

# Positronen-Annihilation: Antimaterie in der Materialforschung

**R. Krause-Rehberg**

Universität Halle

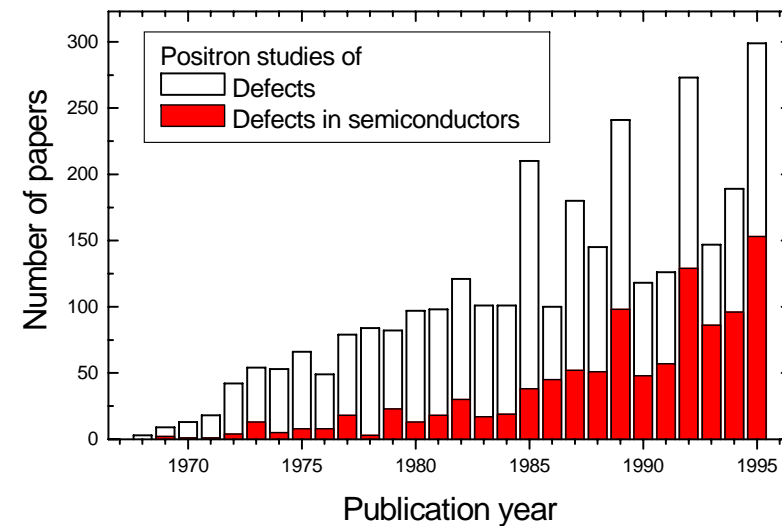
- methodische Einführung
- Beispiele (Halbleiter, Metalle, Nanoporen)

Physikstammtisch, Halle 20.2.2007



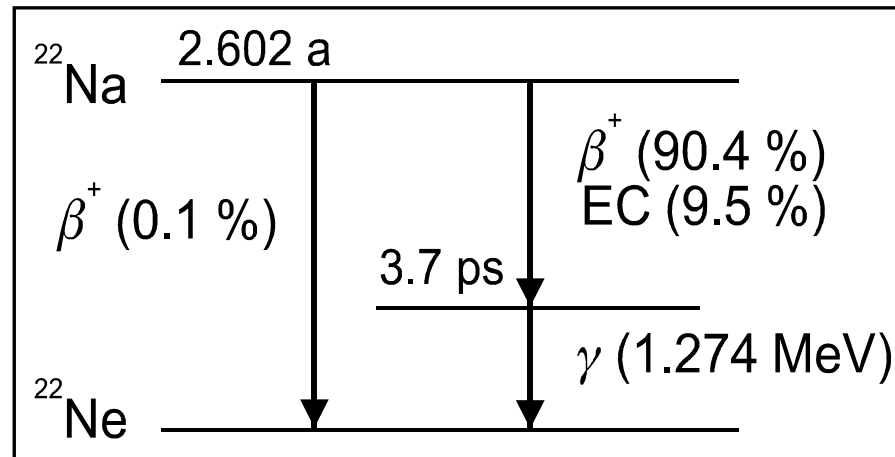
# Positronen-Kalender

- 1928 Positron durch Dirac vorhergesagt
- 1932 Positron in kosmischer Strahlung durch Anderson gefunden
- 1940ties WW von Materie mit Positrons studiert
- 1940-50 erste Studien der Elektronenstruktur mittels Winkelkorrelation
- 1950-1960 Entwicklung der Doppler-Verbreiterungs- & Lebensdauer-Spektroskopie
- 1969 Annihilationsparameter sind sensitiv für Kristalldefekte:  
Positroneneinfang (thermische Leerstellen  
in Metallen, plastische Deformation,  
Ionenkristalle)
- 1968 Positronen Erzeugung  
mittels LINAC
- 1982 Moderation von Positronen &  
Positronenstrahl-Systeme
- 1998 erste Positronen-Mikrosonde  
arbeitet



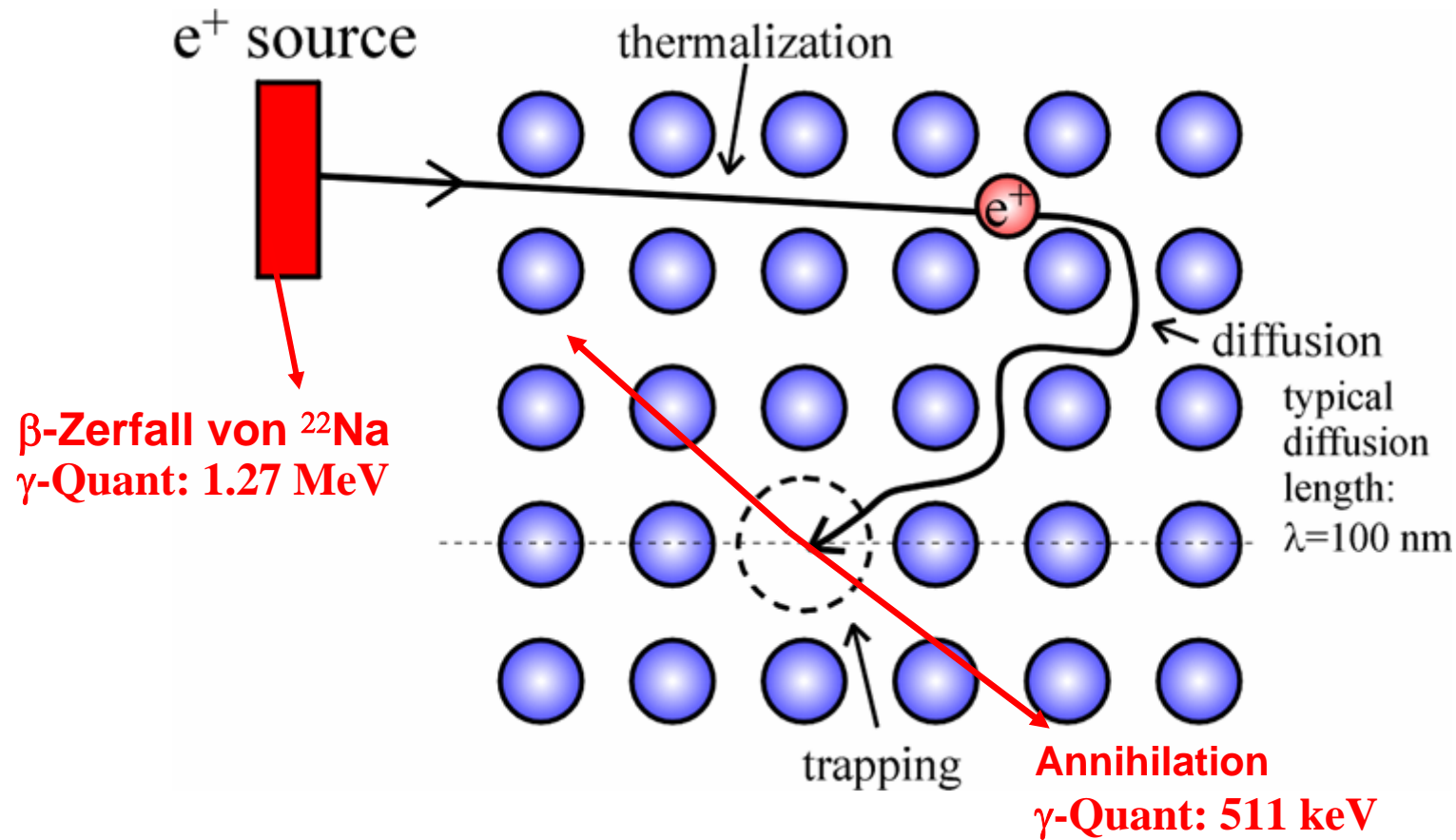
# Positronenquellen

- **$\beta^+$ -Zerfall:**  $^{22}\text{Na} \rightarrow ^{22}\text{Ne} + \beta^+ + \nu_e + \gamma_{(1.27\text{MeV})}$   
(Laborquellen; Halbwertszeit: 2.6 Jahre; bis zu  $10^6$  e<sup>+</sup>/s)



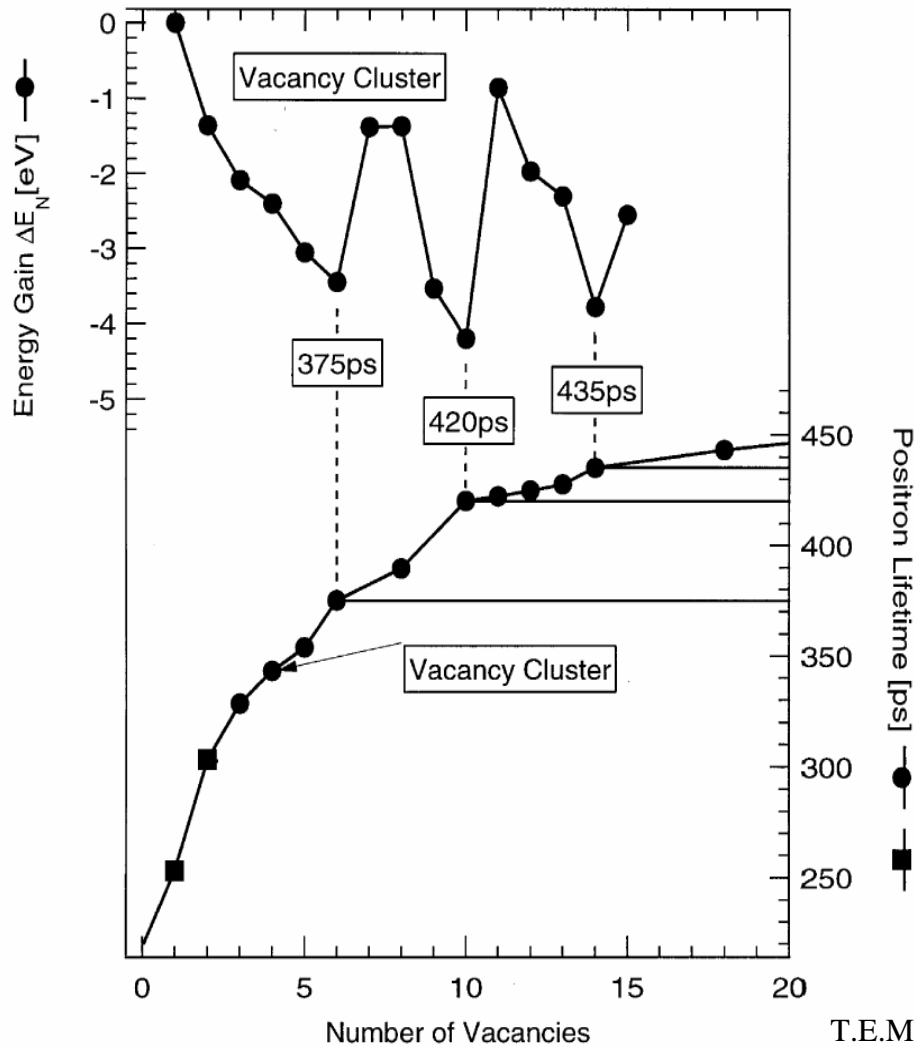
- **Paarbildung** mit MeV-Elektronenstrahlen (oft mit LINAC):  
Bremsstrahlung erzeugt Positronen;  $>10^9$  e<sup>+</sup>/s (unser Projekt einer hochintensiven gepulsten Positronenquelle am FZD in Rossendorf: EPOS)
- nukleare Reaktion:  $^{113}\text{Cd}(n,\gamma)^{114}\text{Cd} + \text{drei } \gamma \text{ Quanten} \Rightarrow$  Paarbildung:  $>10^{10}$  e<sup>+</sup>/s (am Forschungsreaktor-II München)

# Defektnachweis mit Positronen



- Positronen-Wellenfunktion wird im Defekt lokalisiert (z.B. Leerstellen)
- Annihilationsparameter ändern sich, wenn Positron im Defekt zerstrahlt
- Defekte können nachgewiesen werden (Identifizierung und Quantifizierung)

# Theoretische Berechnung der Lebensdauer für Leerstellen-Agglomerate in Si

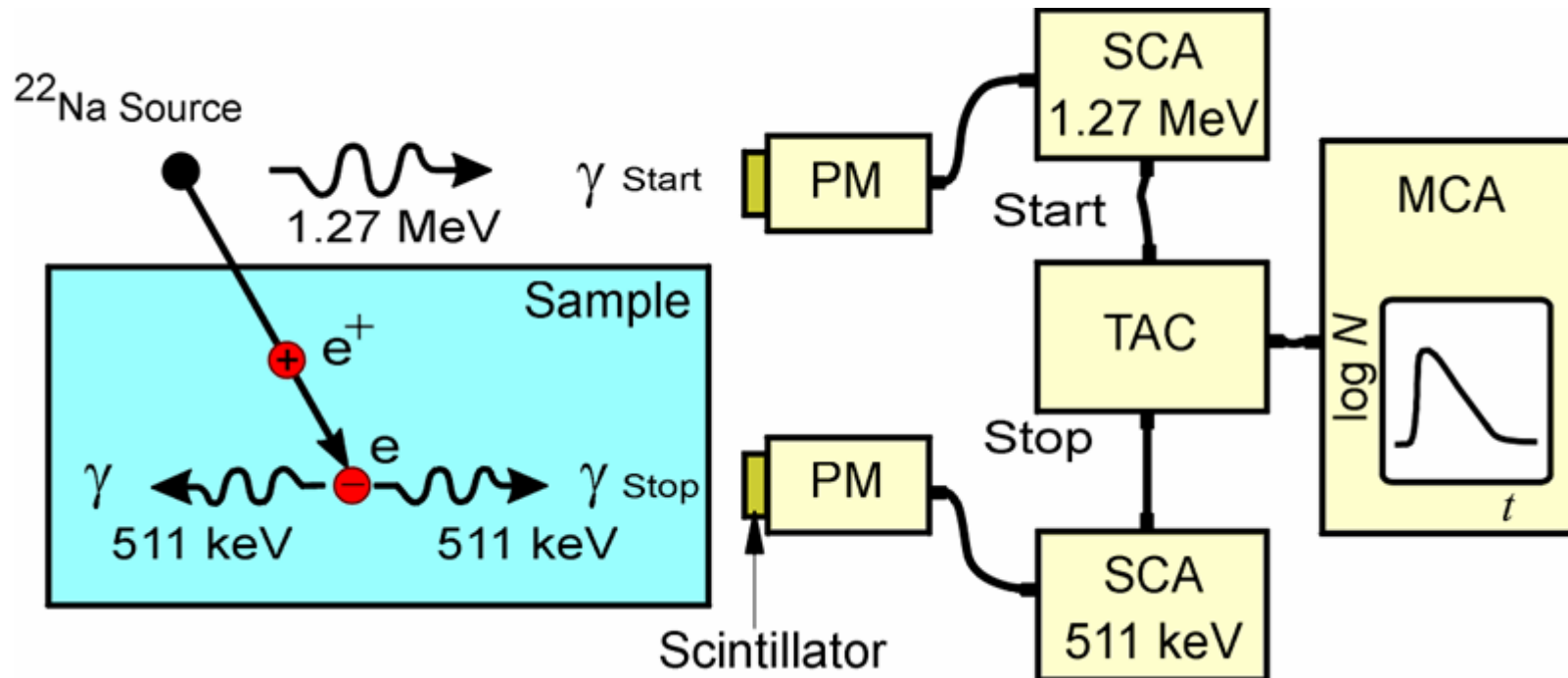


T.E.M. Staab et al., Physica B 273-274 (1999) 501

- es existieren bestimmte Leerstellen-Konfigurationen mit besonders hohem Energiegewinn
- „Magic Numbers“: 6, 10 und 14
- Positronenlebensdauer steigt mit Cluster-Größe
- ab ca.  $n = 10$  Sättigungseffekt, d.h. exakte Größe dann nicht mehr zu ermitteln



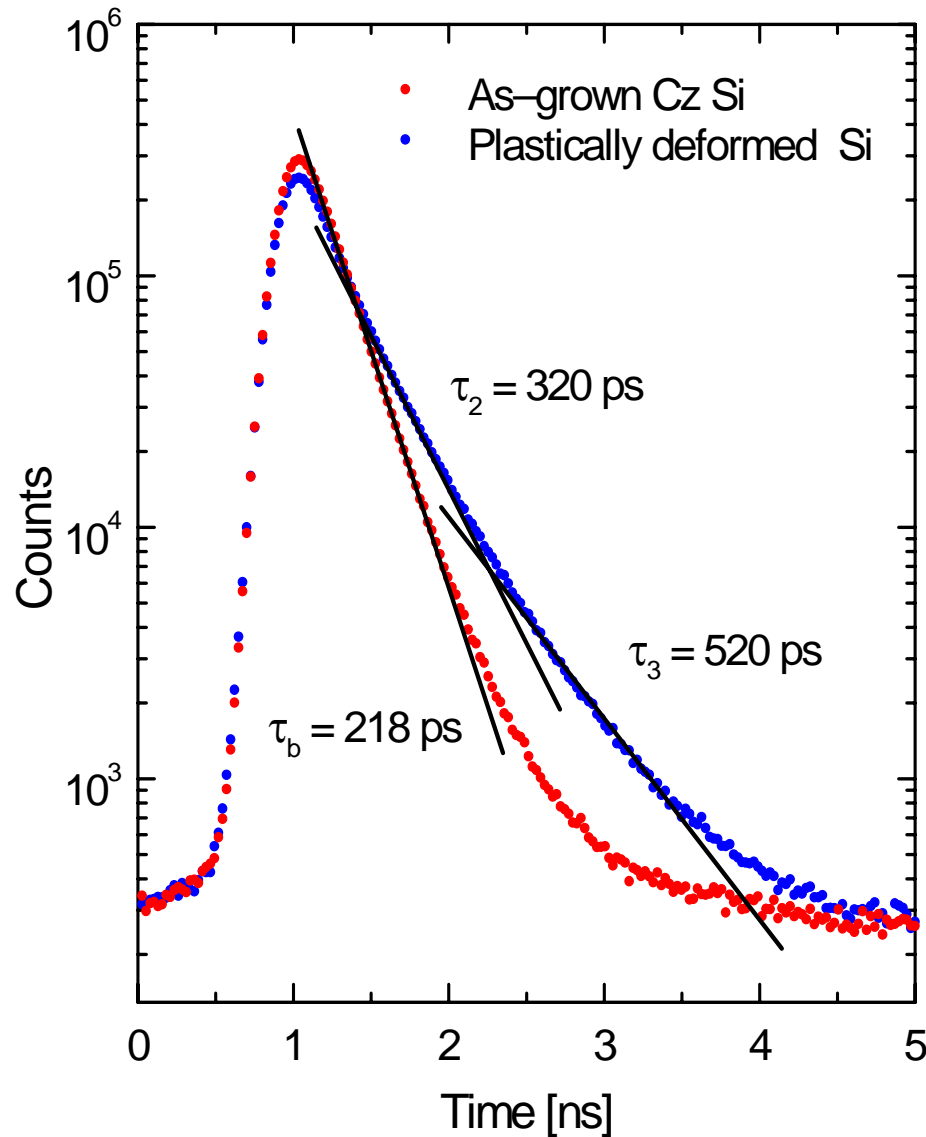
# Die Messung der Positronenlebensdauer



Positronenlebensdauer: Zeitdifferenz zwischen  $1.27\text{ MeV}$   $\gamma$ -Quant ( $\beta^+$ -Zerfall) und einem  $0.511\text{ MeV}$   $\gamma$ -Quant (Annihilation)

PM=Sekundärelektronenvervielfacher; SCA=Einkanalanalysator (Constant-Fraction Typ)  
TAC=Zeit-Impulshöhen-Konverter; MCA= Vielkanalanalysator

# Positronenlebensdauer-Spektren

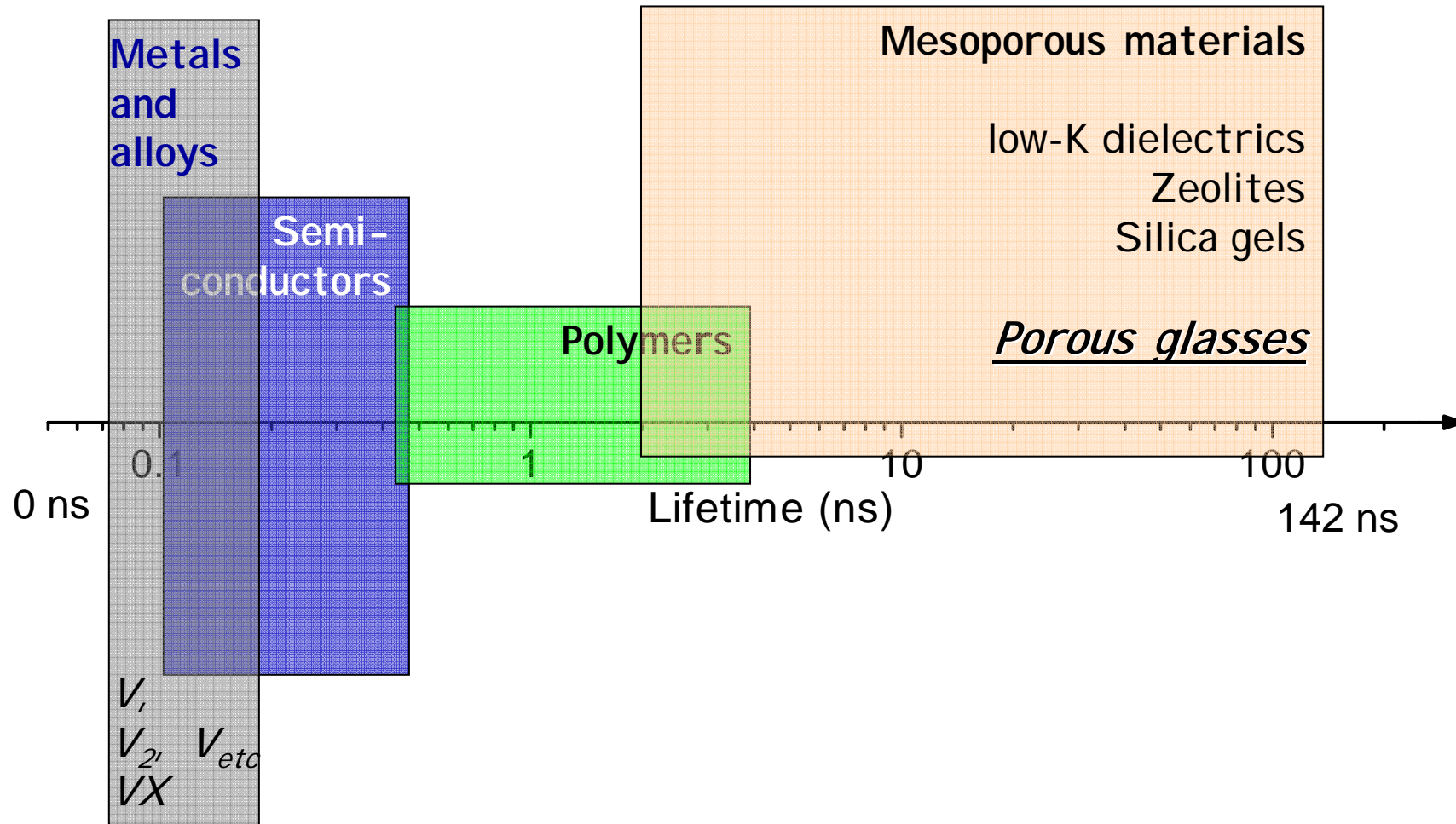


- Lebensdauerspektren bestehen aus exponentiellen Zerfallstermen
- Einfang von Positronen in Defekte mit offenem Volumen führt zu langen Komponenten im Spektrum
- Spektrenanalyse wird mittels nichtlinearer Anpassroutinen durchgeführt
- Ergebnis: Lebensdauern  $\tau_i$  und Intensitäten  $I_i$

$$N(t) = \sum_{i=1}^{k+1} \frac{I_i}{\tau_i} \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right)$$

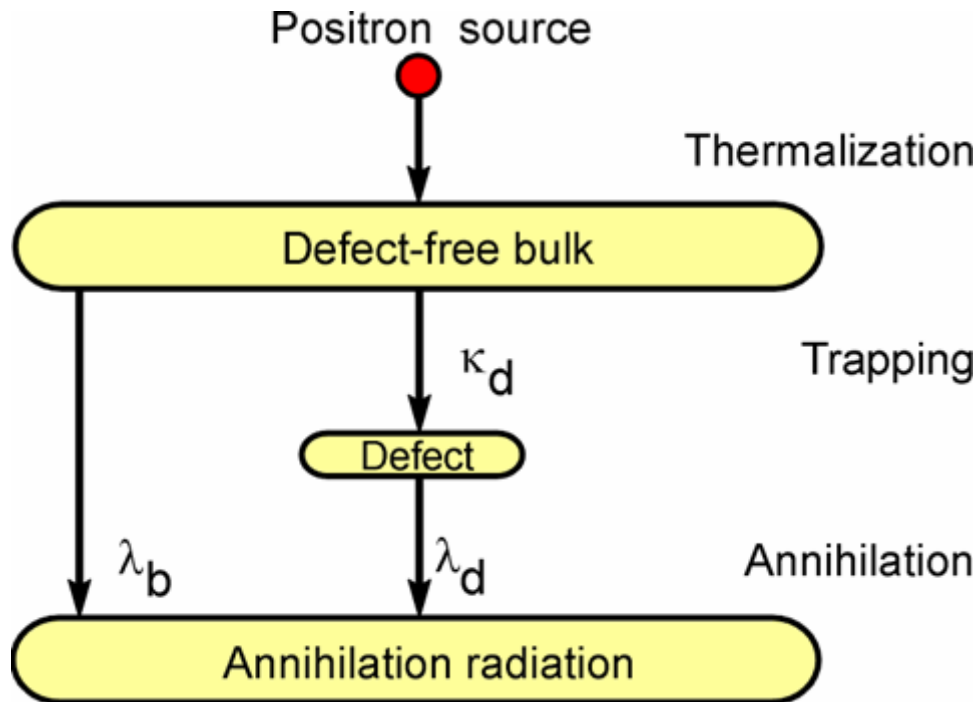


# Typische Lebensdauern





# Positroneneinfang durch einen Defekttyp: Trapping-Modell



$$\frac{dn_b(t)}{dt} = -(\lambda_b + \kappa_d)n_b(t)$$

$$\frac{dn_d(t)}{dt} = -\lambda_d n_d(t) + \kappa_d n_b(t)$$

Lösung ist das Zerfallsspektrum der Positronen:

$$D(t) = I_1 \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) + I_2 \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right)$$

Abkürzungen:

$$\tau_1 = \frac{1}{\lambda_b + \kappa_d}, \quad \tau_2 = \frac{1}{\lambda_d}$$

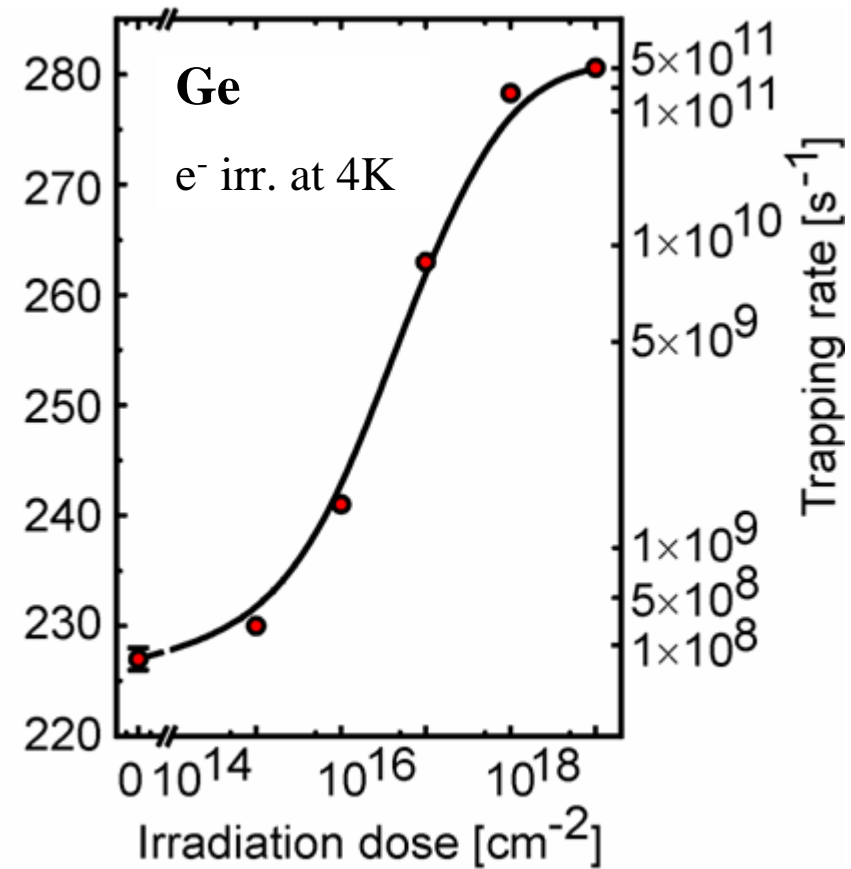
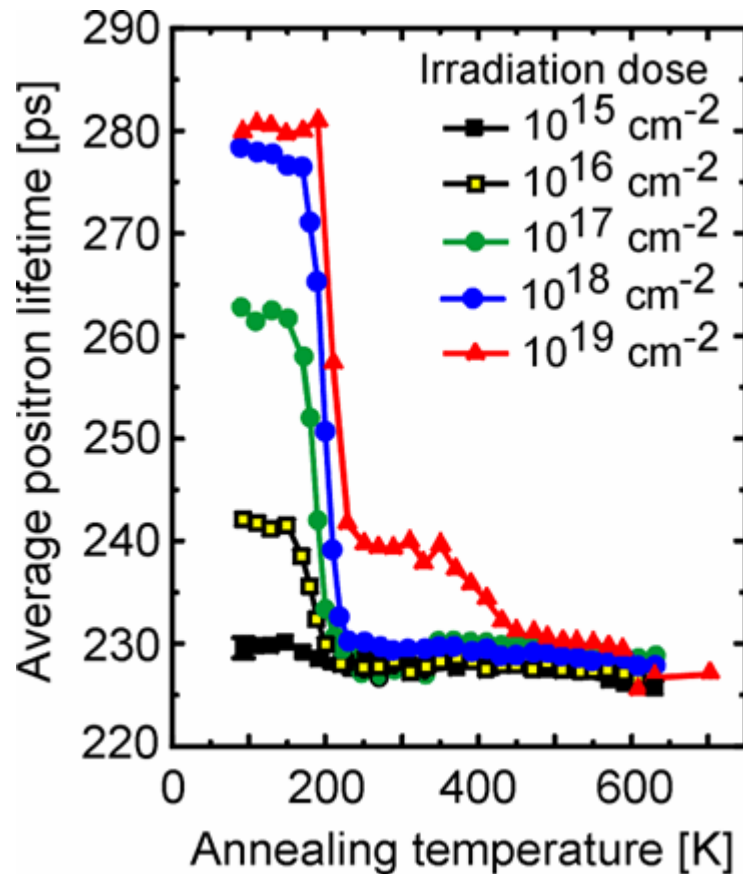
$$I_1 = 1 - I_2, \quad I_2 = \frac{\kappa_d}{\lambda_b - \lambda_d + \kappa_d}$$

Die  $\tau_i$  und  $I_i$  werden gefittet  $\Rightarrow$  Ergebnis:  
Einfangrate  $\kappa$

$$\kappa_d = \mu C_d = \frac{I_2}{I_1} \left( \frac{1}{\tau_b} - \frac{1}{\tau_d} \right)$$

# Defekte in Ge nach Elektronenbestrahlung

- 2 MeV-Elektronenbestrahlung bei 4K induziert Frenkelpaare (Leerstellen + Zwischengitteratom)
- Ausheilstufe bei 200 K
- bei hohen Bestrahlungsdosen bilden sich Doppelleerstellen

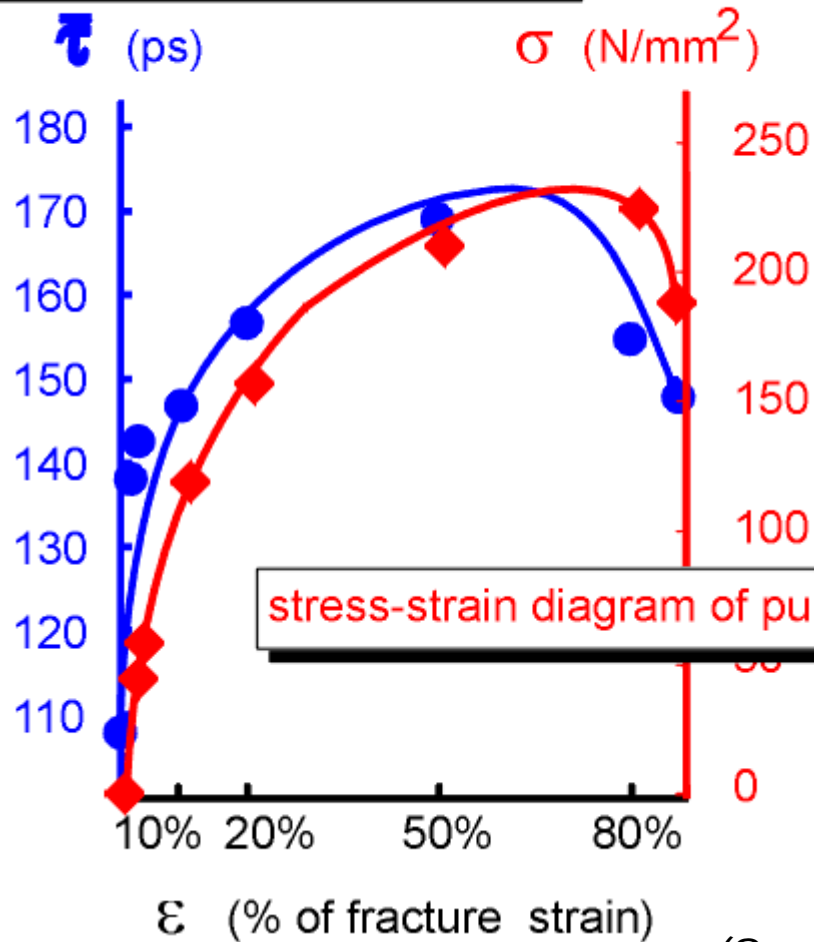


Polity et al., Phys. Rev. B **55** (1997) 10480



# Stress-strain experiments in Fe

average positron lifetime in pure iron after tensile strain

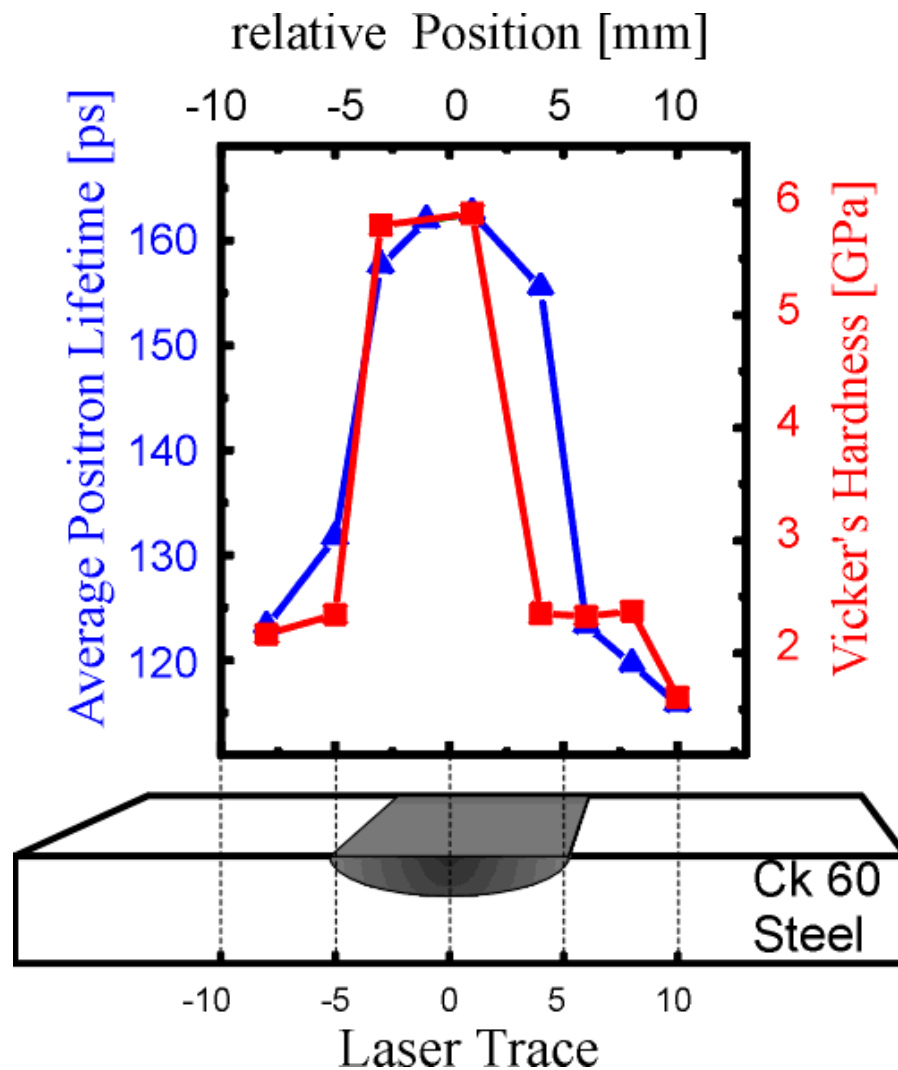


- Stress-strain experiments on Fe using a standard testing machine
- measured in relaxed state
- distinct positron trapping after 80% Hooks range (fully elastic region)
- early stage of fatigue

(Somieski et al., 1996)



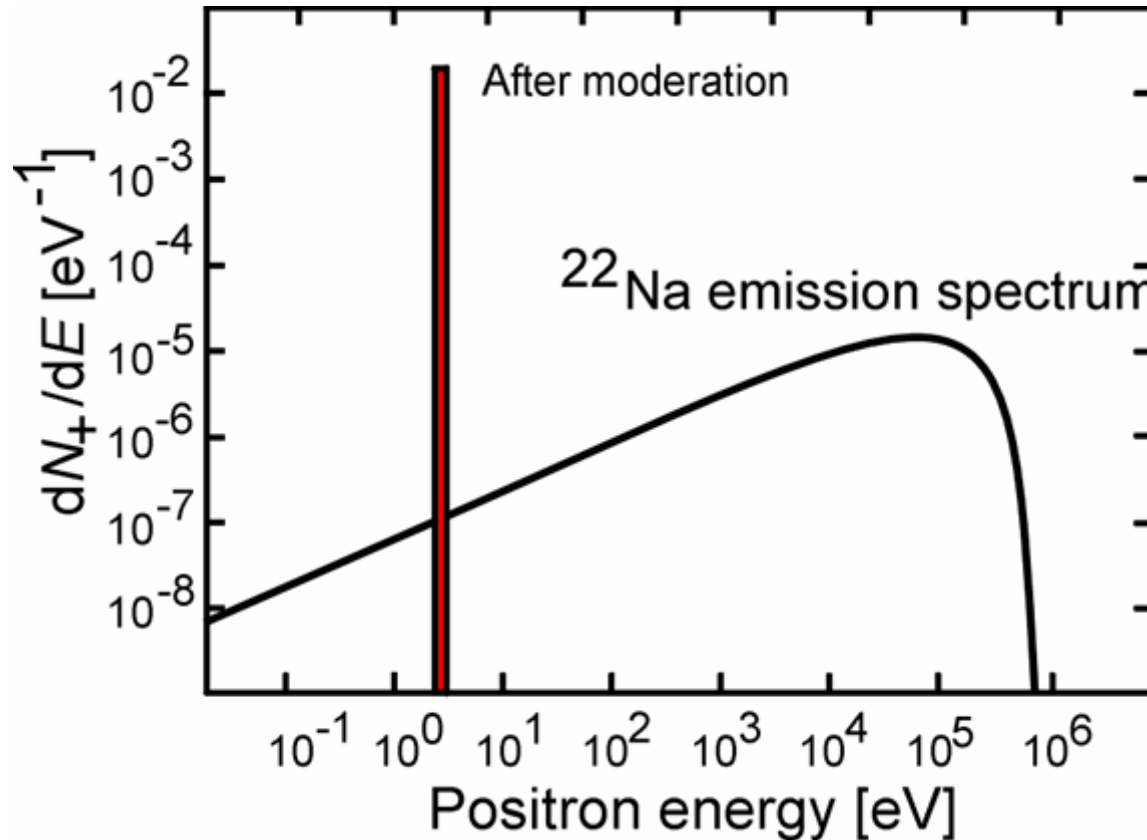
# Laser Hardening of Steel



- surface hardening by Laser treatment
- Laser power 1330 W, 16 mm/s
- hardening due to formation of dislocations
- positrons not sensitive to hardness itself, but to micro-defects

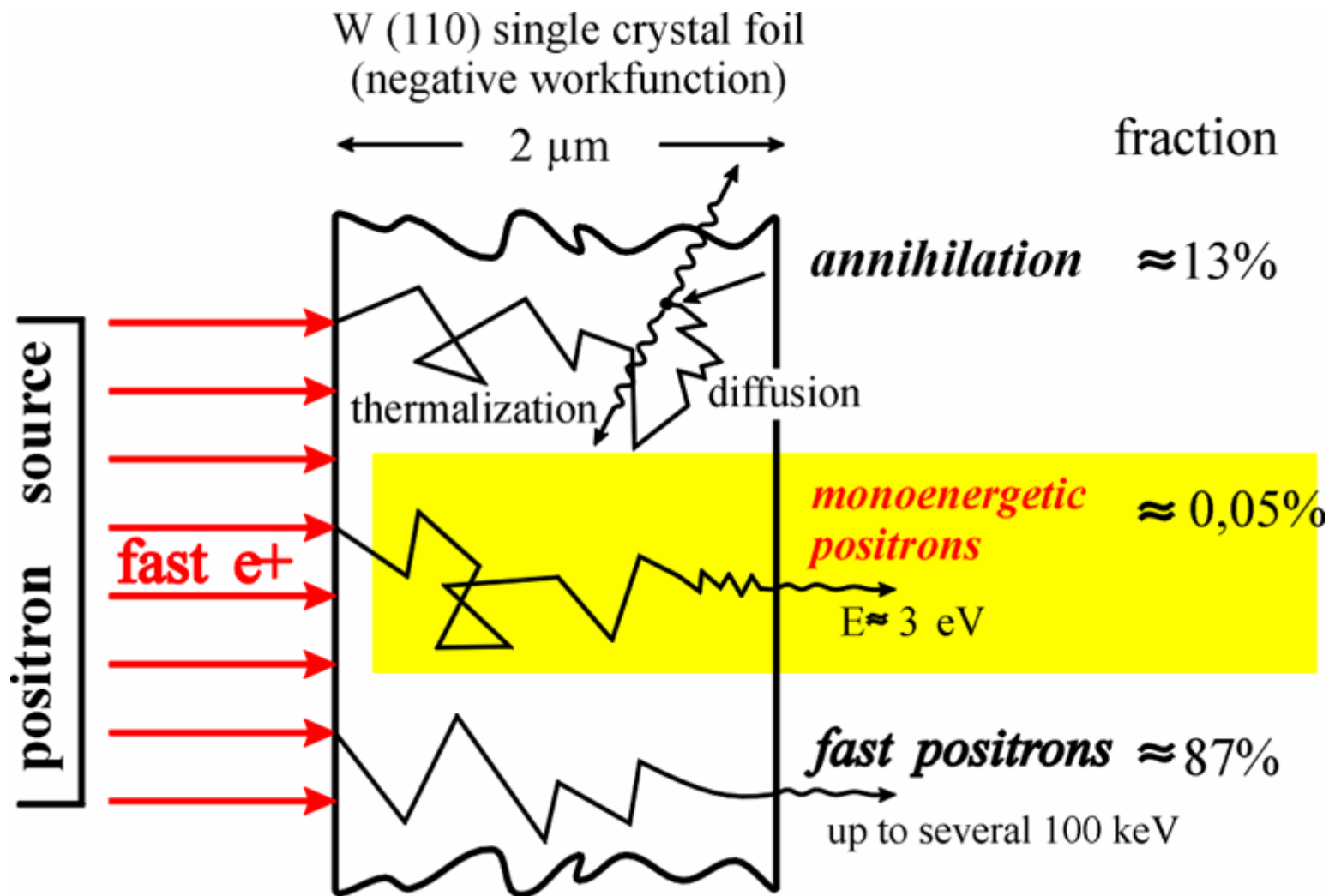
(Somieski et al., 1996)

# Informationstiefe der Positronen-Messung



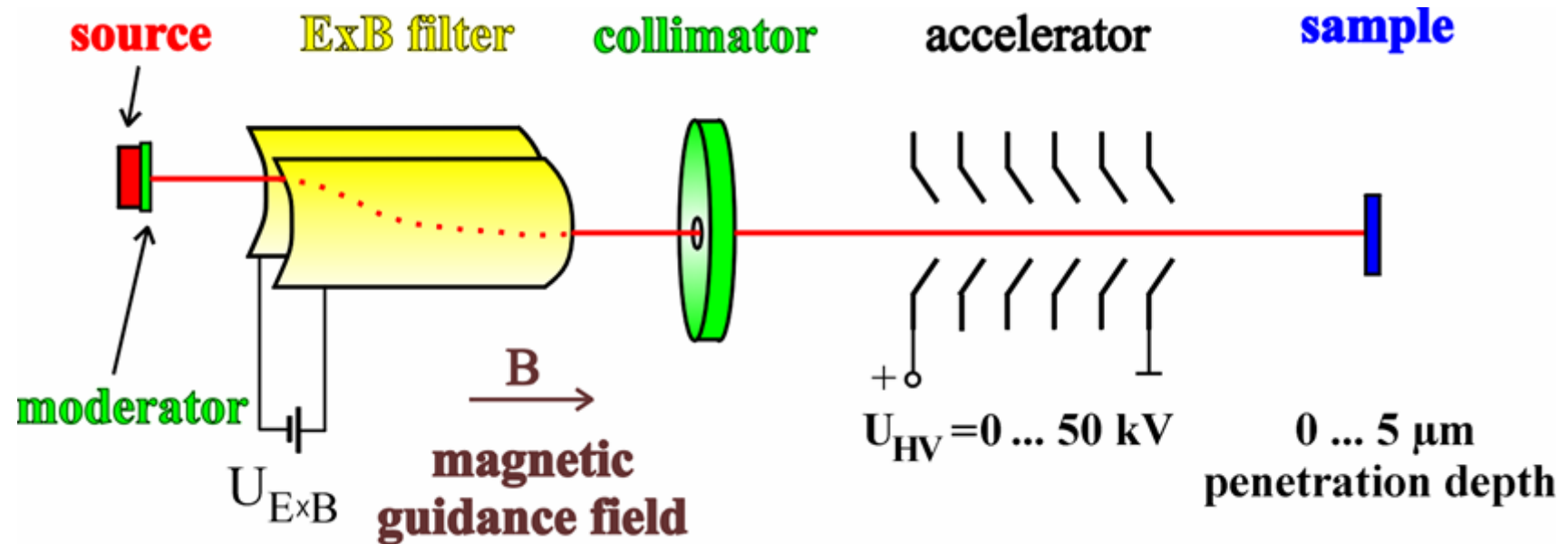
- Positronen aus  $\beta^+$ -Zerfall: breites Emission-Spektrum bis 540 keV
- tiefe Implantation in Probe
- ungeeignet für Untersuchung dünner Schichten
- monoenergetische Positronen nötig
- Moderation mittels Metallfolien

# Moderation von Positronen



Effektivität der Moderation:  $\approx 10^{-4}$

# Das Positronen-Strahlsystem in Halle



- Spot Durchmesser: 5mm
- Zeit für eine Doppler-Messung: 20 min
- Zeit für Tiefenscan: 8 h

# Das Positronenstrahlsystem in Halle

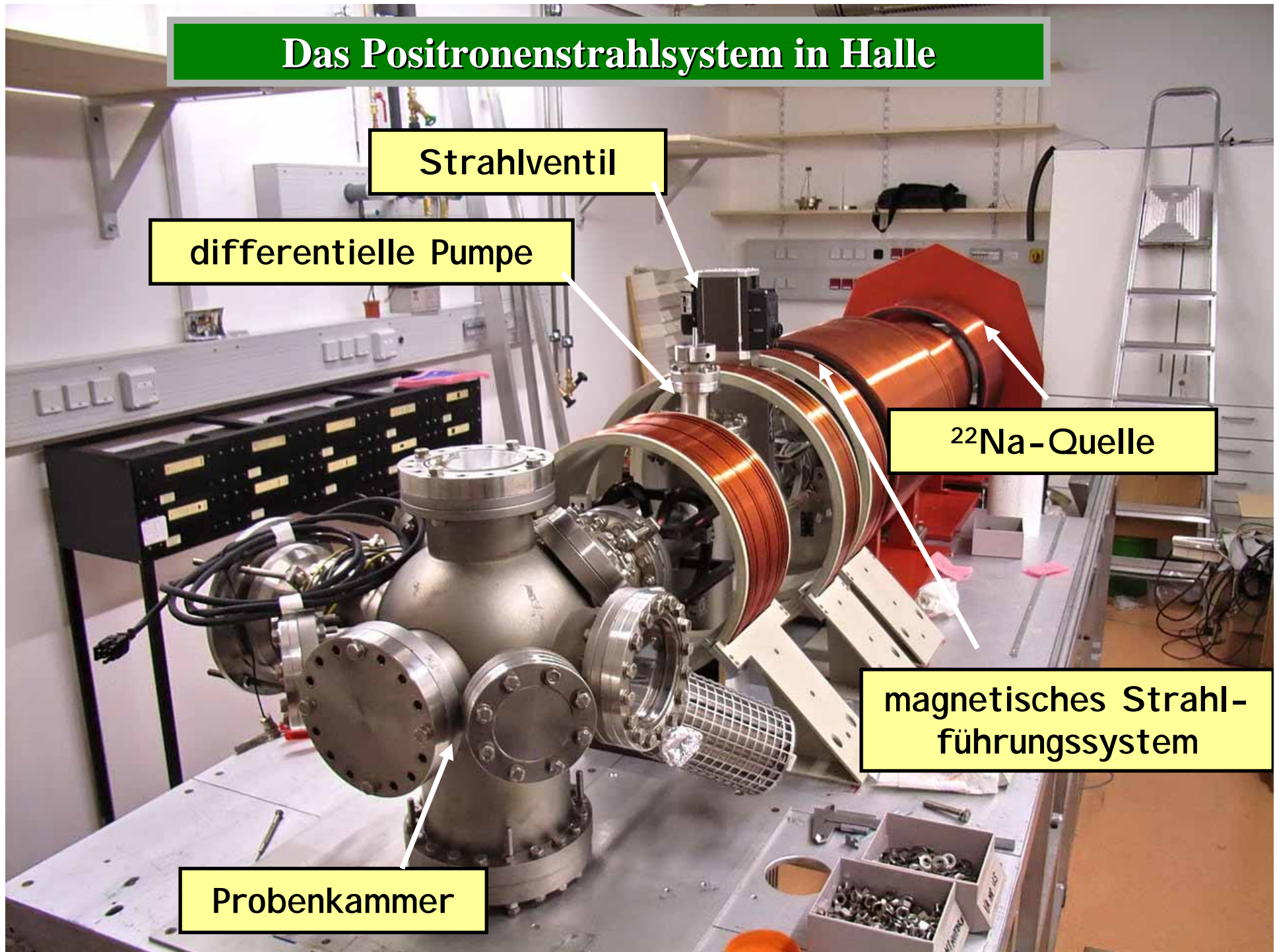
Strahlventil

differentielle Pumpe

$^{22}\text{Na}$ -Quelle

magnetisches Strahl-  
führungssystem

Probenkammer

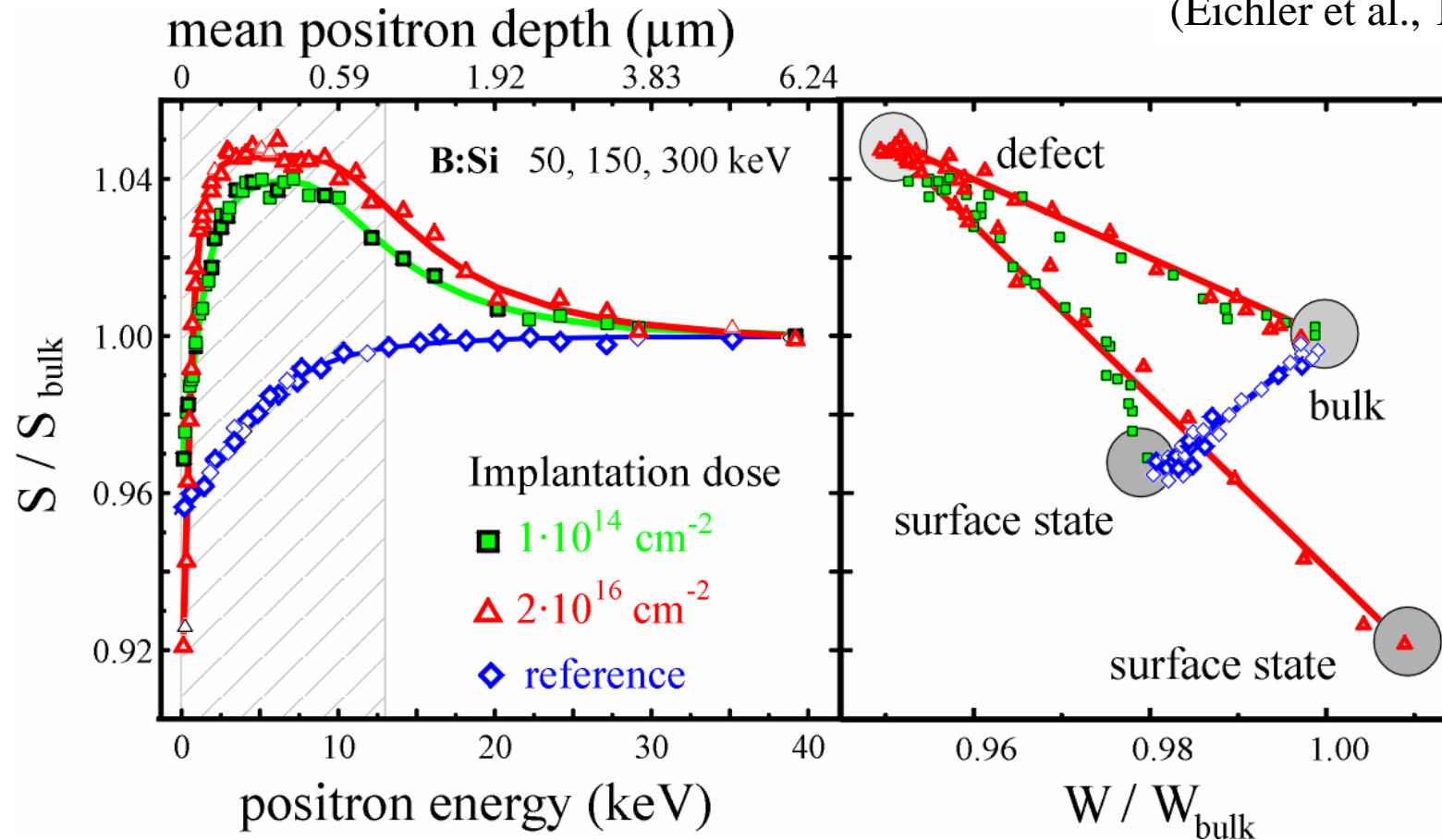




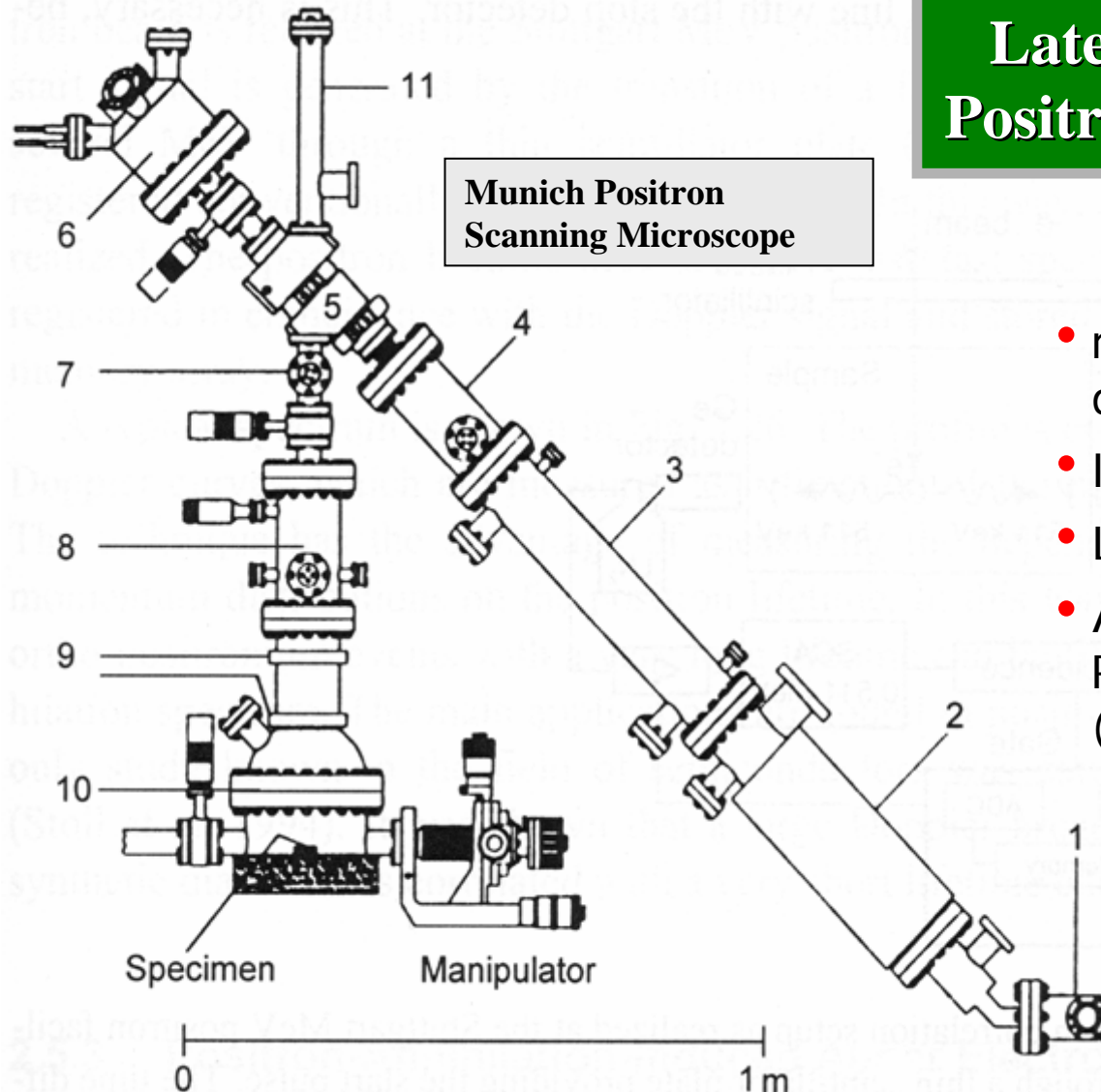
# Defects in Si induced by Ion Implantation

- ion implantation is most important doping technique in planar technology
- main problem: generation of defects  $\Rightarrow$  positron beam measurements

(Eichler et al., 1997)



# Laterale Auflösung mittels Positronen-Raster-Mikroskop

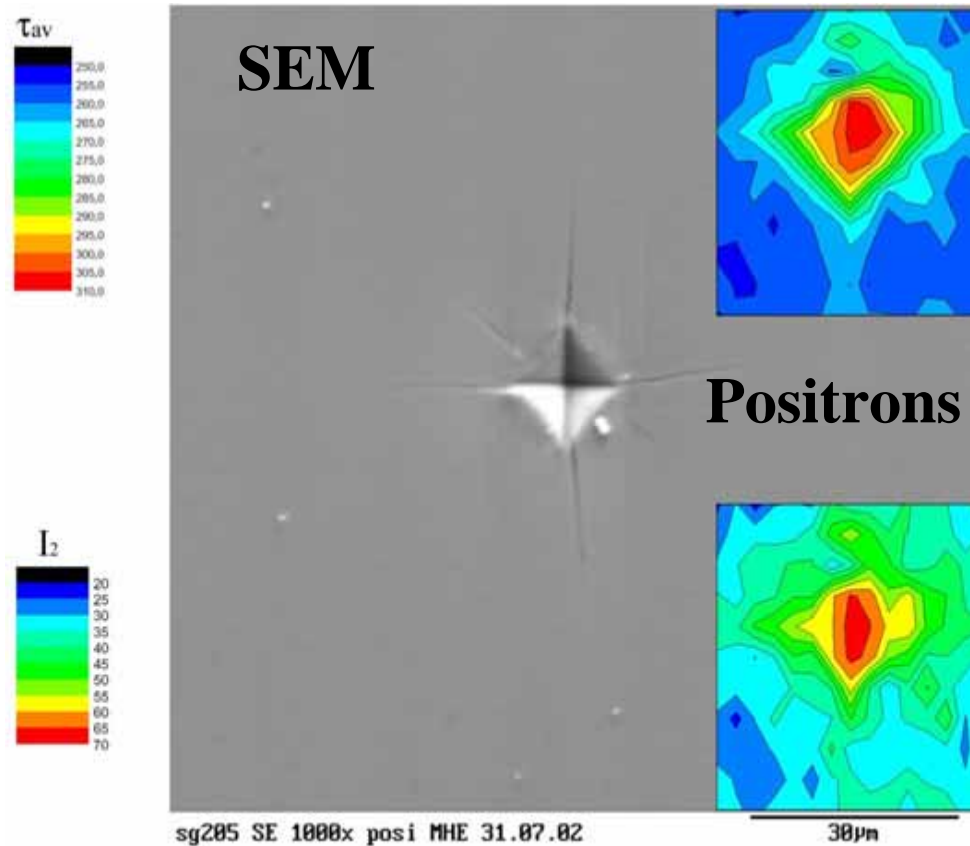


- monoenergetische Positronen durch Moderation
- laterale Auflösung ca.  $2 \mu\text{m}$
- Lebensdauer-Messung möglich
- Auflösung prinzipiell durch Positronendiffusion limitiert (ca. 100nm)

W. Triftshäuser et al., NIM B **130** (1997) 265

# Mikrohardness indentation in GaAs

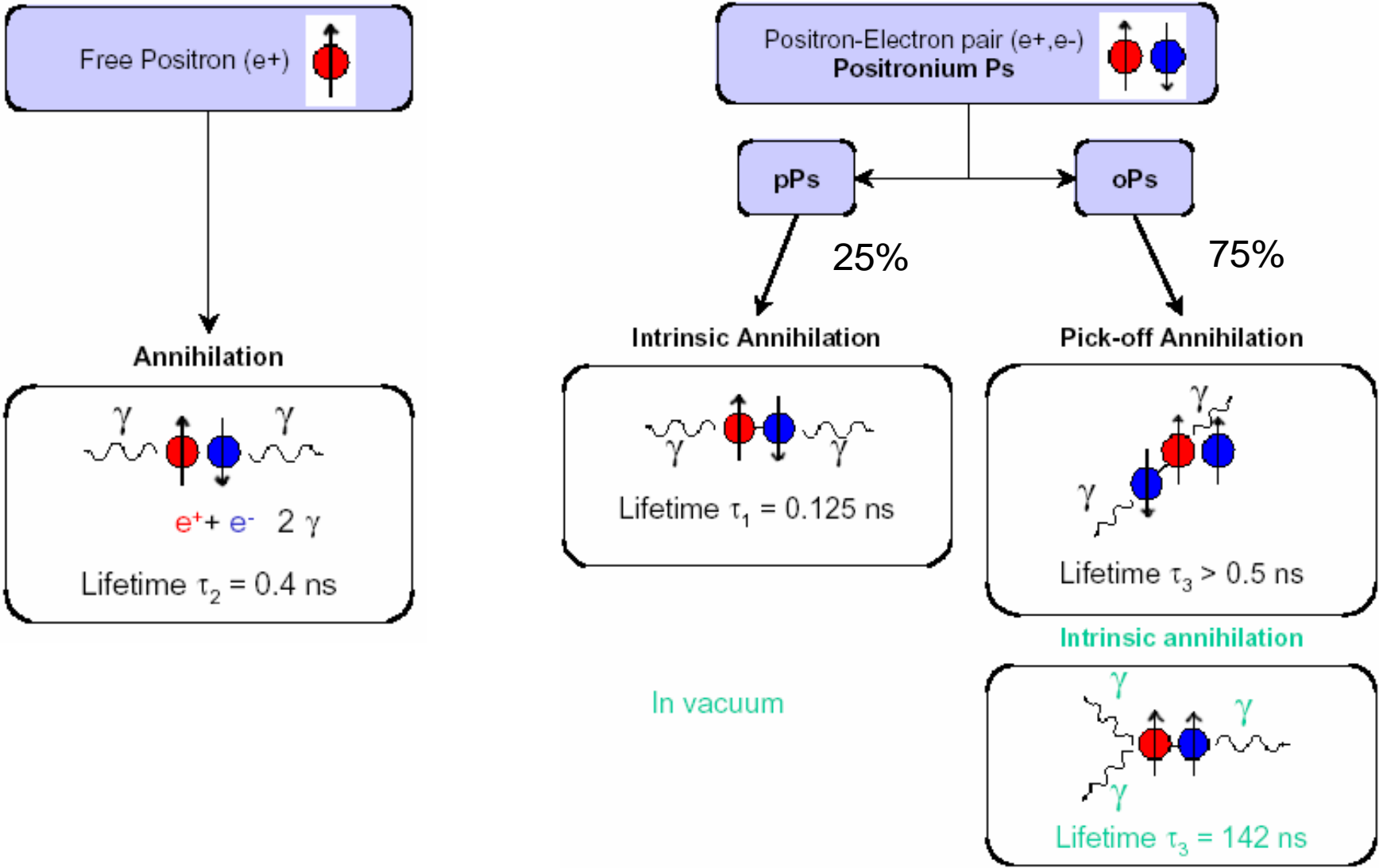
- Comparison of SEM and Munich Positron Scanning Microscope; problem here at the moment: intensity



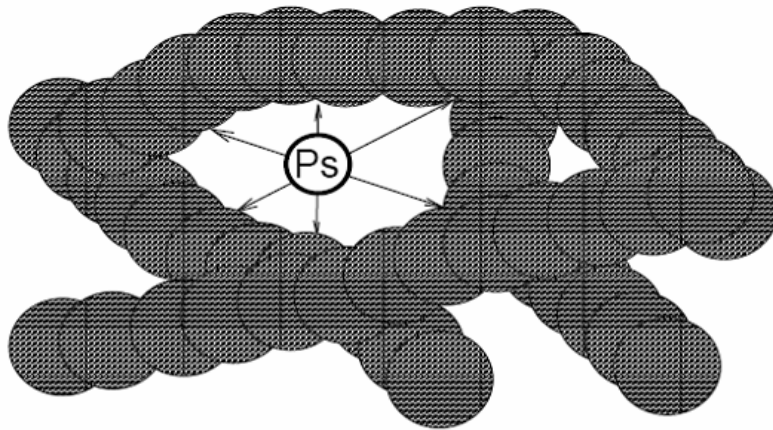
(Krause-Rehberg et al., 2002)

# Positrons & Positronium

In materials without free electrons Positronium may be formed (Polymers, glass, liquids, gases).



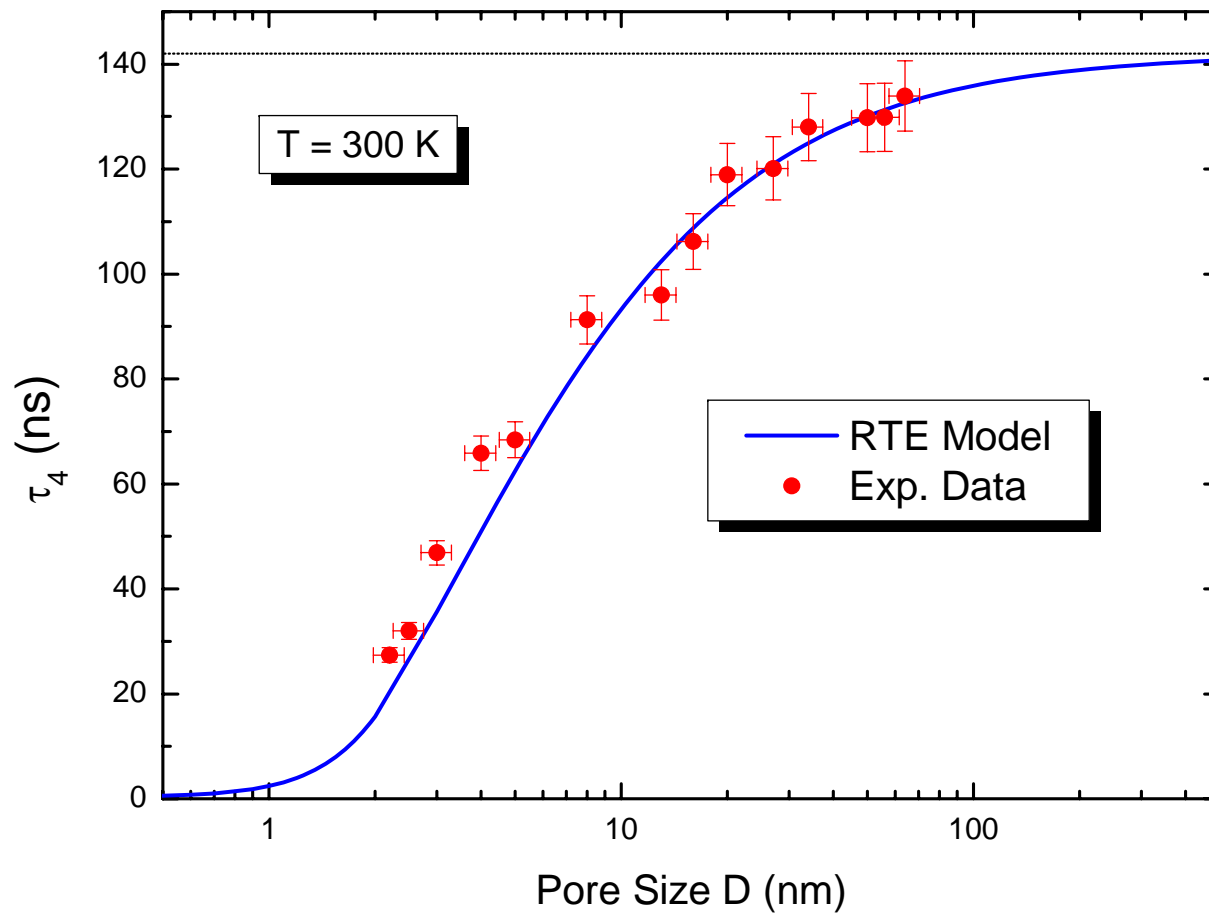
## Pick-off Annihilation of o-Ps



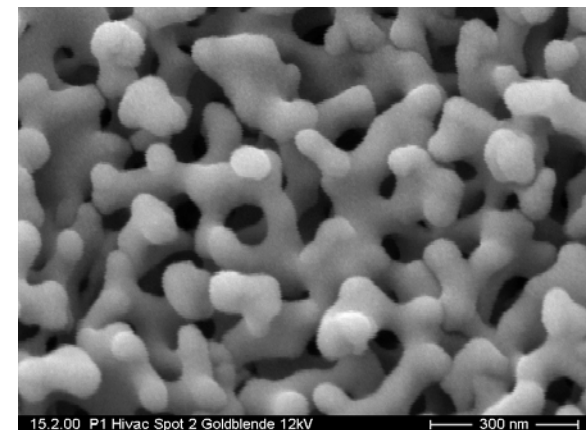
### pick-off annihilation

- o-Ps is converted to p-Ps by capturing an electron with anti-parallel spin
- happens during collisions at walls of pore
- lifetime decreases rapidly
- lifetime is function of pore size 1 ns ... 142 ns

# Porous Glass



- we measured porous glass in a broad pore size range
- pore size obtained by  $N_2$ -adsorption method
- for  $T=300 \text{ K}$  general agreement to the RTE model
- calibration curve for the correlation of o-Ps lifetime and pore size



# Applications of Positron Annihilation

Variety of applications in all field of materials science:

- defect-depth profiles due to surface modifications and ion implantation
- tribology (mechanical damage of surfaces)
- polymer physics (pores; interdiffusion; ...)
- low-k materials (thin high porous layers)
- defects in semiconductors, ceramics and metals
- epitaxial layers (growth defects, misfit defects at interface, ...)
- fast kinetics (e.g. precipitation processes in Al alloys; defect annealing; diffusion; ...)
- radiation resistance (e.g. space materials)
- many more ...

