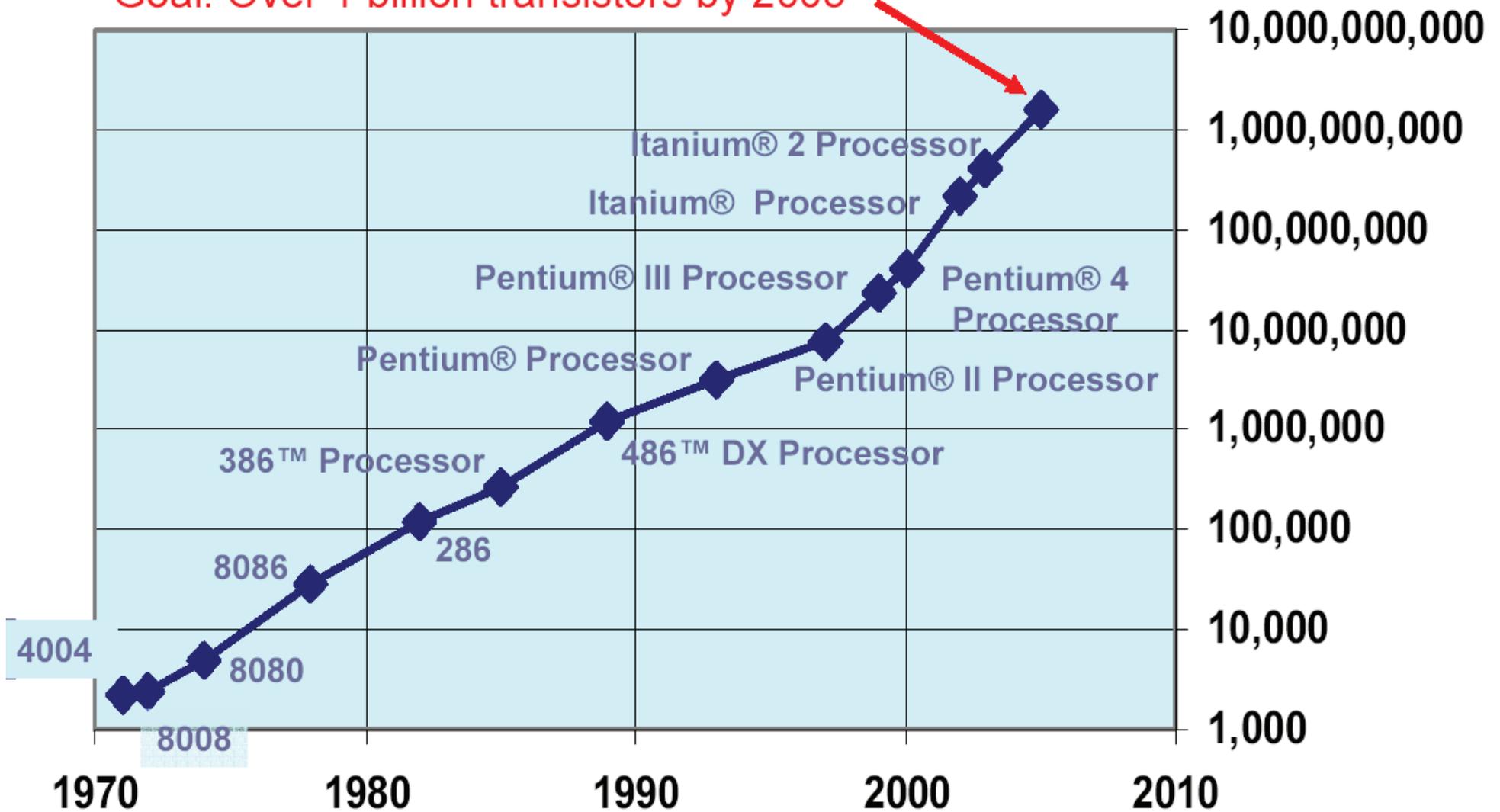
M. Drescher, U. Kleineberg, and U. Heinzmann  
*Fakultät für Physik, Universität Bielefeld, D-33501 Bielefeld, Germany*

(Received 6 June 1997)

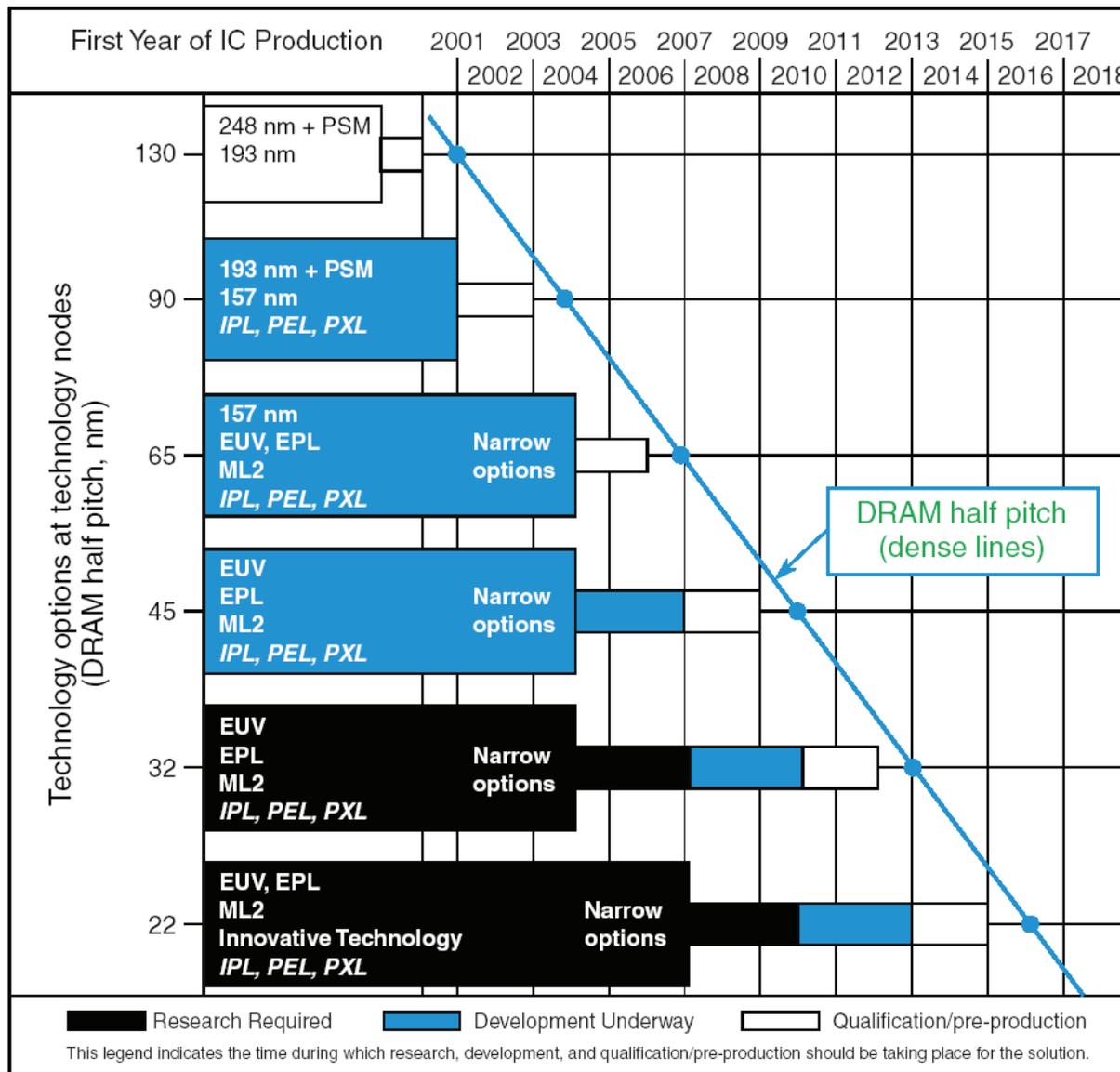


# Halbleiter Industrie – Moore's Gesetz

Goal: Over 1 billion transistors by 2005



# Halbleiter Industrie – Moore’s Gesetz



# Halbleiter Industrie – Roadmap

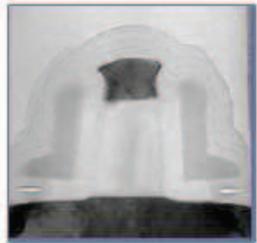
First year of volume production	2001	<del>2004</del> 2003*	<del>2007</del> 2005*	<del>2010</del> 2007*	<del>2013</del> 2009*	<del>2016</del> 2011*
Technology Generation (Dense lines, printed in resist)	130 nm	90 nm	65 nm	45 nm	32 nm	22 nm
Isolated Lines (in resist) [Physical gate, post-etch]	90 nm [65 nm]	53 nm [37 nm]	35 nm [25 nm]	25 nm [18 nm]	18 nm [13 nm]	13 nm [9 nm]
Chip Frequency	1.7 GHz	4.0 GHz	6.8 GHz	12 GHz	19 GHz	29 GHz
Transistors per chip (HV) (3 × for HP ; 5 × for ASICs)	100 M	190 M	390 M	780 M	1.5 B	3.1 B
DRAM Memory (bits)	510 M	1.1 G	4.3 G	8.6 G	34 G	69 G
Gate CD Control (3 $\sigma$ , post-etch)	5 nm	3 nm	2 nm	1.5 nm	1.1 nm	0.7 nm
Field Size (mm × mm)	25 × 32	25 × 32	22 × 26	22 × 26	22 × 26	22 × 26
Chip Size (mm) (2.2 × for HP ; to 4 × for ASIC)	140	140	140	140	140	140
Wafer Size (diameter)	300 mm	300 mm	300 mm	450 mm	450 mm	450 mm

\*Semiconductor Industry Association (SIA), December 2001. **\*Possible 2-year cycle.**

# Nanoskalige Strukturen

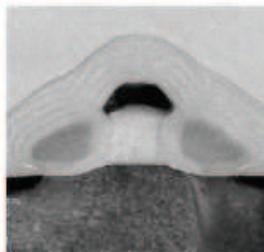
Größe von CMOS Strukturen ist im nm Bereich -- Nanosysteme

90 nm Node  
2003



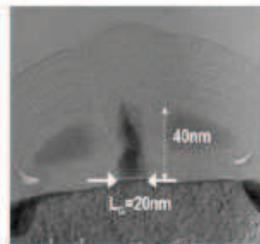
50 nm Länge

65 nm Node  
2005



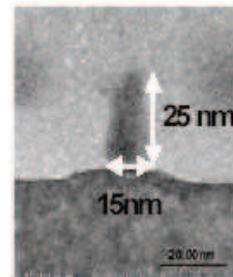
30 nm  
Prototyp

45 nm Node  
2007



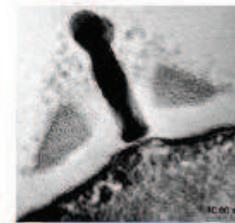
20 nm

32 nm Node  
2009



15 nm

22 nm  
2011



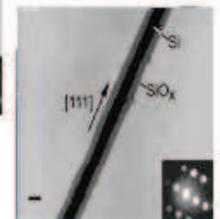
10 nm

16 nm  
2013

11 nm  
2015



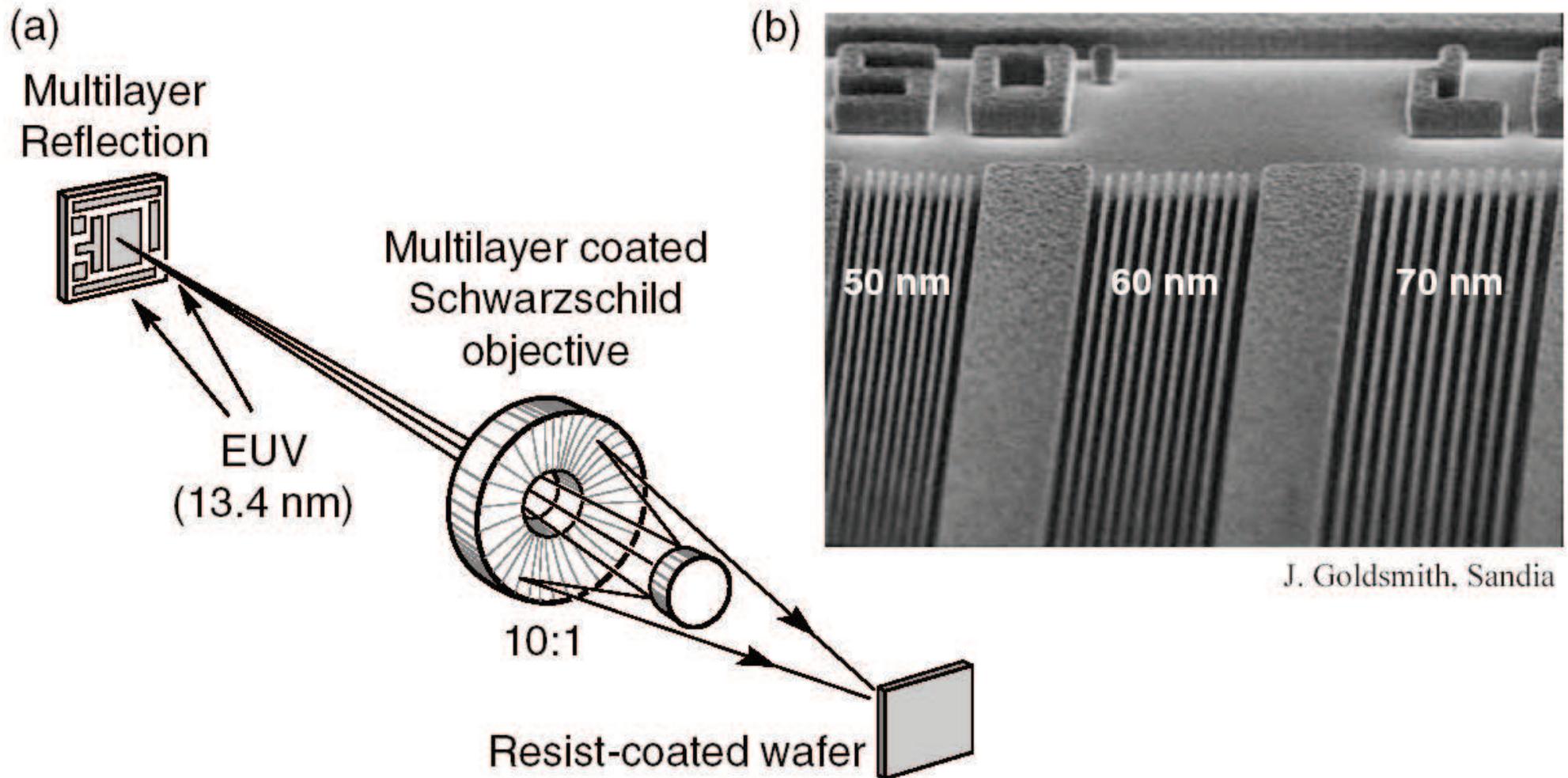
8 nm  
2017



Herstellung mit Lithographie

Licht ähnlicher Wellenlänge (einige nm) wird benötigt !

# EUV Lithography – Abbildung



# Take Home Message – Einführung

- Röntgen- und Rumpfniveauspektroskopie erlauben eine Element- und Ortsspezifische Analyse von Materialien
- Weiche Röntgenstrahlung ( $\cong 0.5-100$  nm): Elektronische Struktur  
Harte Röntgenstrahlung ( $\leq 0.5$  nm): Geometrische Struktur
- Röntgenstrahlung kann mit Röntgenröhren, Synchrotronquellen oder High Harmonic Generation hergestellt werden
- FEL's und HHG können laserähnliche Röntgenstrahlung produzieren: Hohe Intensität, ultrakurze Pulse
- Weiche Röntgenstrahlung im EUV (Extended UV) ist von großer Bedeutung für die Lithographie und die nächsten Generationen von Halbleiterbauelementen