

Mit Antimaterie auf der Suche nach Nanodefekten in Werkstoffen

R. Krause-Rehberg

Halle, 9. Juli 2003

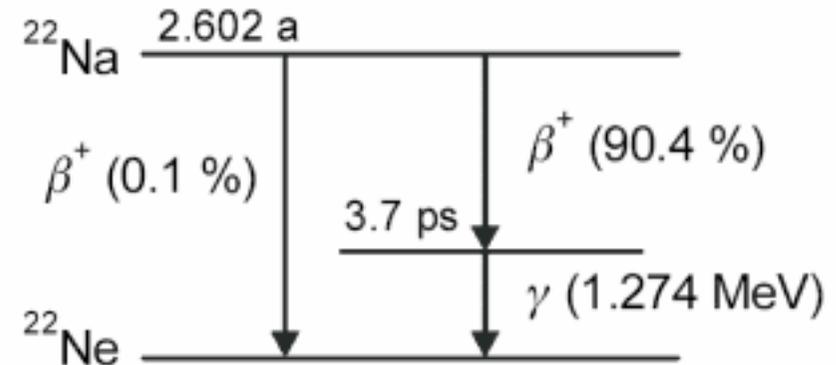
Universität Halle

- Was sind Positronen?
- Die „Positronenannihilation“
- Warum sind Punktdefekte so wichtig?
- Positronen finden Defekte in Werkstoffen



Positronen sind die Antiteilchen der Elektronen

- Atomkerne sind aus Protonen und Neutronen aufgebaut
- wenn zuviel oder zu wenig Neutronen: Kerne zerfallen spontan: **Radioaktivität**
- **Positronenumwandlung** (β^+ Umwandlung; Proton wird in Neutron umgewandelt; Positron und Neutrino entsteht)
- Positron ist im Prinzip ein stabiles Teilchen: zerfällt nicht von selbst
- Wenn allerdings Positron auf Elektron trifft: **Annihilation** bzw. Zerstrahlung
- Masse wird in Energie umgewandelt, es entstehen „**Gamma-Quanten**“ (γ -Quanten)
- Energie berechnet sich nach Einstein'scher Formel: **$E = m_0 c^2$**



Zerfallsschema des Isotops ^{22}Na
(^{23}Na ist stabiles Isotop)

Die Positronenannihilation

- Es entstehen bei der Annihilation zwei γ -Quanten
- Energie eines Annihilations- γ -Quantes $E = m_0c^2 = 511 \text{ keV}$
- ist hohen Energiebetrag
- Beispiel: Annihilation aller Elektronen einer M8-Schraube von 56 g Masse

56 g ist ein Mol Fe $\rightarrow 6 \times 10^{23}$ Atome mit je 26 Elektronen

= $1,6 \times 10^{25}$ Elektronen mit jeweils 511 keV

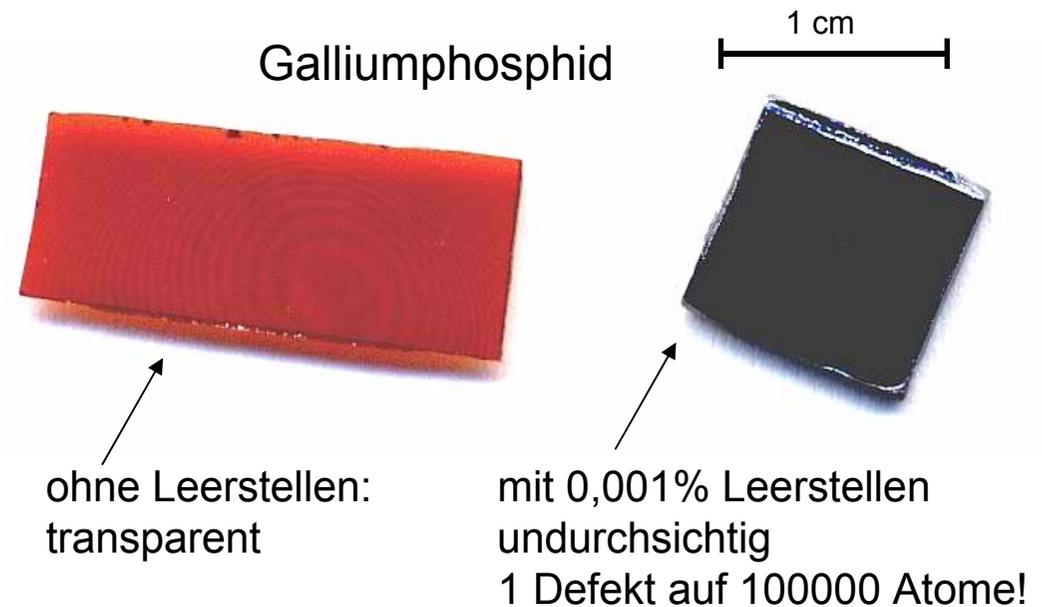
= $7,9 \times 10^{24}$ MeV = 354 MWh

Damit würde 20W-Birne 17,7 Mio. Stunden brennen = 48600 Jahre

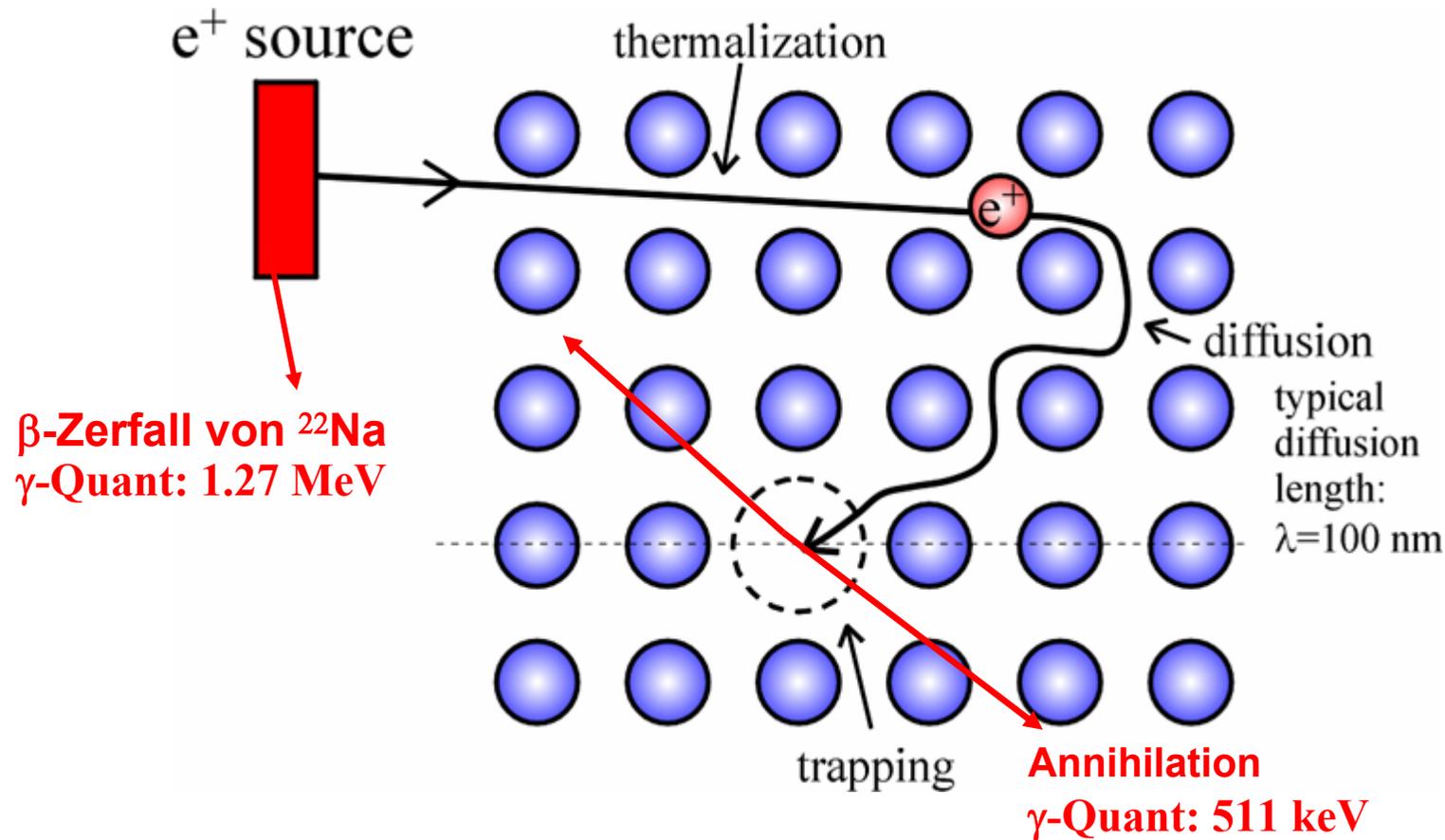


Punktdefekte bestimmen Werkstoffeigenschaften

- Punktdefekte bestimmen die physikalischen Werkstoffeigenschaften
- elektrische Leitfähigkeit wird komplett verändert
- nutzt man zum Dotieren von Halbleitern (n-, p-Si)
- auch optische Eigenschaften ändern sich drastisch
- Punktdefekte bilden sich bei Bestrahlung (kosmische Strahlung) oder bei plastischer Deformation
- Eigenschaften müssen daher gut bekannt sein
- Man benötigt physikalische Messmethoden, um solche nanoskopisch kleinen Defekte zu beobachten

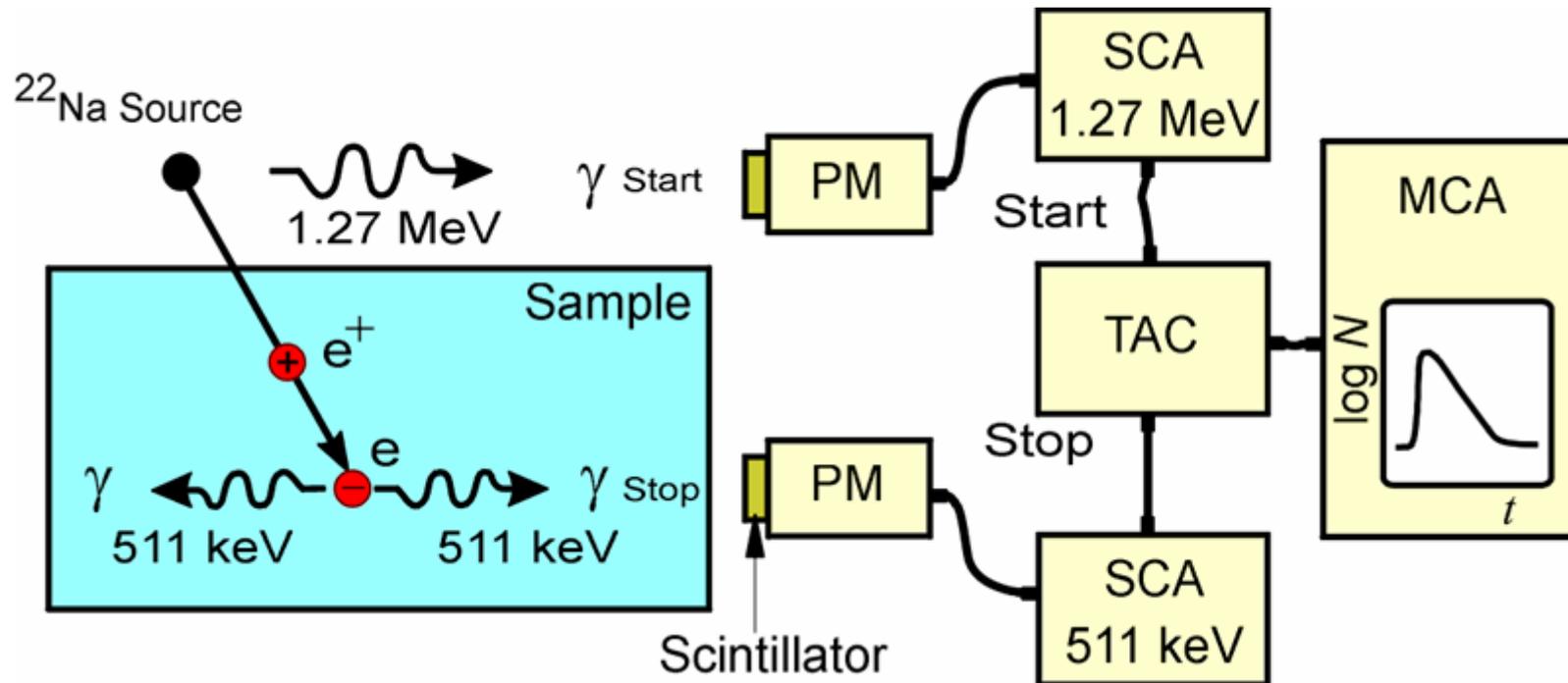


Das Experiment: Defektnachweis mit Positronen



- Positronen werden in Leerstellen lokalisiert
- Lebensdauer wird größer, wenn Positron in Leerstelle zerstrahlt
- Leerstellen können auf diese Weise nachgewiesen werden

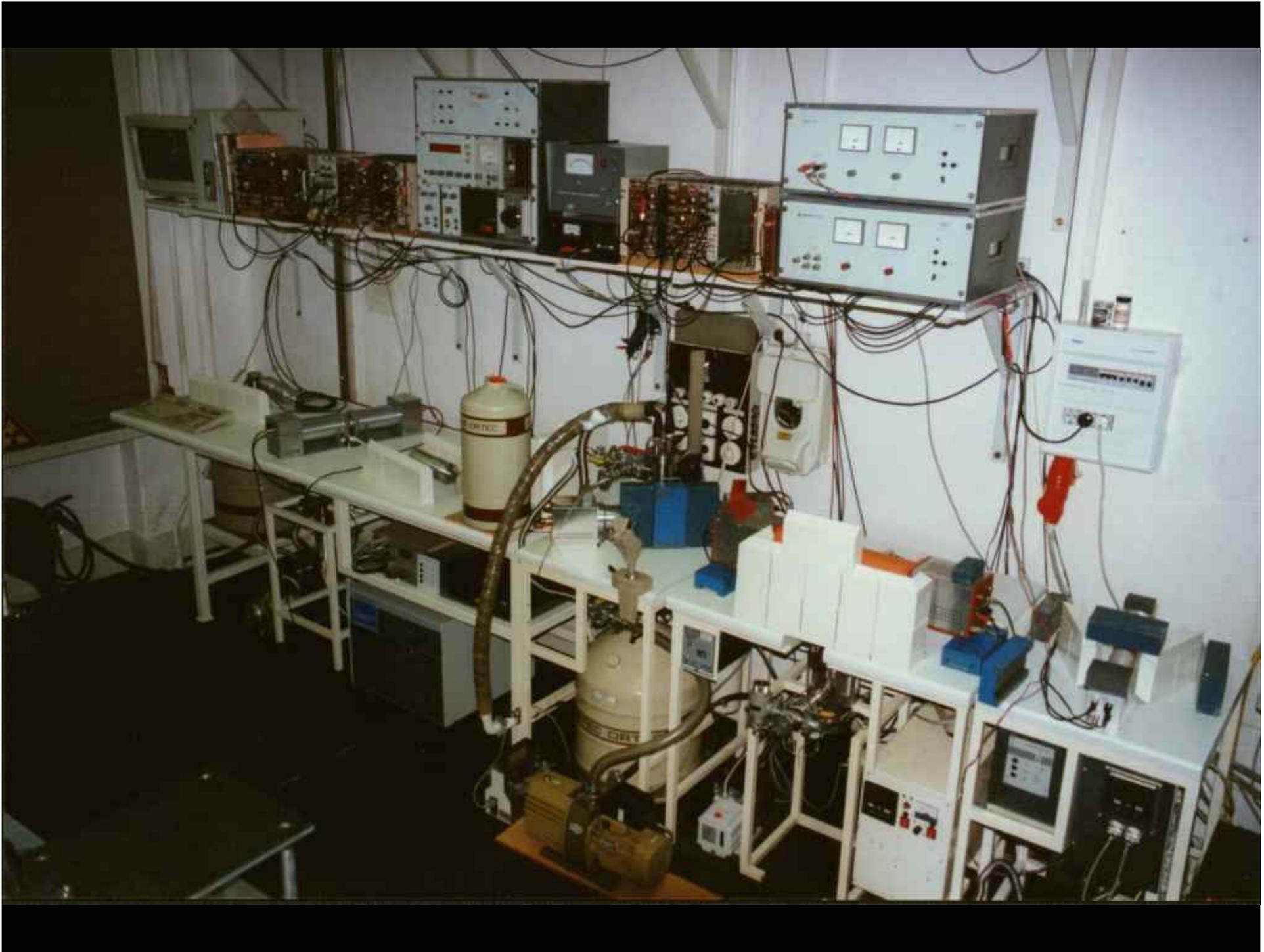
Die Messung der Positronenlebensdauer



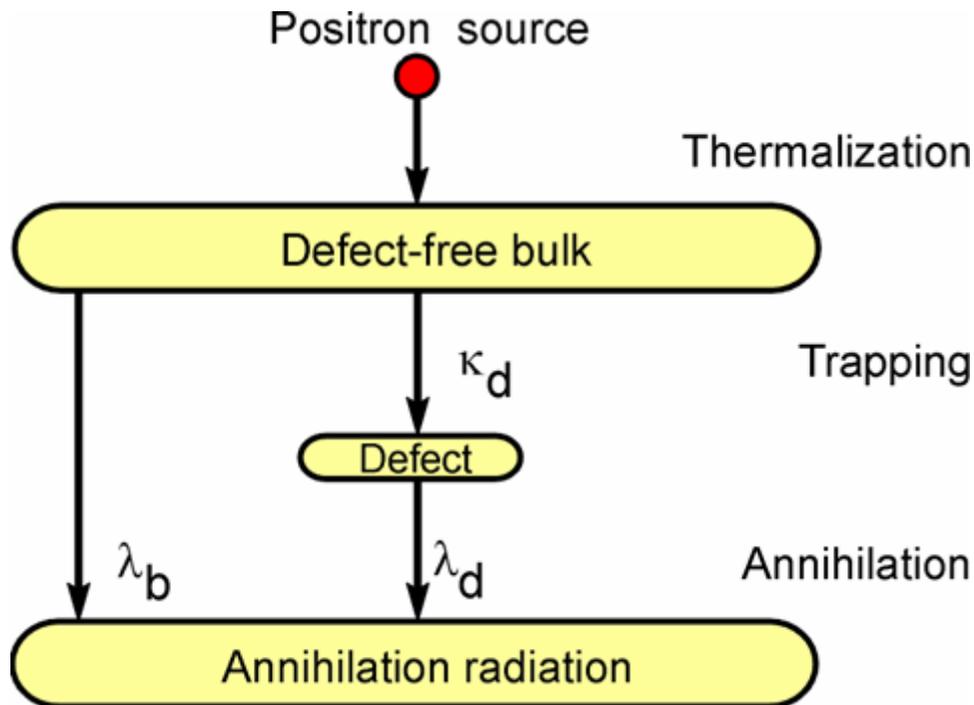
Positronenlebensdauer: Zeitdifferenz zwischen

- 1.27 MeV γ -Quant (β^+ -Zerfall) und
- einem 0.511 MeV γ -Quant (Annihilation)

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



Positroneneinfang durch 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:

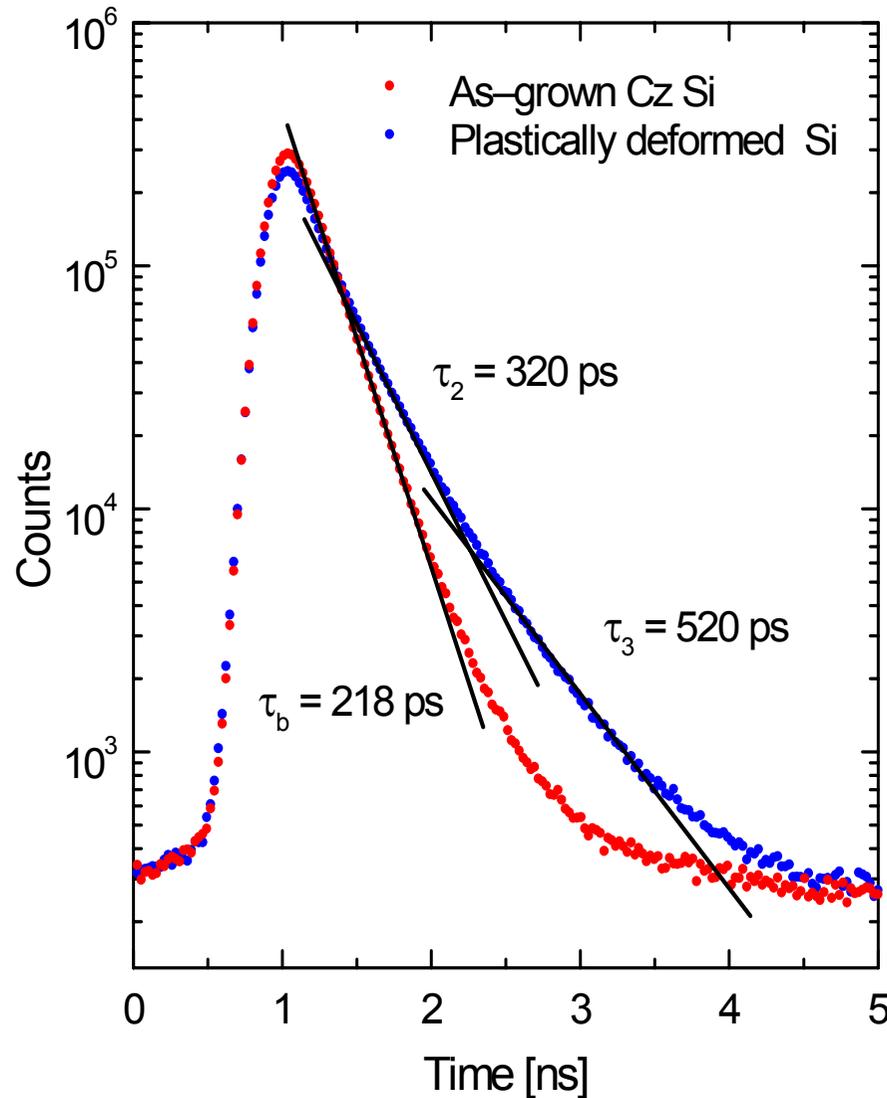
$$\tau_1 = \frac{1}{\lambda_b + \kappa_d}, \quad \tau_2 = \frac{1}{\lambda_d}$$

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

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

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

Positronenlebensdauer-Spektren

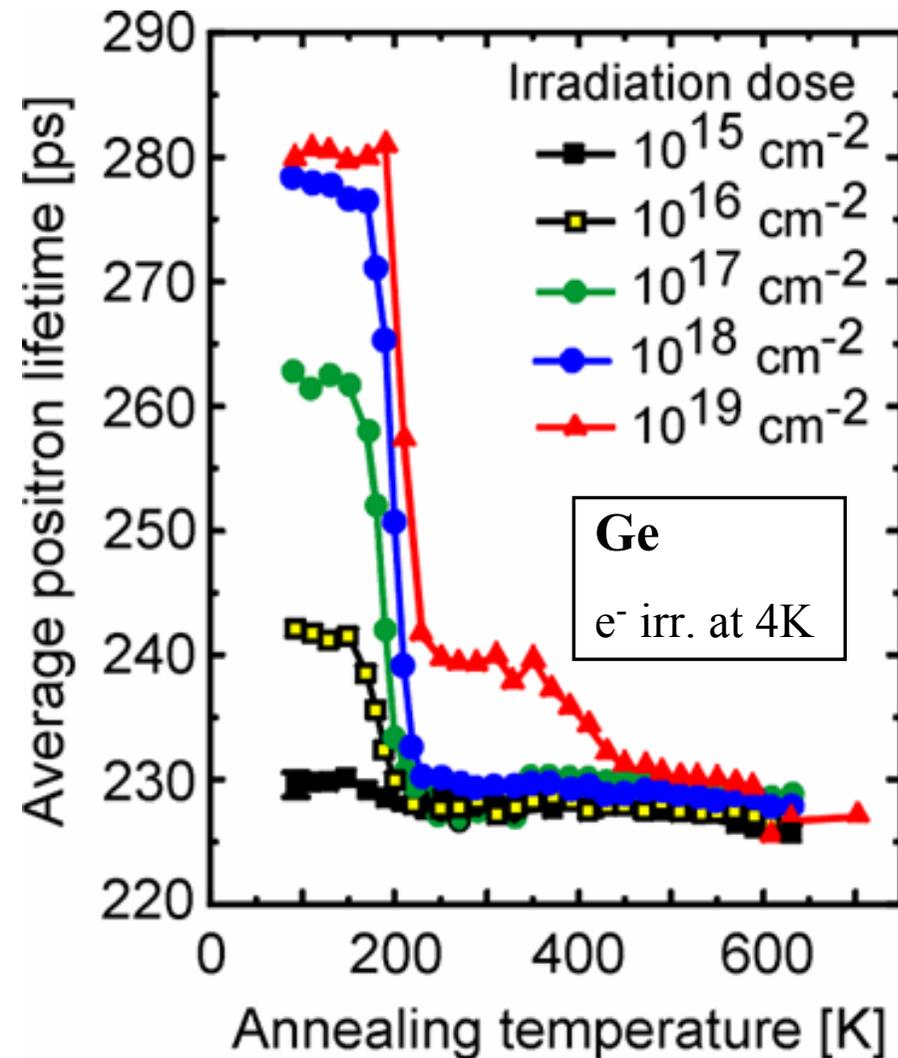


- Lebensdauerspektren bestehen aus exponentiellen Zerfallstermen
- Einfang von Positronen in Defekte mit offenem Volumen führt zu langen Komponenten im Spektrum
- Spektralanalyse wird mittels nichtlinearer Anpassroutinen durchgeführt
- Ergebnis: Lebensdauern τ_i und Intensitäten I_i

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

Defekte in Ge nach Elektronenbestrahlung

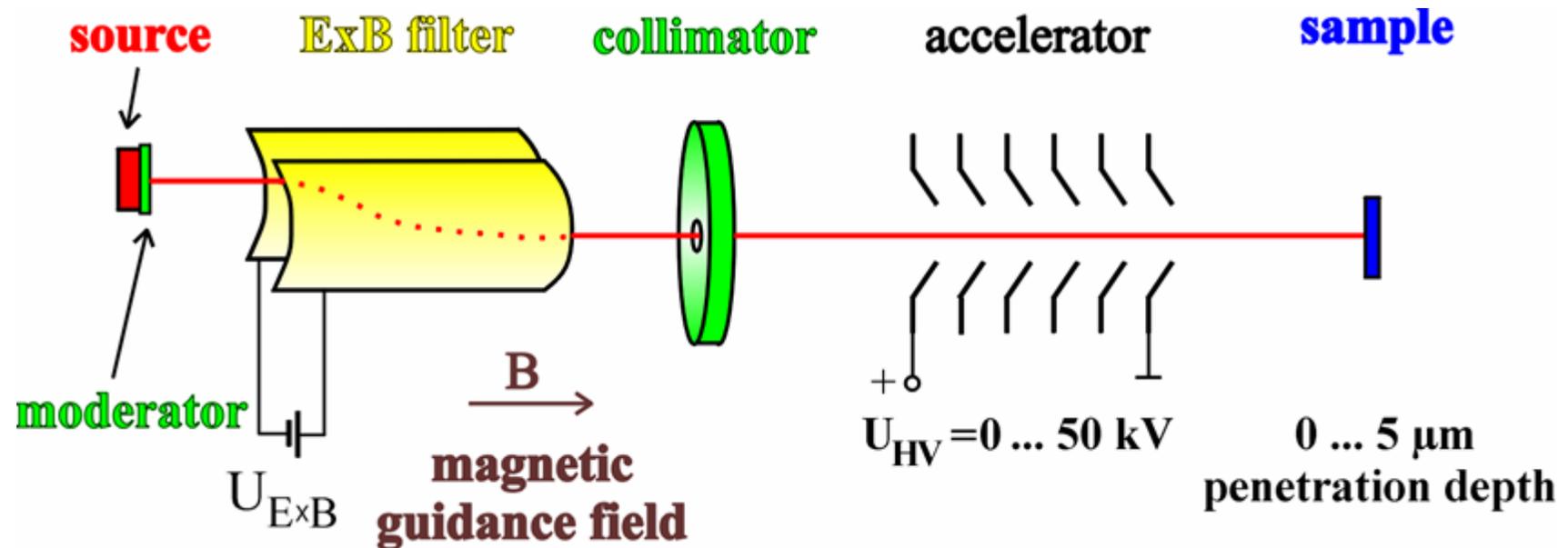
- 2 MeV-Elektronenbestrahlung bei 4K erzeugt Leerstellen
- Ausheilstufe bei 200 K
- bei hohen Bestrahlungsdosen bilden sich Doppelleerstellen
- diese sind thermisch stabiler als Einzelleerstellen



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



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

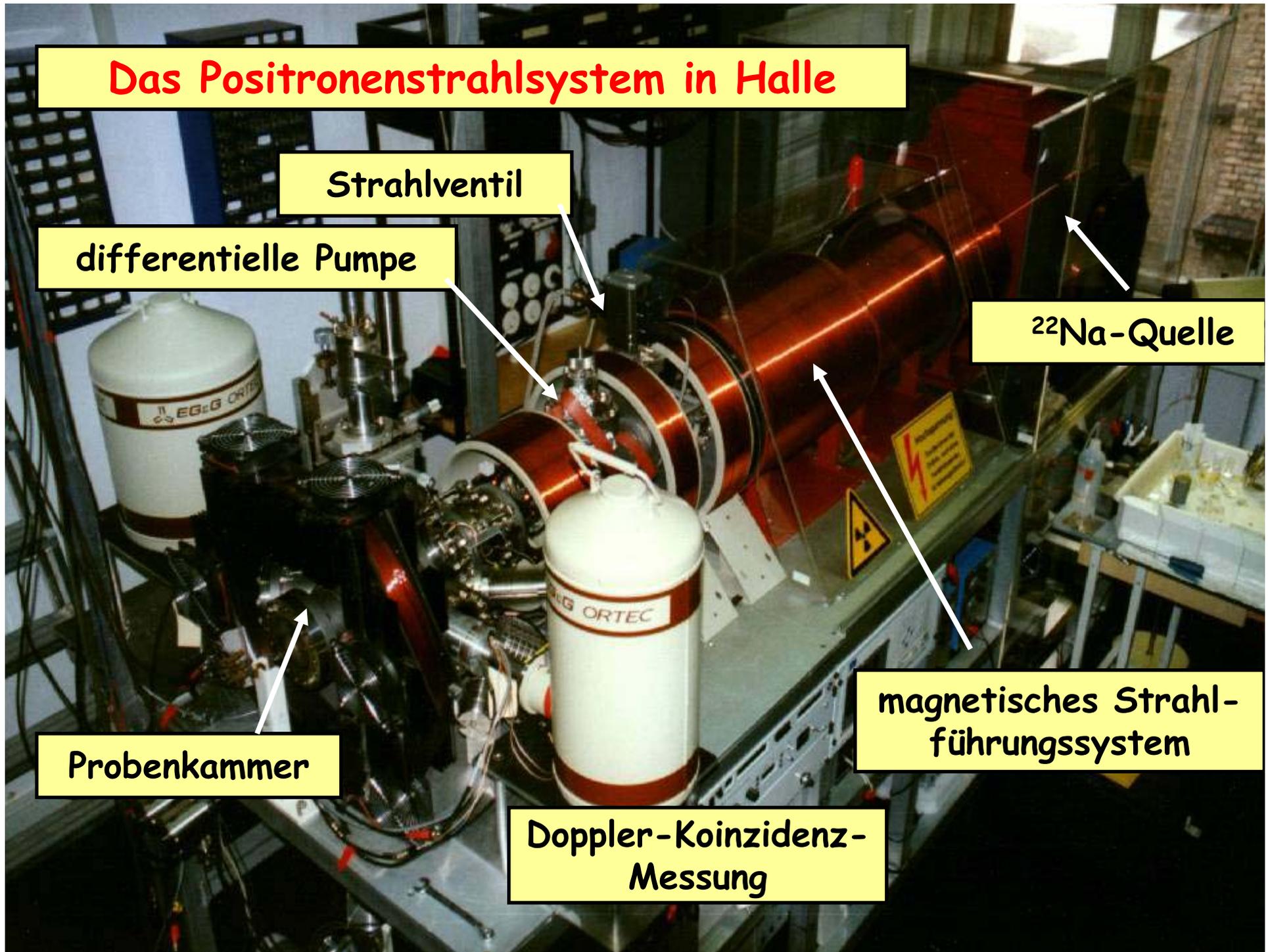
differentielle Pumpe

^{22}Na -Quelle

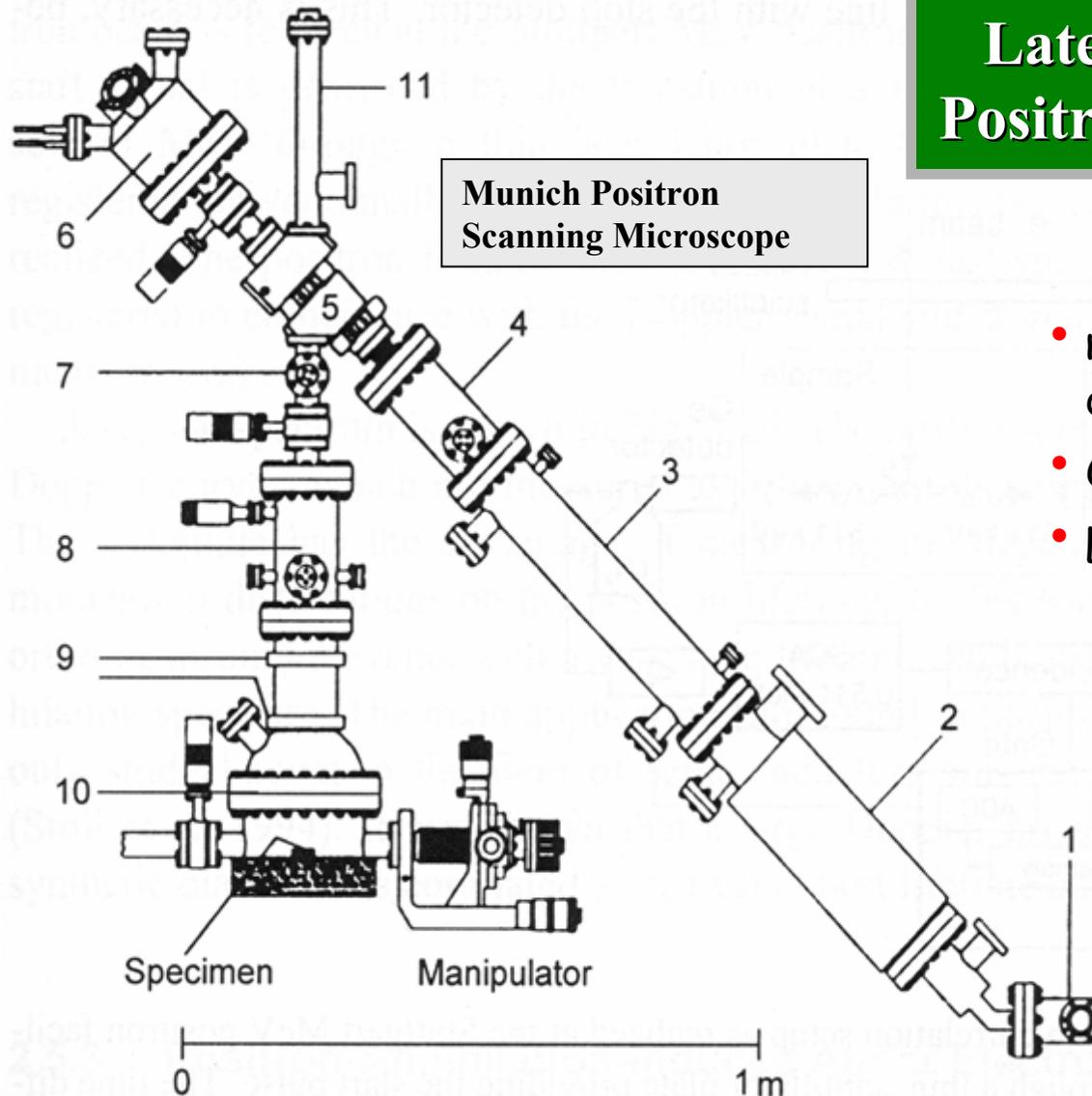
Probenkammer

Doppler-Koinzidenz-
Messung

magnetisches Strahl-
führungssystem



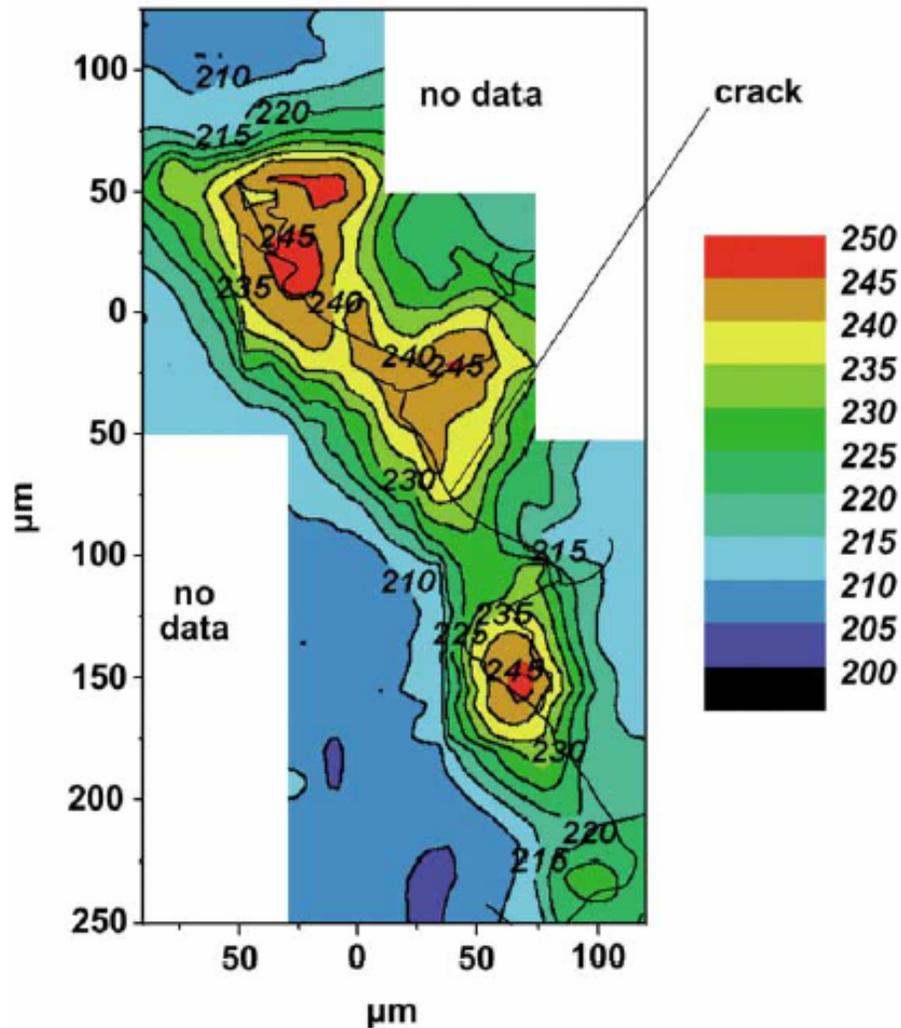
Laterale Auflösung mittels Positronen-Raster-Mikroskop



- monoenergetische Positronen durch Moderation
- Orts-Auflösung ca. $2 \mu\text{m}$
- Lebensdauer-Messung möglich

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

Defekte an einem Riss in Kupfer



- orts aufgelöste Lebensdauer-Messung um einen Mikroriss in Cu nach mechanischer Ermüdung
- es wurden 2 Defekte detektiert: kleine Leerstellencluster und Versetzungen
- Leerstellencluster lassen sich noch 40 μm neben Riss finden

W. Egger et al., Applied Surface Sci. 194 (2002)

Zusammenfassung und Ausblick

- Positronen: geeignete Sonde zur Charakterisierung von Werkstoffen in allen Bereichen
- besonders empfindlich für Leerstellen
- Stand der Technik: Einsatz von Positronen-Mikrostrahl
- notwendig: intensivere Positronenquellen, z.B. EPOS oder FRM-II

Vortrag als PDF-File:

<http://positron.physik.uni-halle.de>

