

Die Positronenannihilation in der Materialforschung

R. Krause-Rehberg, G. Dlubek

1) Methoden und kristalline Stoffe

- Die Positronenlebensdauer-Spektroskopie
- Beispiele
- EPOS - Positronenquelle im FZ Rossendorf
- Anwendungsgebiete des Systems

2) Positronium und poröse Stoffe / Polymere

- Positronium
- offenes Volumen in Polymeren

Bitte während des Vortrages Fragen stellen!



Einleitung

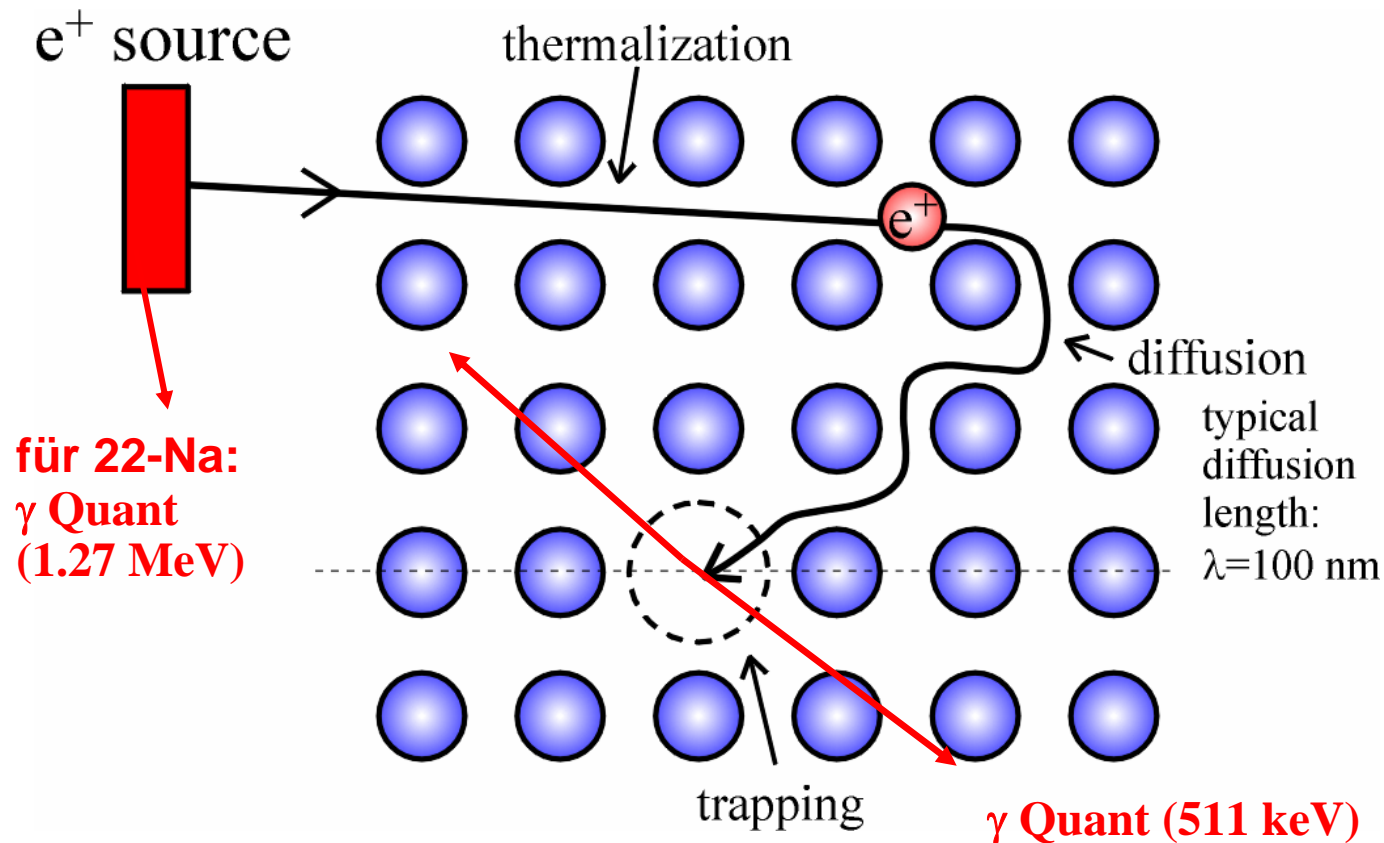
Positrons erhält man:

- β^+ Zerfall: $^{22}\text{Na} \rightarrow ^{22}\text{Ne} + \beta^+ + \nu_e + \gamma_{(1.27\text{MeV})}$ ($t_{1/2}$: 2,6 Jahre; bis zu 10^6 e^+/s)
- Paarbildung mit Hilfe von MeV-Elektronen (LINAC, Reaktor) auf Target (Bremsstrahlung; $\approx 10^9$ e^+/s)

Geometrie des Experimentes:

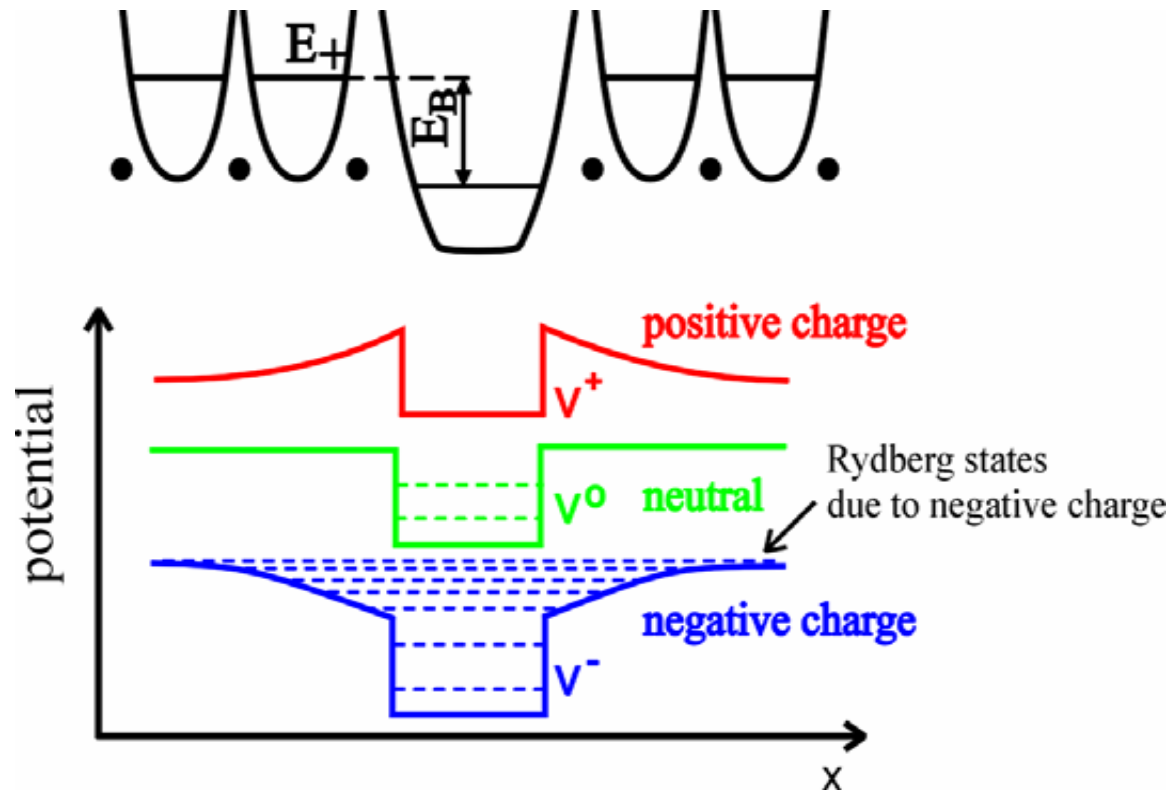
- “Sandwich Geometrie” (^{22}Na -Quelle direkt zwischen zwei identischen Probenhälften)
- Positronenstrahl (Vakuumanlage; Quelle und Probe separiert)
- “Positronenmikroskop” (UdW München, Auflösung ca. 1...2 μm ; Uni Bonn ca. 10 μm)

Positroneneinfang durch Kristalldefekte



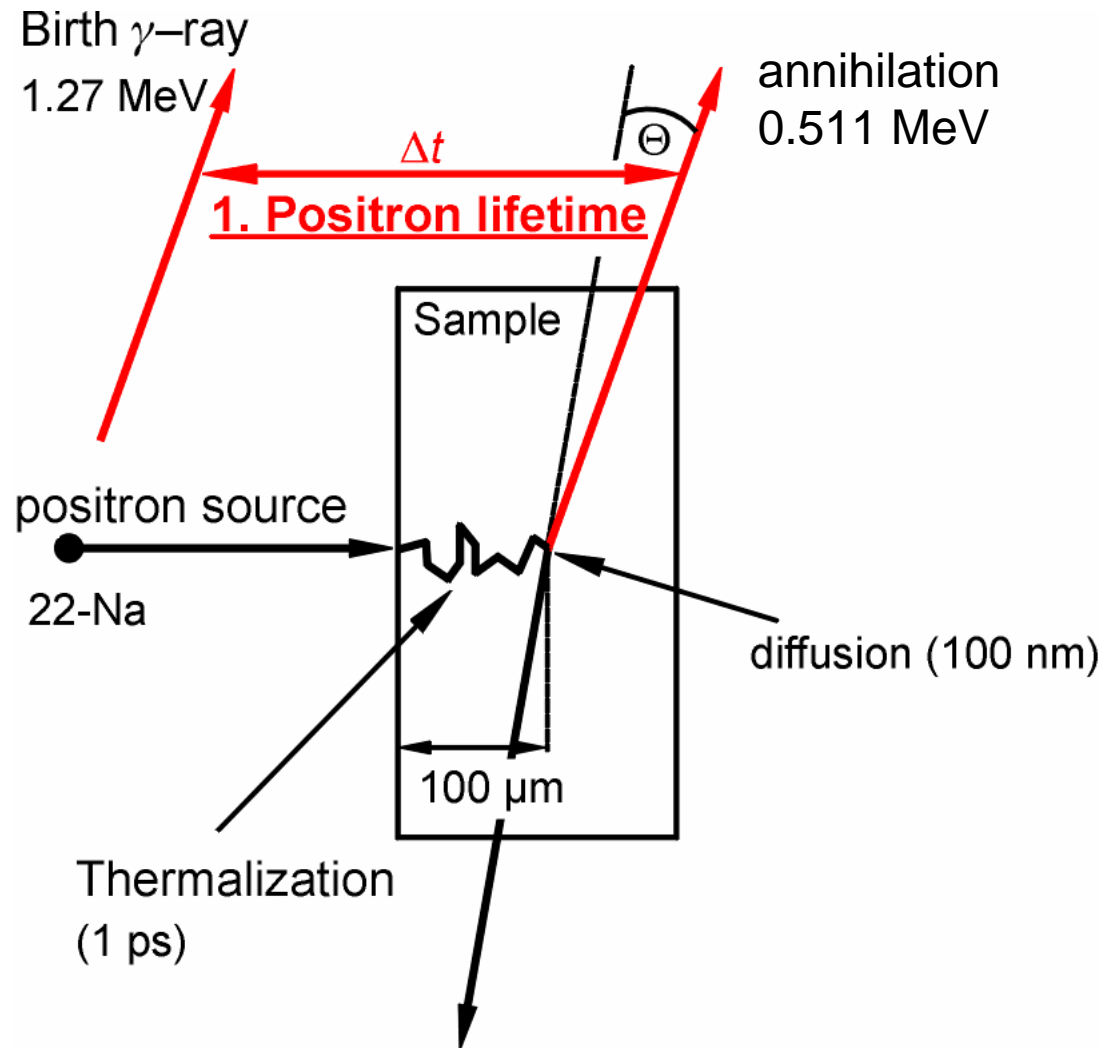
- Positronen-Wellenfunktion wird im Defekt lokalisiert
- Annihilationsparameter ändern sich, wenn Positron im Defekt zerstrahlt
- Defekte können nachgewiesen werden (Identifizierung und Quantifizierung)

Das Einfangpotential von geladenen Leerstellen

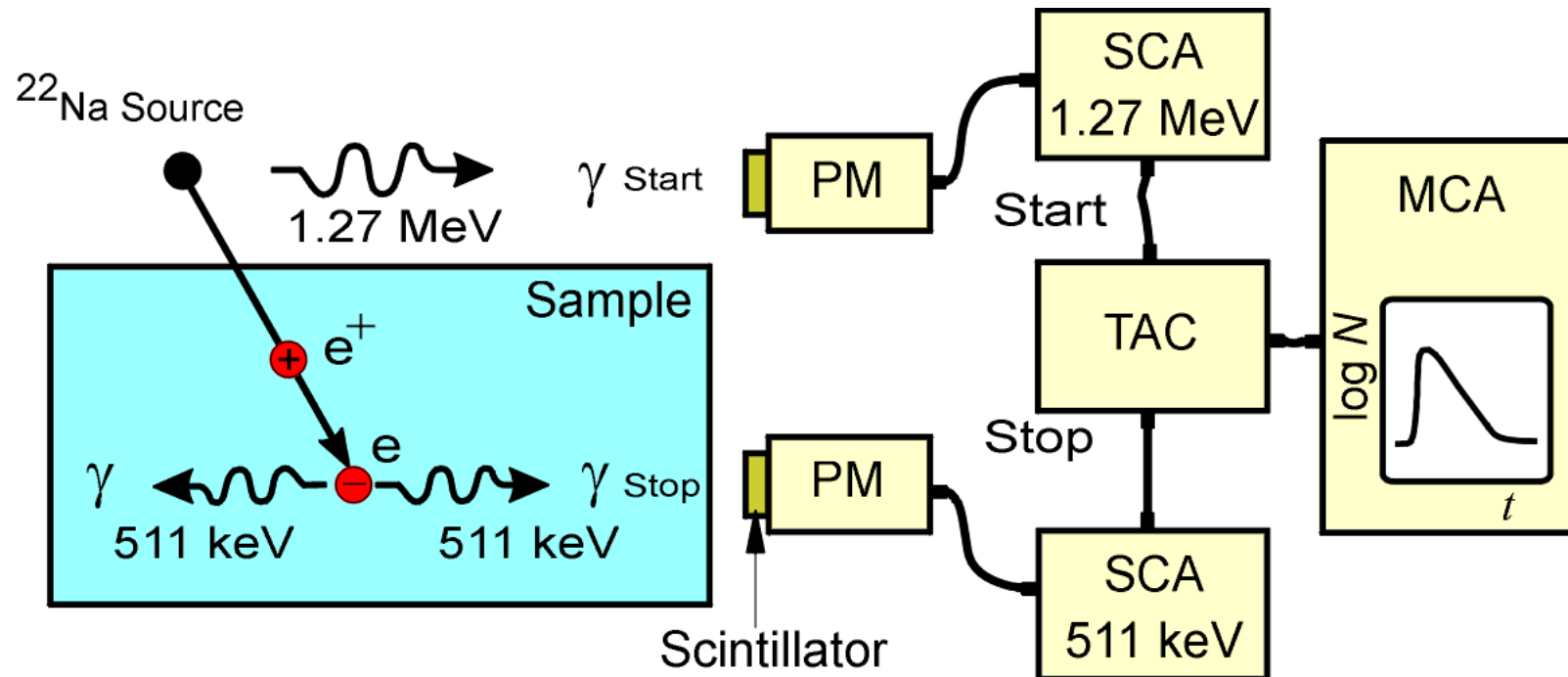


- Attraktives Potential durch fehlendes Atom (abstoßender Kern fehlt)
- in Halbleitern: Zusätzlicher Coulomb-Anteil ($\propto 1/r \rightarrow$ ist weit ausgedehnt)
- kein Positroneneinfang durch positive Leerstellen

Die Positronenlebensdauer-Messung

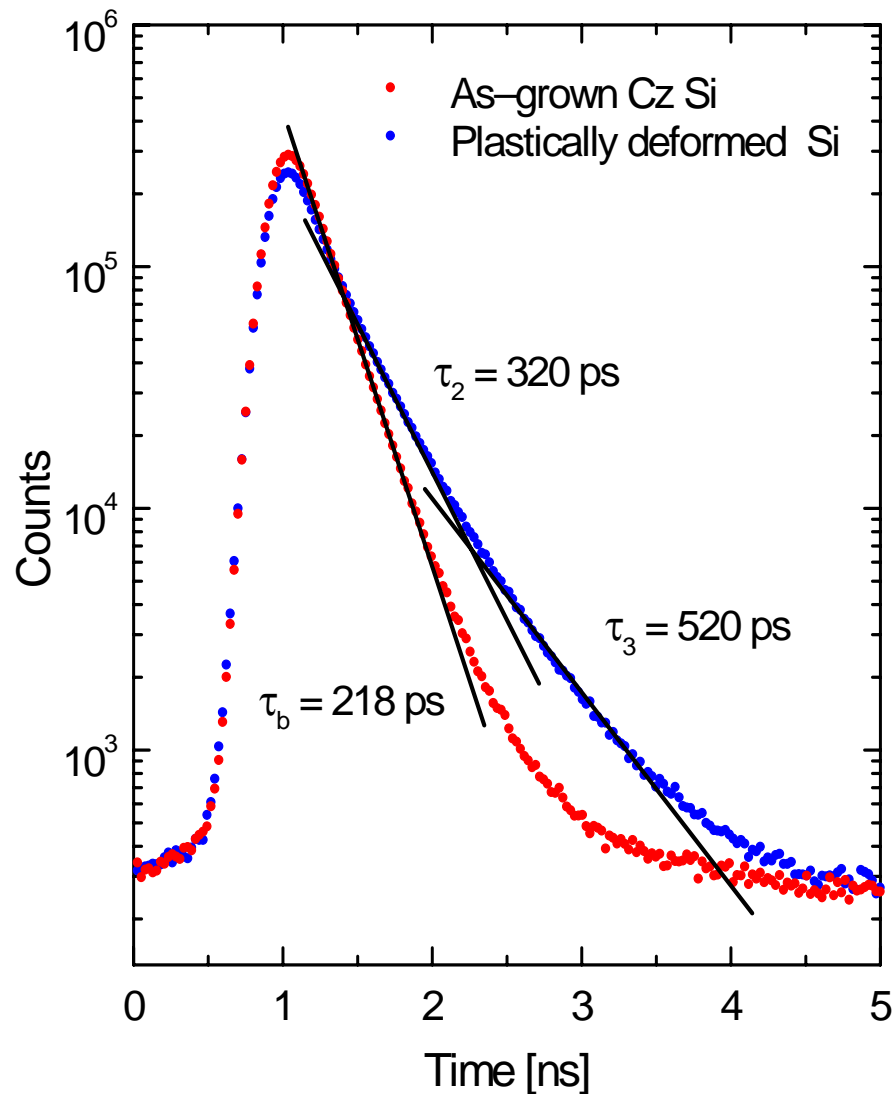


Lebensdauer-Spektrometer



- Positronenlebensdauer wird als Zeitdifferenz gemessen zwischen 1.27 MeV Gammaquant (β^+ -Zerfall) und einem 0.511 MeV Quant (Annihilationsprozess)
- PM = Sekundärelektronenvervielfacher; SCA=Einkanalanalysator (Constant-Fraction Typ); TAC=Zeit-Impulshöhen-Konverter; MCA= Vielkanalanalysator

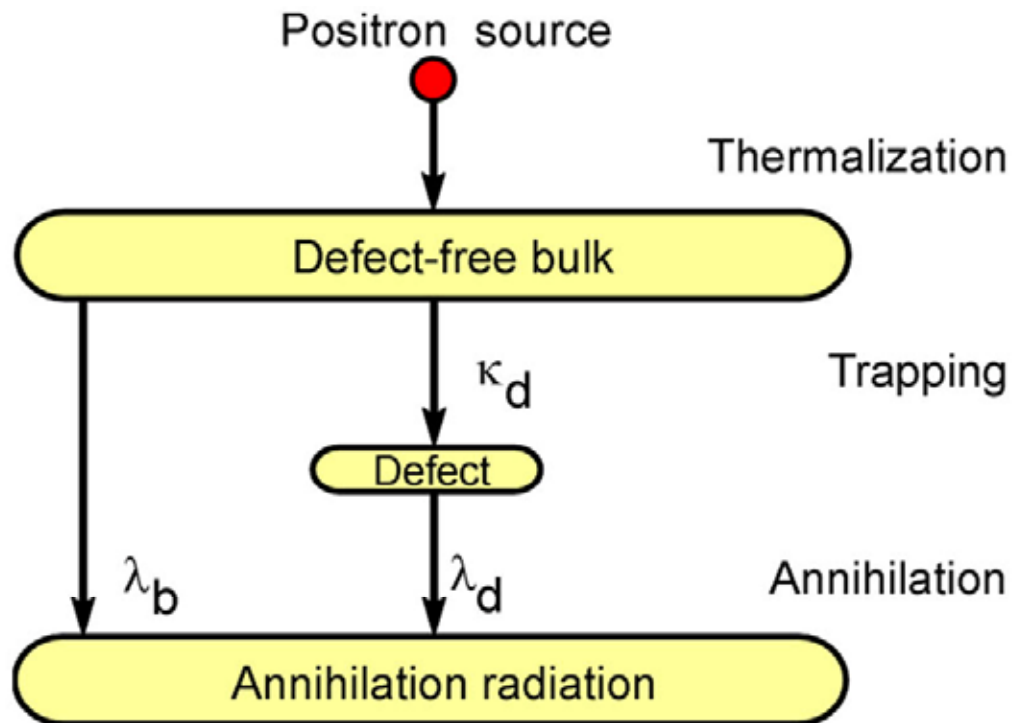
Positronenlebensdauer-Spektren



- Lebensdauerspektren bestehen aus exponentiellen Zerfallstermen
- Einfang von Positronen in Defekte mit offenem Volumen führt zu langen Komponenten im Spektrum
- Spektrenanalyse wird mittels nicht-linearer Anpassroutinen nach Subtraktion von Untergrund und Quellanteil durchgeführt
- Ergebnis: Lebensdauern τ_i und Intensitäten I_i

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

Trapping-Modell für einen Defektyp



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

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

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:

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

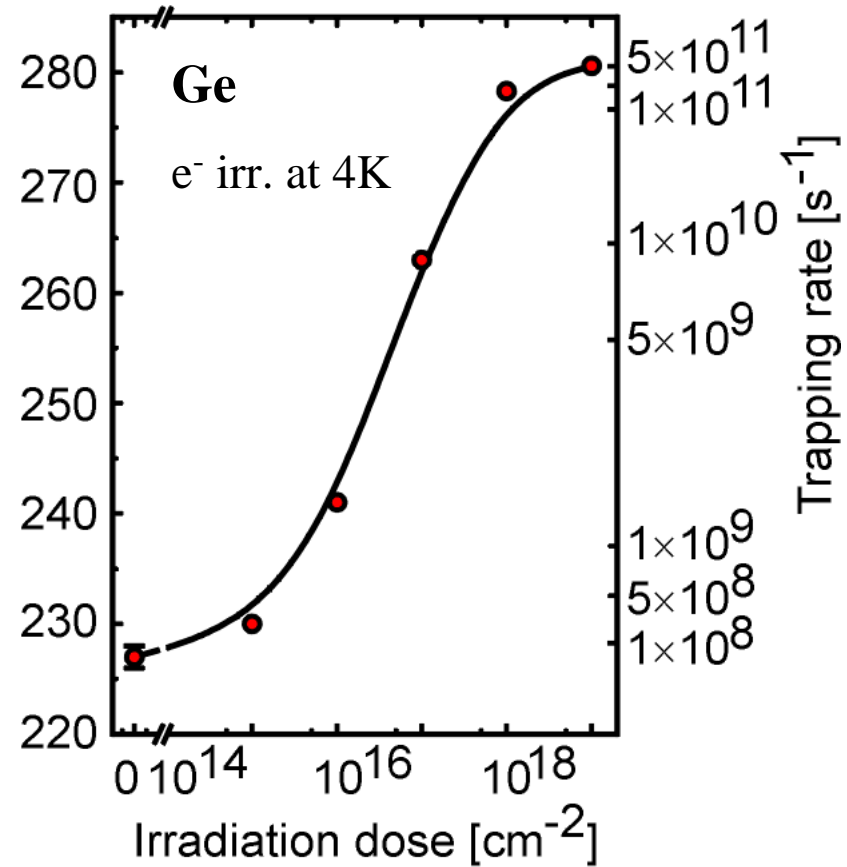
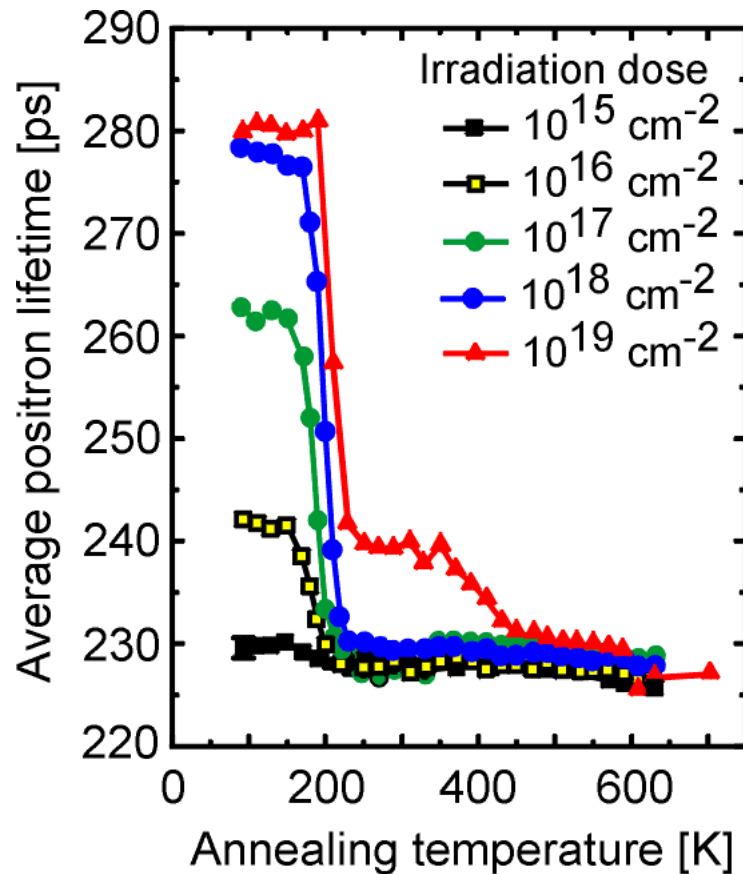
$$I_1 = 1 - I_2, \quad I_2 = \frac{\kappa_d}{\lambda_b - \lambda_d + \kappa_d}$$

Die τ_i und I_i werden gefittet \Rightarrow Ergebnis:
Einfangrate κ

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

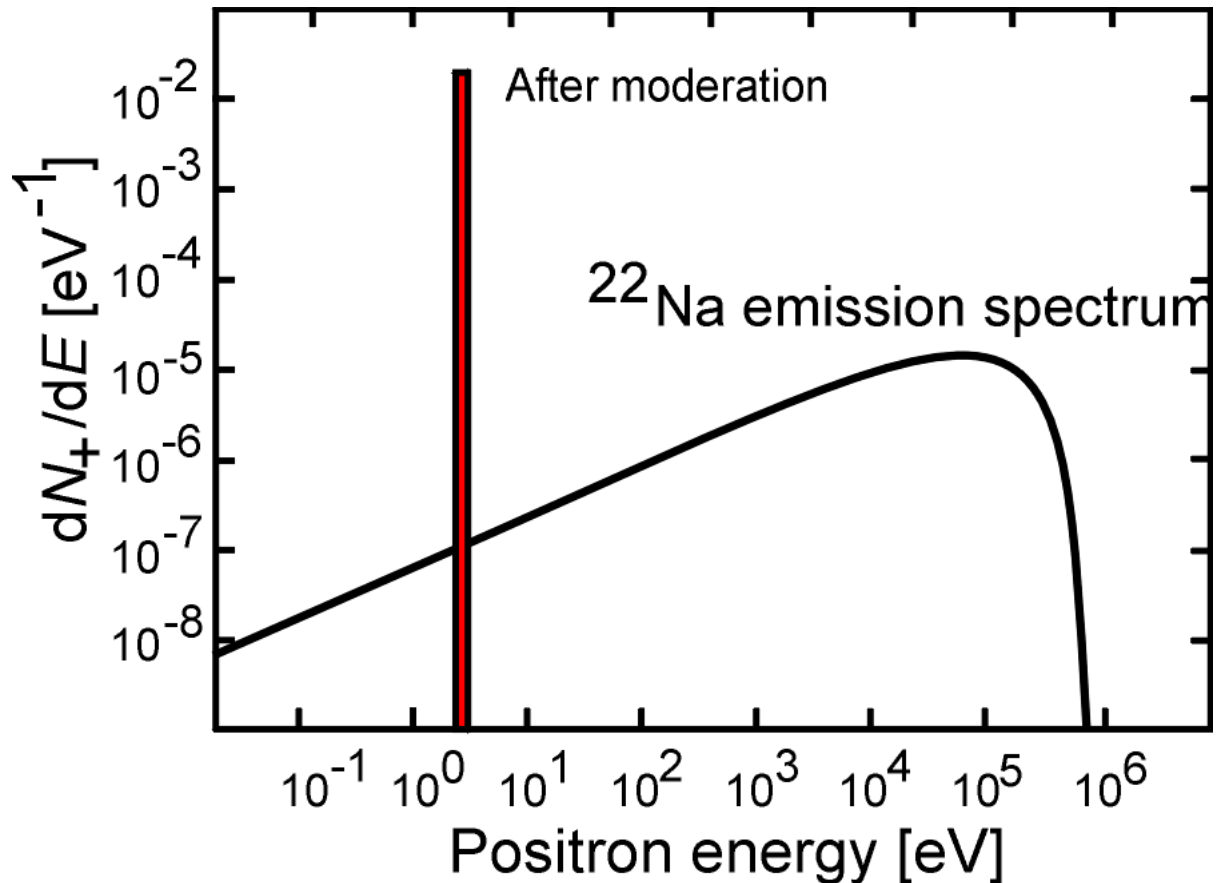
Defekte in Ge nach Elektronenbestrahlung

- Elektronenbestrahlung induziert Frenkelpaare (Elektronen-Energie: 2 MeV)
- Ausheilstufe bei 200 K
- bei hohen Bestrahlungsdosen bilden sich Doppelleerstellen



(Polity et al., 1997)

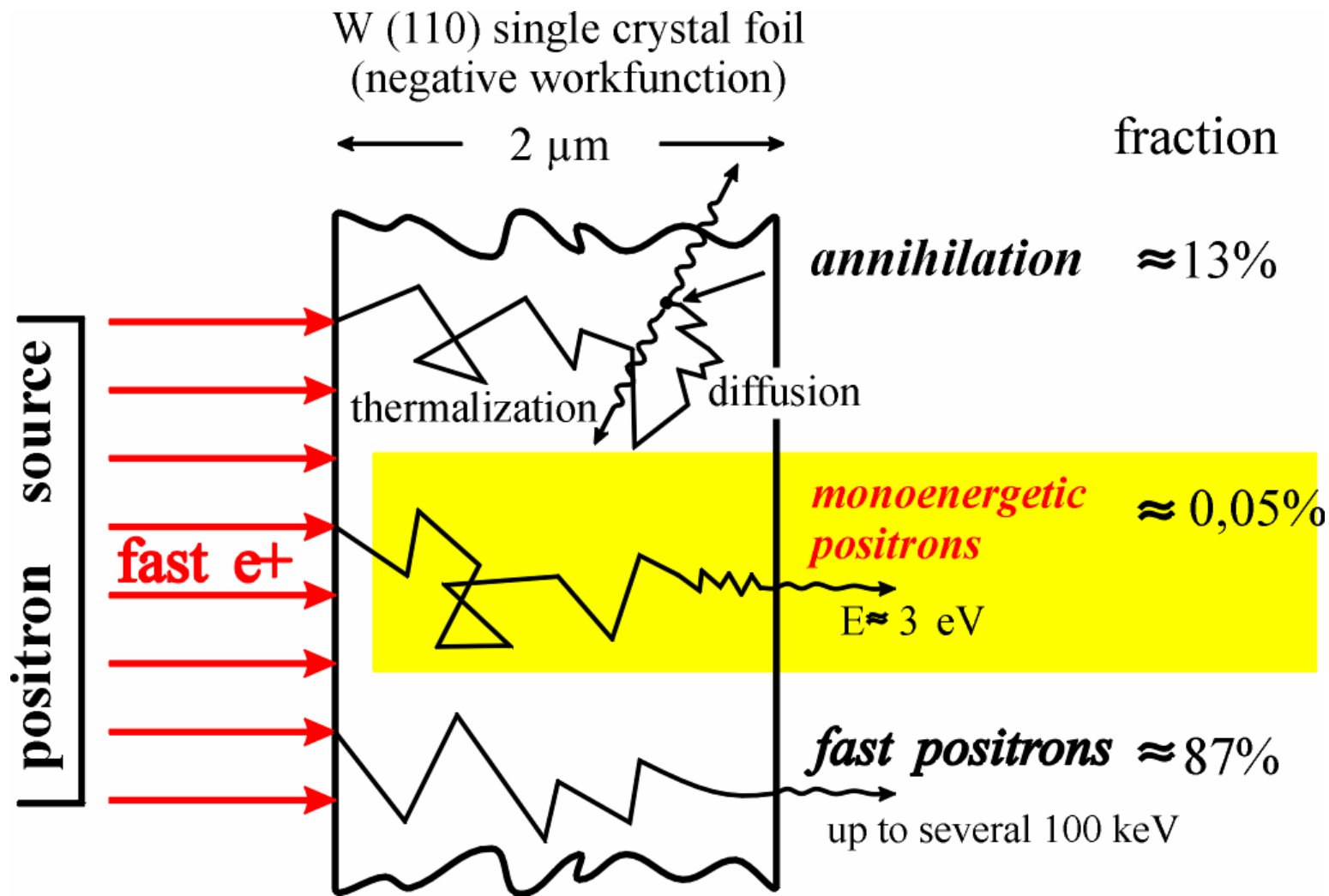
Informationstiefe der Positronenmessung



- Isotopenquellen haben breites Emission-Spektrum
- ^{22}Na bis 540 keV
- tiefe Implantation in Probe
- ungeeignet für Untersuchung dünner Schichten
- monoenergetische Positronen nötig
- Moderation mittels Metallfolien

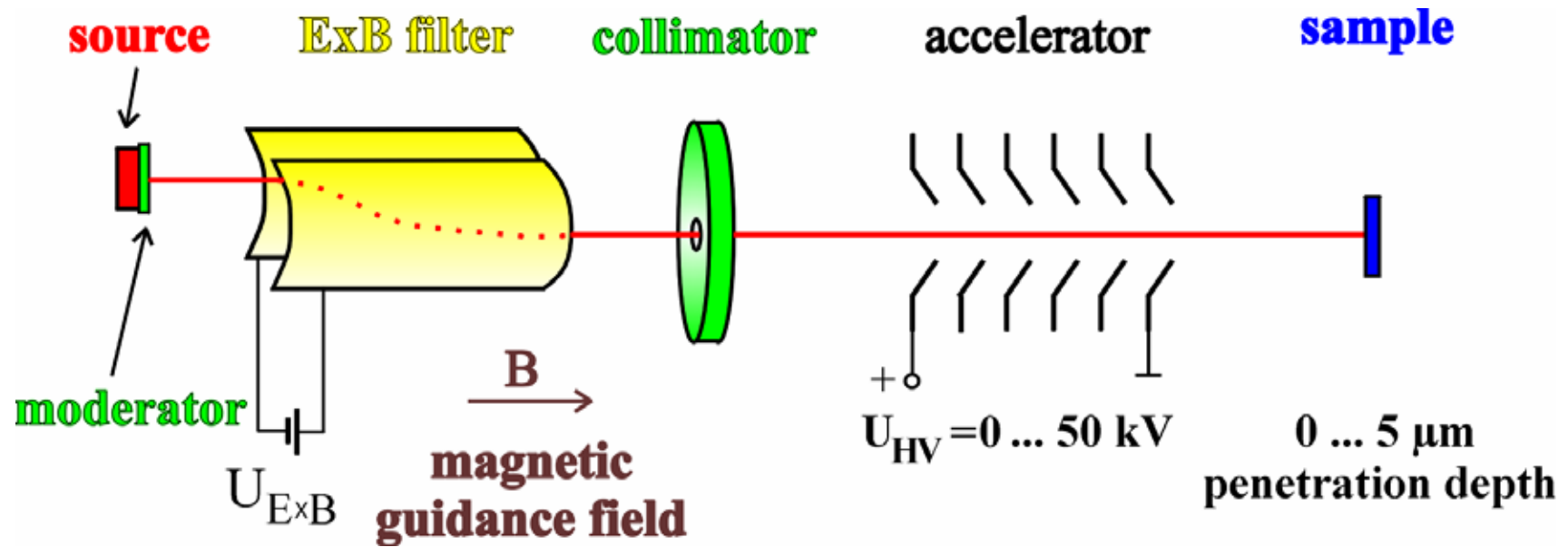
mittlere Implantationstiefe (1/e) von unmoderierten Positronen: Si: 50 μm GaAs: 22 μm

Moderation von Positronen



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

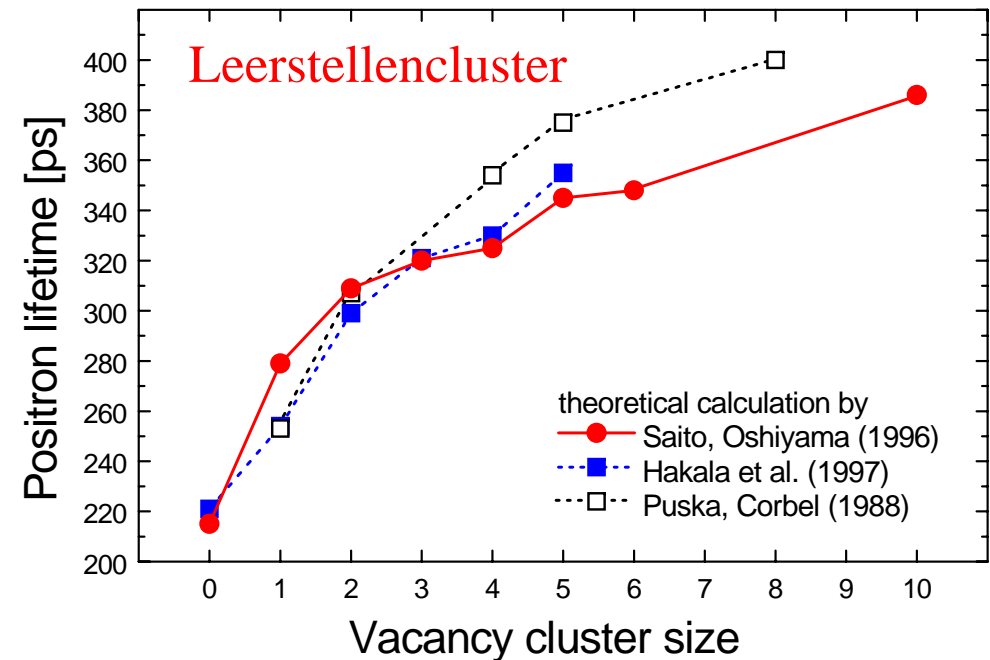
Das Positronenstrahlsystem in Halle



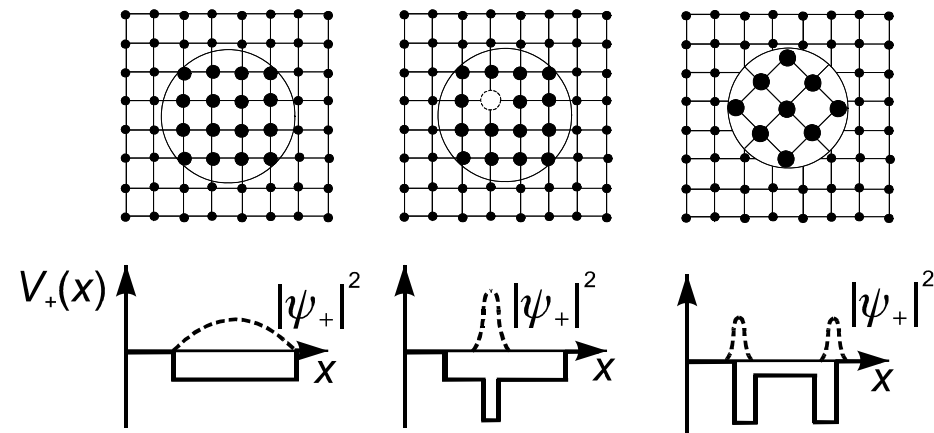
- Spot Durchmesser: 5mm
- Zeit für einen Messpunkt: 20 min
- Zeit für Tiefenscan: 8 h

Welche Defekte können untersucht werden?

- Defekte mit offenem Volumen:
 - Leerstellen & Agglomerate
 - Versetzungen (Defekte auf der Versetzungslinie)
 - sub-nm-Hohlräume in Polymeren
 - nm-Hohlräume in porösen Materialien
 - Korngrenzen (falls Körner < 1 μ m)
 - Oberfläche (auch innere OF)
- Defekte ohne offenes Volumen:
 - Ausscheidungen (z.B. Al-Legierungen)
 - negativ geladene Defekte, z.B. akzeptorartige Verunreinigungen in Halbleitern



Positroneneinfang in/an Ausscheidungen



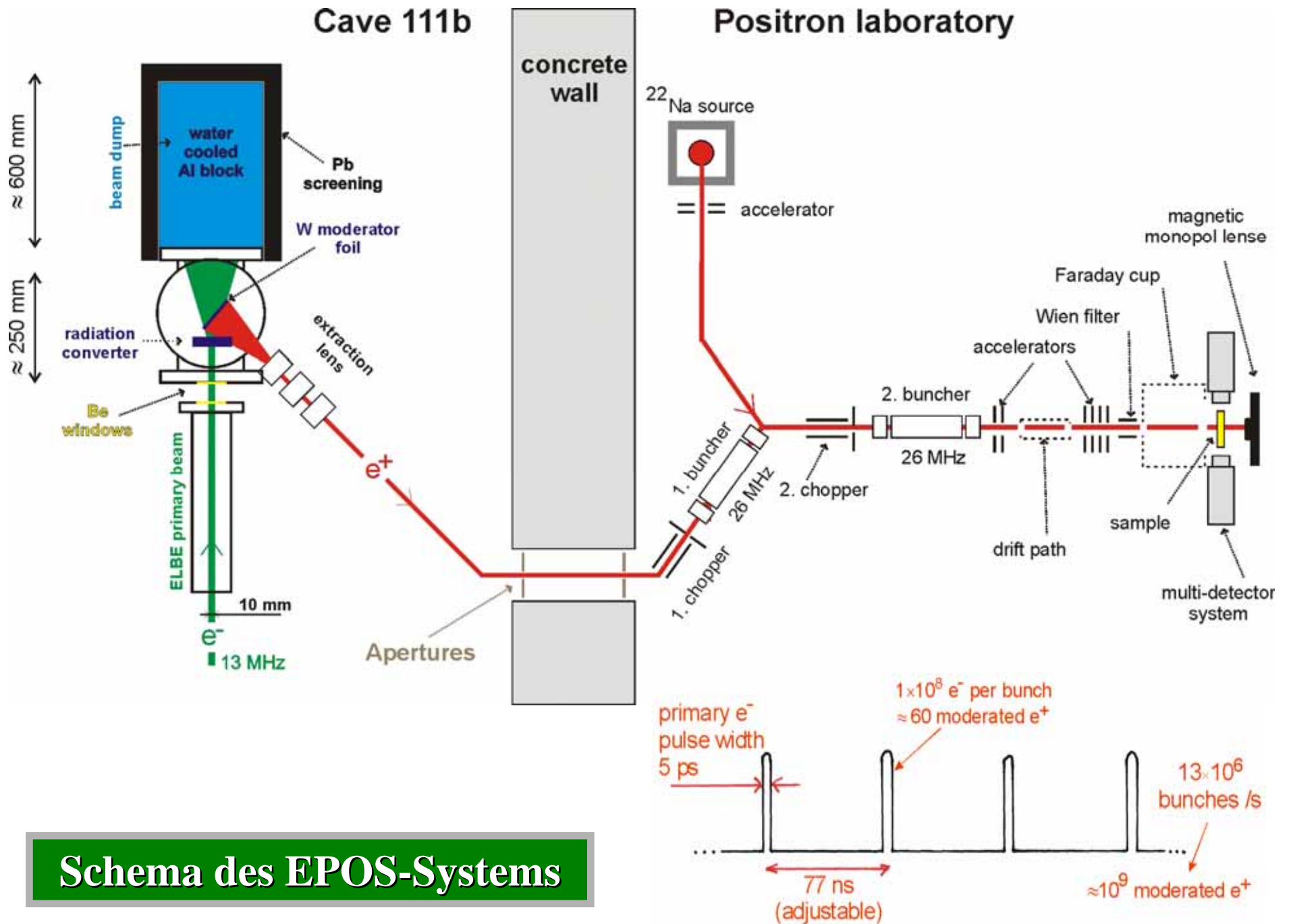
Potentielle Anwendungen der PAS

Vielfältige Probleme der Materialwissenschaften können bearbeitet werden:

- Defekt-Tiefenprofile nach Oberflächenmodifikation (z.B. Ionenstrahlen)
- Tribologie (Defekte nach oberflächlicher mechanischer Schädigung)
- Defekte in Halbleitern und Metallen nach Kristallzucht, plastischer Deformation, Bestrahlung
- epitaktische Schichten (Wachstumsdefekte, Misfit-Defekte am Interface)
- Oberflächenbeschichtungen für metallische Werkstoffe
- Ausscheidungen in aushärtbaren Aluminiumlegierungen
- Untersuchung zur Strahlenhärte von Solarzellen
- hochporöse Isolierschichten für die Halbleiterindustrie (Ersatz für SiO_2)
- nano-poröse Gläser (Katalysatoren); Größe und Befüllung der Poren
- Polymere (Poren; kinetische Untersuchungen zur Interdiffusion)
- ...

EPOS = ELBE Positron Source

- ist externer Messplatz des Interdisziplinären Zentrums für Materialwissenschaften (I ZM) der Martin-Luther-Universität Halle
- Finanzierung durch EU-Mittel (EFRE), Land Sachsen-Anhalt und MLU
- Aufbau hat begonnen
- Messplatz für materialwissenschaftliche Untersuchungen
- Benutzung durch Besuchergruppen (zwei Nutzertreffen 2002 und 2004 mit europaweiter Beteiligung)
- Fernsteuerung des Messablaufs über Internet



Schema des EPOS-Systems