

Materialforschung mit Positronen - die intensive Positronenquelle EPOS

Martin-Luther-Universität



Halle-Wittenberg

R. Krause-Rehberg

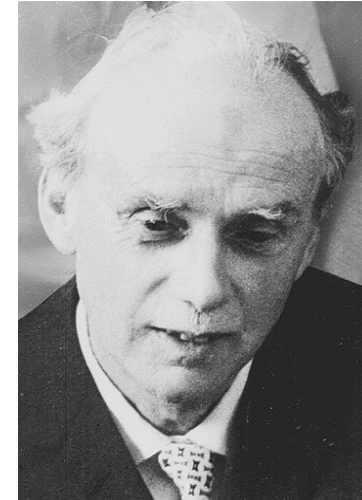
- Historische Einführung
- Die Techniken der Positronenannihilation
- Anwendung in der Materialforschung
- EPOS = ELBE Positron Source



Historisches

- **D.A.M. Dirac**, Vorhersage des Positrons schon 1928; Interpretation der Zustände negativer Energie, die sich als Lösungen der Dirac-Gleichung ergeben; (Nobelpreis 1933)

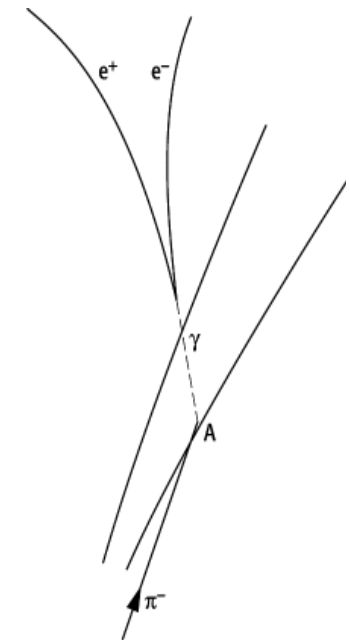
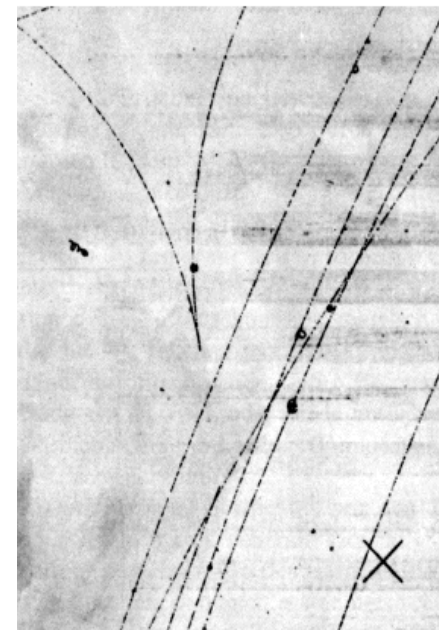
Dirac D.A.M. (1928): Proc. Roy. Soc. 117, 610



- **C.D. Anderson** entdeckte mit Wilson-Kammer 1932 das Positron in der Höhenstrahlung (Nobelpreis 1936) Anderson C.D. (1932):

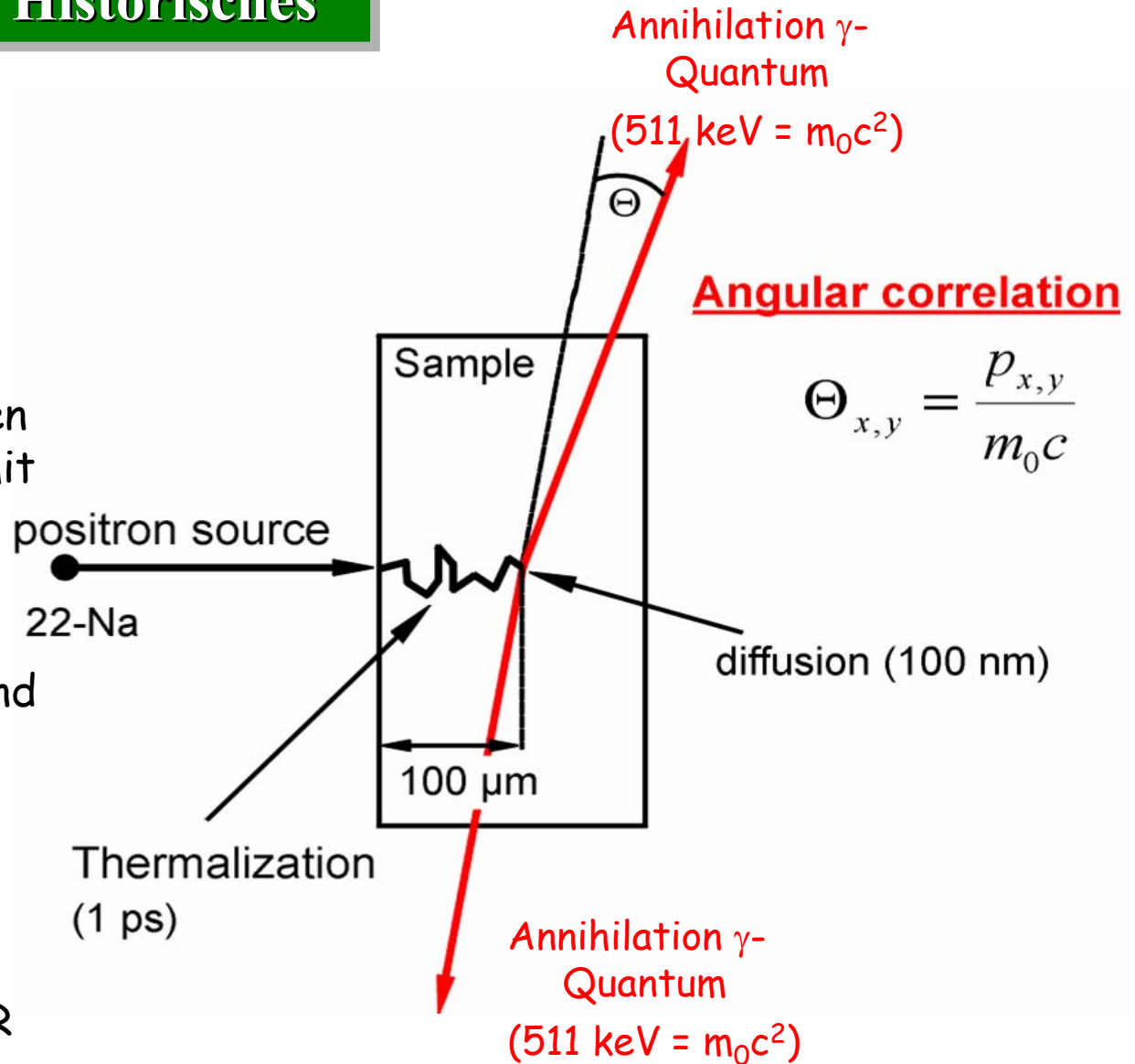
Science 76, 238

- wies 1937 zusammen mit S. H. Neddermeyer das μ -Meson nach
- 1933 exakter Nachweis der Paarerzeugung von Elektronen und Positronen durch Gammaquanten

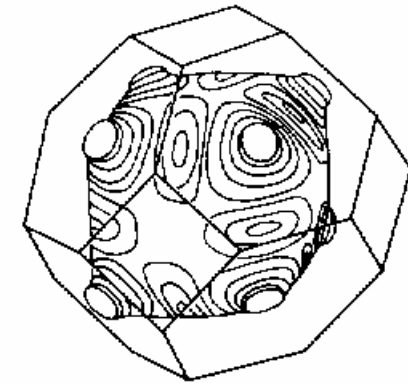
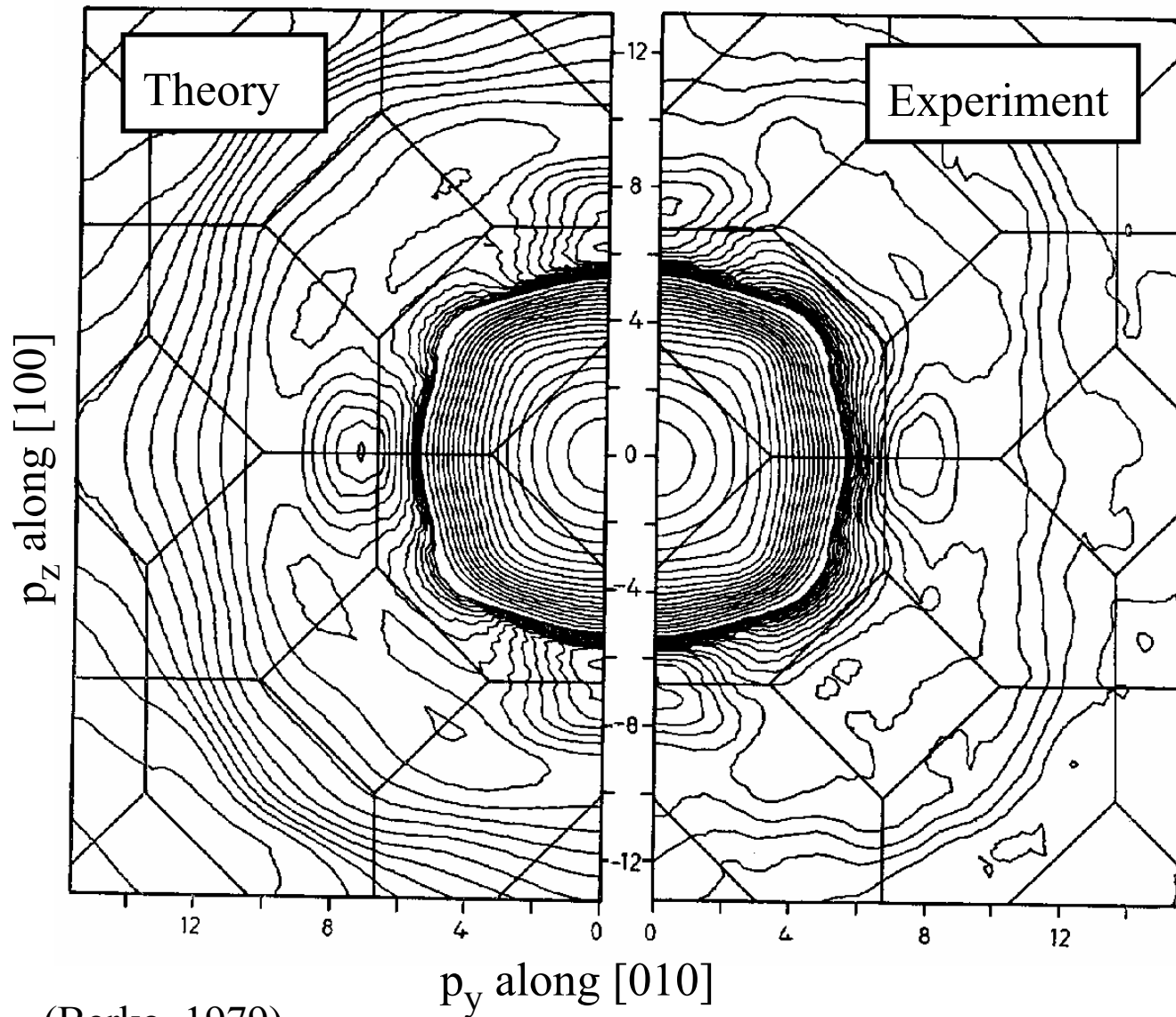


Historisches

- in 40er Jahren:
Wechselwirkung des Positrons mit Materie
- Vorhersage (Mohorovicic, 1934) und Nachweis (Deutsch, 1951) von **Positronium** als gebundenen Zustand eines Positrons mit einem Elektron
- erste Experimente zur Elektronenstruktur von Festkörpern (Behringer and Montgomery, 1942; de Benedetti et al. 1950)
- Wieso ist das möglich? Methode der **Winkelkorrelation** der Annihilationsquanten, auch ACAR
- bei Annihilation gilt Energie- und Impulserhaltungssatz



Fermi-Fläche von Cu



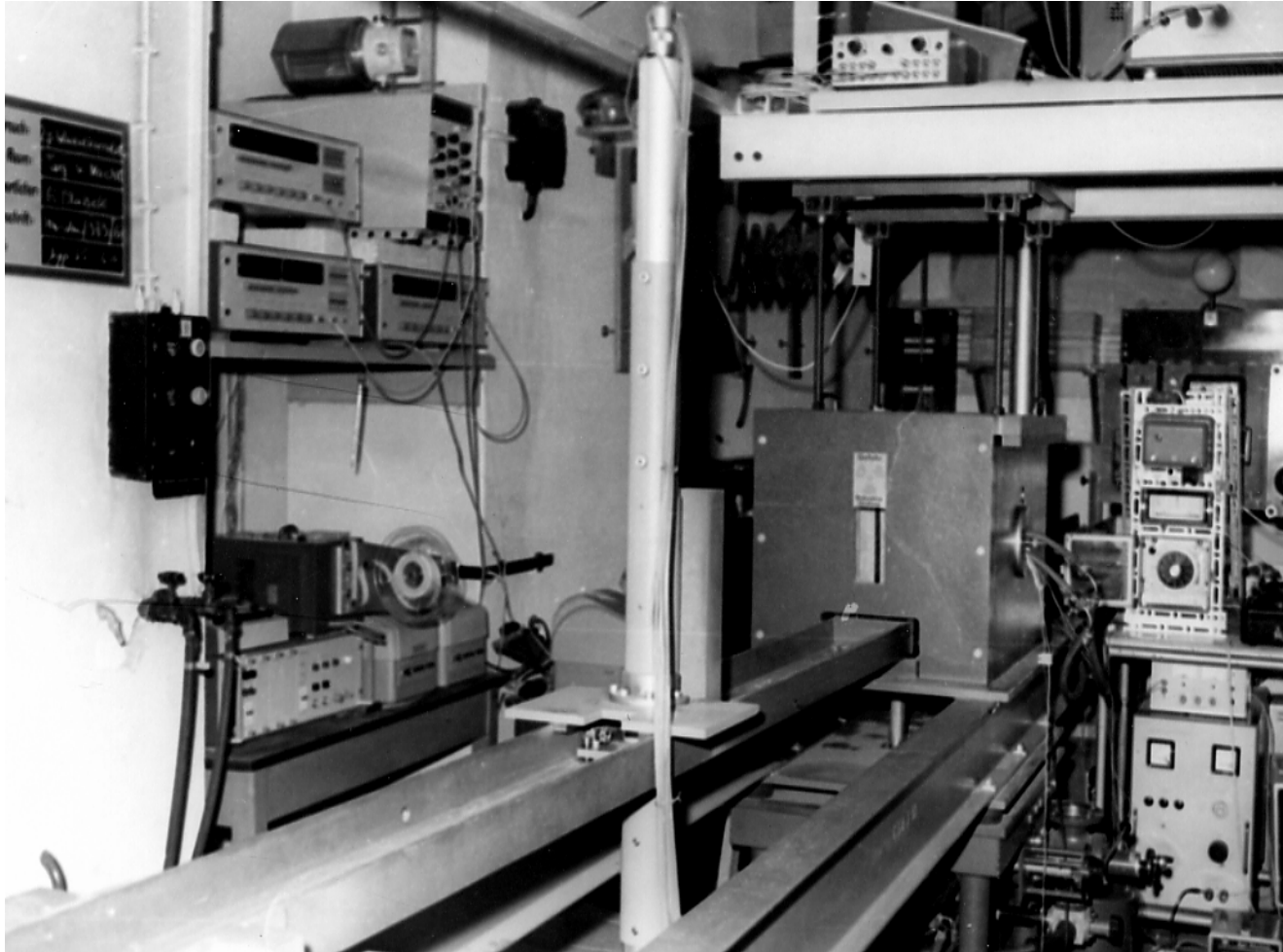
Fermi surface
of copper

(Berko, 1979)



Positronenlabor in Halle

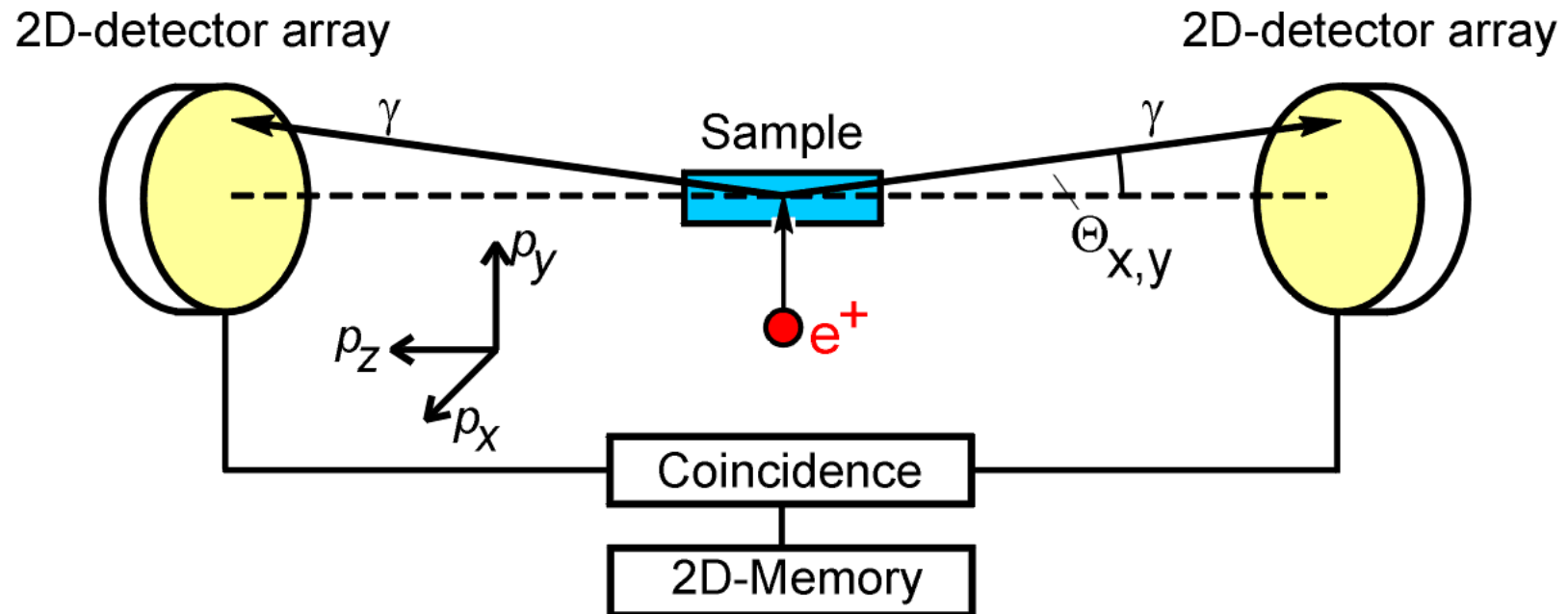
- Gründung des Labors im Jahre 1970 auf Initiative von Prof. Otto Brümmer



eindimensionale 2γ -Winkelkorrelationsanlage erbaut von Prof. G. Dlubek und den Werkstätten des FB

Winkelkorrelation der Annihilationsquanten

- heute: Messung der Winkelkorrelation in zwei Dimensionen mit Flächendetektoren

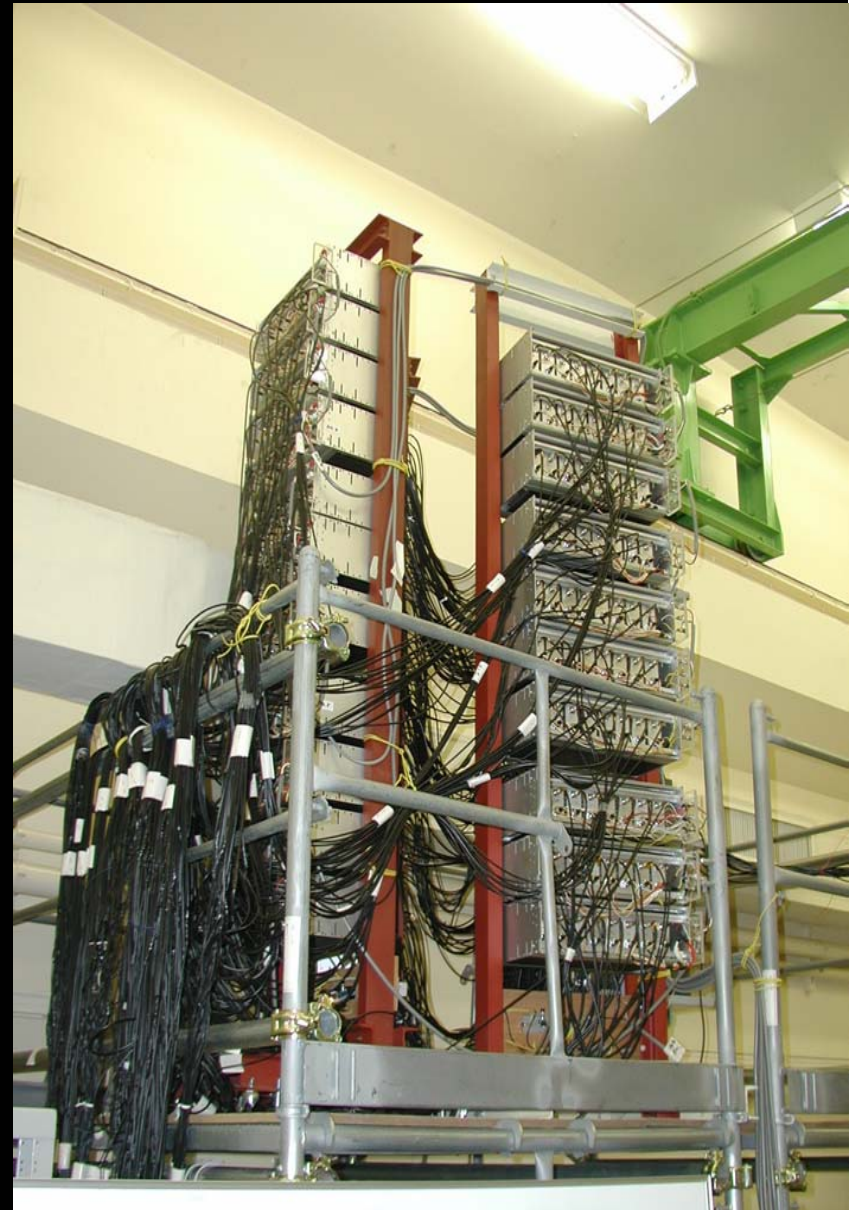
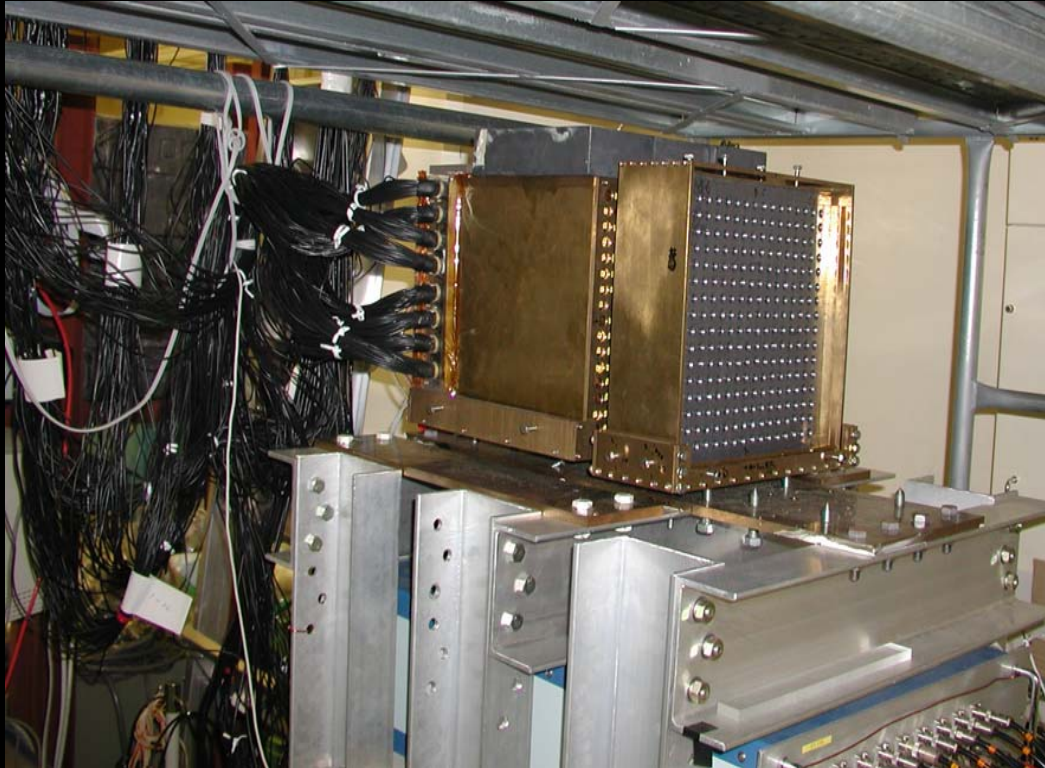


Coincidence counting rate N_c :

$$N_c(\Theta_x, \Theta_y) = A_c \int_{-\infty}^{\infty} \sigma(\Theta_x m_0 c, \Theta_y m_0 c, p_z) dp_z$$

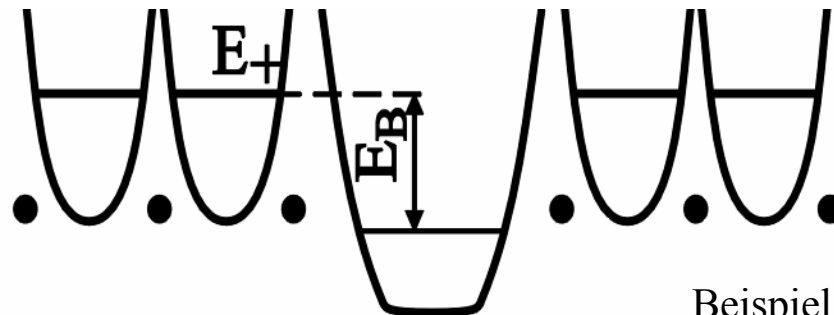
2D-ACAR-System in Tsukuba

γ -Detektion mit zwei Arrays von SEV's



Positroneneinfang durch Kristalldefekte

- bald erkannt: Kristalldefekte können Positronen einfangen - Annihilationsparameter ändern sich signifikant
- MacKenzie (1967): thermische Leerstellen in Metallen
- Brandt (1968): Ionenkristalle
- Dekhtyar (1969): plastisch deformierte Halbleiter

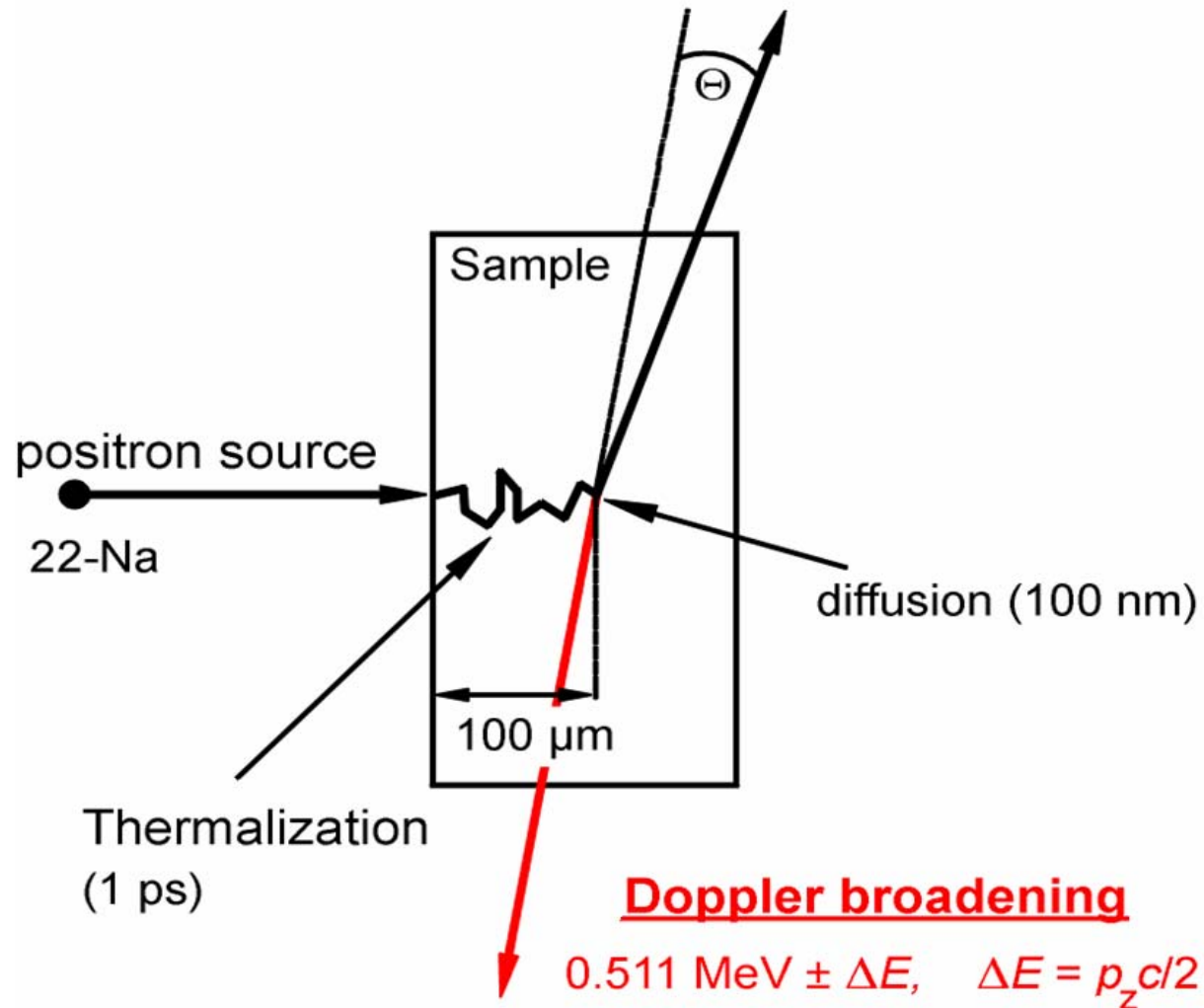


Beispiel: attraktives Potential einer Leerstelle

- solche Einfangzentren sind u.a.:
 - Leerstellen und Leerstellenagglomerate
 - Versetzungen
 - Korngrenzen
 - kleine Ausscheidungen

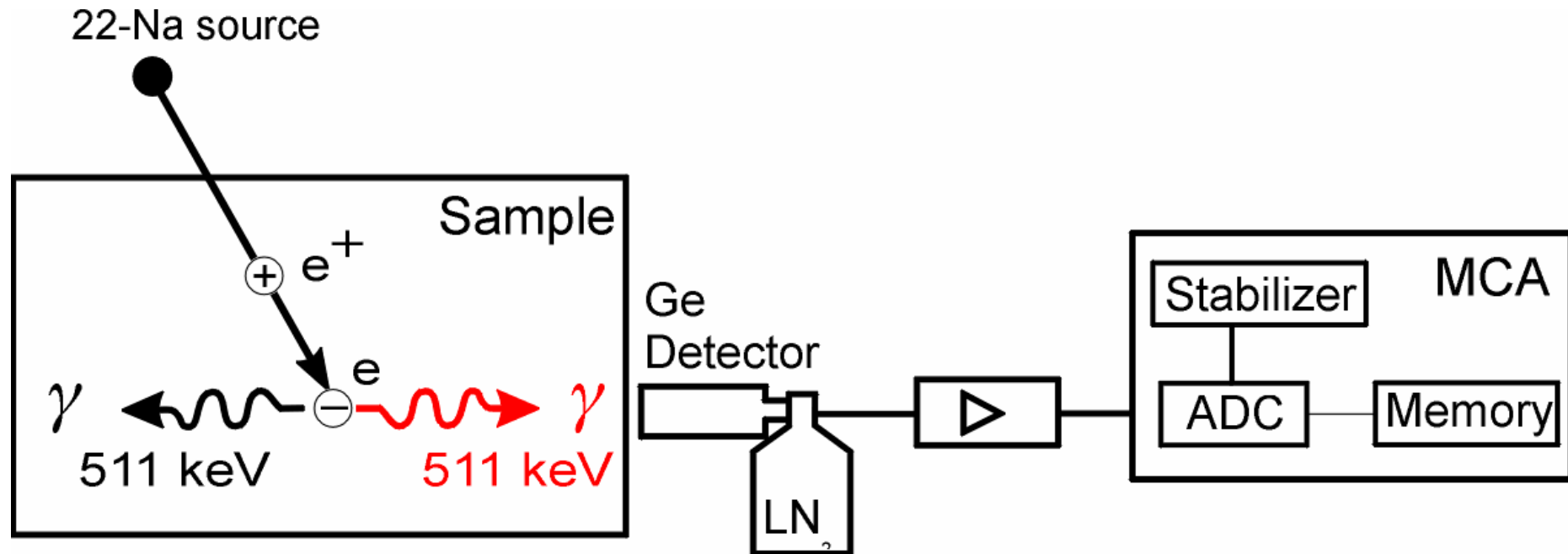
Dopplerverbreiterung der Annihilationslinie

stürmische Entwicklung der Messtechnik und Elektronik führte in 60er Jahren zu neuen Techniken



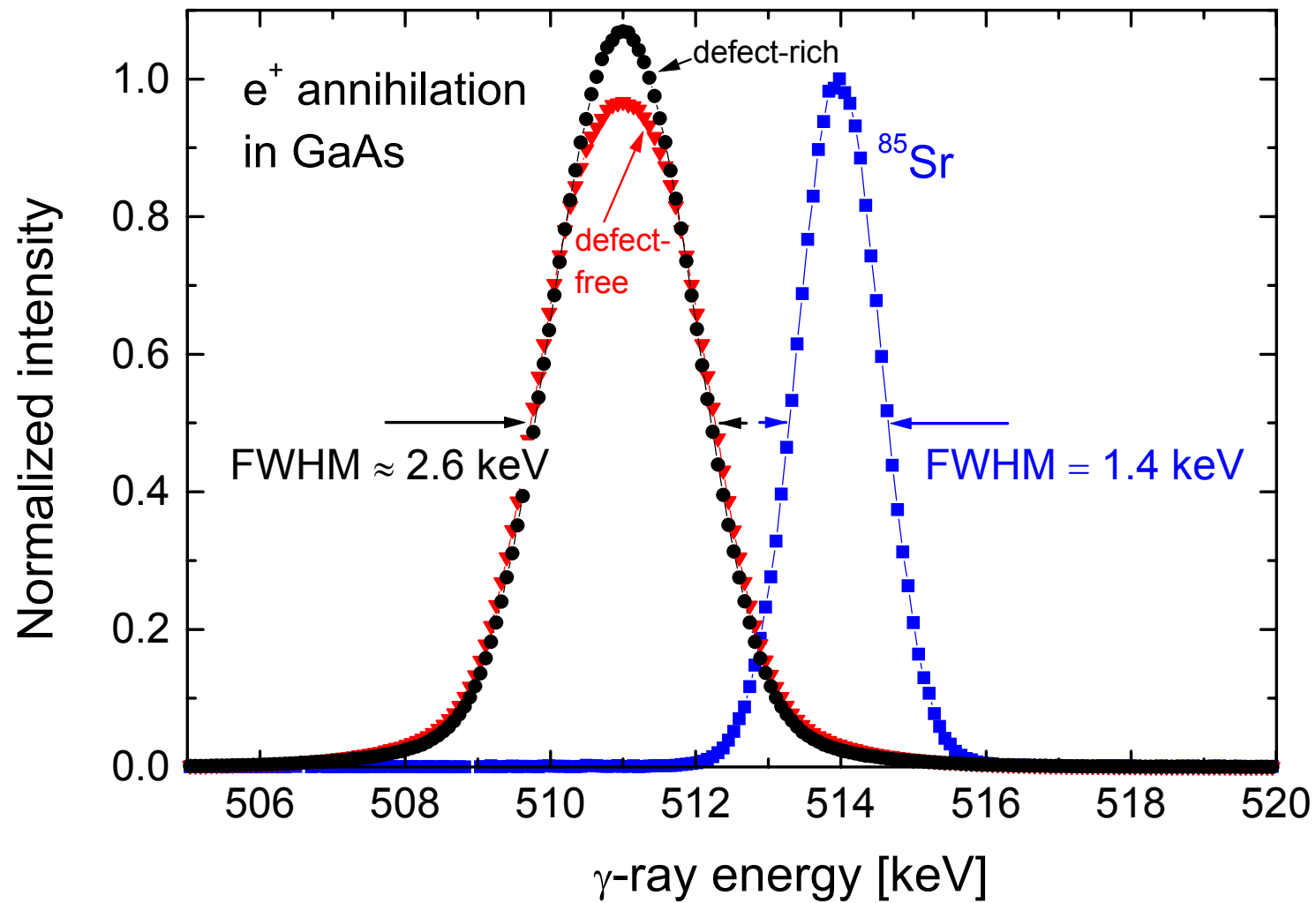
Messung der Dopplerverbreiterung

- γ -Spektroskopie mittels Ge-Detektor
- auch Doppler-Koinzidenz-Spektroskopie



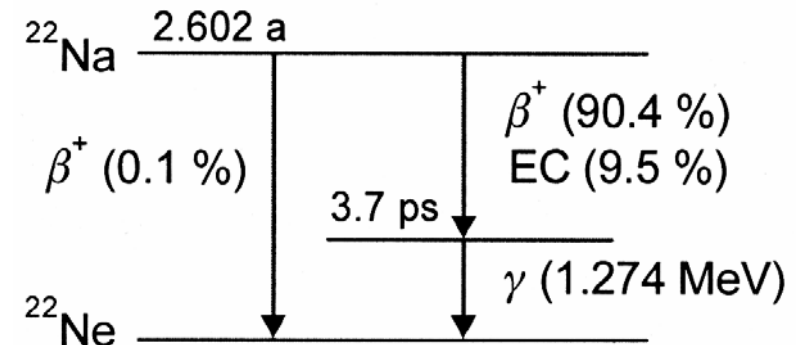
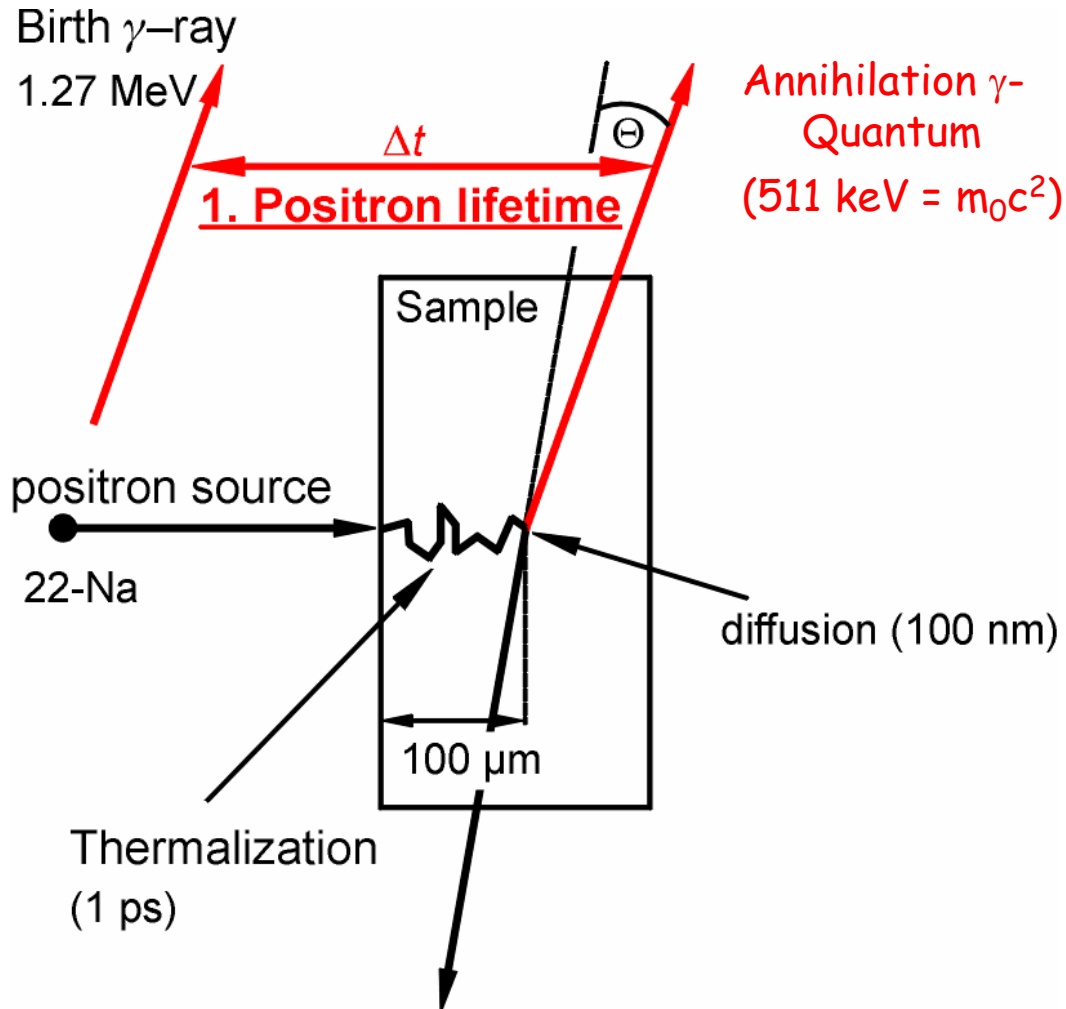
Dopplerverbreiterung der Annihilationslinie

- Beispiel: plastisch deformiertes GaAs (Leipner et al.)



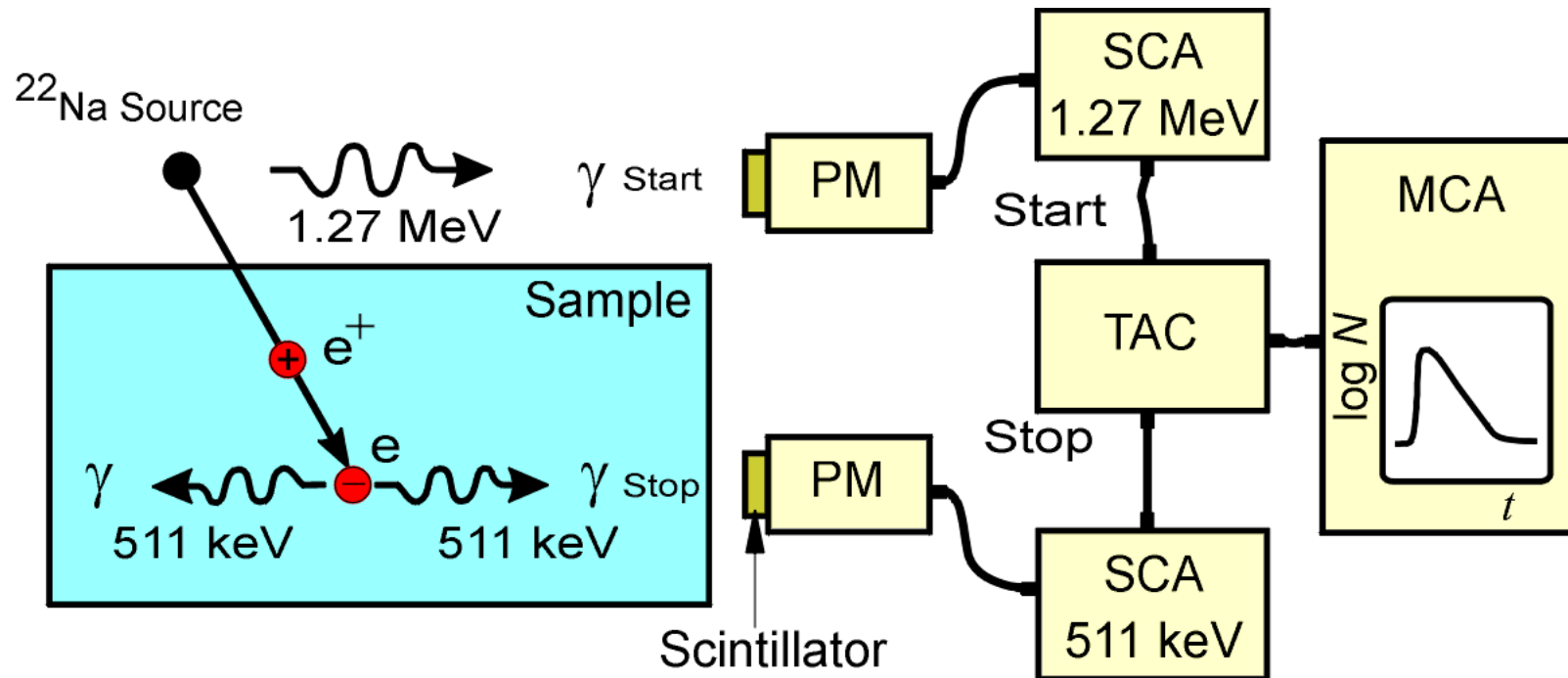
Positronenlebensdauer-Spektroskopie

- einfache Start-Stopp-Lebensdauerermessung durch Registrierung zweier γ -Quanten (^{22}Na)



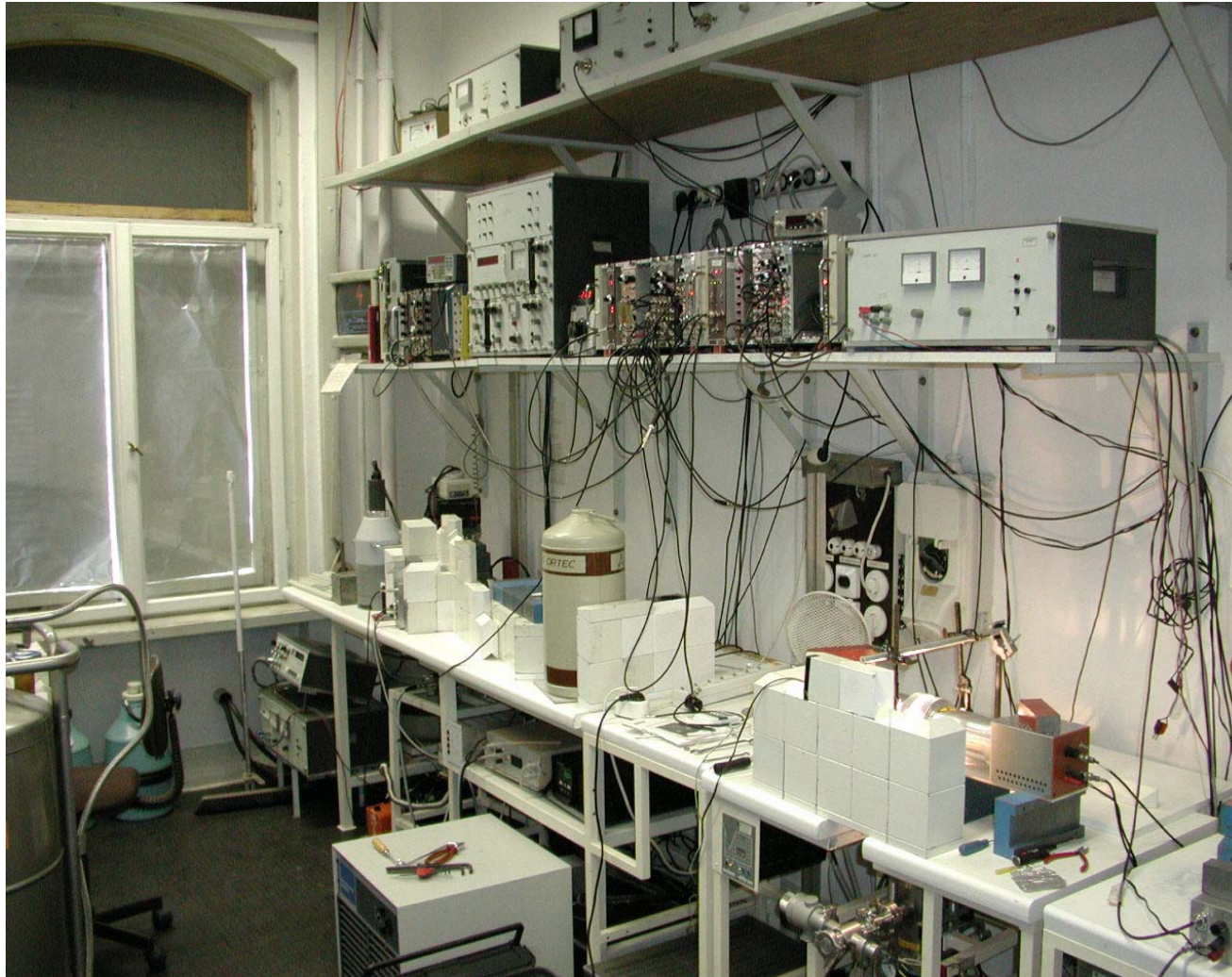
Zerfallsschema von ^{22}Na

Positronenlebensdauer-Spektroskopie

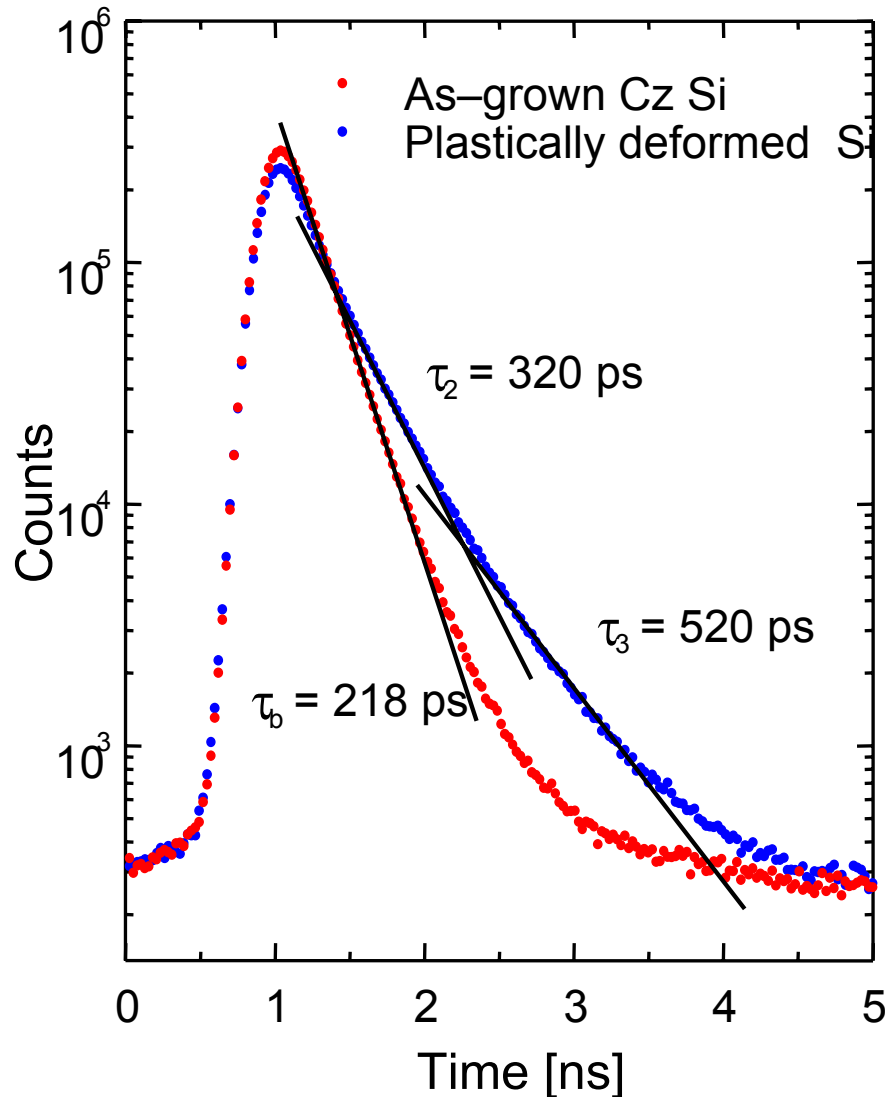


PM=Sekundärelektronenvervielfacher; SCA=Einkanalanalysator (Constant-Fraction Typ); TAC=Zeit-Impulshöhen-Konverter; MCA= Vielkanalanalysator

Positronenlebensdauer-Spektroskopie



Positronenlebensdauer-Spektroskopie

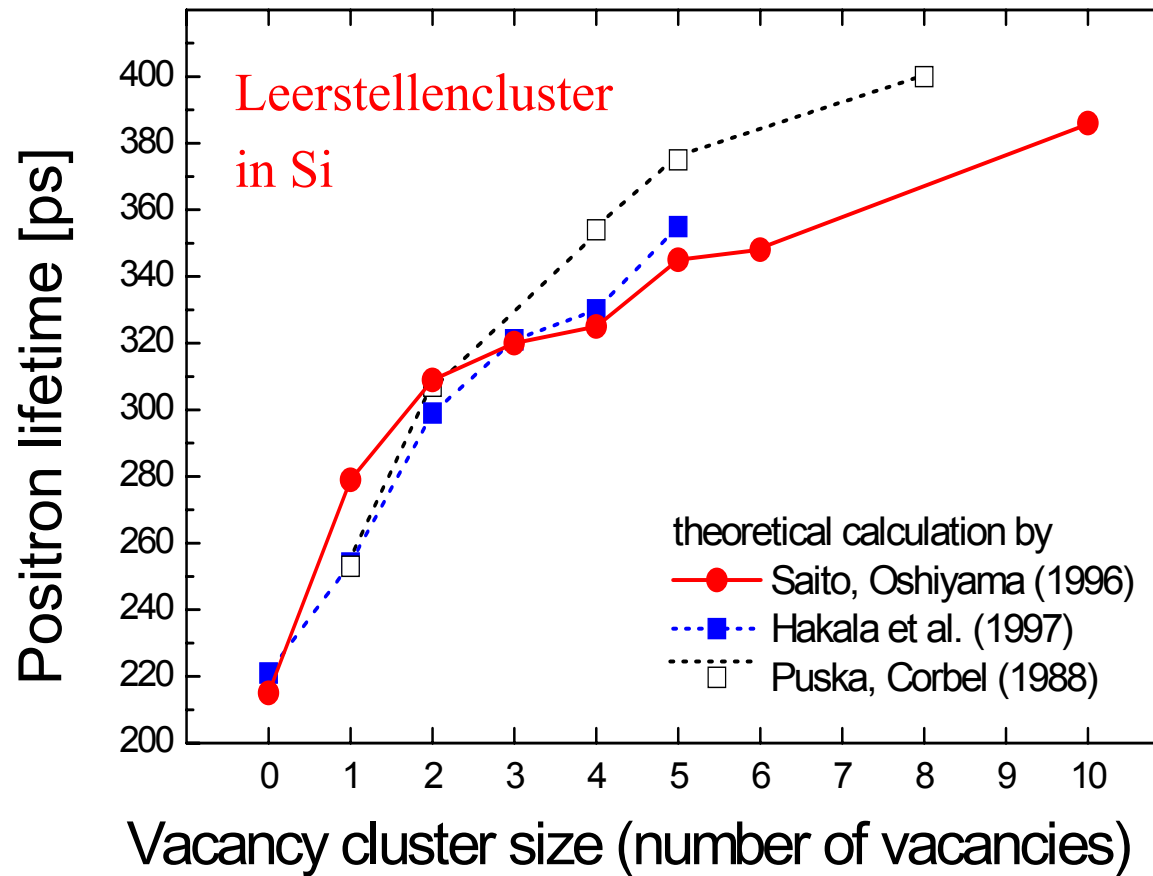


- Lebensdauerspektren bestehen aus exponentiellen Zerfallstermen
- Einfang von Positronen in Defekte mit offenem Volumen führt zu langen Komponenten im Spektrum
- Ergebnis der numerischen Auswertung: Lebensdauern τ_i und Intensitäten I_i

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



Nachweis von Leerstellenclustern



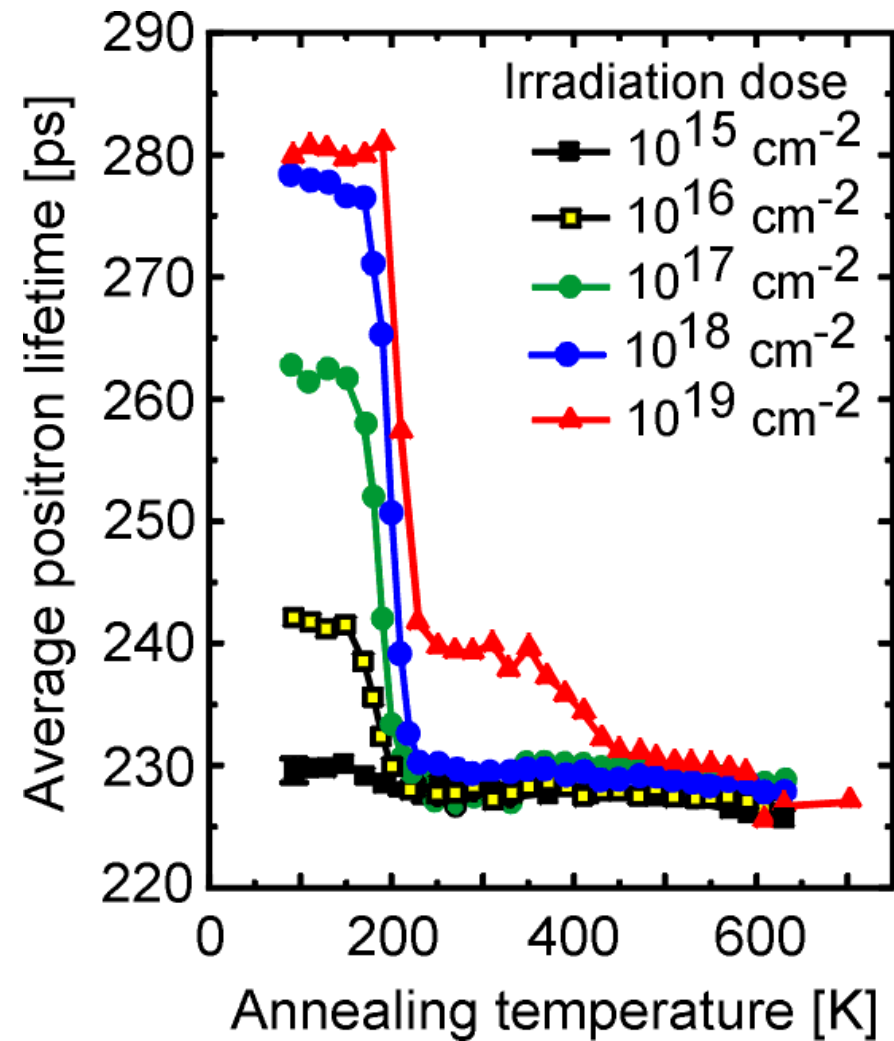
$$N(t) = \sum_{i=1}^{k+1} \frac{I_i}{\tau_i} \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right)$$

defekttypische
Lebensdauern τ_i sind
Maß für offenes
Volumen im Defekt



Defekte nach Elektronenbestrahlung von Ge

- Elektronenbestrahlung 2MeV bei 4K induziert Frenkelpaare (Paare von Leerstellen und Zwischengitteratomen)
 - Ausheilstufe bei 200 K
 - bei hohen Bestrahlungsdosen bilden sich Doppelleerstellen, wenn Einzellerstellen beweglich werden
-
- Wegen hoher Energie der β -Teilchen: hohe Informationstiefe
 - mittlere e^+ -Eindringtiefe in GaAs: ca. 20 μm
 - oft dünne Schichten zu untersuchen (Epitaxie, Implantation, usw.)
 - Positronen werden moderiert

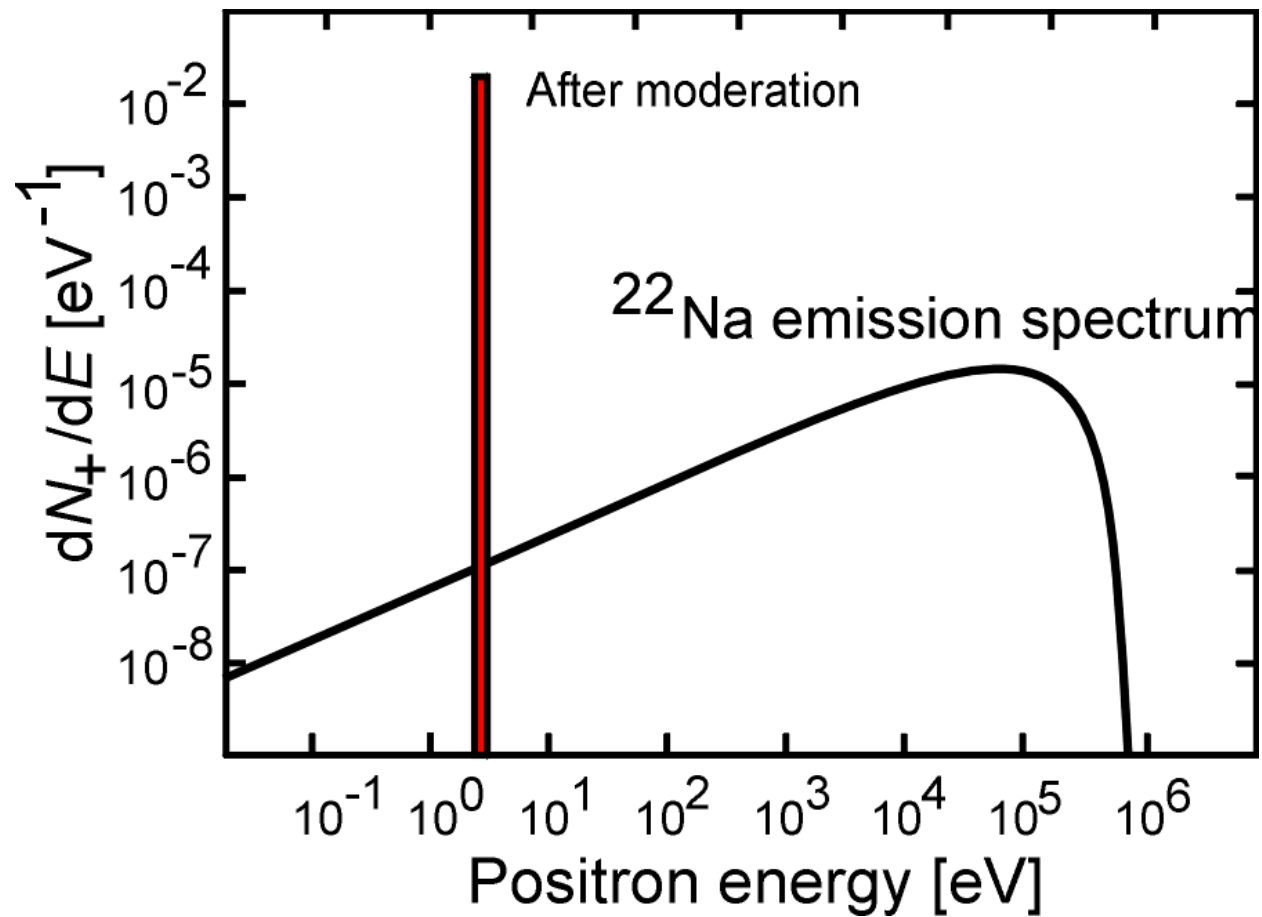


(Polity et al., 1997)

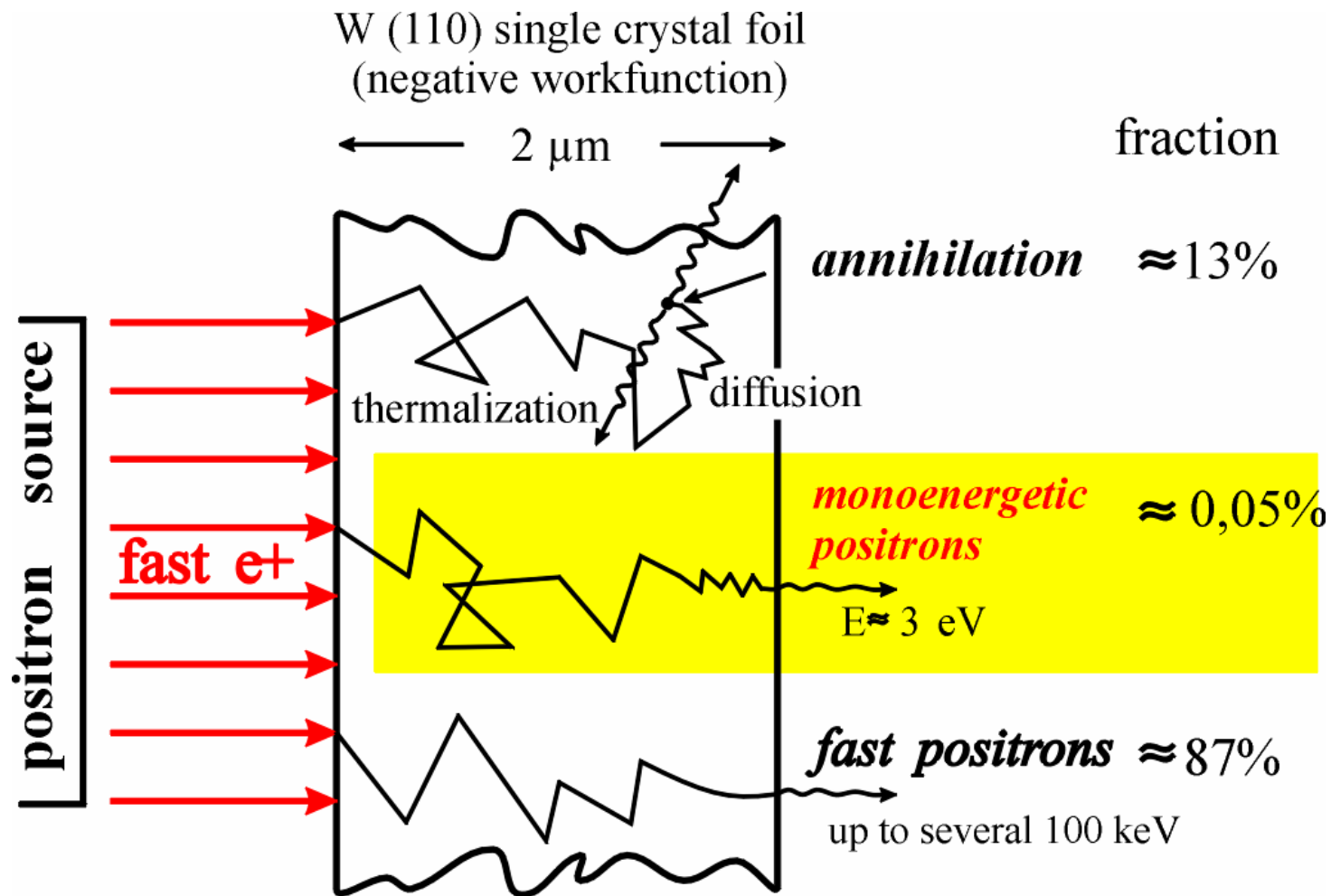


Monoenergetische Positronen: Moderation

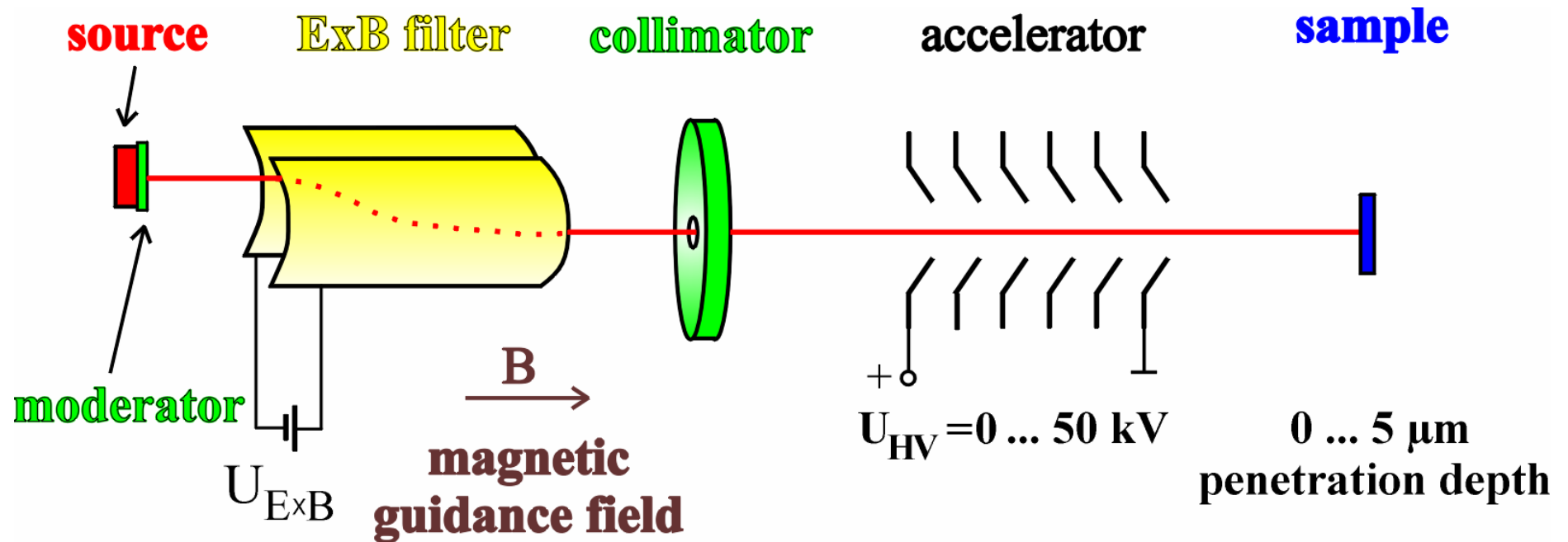
- breite Energieverteilung im β -Spektrum



Monoenergetische Positronen: Moderation



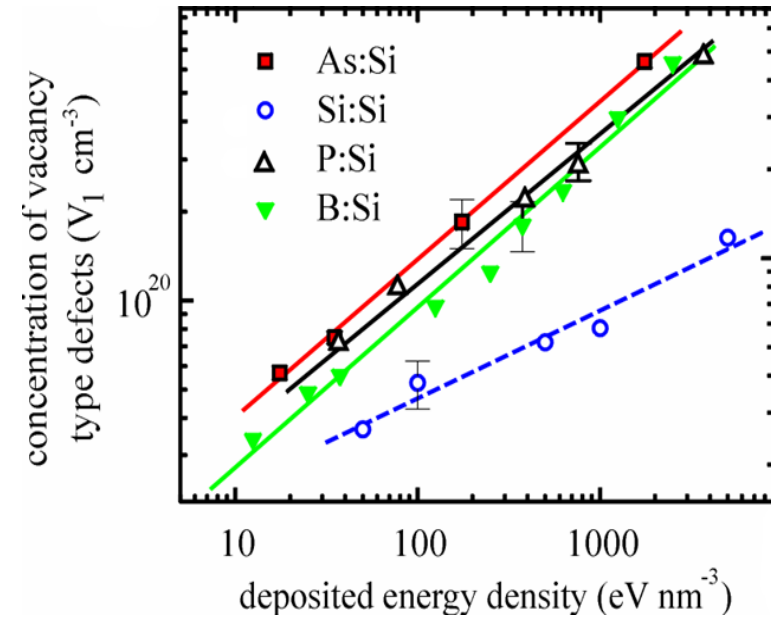
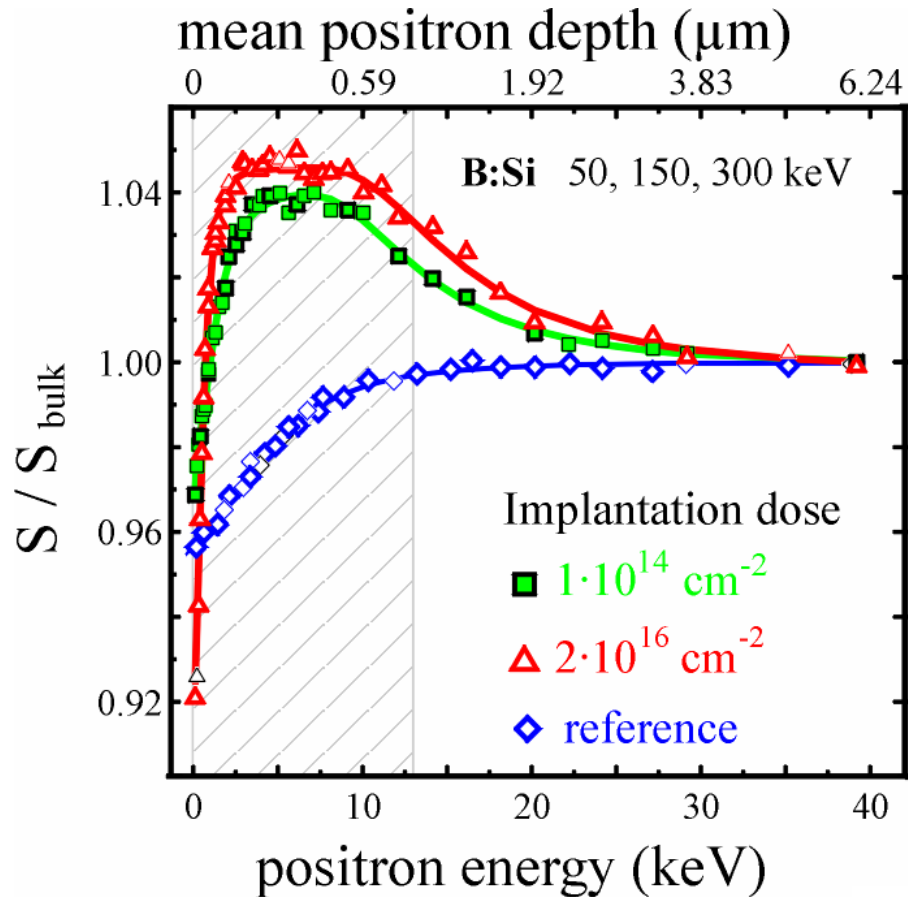
Defektprofile messen mit einem monoenergetischen Positronenstrahl



- Eindringtiefe der Positronen durch Beschleunigungsspannung zu steuern

Defekte nach Ionenimplantation

- Ionenimplantation ist wichtigste Technik für das Dotieren in der planaren Technologie
- Hauptproblem: Ausheilen der Implantationsdefekte (z.B. Diffusion der Dotanden)



(Eichler et al., 1997)



Das Positronenstrahlsystem in Halle

Strahlventil

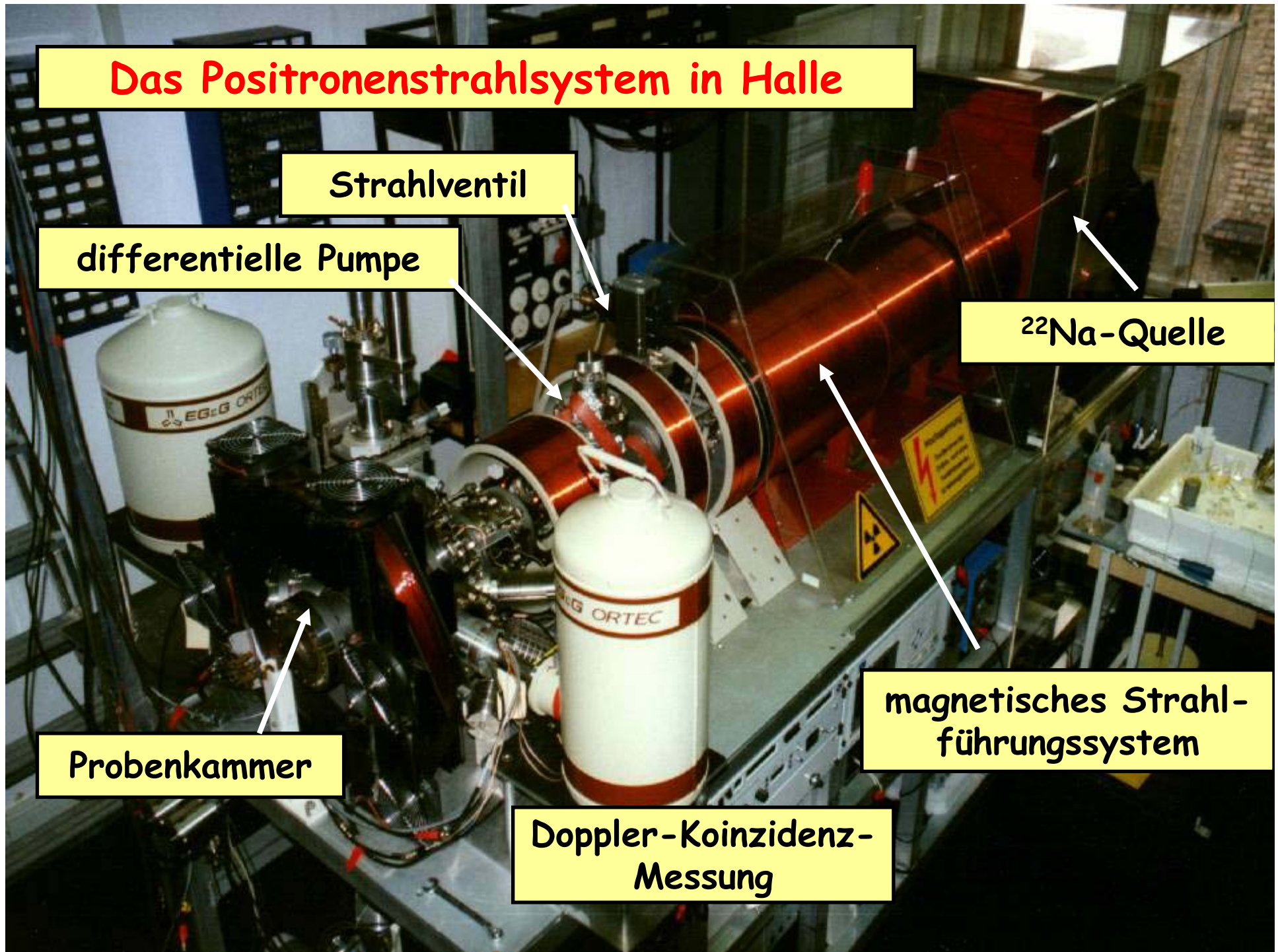
differentielle Pumpe

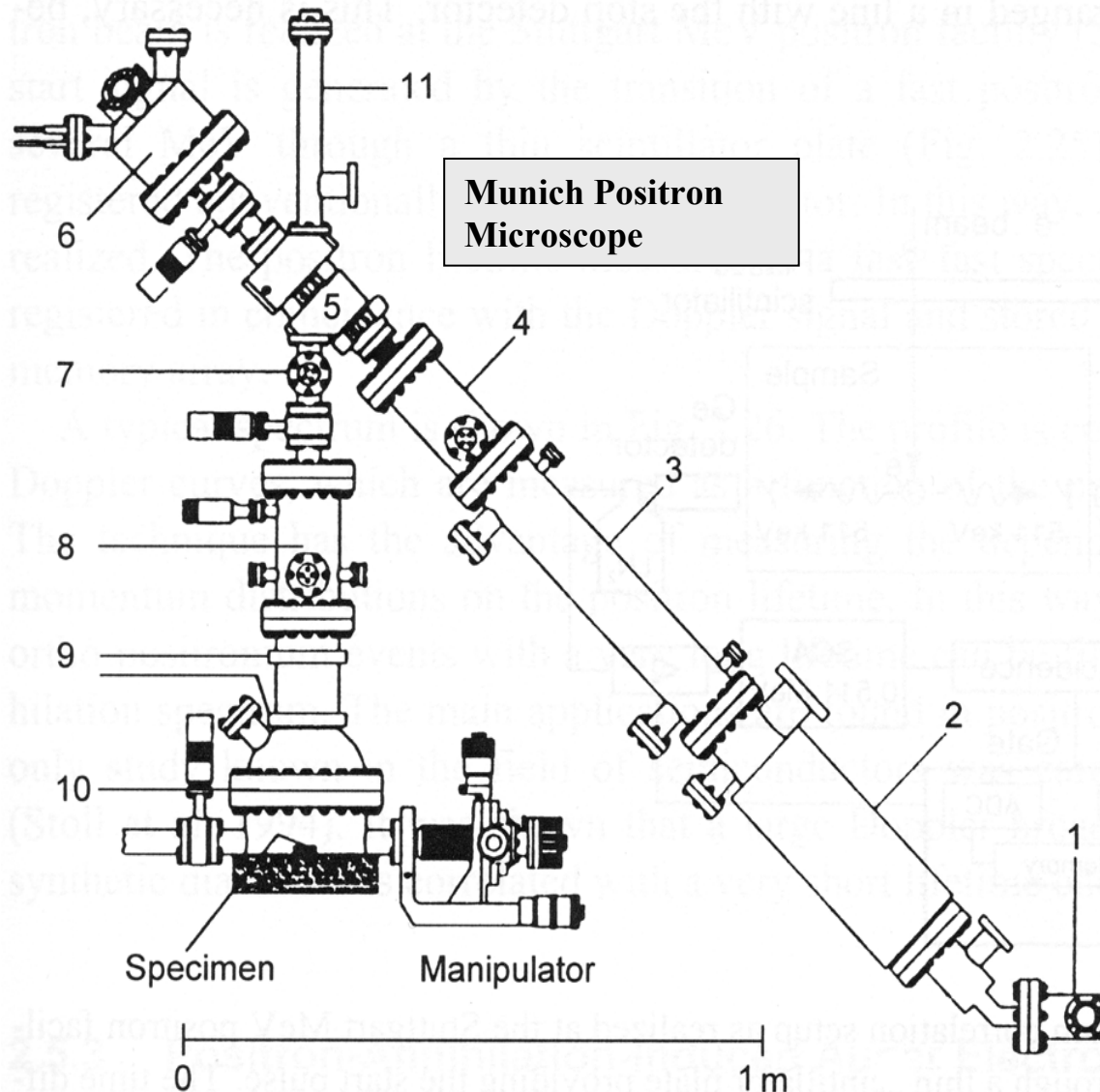
^{22}Na -Quelle

Probenkammer

Doppler-Koinzidenz-
Messung

magnetisches Strahl-
führungssystem





Laterale Auflösung mittels Positronen- Raster-Mikroskop

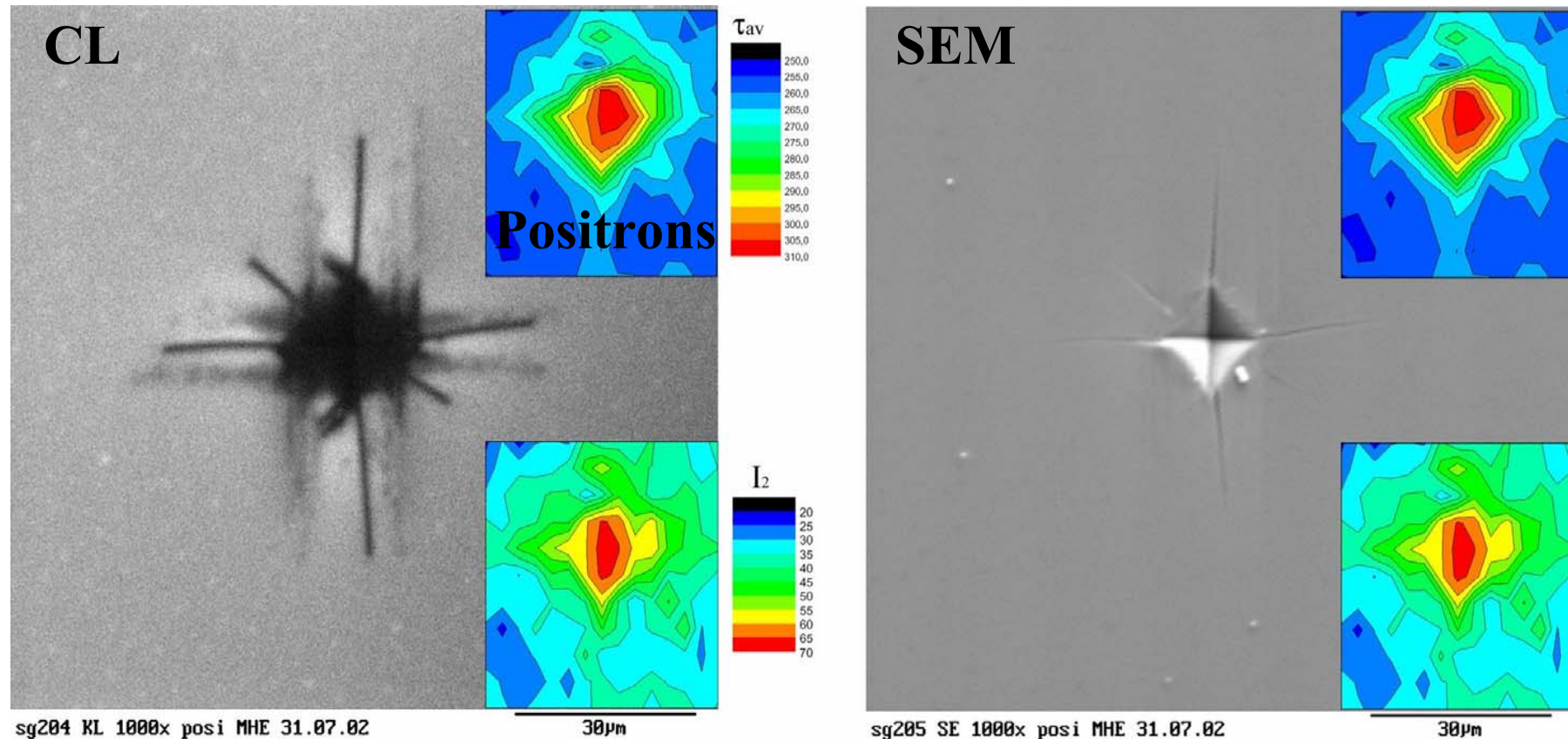
- laterale Auflösung ca. $1 \mu\text{m}$
- Auflösung durch Positronen-diffusion limitiert (ca. 100nm)
- anderes System an Univ. Bonn

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



Beispiel: Mikrohärteeindruck in GaAs

- Vergleich von Rasterelektronenmikroskopie (SEM), Kathodolumineszenz (CL) und dem Münchener Raster-Positronen-Mikroskop; Problem hier: Intensität



(Krause-Rehberg et al., 2002)

Nächster Schritt: intensive Positronenquellen für Nutzergruppen

- bei Verwendung von Isotopenquellen: Zeit / Spektrum $10^4 \dots 10^5$ s
- intensive Positronenquellen notwendig, die für Nutzergruppen frei zugänglich sind
- Positronenerzeugung bspw. durch Paarbildung an hochenergetischen Elektronen-LINAC's ($E > 10$ MeV)
- weltweit drei Projekte:
 - LLNL (Livermore, USA): LINAC-System mit e^+ -Mikrostrahl, aber kein freier Zugang für Nutzergruppen
 - FRM-II Garching: u.a. Ankopplung des Positronen-Raster-Mikroskops
 - EPOS im FZR (Rossendorf): hochintensive Strahlungsquelle ELBE wird genutzt; einmalige primäre Elektronen-Zeitstruktur dieses LINACs zur direkten Positronen-Erzeugung
- EPOS = ELBE POSitron Source; ist als externer Messplatz des IWZ der Uni Halle geplant; freier Zugang für Nutzergruppen

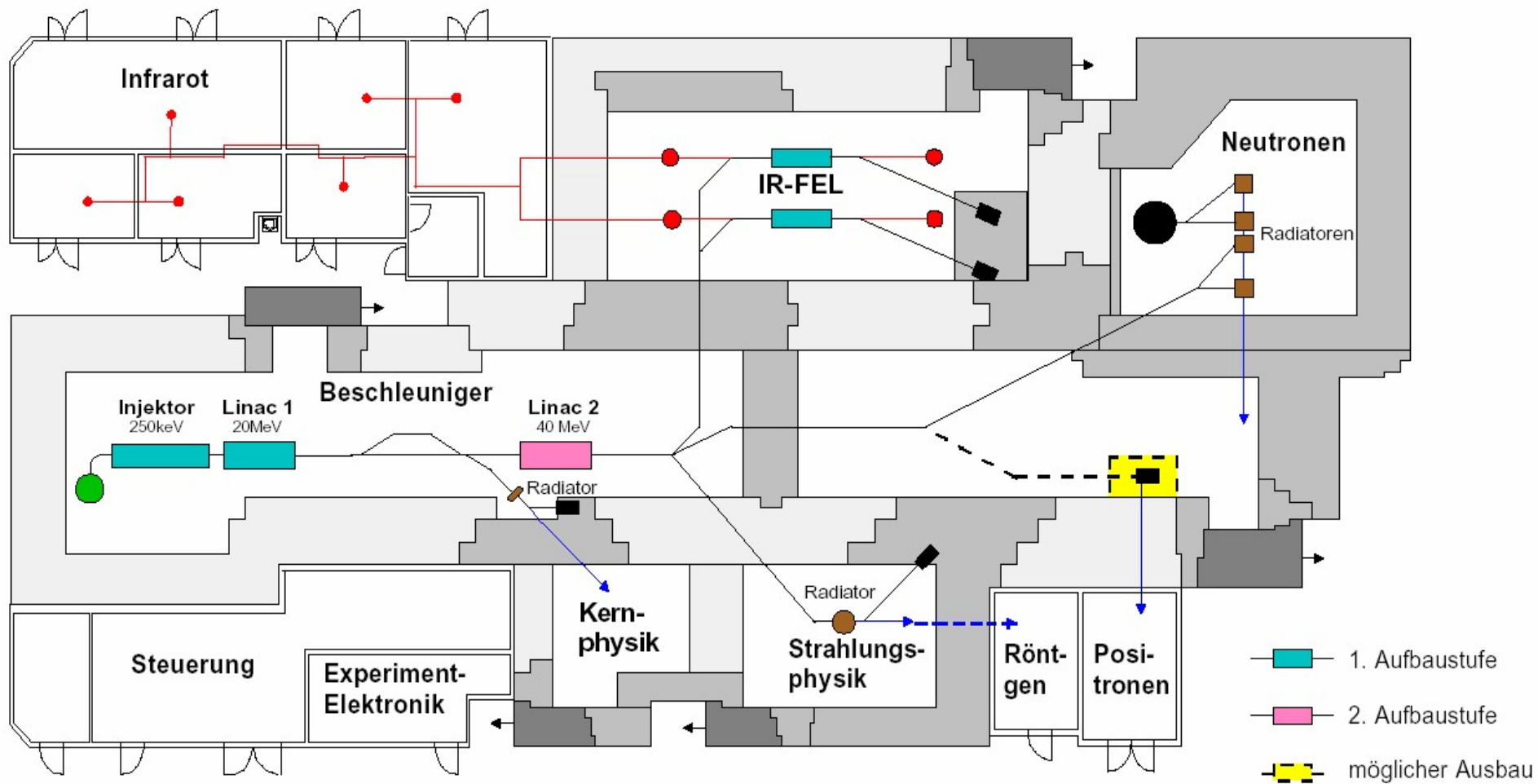


EPOS = ELBE Positron Source

- EPOS kombiniert erstmalig alle Techniken der Positronenannihilation
- besonders hohe Datenrate durch Multidetektorsystem (z.B. 16 Detektoren für Lebensdauer-Spektroskopie)
- wichtigste Daten:
 - Zählrate $> 10^6 \text{ s}^{-1}$ (konventionell ca. 10^3 s^{-1}); wichtig für kinetische Untersuchungen
 - erstmalig auch Lebensdauern bis $> 100 \text{ ns}$ messbar (Nanovoids in „low-k materials“)
 - gute laterale Auflösung ($25\text{...}50 \mu\text{m}$), aber keine Mikroskopie geplant
 - Extrem gute Zeitauflösung und Peak/UG-Verhältnis durch koinzidente Messung von Lebensdauer- und Doppler-Spektren
 - völlig neuartiges Detektorsystem mit digitaler Messung
 - dadurch: kein Abgleich von elektronischen Komponenten vor Ort mehr erforderlich
 - volle Systemkontrolle über Internet

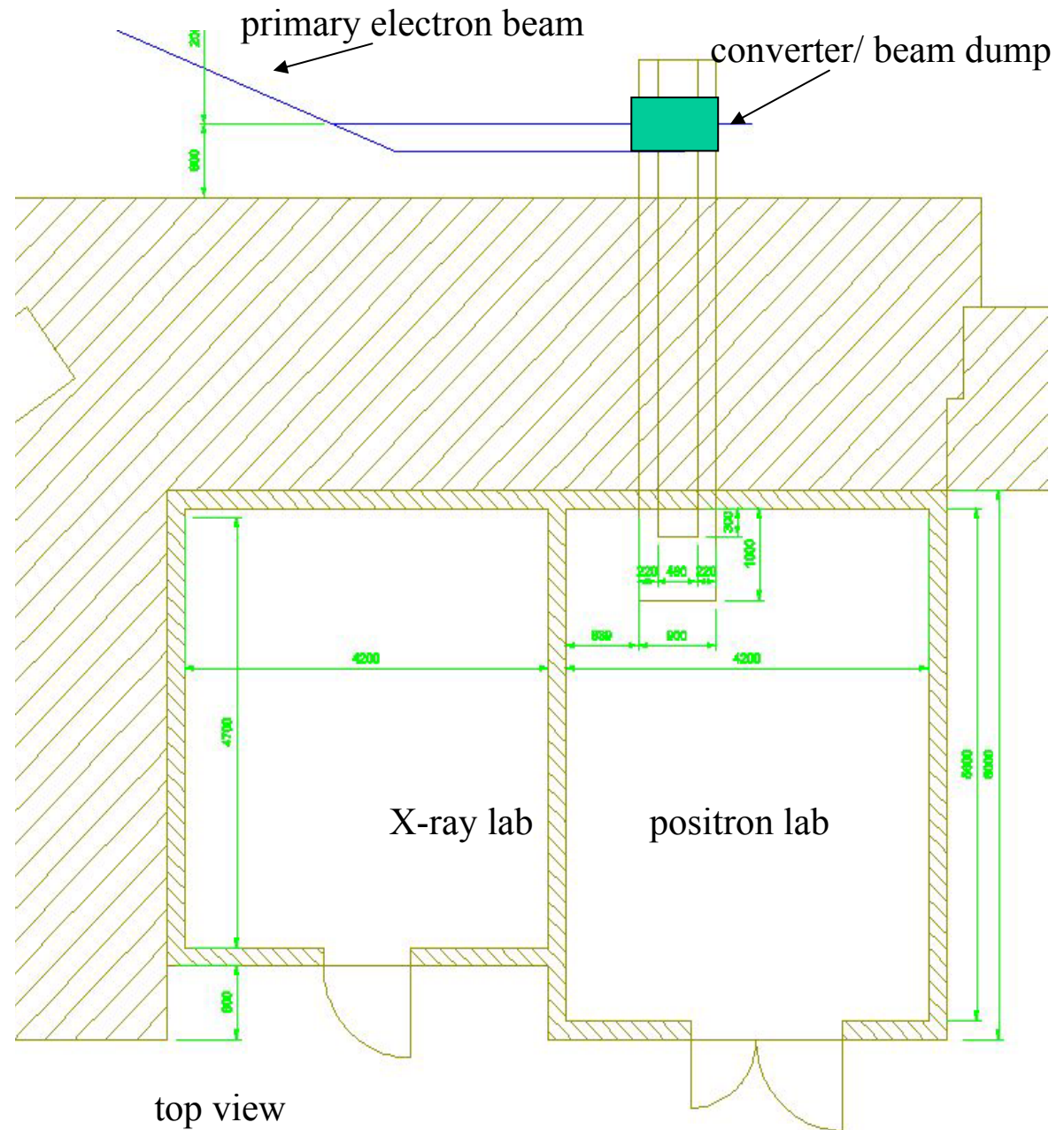


Grundriss der ELBE-Halle



Grundriss des Positronenlabors

- Planung für die zwei neuen Labors ist abgeschlossen
- Bauausführung für 2003 geplant
- Vertrag zwischen Uni Halle und FZR ist fast unterschriftsreif
- Finanzierung ...

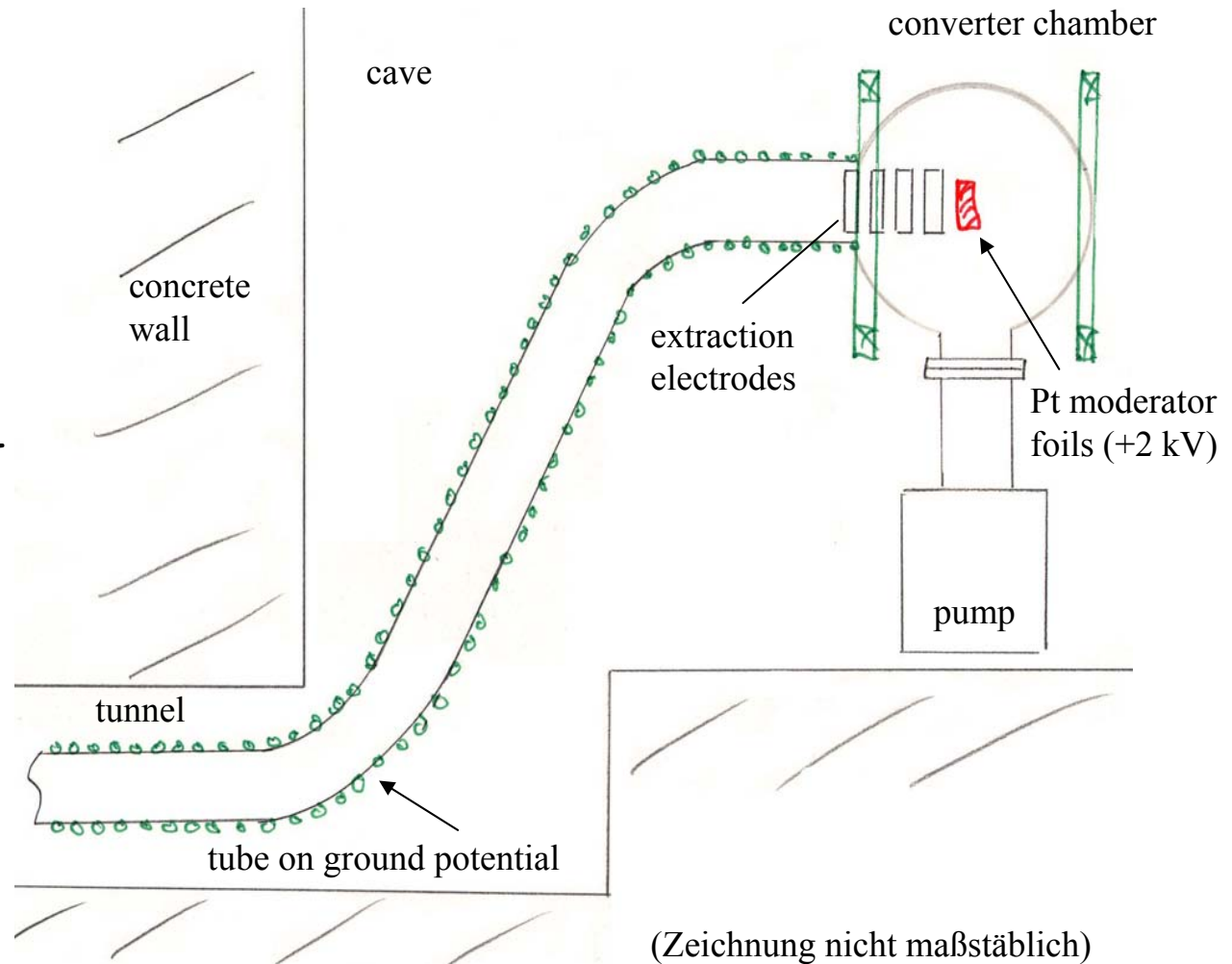


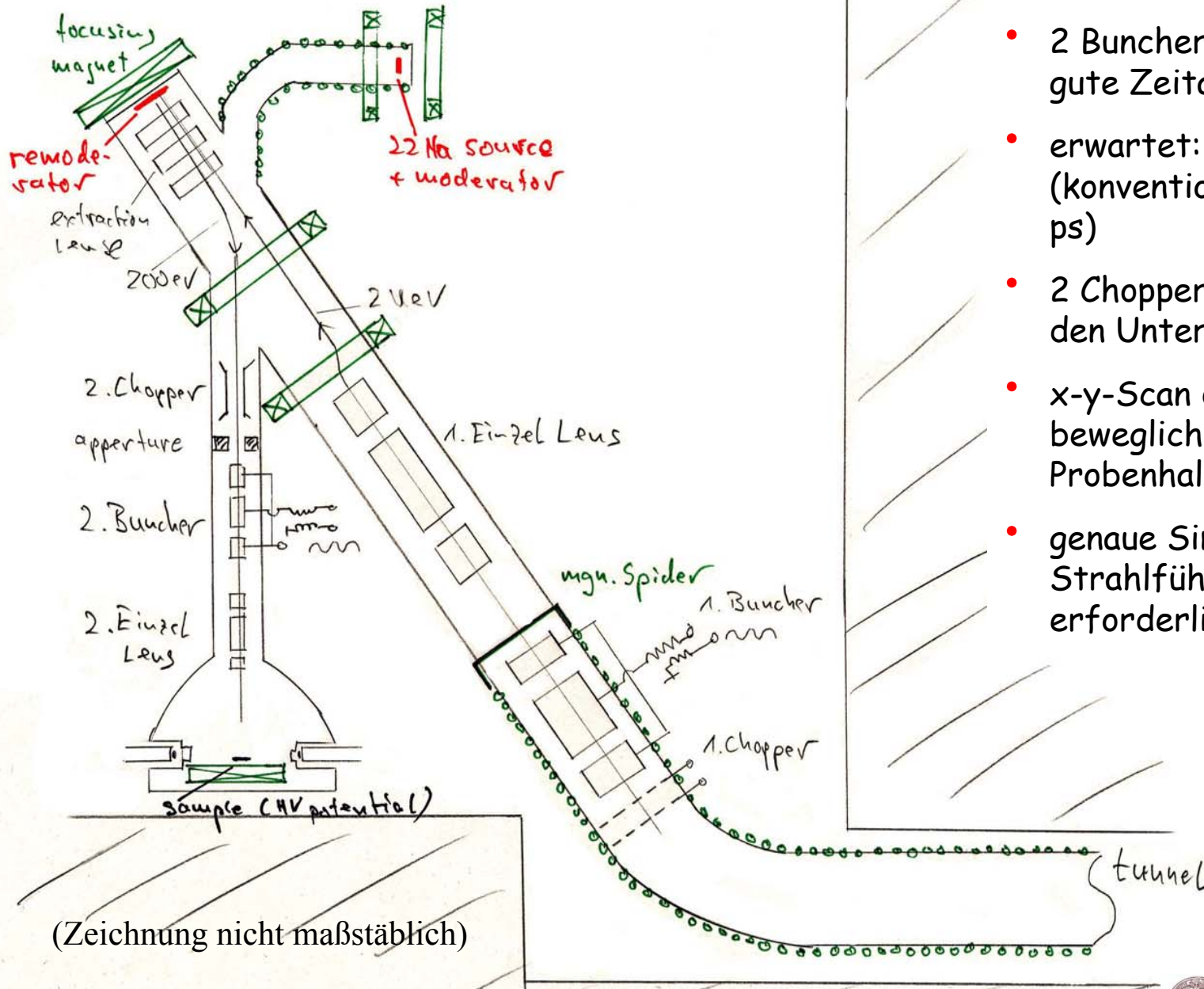


Januar 2003

Konverter-Kammer

- September 2002: Design-Workshop EPOS-02 wurde organisiert
- 22 Teilnehmer aus 11 Ländern
- Unterstützung durch Simulationen und Werkstattkapazität
- mögliches Design wurde ausführlich diskutiert





(Zeichnung nicht maßstäblich)

- 2 Buncher sorgen für gute Zeitauflösung
- erwartet: ca. 100 ps (konventionell ca. 200 ps)
- 2 Chopper reduzieren den Untergrund
- x-y-Scan durch beweglichen Probenhalter
- genaue Simulationen der Strahlführung erforderlich



Anwendungsspektrum von EPOS

- Anwendung für die volle Breite der Materialwissenschaften
- durch besonders kurze Messzeiten (Spektrum in 100 ms): in-situ Studium der Defektkinetik (Diffusion, Ausscheidungsprozesse, Defektausheilung, ...)
- Tribology (oberflächennahe Defekte)
- Polymerphysik (Poren; Interdiffusion; ...)
- „low-k materials“ (dünne hoch-poröse Schichten für elektronische Bauteile)
- Defekte in Halbleitern, Keramiken and Metallen (an Oberfläche und im Volumen)
- Epitaxie-Schichten (Wachstums- und Anpassdefekte)
- Strahlungshärte (z.B. Weltraummaterialien)
- ...



Zeitplan

	1. Jahr	2. Jahr	3. Jahr
Laborräume			
Simulation Konverterkammer			
Simulation Strahlführung			
Konverterkammer und Strahlführung durch Tunnel			
Simulation Strahlenschutz			
Aufbau erster Chopper / Buncher			
Test des Konverters/Transportlinie			
Fertigstellung Vakuumsystem			
erste Einzellinse und Remoderator			
zweiter Chopper und Einzellinse			
Probenkammer			
Kammer für Isotopenquelle			
Test komplettes Transportsystem			
Detektorsystem und Software			
Messplatz-Automatisierung			
Justierung der Beamfokussierung			
Optimierung der Zeitauflösung			



Probleme

- Extrem hohes Datenaufkommen durch digitale Messung; könnte Messgeschwindigkeit bei Lebensdauer-Spektroskopie limitieren
- Strahlenschutz-Maßnahmen an Konverterkammer (Simulationen notwendig)
- aber: keine wesentlichen technischen Schwierigkeiten
- Vertrag mit FZR und Finanzierung
- für Umsetzung in 3 Jahren benötigen wir Unterstützung der zukünftigen Nutzer (Softwareentwicklung; Werkstattkapazität)



Zusammenfassung

- zur weiteren methodischen Entwicklung: intensive Positronenquellen notwendig
- EPOS ist ambitioniertes Projekt am FZ Rossendorf
- für Nutzergruppen („user-dedicated facility“)
- ergänzt ideal das Projekt am FRM-II in Garching



Den Vortrag gibt es hier
<http://positron.physik.uni-halle.de>

