Aufbau und Entwicklung von Neutronen-Flugzeit-Detektoren für die Untersuchung astrophysikalisch relevanter (γ,n)-Reaktionen

Diplomarbeit von

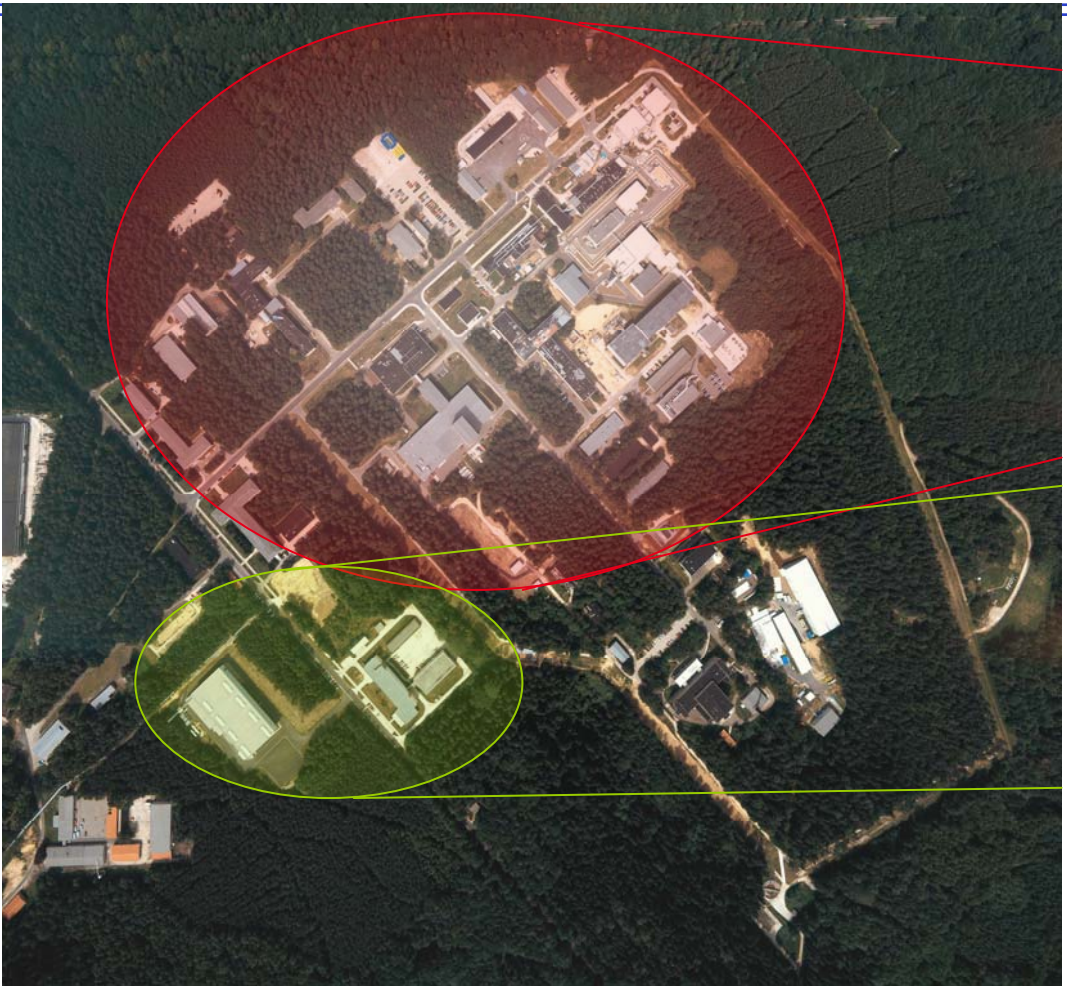
Roland Beyer

durchgeführt am Institut für Kern- und Hadronenphysik
des Forschungszentrums Rossendorf bei Dresden

Inhalt

- ELBE am Forschungszentrum Rossendorf, Dresden
- Nukleosynthese-Prozesse
- Nachweis von Neutronen, Flugzeitexperimente
- Das Datenaufnahme System
- Die Detektoren:
  - Li-Glas-, Plastik- und ZnS-Szintillatoren
  - Charakterisierungs-Messungen mit ^{252}Cf n-Quelle
- Messung des Wirkungsquerschnittes von d(γ,n)p an ELBE

Das Forschungszentrum Rossendorf e.V.



Institute für:

- Ionenstrahlphysik und Materialforschung
- Radiochemie
- Biopharmazie
- Sicherheitsforschung

- **Kern- und Hadronenphysik**
- Hochfeld-Magnetlabor Dresden (mit TU und IFW)

Strahlungsquelle ELBE

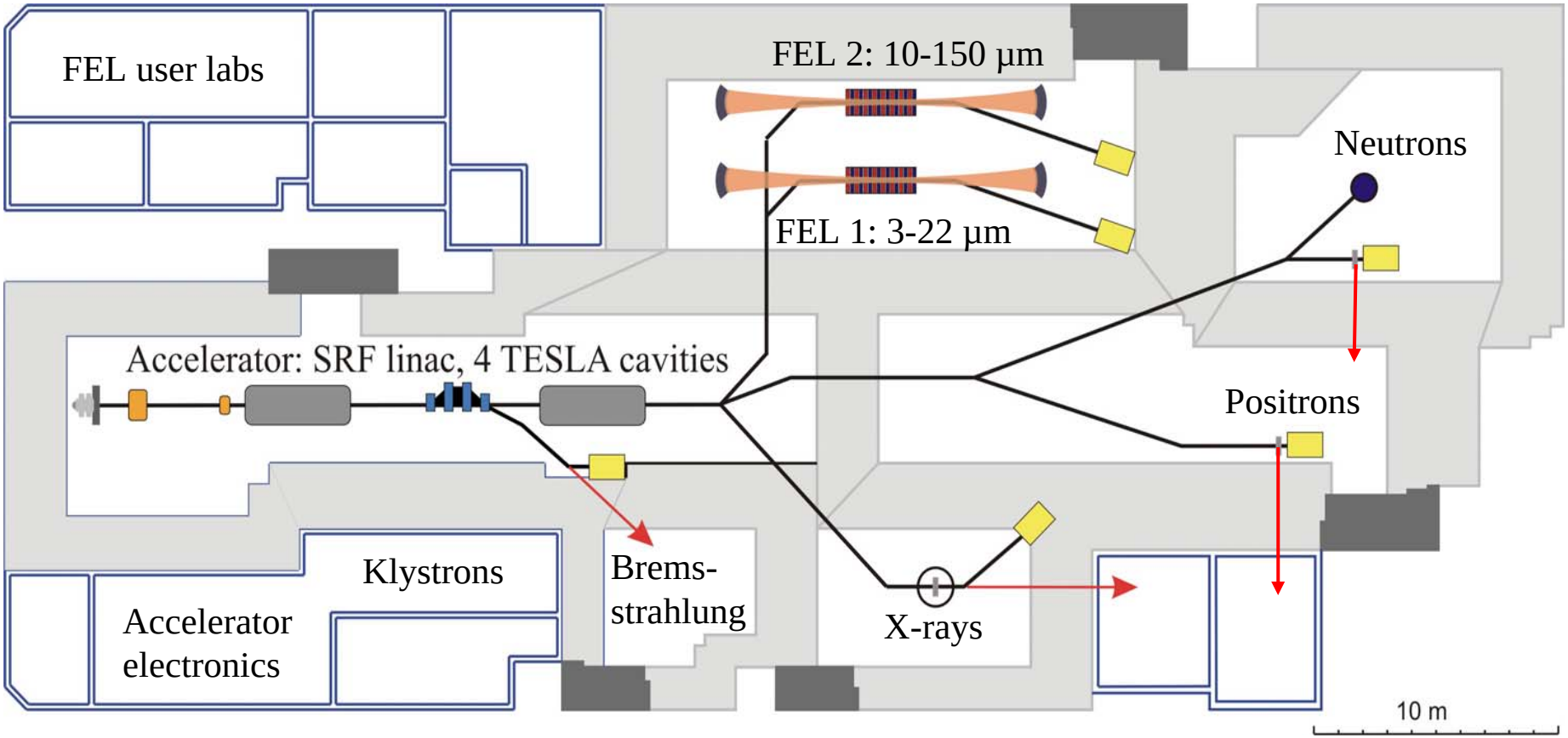
Größtes Institut der Leibniz-Wissenschaftsgemeinschaft

Mitarbeiter: 550

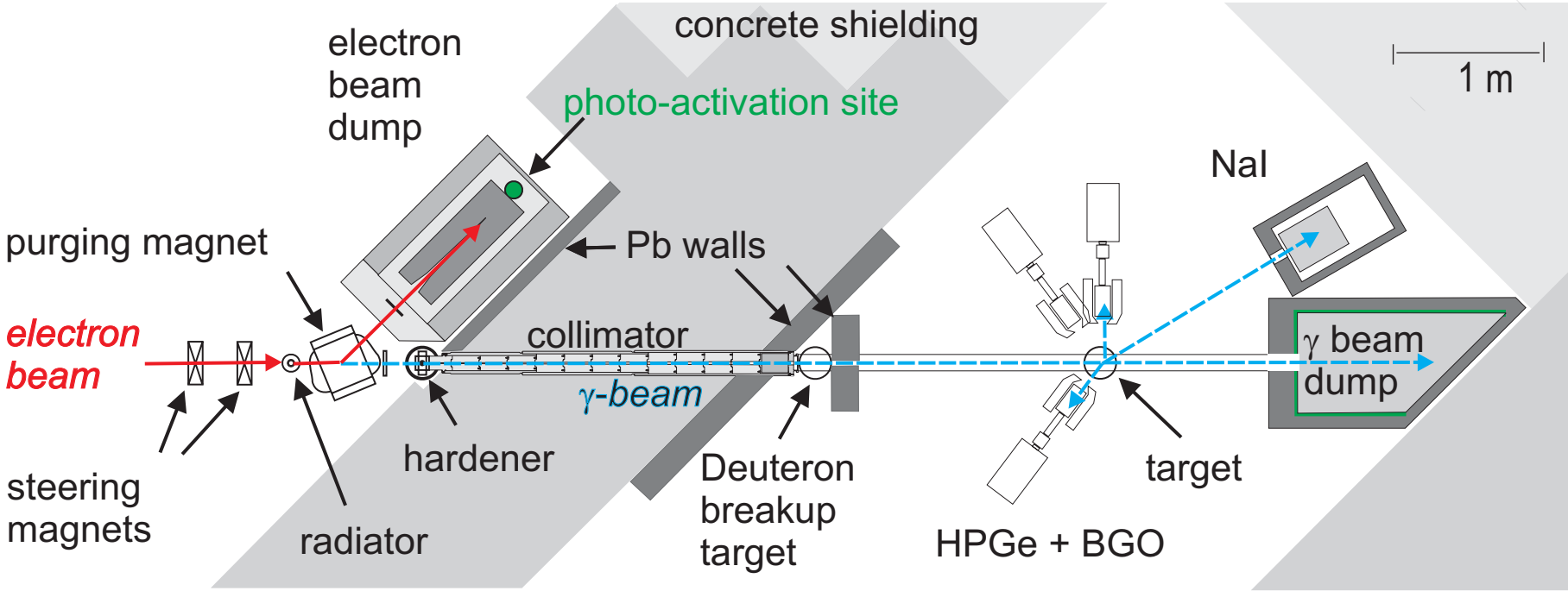
Supraleitender **El**ektronen **L**inear Beschleuniger

mit hoher **B**rillanz und geringer **E**mittanz

- 40 MeV, 1mA (CW) Elektronenbeschleuniger (40 kW Leistung)
- Beschleuniger und Strahlungserzeugung in voneinander abgeschirmten Caves



Der Bremsstrahlungsmessplatz an ELBE

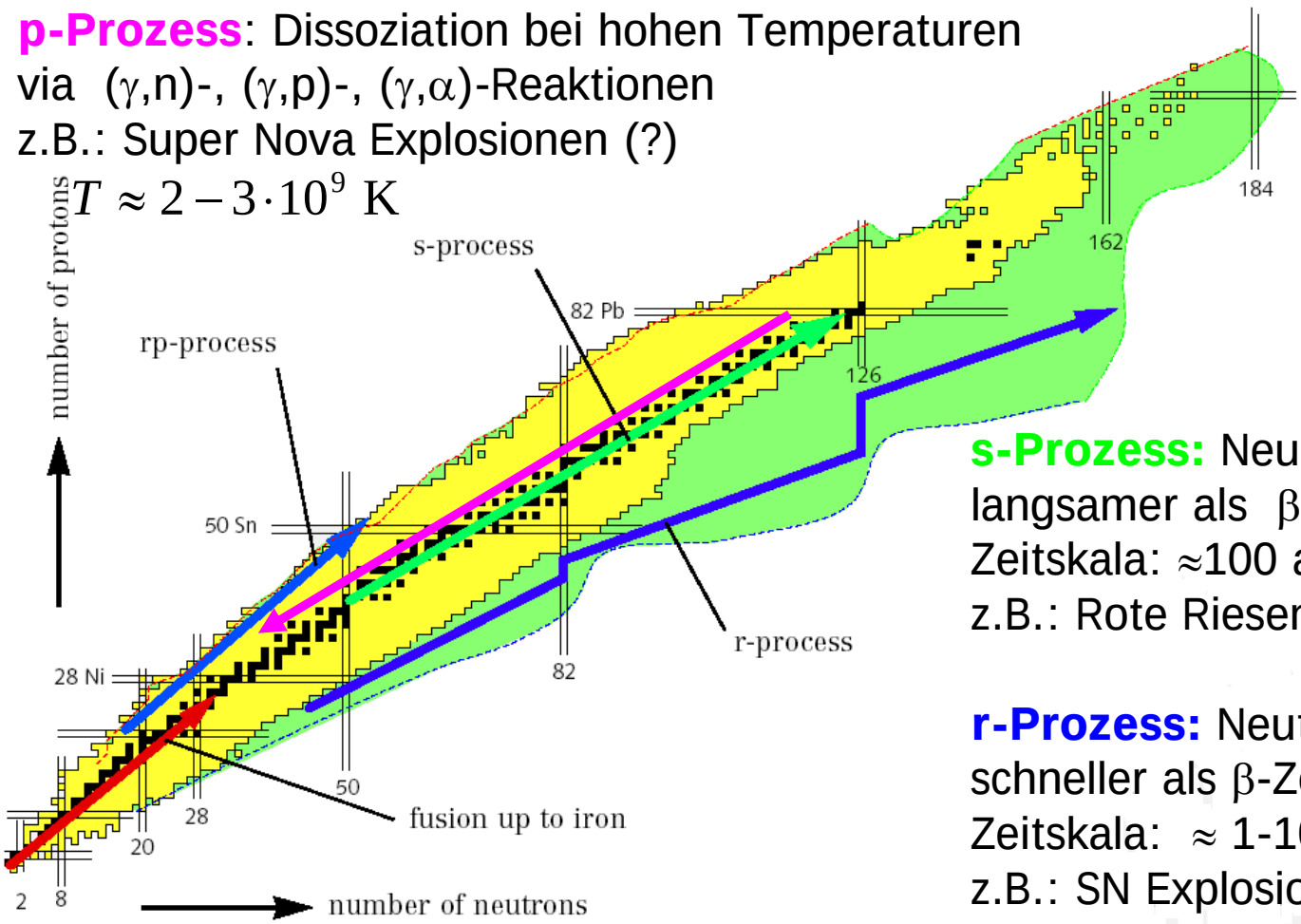


- Kernresonanzfluoreszenzmessungen ➔ Bestimmung von Kernniveaus
- Photoaktivierungsmessungen & Flugzeitmessung von Neutronen aus (γ,n)-Reaktionen ➔ Bestimmung von Wirkungsquerschnitten mit astrophysikalischem Hintergrund

Nukleosynthese

p-Prozess: Dissoziation bei hohen Temperaturen
via (γ,n)-, (γ,p)-, (γ,α)-Reaktionen
z.B.: Super Nova Explosionen (?)

$T \approx 2-3\cdot 10^9$ K



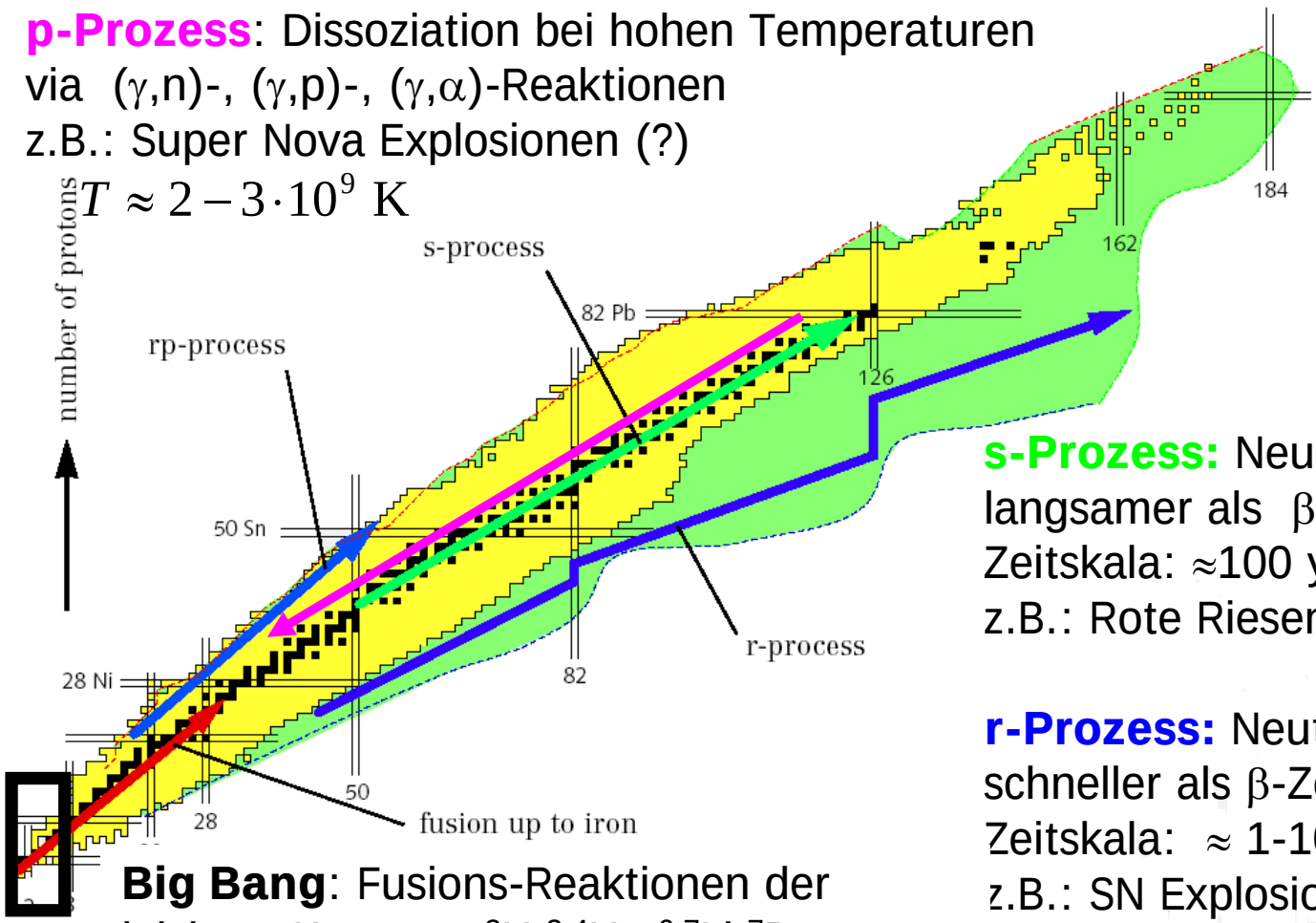
s-Prozess: Neutronen-Einfang
langsamer als β-Zerfall
Zeitskala: ≈100 a
z.B.: Rote Riesen

r-Prozess: Neutronen-Einfang
schneller als β-Zerfall
Zeitskala: ≈ 1-10 s
z.B.: SN Explosionen

Nukleosynthese

p-Prozess: Dissoziation bei hohen Temperaturen
via (γ,n)-, (γ,p)-, (γ,α)-Reaktionen
z.B.: Super Nova Explosionen (?)

$T \approx 2-3\cdot 10^9$ K

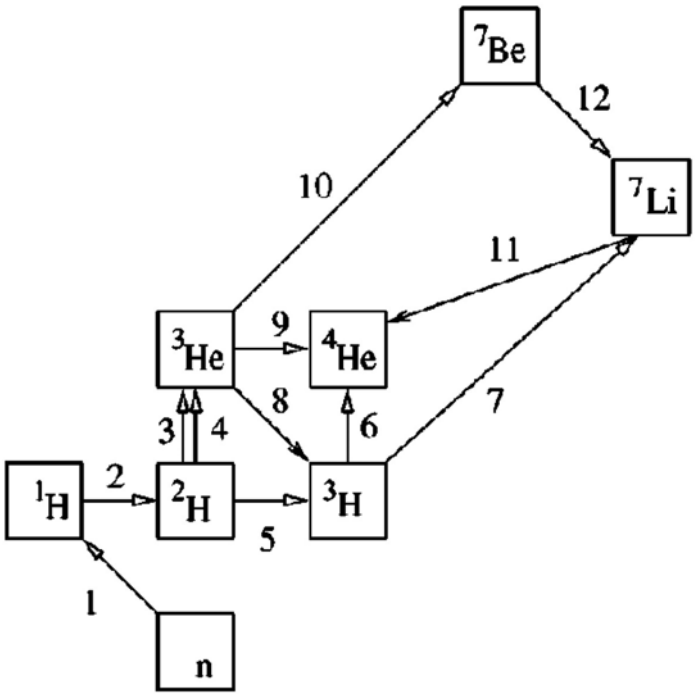


Big Bang: Fusions-Reaktionen der leichten Kerne zu ^{2}H,^{3,4}He,^{6,7}Li,^{7}Be

s-Prozess: Neutronen-Einfang
langsamer als β-Zerfall
Zeitskala: ≈100 yr
z.B.: Rote Riesen

r-Prozess: Neutronen-Einfang
schneller als β-Zerfall
Zeitskala: ≈ 1-10 s
z.B.: SN Explosionen

Big Bang Nukleosynthese

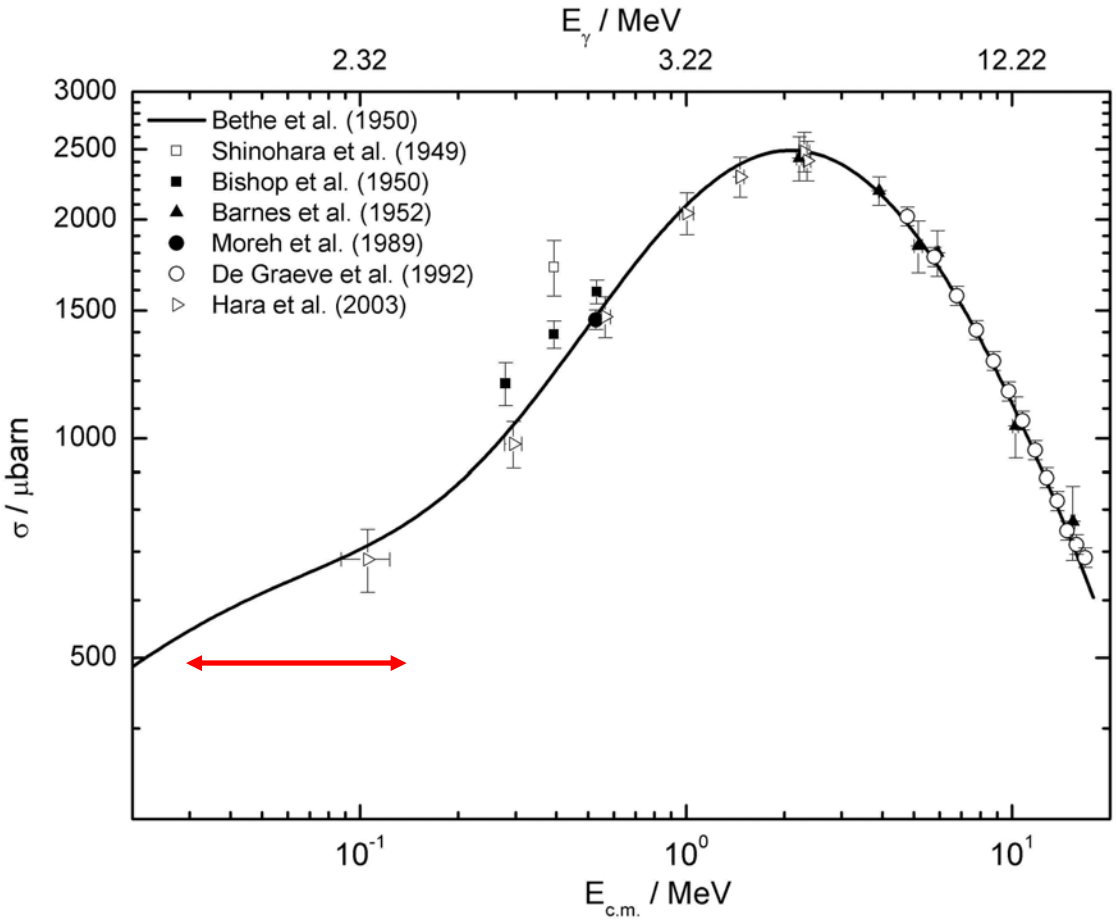


1. $p \longleftrightarrow n$
2. $p(n,\gamma)d$
3. $d(p,\gamma)^3\mathrm{He}$
4. $d(d,n)^3\mathrm{He}$
5. $d(d,p)t$
6. $t(d,n)^4\mathrm{He}$
7. $t(\alpha,\gamma)^7\mathrm{Li}$
8. $^3\mathrm{He}(n,p)t$
9. $^3\mathrm{He}(d,p)^4\mathrm{He}$
10. $^3\mathrm{He}(\alpha,\gamma)^7\mathrm{Be}$
11. $^7\mathrm{Li}(p,\alpha)^4\mathrm{He}$
12. $^7\mathrm{Be}(n,p)^7\mathrm{Li}$

- Häufigkeit der leichten Elemente nur durch ein Dutzend Wirkungsquerschnitte bestimmt
- Die Verhältnisse der Teilchenzahlen bestimmen die weitere Entwicklung des Universums
- Photodissoziation des Deuterons d(γ,n)p bzw. Neutroneneinfang am Proton n(p,γ)d ist eine Schlüsselreaktion

Nollett, Burles PhysRevD61, 123505

Schwellennahe Messungen von ^{2}H(γ,n)p



$$d + \gamma \rightarrow p + n$$

- Relevanter Energie-Bereich

  E_{cm} = 30-130 keV
- In diesem Bereich nur wenige verlässliche Messungen

➔ Ziel: genauere Messungen in diesem Bereich

Detektion von nicht-thermischen Neutronen

- direkte Messung schwierig, da elektrisch neutral
  - ➔ erst Konversion in geladene Teilchen
  - ➔ danach Nachweis der Konversionsprodukte durch herkömmliche Strahlungsdetektoren (z.B. Szintillatoren)
- Möglichkeiten:
  - Elastische Streuung, z.B. an Wasserstoff
    - ➔Detektoren sehr einfach zu realisieren, aber schlecht für niederenergetische Neutronen
  - Neutroneneinfang, z.B. $^{10}B + {}^{1}n \rightarrow {}^{7}Li^{*} + {}^{4}He + 2{,}31$ MeV
    - ➔Effizienz hoch für niedrige Neutronen-Energien, fällt aber mit steigender sehr schnell ab
- Bestimmung der Neutronen-Energie durch Flugzeitmessungen
- Anforderung: gute Flugzeitauflösung

  ($\Delta t < 1$ ns $\Leftrightarrow$ 0.3 keV bei E_n=50 keV & 1m Flugstrecke)

Getestete Detektoren

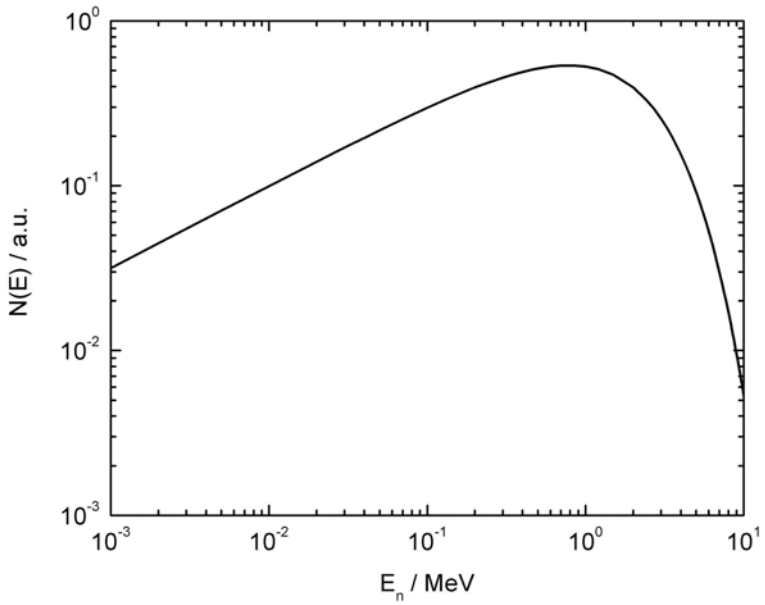
- Protonen-Rückstoß-Detektoren (Plastik Szintillatoren):
  - 12, 25 und 100 cm, rechteckiger Querschnitt 22x42 mm^2
  - beidseitig mit SEVs ausgelesen für Ortkorrektur
  - Nachweis durch Rückstoß an den Protonen
- Li-Glas Detektoren:
  - Scheiben von 46 mm Durchmesser, 10 und 25 mm dick
  - einseitig ausgelesen
  - Nachweis: $^{6}Li + {}^{1}n \rightarrow {}^{4}He + {}^{3}H + 4{,}78$ MeV
- ZnS Detektoren:
  - Scheiben von 46 mm Durchmesser, 6 mm dick
  - ^{6}Li in einem ZnS(Ag)-Kristall
  - Bietet Möglichkeit der Pulsformanalyse

Messung der Flugzeit von Neutronen aus der Spontanspaltung von ^{252}Cf

Zerfall des ^{252}Cf:

$$^{252}_{98}\mathrm{Cf} \rightarrow ^{4}_{2}\mathrm{He} + ^{248}_{96}\mathrm{Cm} \qquad 97\%$$

$$^{252}_{98}\mathrm{Cf} \rightarrow \mathrm{X} + \mathrm{Y} + N_n \cdot ^{1}_{0}\mathrm{n} \qquad 3\%$$



- Neutronenspektrum:

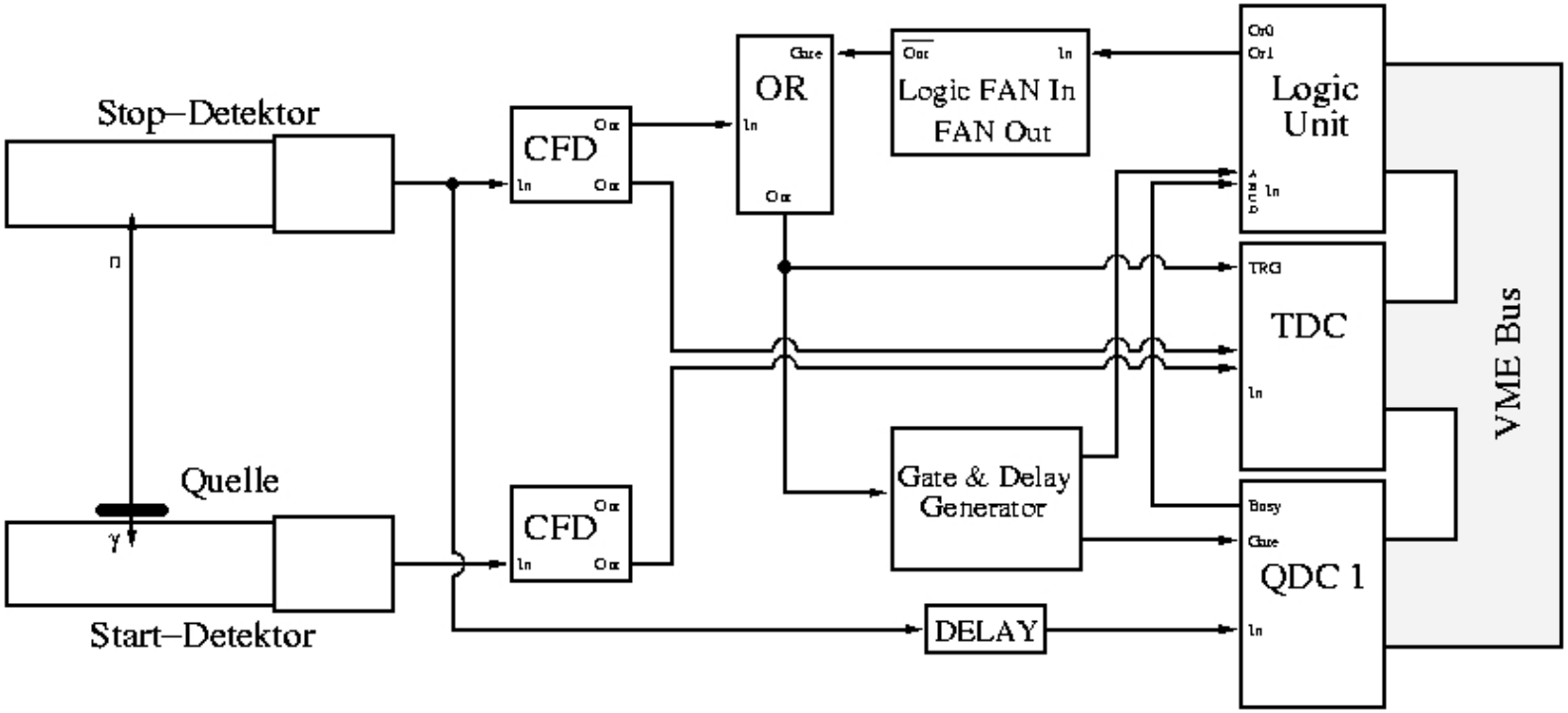
$$\frac{dN(E)}{dE} \sim \sqrt{E} \cdot \exp\left\{-\frac{E}{1{,}565\,\mathrm{MeV}}\right\}$$

- Ca. 3,8 Neutronen und 10,3 Photonen pro Spaltung
- Aktivität der Quelle: $8 \cdot 10^5$ Bq

- Normierung:

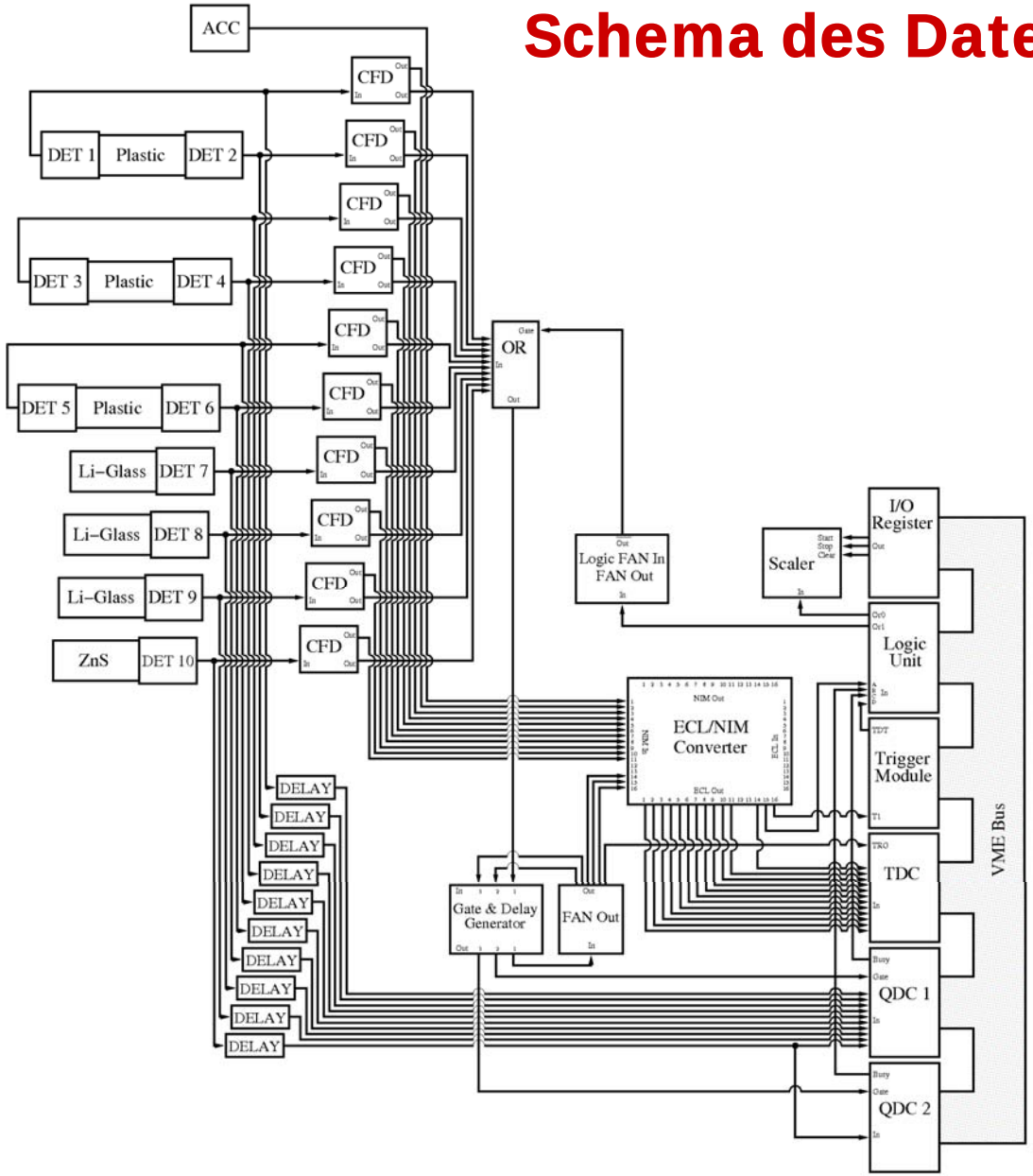
$$\int \frac{dN(E)}{dE}\,dE = A \cdot \langle N_n \rangle \cdot T_{live} \cdot \frac{\Omega}{4\pi}$$

Messung der Flugzeit von Neutronen aus der Spontanspaltung von ^{252}Cf



- Bestimmung des Zeitpunkts der Spaltung mit Hilfe eines BaF_2-Photonen-Detektors
- korellierte Messung von Energie- und Zeit-Signal der Detektoren

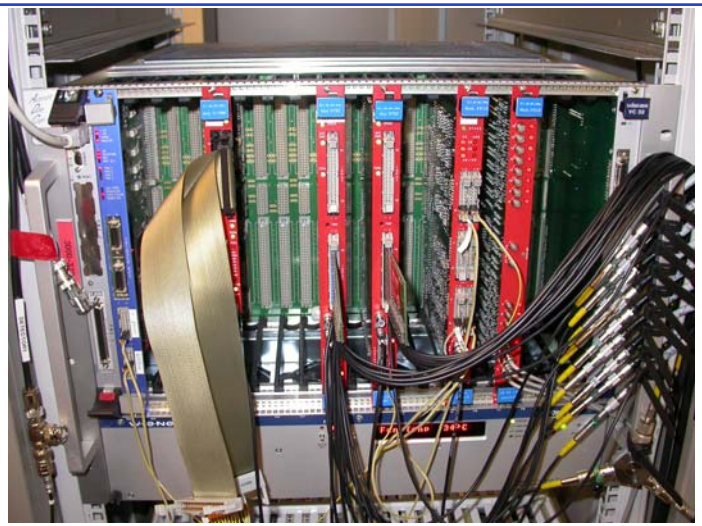
Schema des Datenaufnahme-Systems

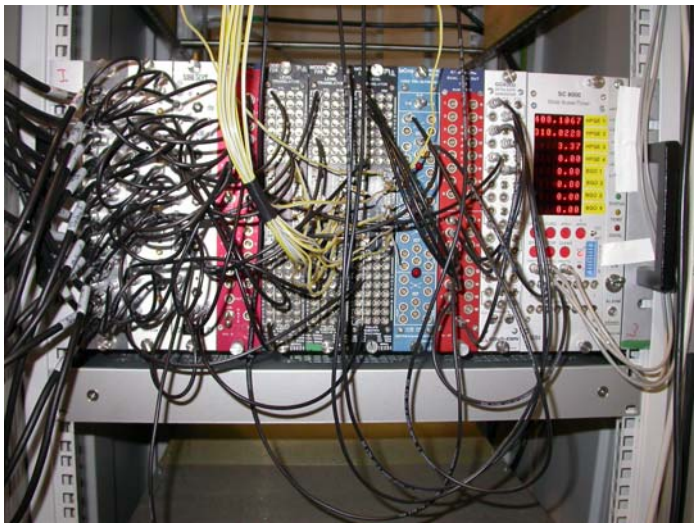


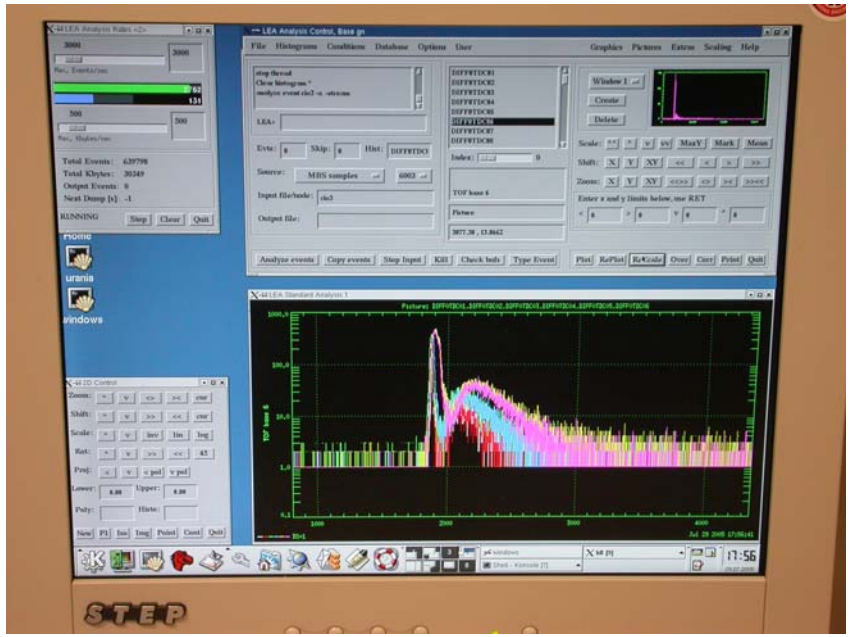
- Bis zu 10 Detektoren gleichzeitig (noch ausbaubar)
- Maximale Zählrate 13 kHz

- RIO3: PowerPC basierend auf LYNX
- CAEN TDC V1190A
  128ch Multihit
- CAEN QDC V792
  32ch Multievent 12 bit
- CFDs: Eigenentwicklung

Elektronik und Datenaufnahme



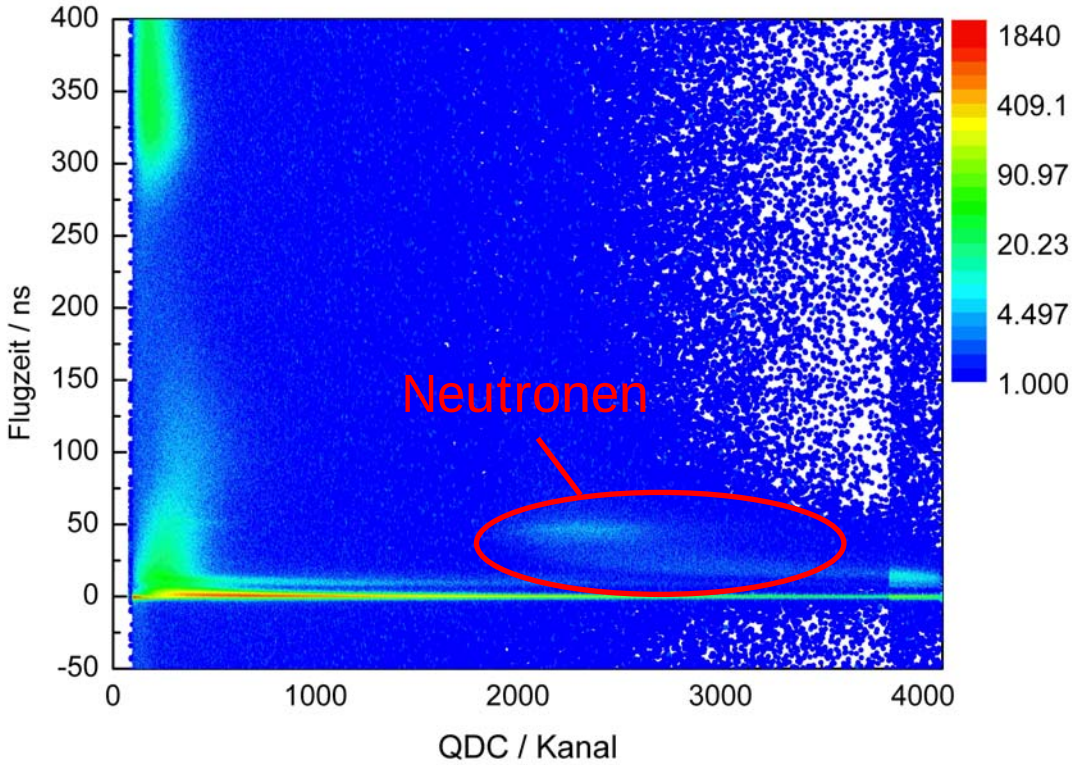


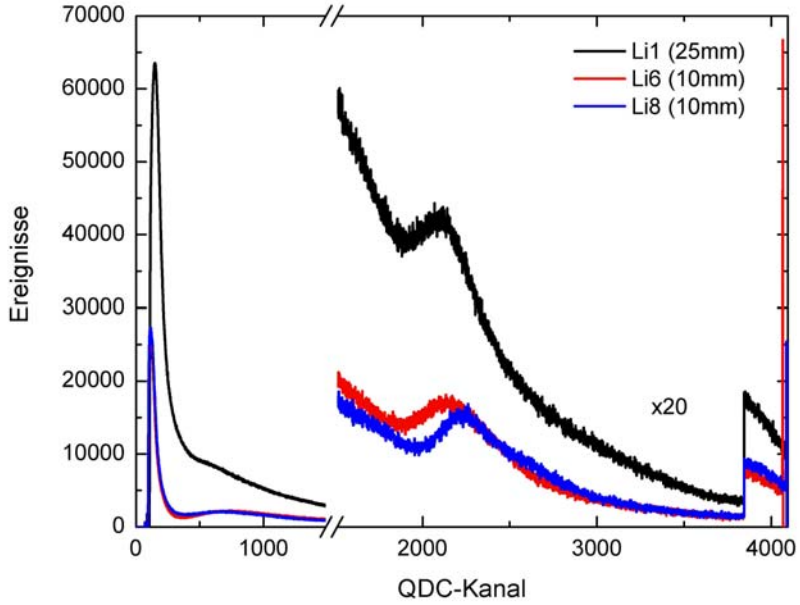


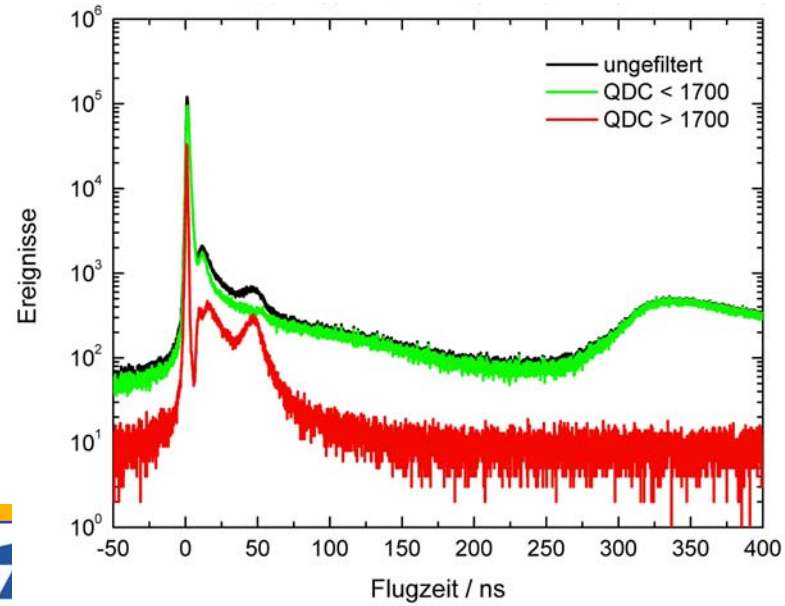
- MBS Datenaufnahme
- LEA Online Analyse
- List-Mode Rate max. 500 MByte / 30min

Li-Glas Detektoren – gemessene Spektren

$^{6}Li + n \rightarrow {}^{4}He + {}^{3}H + 4{,}78\ MeV$

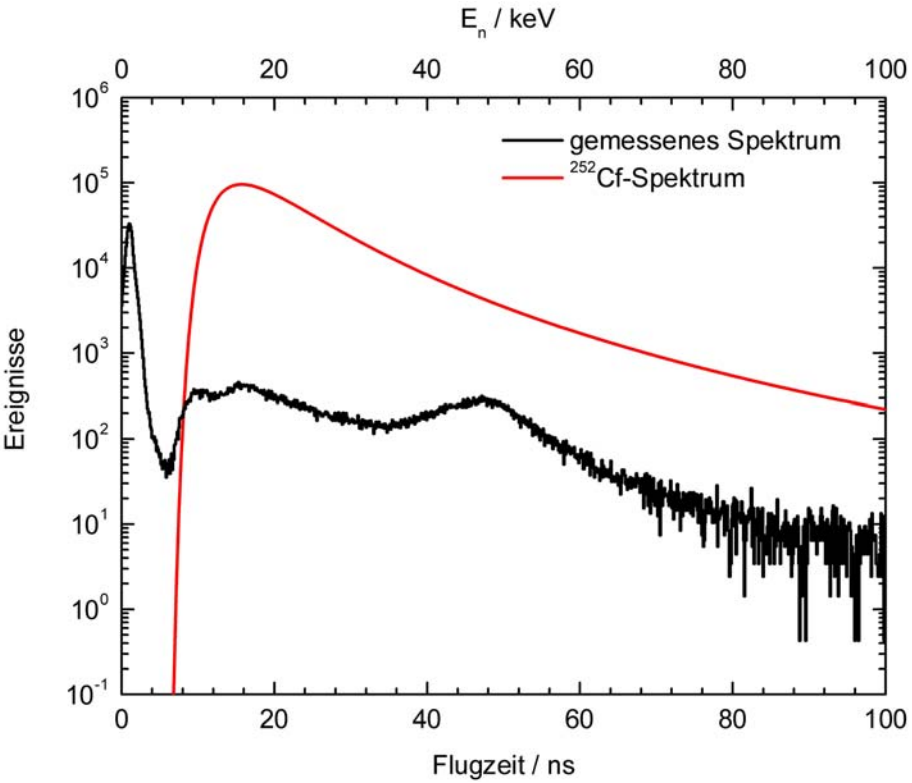




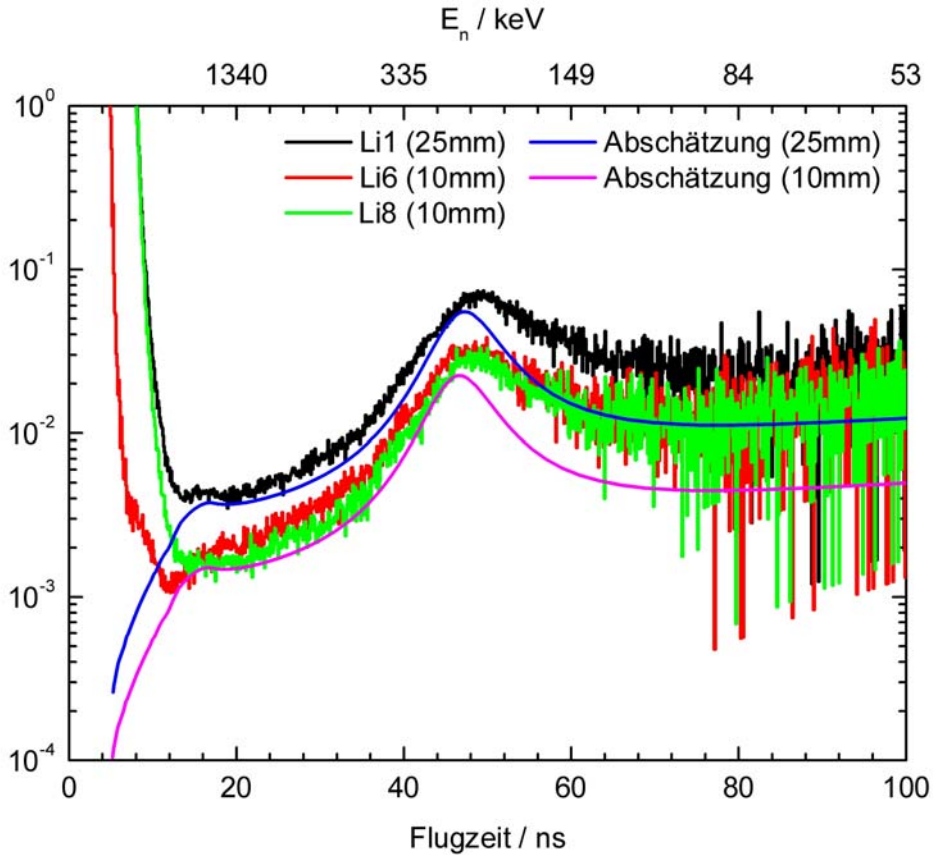


Zeitauflösung: ca. 1 ns (FWHM)

Li-Glas Detektoren – Effizienz-Bestimmung



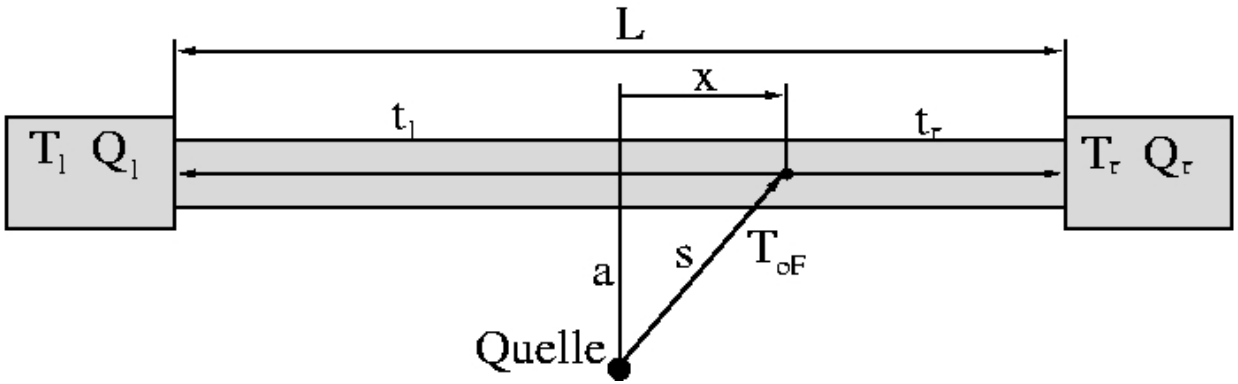
$$\varepsilon = \frac{N_{gemessen}}{N_{erwartet}}$$



Abschätzung der Effizienz:

$$\varepsilon = 1 - \exp\{-n_{Li} \cdot \sigma \cdot d\}$$

Plastik-Detektoren – beidseitige Auslese



$$T_{l/r} = T_{oF} + t_{l/r} + T_{off,l/r}$$

$$\Sigma T = T_l + T_r$$

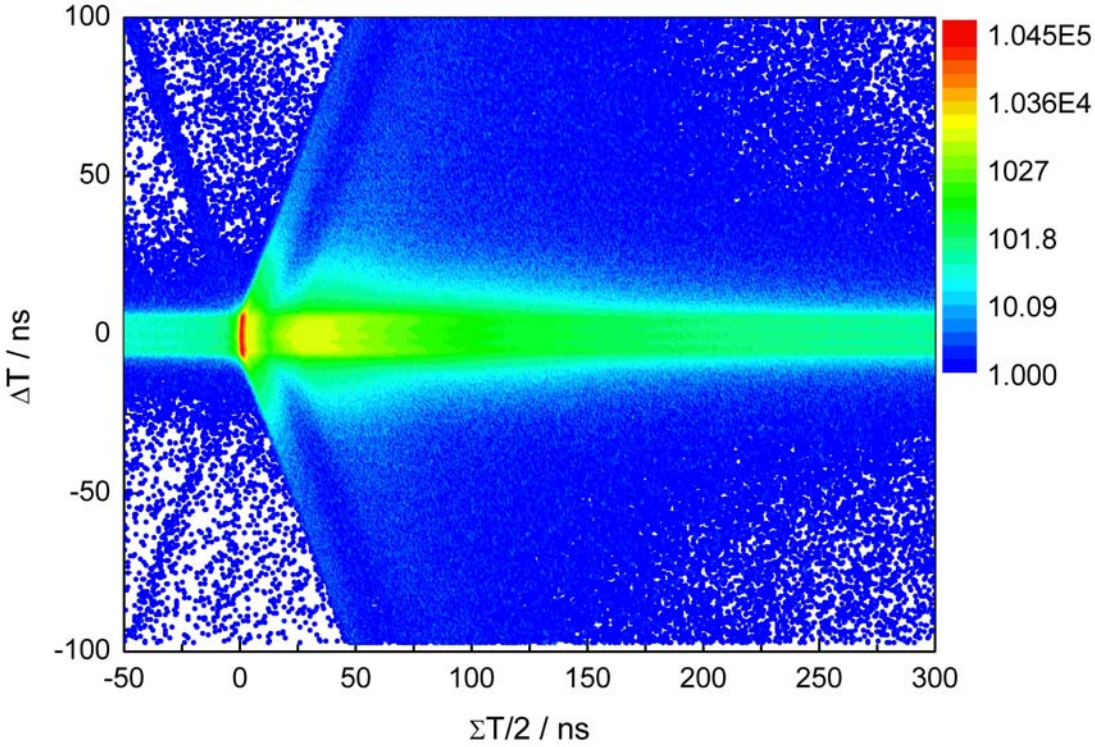
$$\Delta T = T_l - T$$

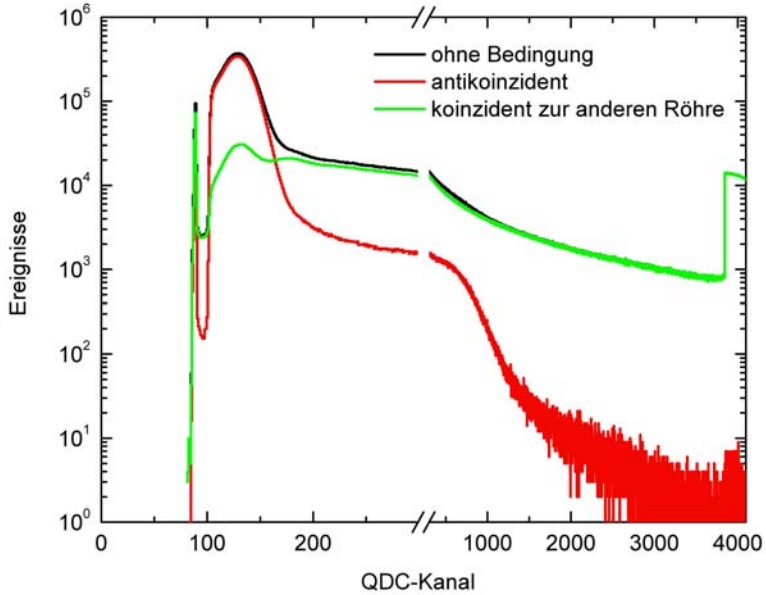
$$\Rightarrow$$

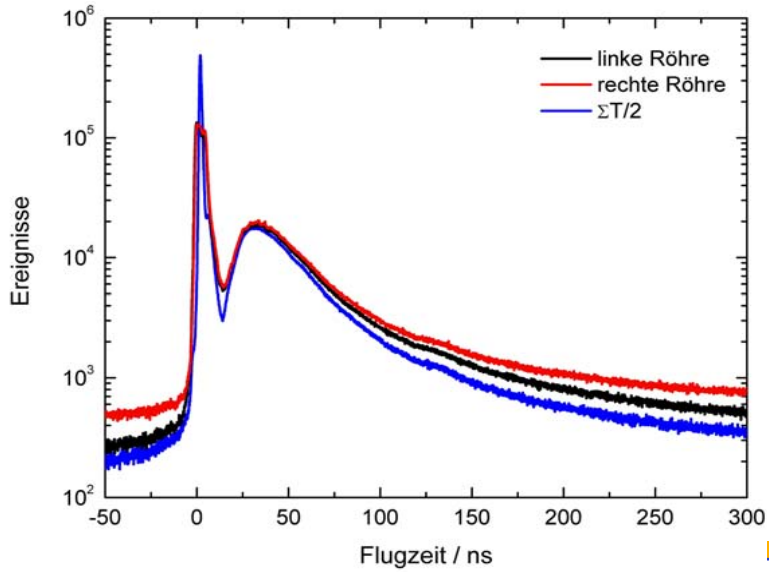
$$x = \frac{c_{eff}}{2}\left(\Delta T - \Delta T_{off}\right)$$

$$T_{oF} = \frac{1}{2}\left(\Sigma T - \frac{L}{c_{eff}} - T_{off}\right)$$

Plastik-Detektoren – gemessene Spektren

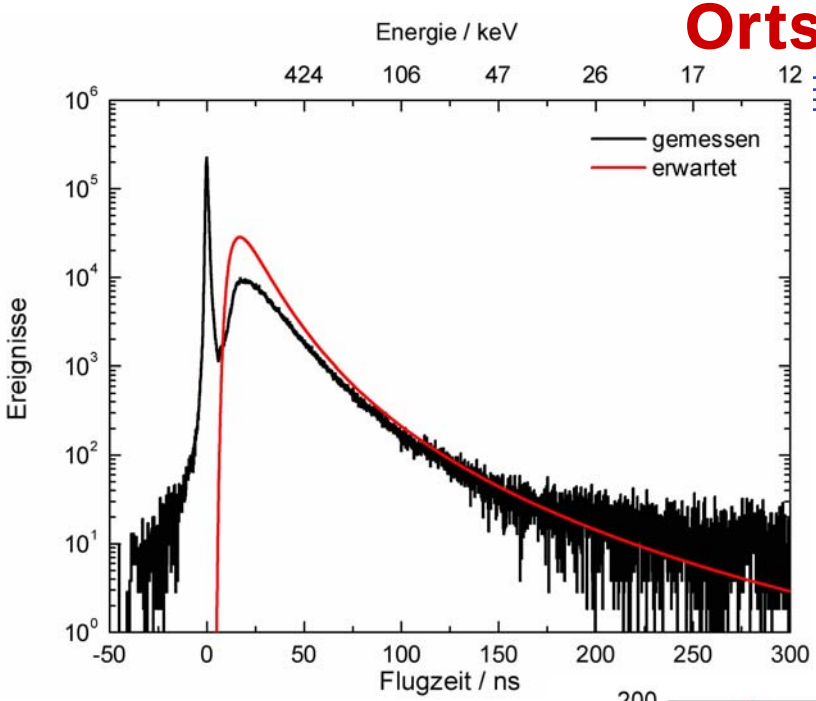


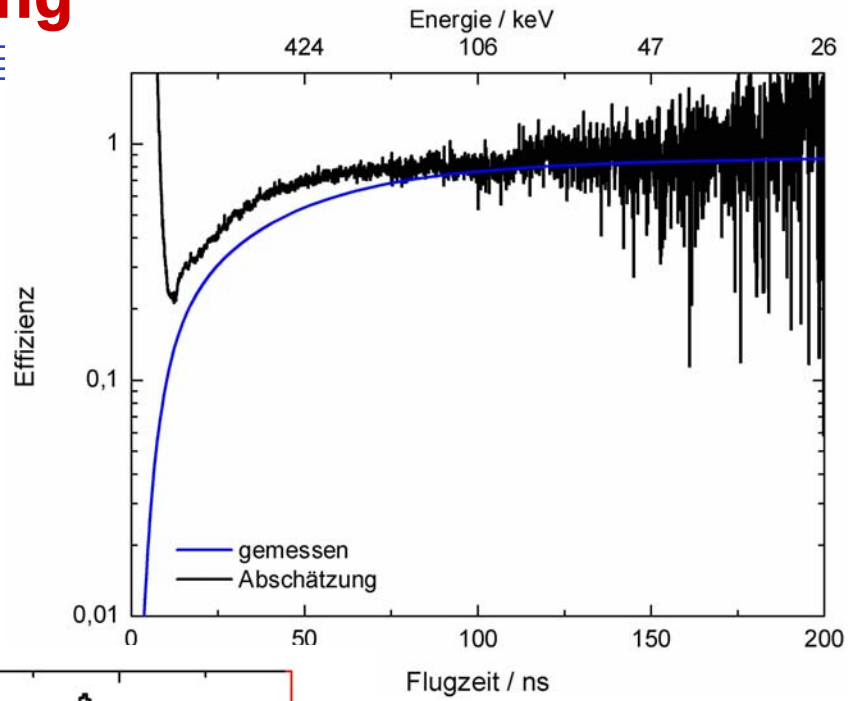


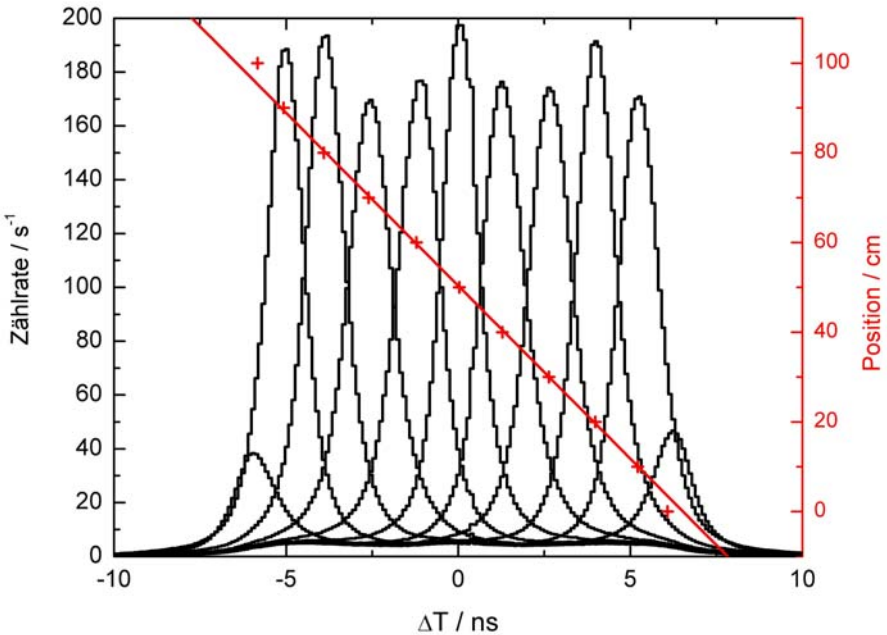


Zeitauflösung: ca. 1 ns (FWHM)

Plastik-Detektoren – Effizienz und Ortsauflösung







Ortsauflösung: 5,7 cm

Zusammenfassung

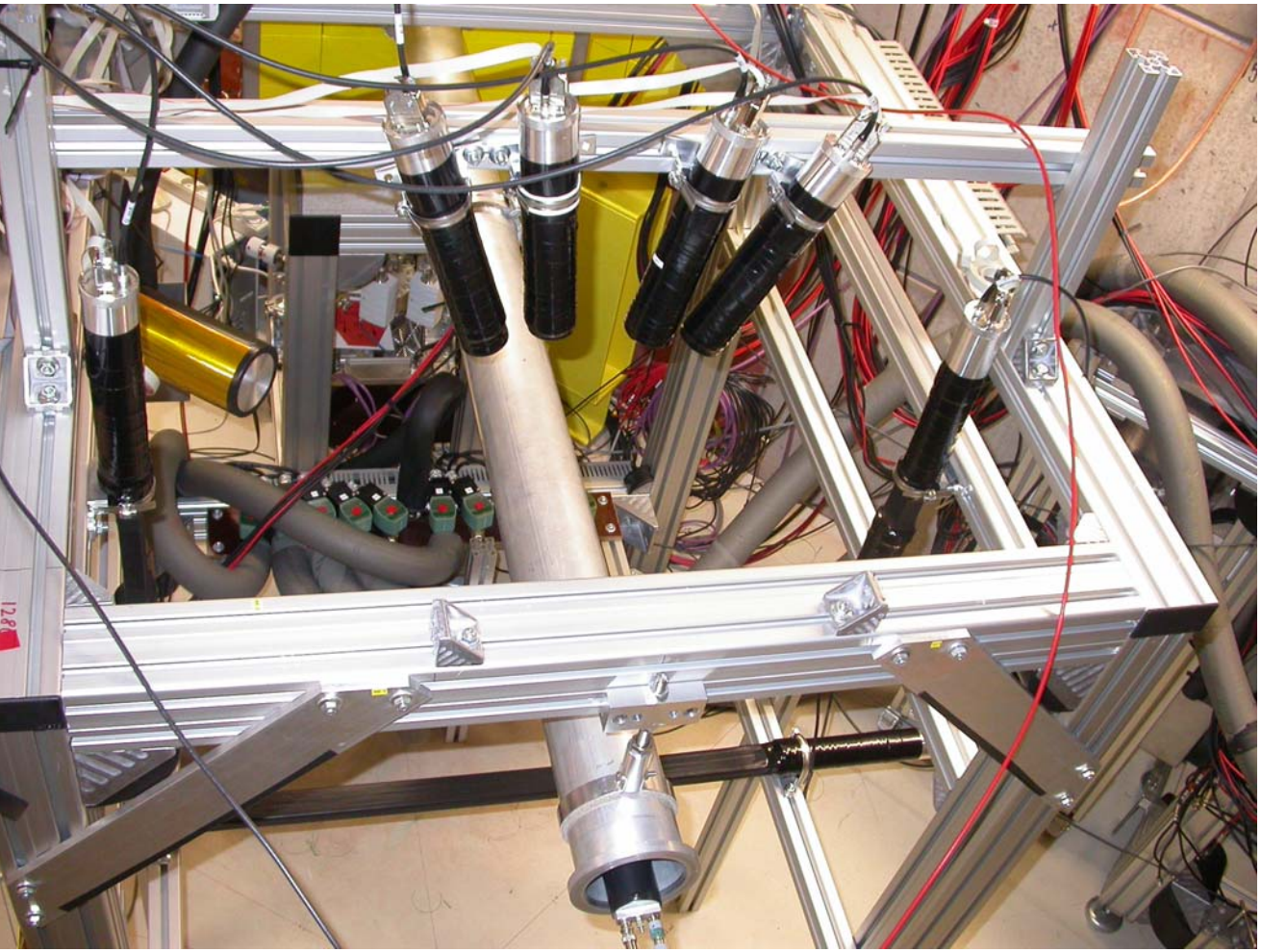
- Ein leistungfähiger Messaufbau zur korrelierten Aufnahme von Energie- und Zeit-Signalen eines Multi-Detektor-Systems wurde geschaffen.
- Ein Daten-Aquisitions-Programm zur List-Mode-Datenaufnahme wurde entwickelt (MBS).
- Für jeden Detektor-Typ wurde ein individuelles on-/offline Analyse-Programm erstellt (LEA).
- Für Plastik-, Li-Glas- und ZnS-Szintillatoren wurden Zeitauflösungen bestimmt ($\Delta t < 1$ ns FWHM) und die absolute Neutronen-Nachweis-Effizienz untersucht.
- Eine Testmessung der Photodissoziation des Deuteron am ELBE-Beschleuniger wurde durchgeführt.

Deuteron-Aufbruch - Messung an ELBE

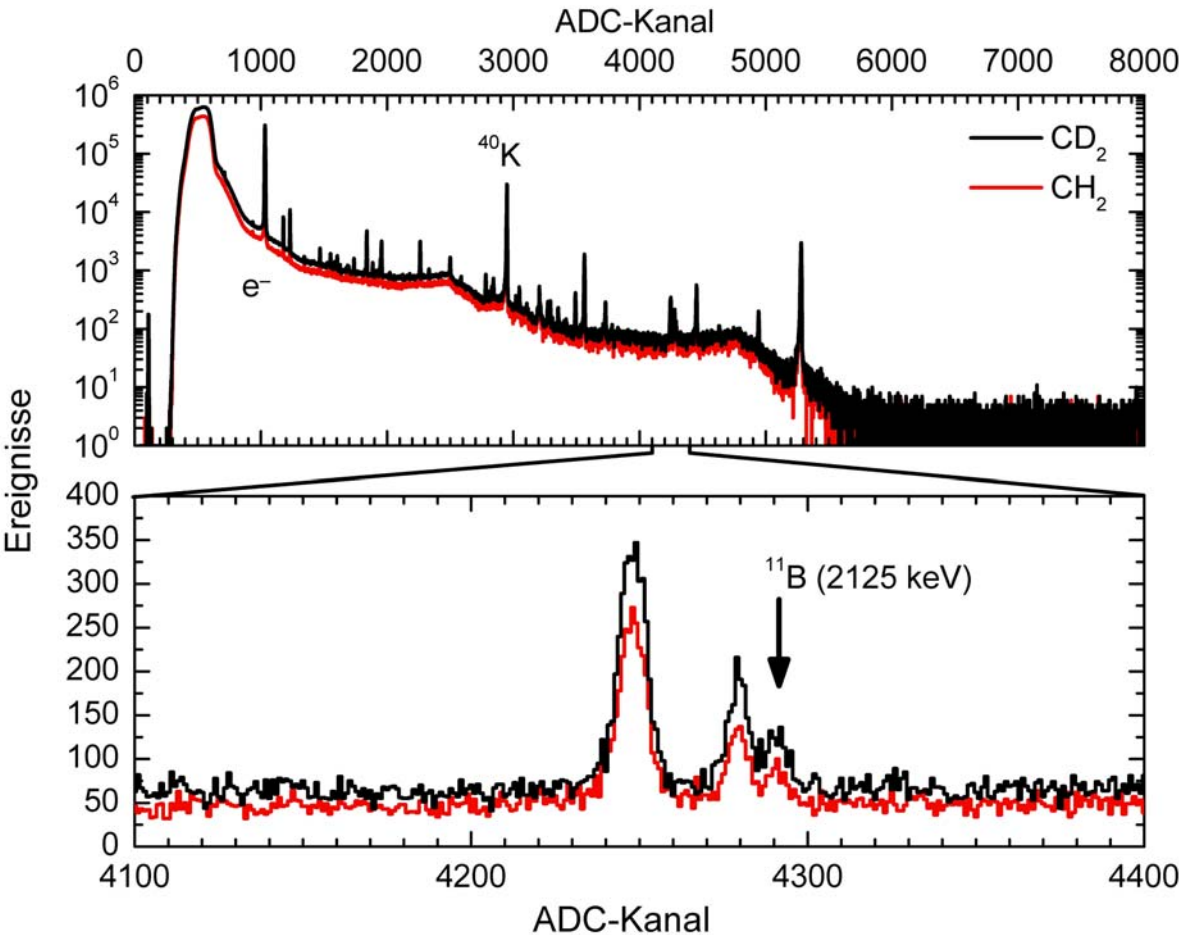
$$d + \gamma \rightarrow p + n$$

- ELBE Energie 5.5 MeV ➔ $E_{n,max} \cong 1{,}4$ MeV
- Mikropulsfrequenz 1,625 MHz (615 ns)
- mittlerer Kathodenstrom ca. 80 μA
- genutzte Strahlzeit: 22,5 Stunden
- Messung mit CD_2 Target, zu 98% angereichert
- CH_2 Target zur Subtraktion des Untergrundes
- ^{11}B Target zur Bestimmung des Photonen Flusses mit HPGe-Detektoren

Experimenteller Aufbau



Bestimmung des Photonen-Flusses



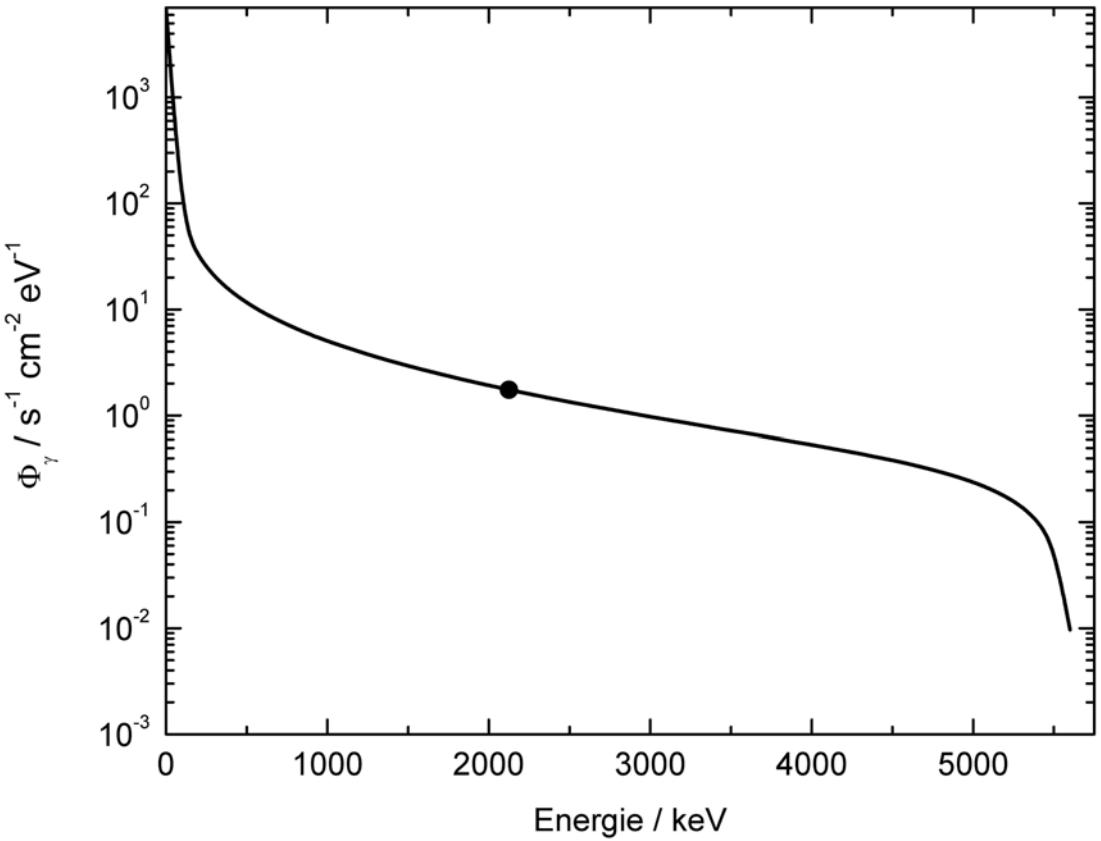
$$\Phi_\gamma = \frac{A_{Peak}}{\varepsilon \cdot T_{live} \cdot I_S \cdot N_{^{11}B} \cdot \omega}$$

Photonenfluß bei 2125 keV:

CD_2: 1,75 ± 0,30 s^{-1} cm^{-2} eV^{-1}

CH_2: 1,46 ± 0,29 s^{-1} cm^{-2} eV^{-1}

Bestimmung des Photonen-Flusses



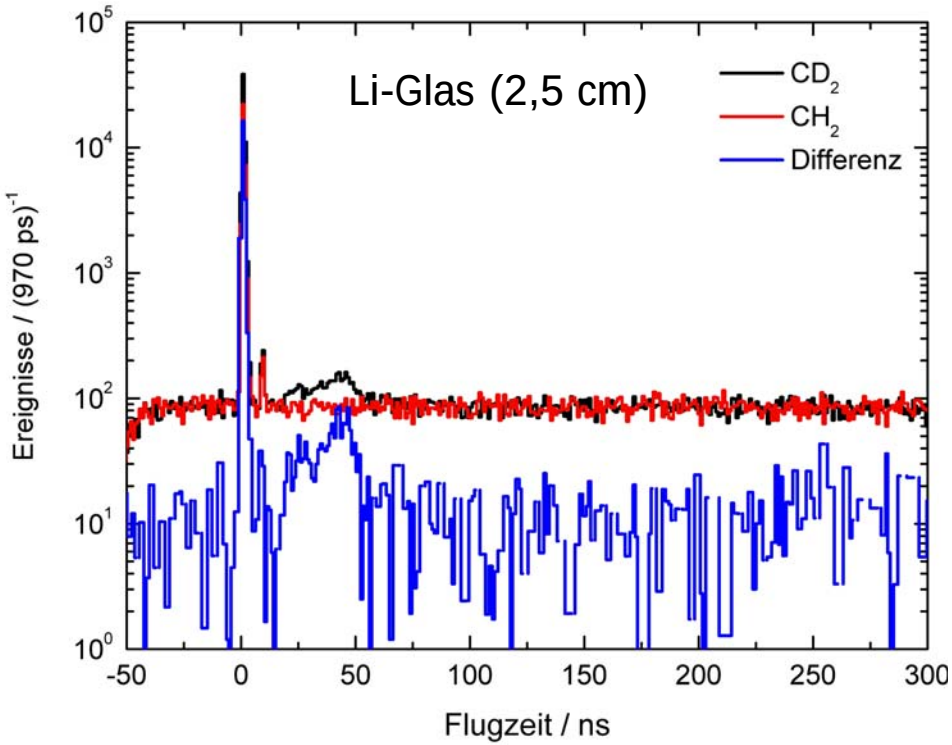
$$\Phi_\gamma = \frac{A_{Peak}}{\varepsilon \cdot T_{live} \cdot I_S \cdot N_{^{11}B} \cdot \omega}$$

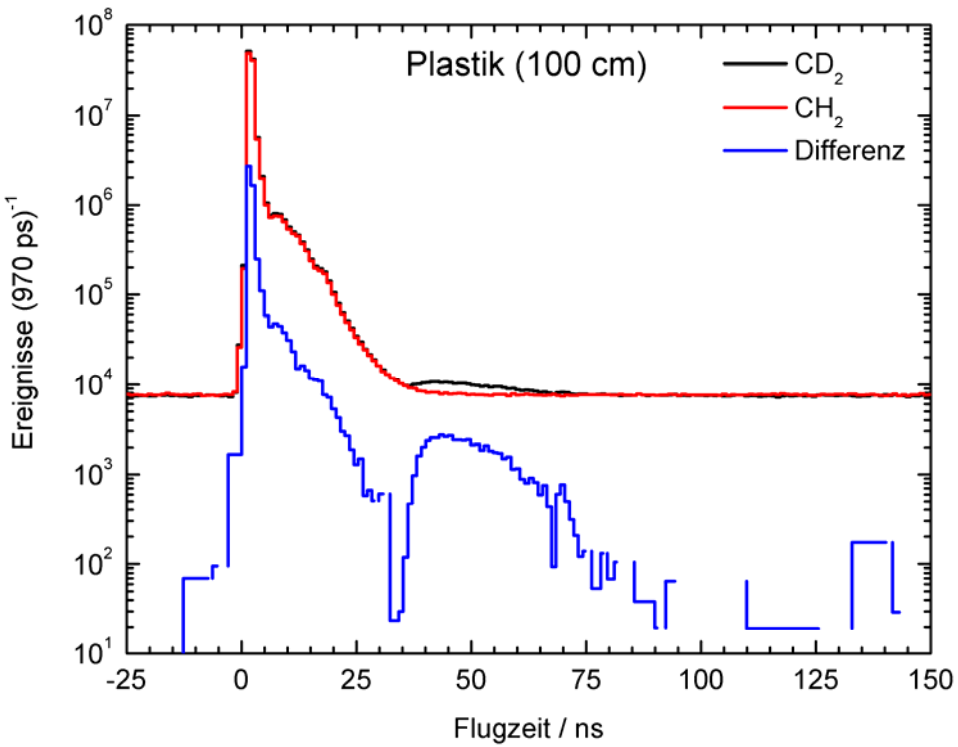
Photonenfluß bei 2125 keV:

CD_2: 1,75 ± 0,30 s^{-1} cm^{-2} eV^{-1}

CH_2: 1,46 ± 0,29 s^{-1} cm^{-2} eV^{-1}

Gemessene Flugzeitspektren

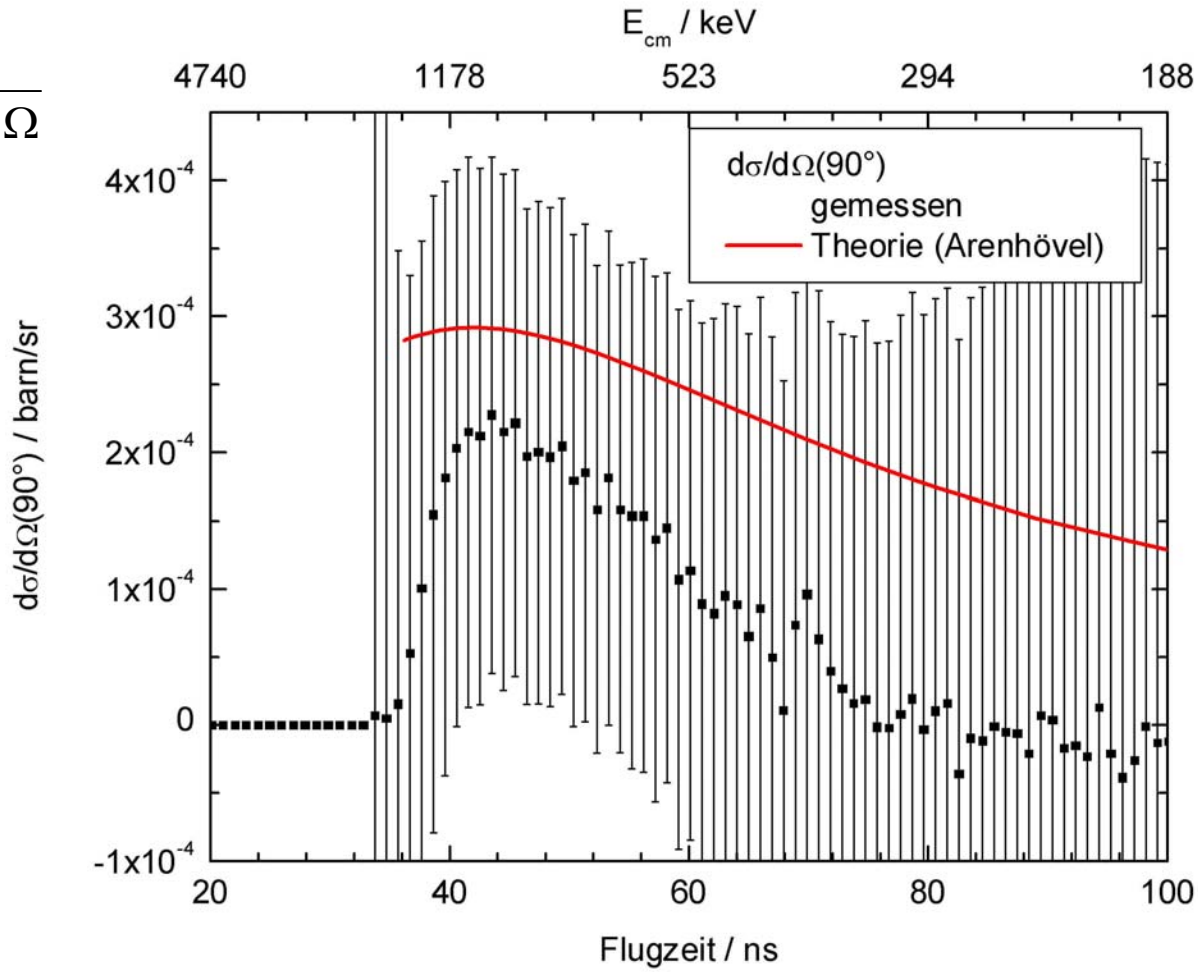




Bestimmung des Wirkungsquerschnittes von d(γ,n)p

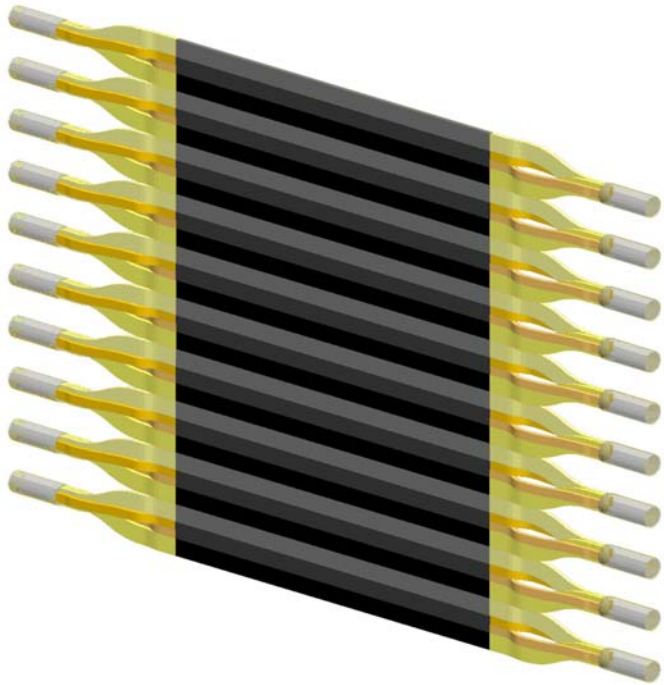
$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(E) = \frac{N_n(E)}{\Phi_\gamma(E) \cdot T_{live} \cdot N_D \cdot \varepsilon(E) \cdot \Omega}$$

Größte Unsicherheit aus der Bestimmung des Photonenflusses und der Detektor-Effizienz



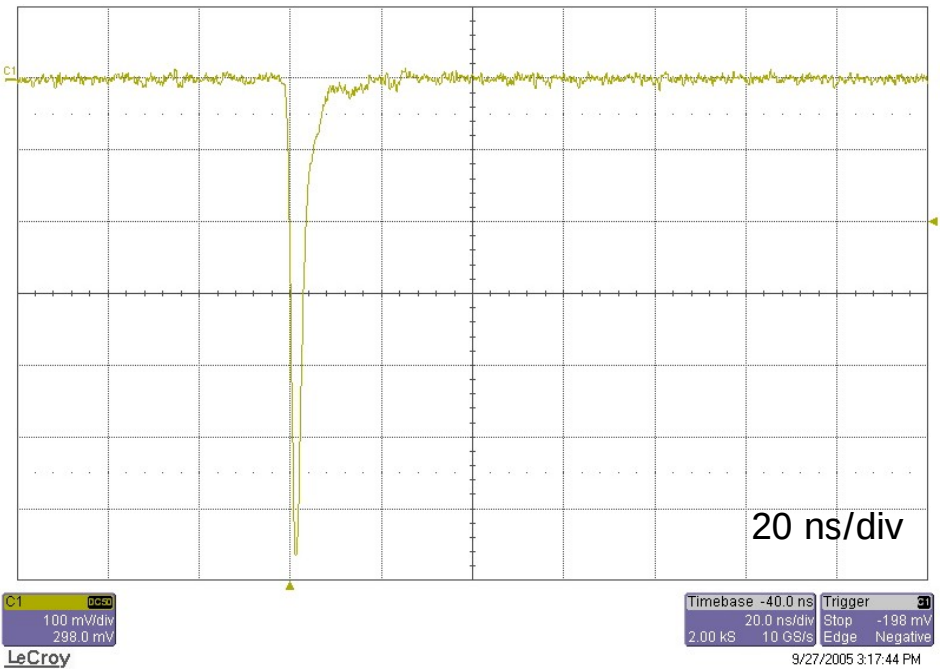
Ausblick

- Exakte Bestimmung der Effizienz in Zusammenarbeit mit der PTB Braunschweig:
  - Monte Carlo Simulationen
  - mit monoenergetischen Neutronen
    → Response
  - mit kontinuierlichem ^{252}Cf-Spektrum, aber unter Verwendung einer Spaltkammer → $\varepsilon(E)$
- Aufbau eines größeren Arrays von Plastikszintillatoren für längere und genauere Messungen

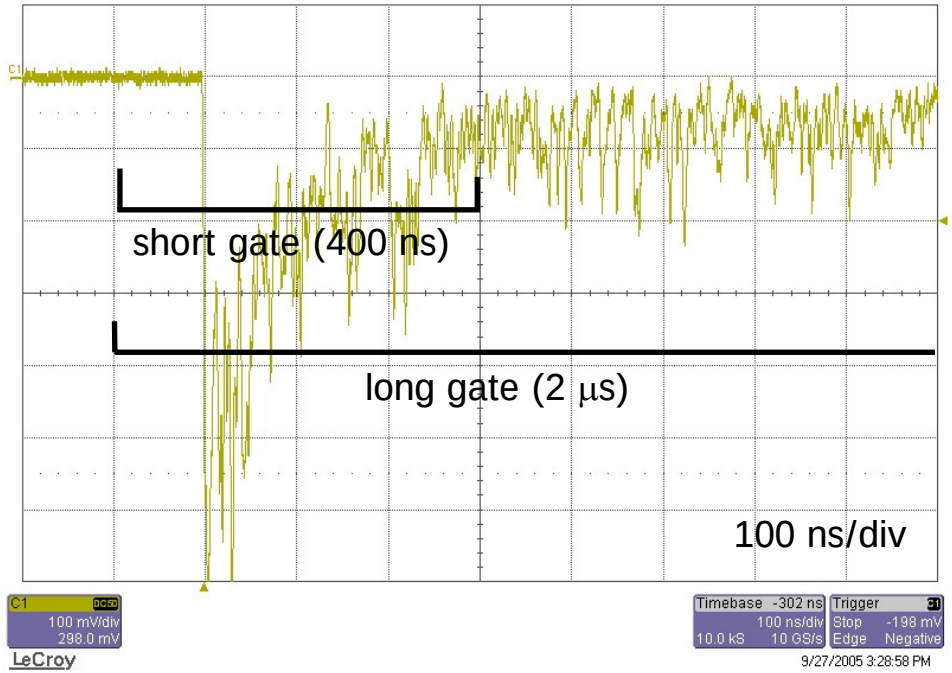


ZnS-Detektor – Pulsformanalyse

γ-Ereignis



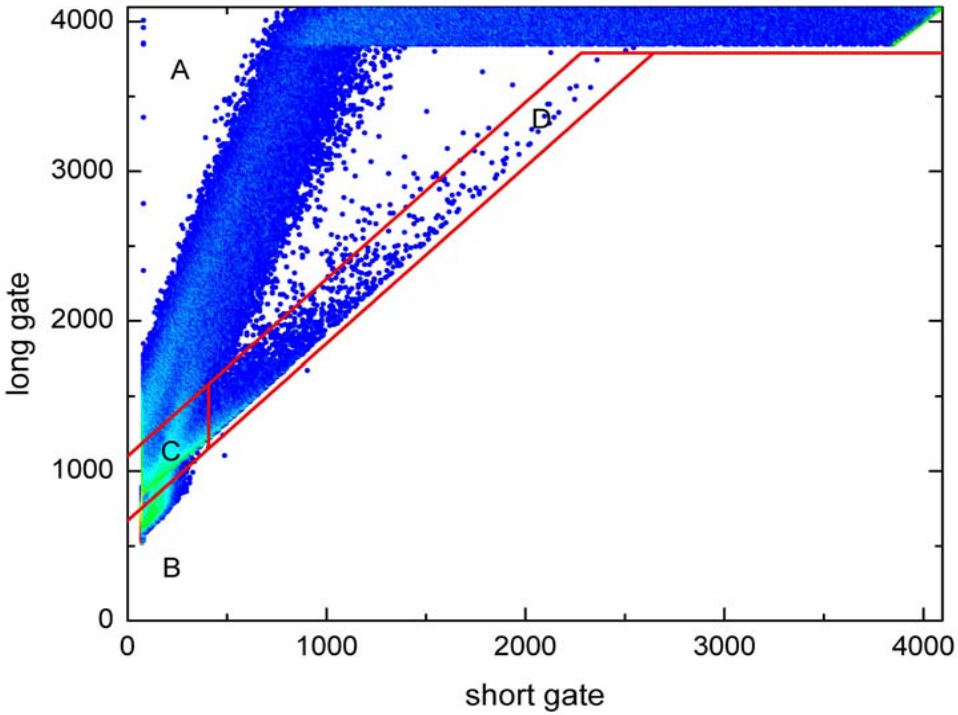
Neutronen-Ereignis

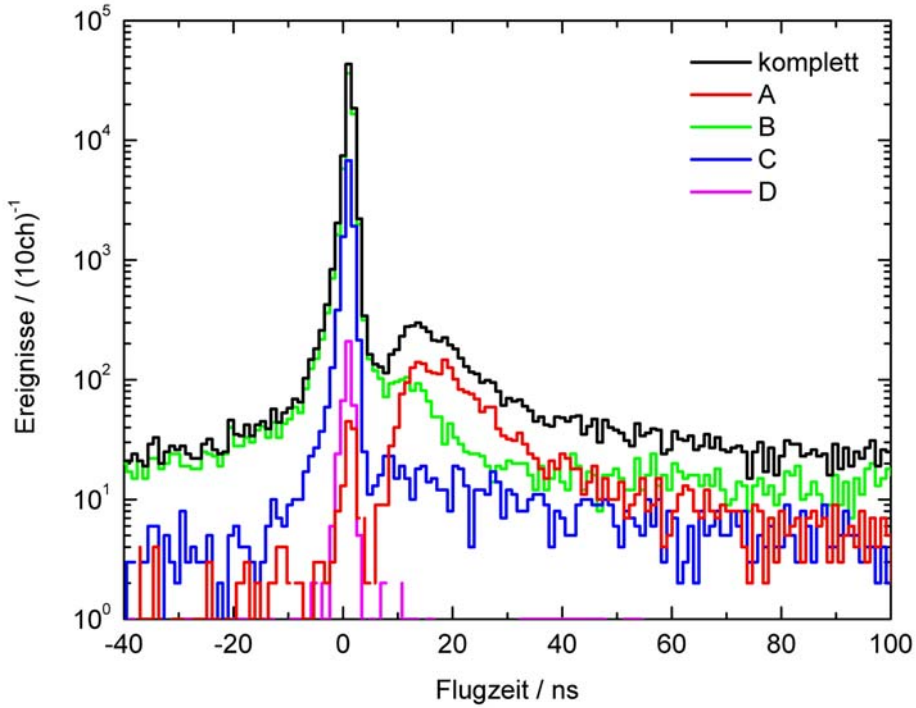


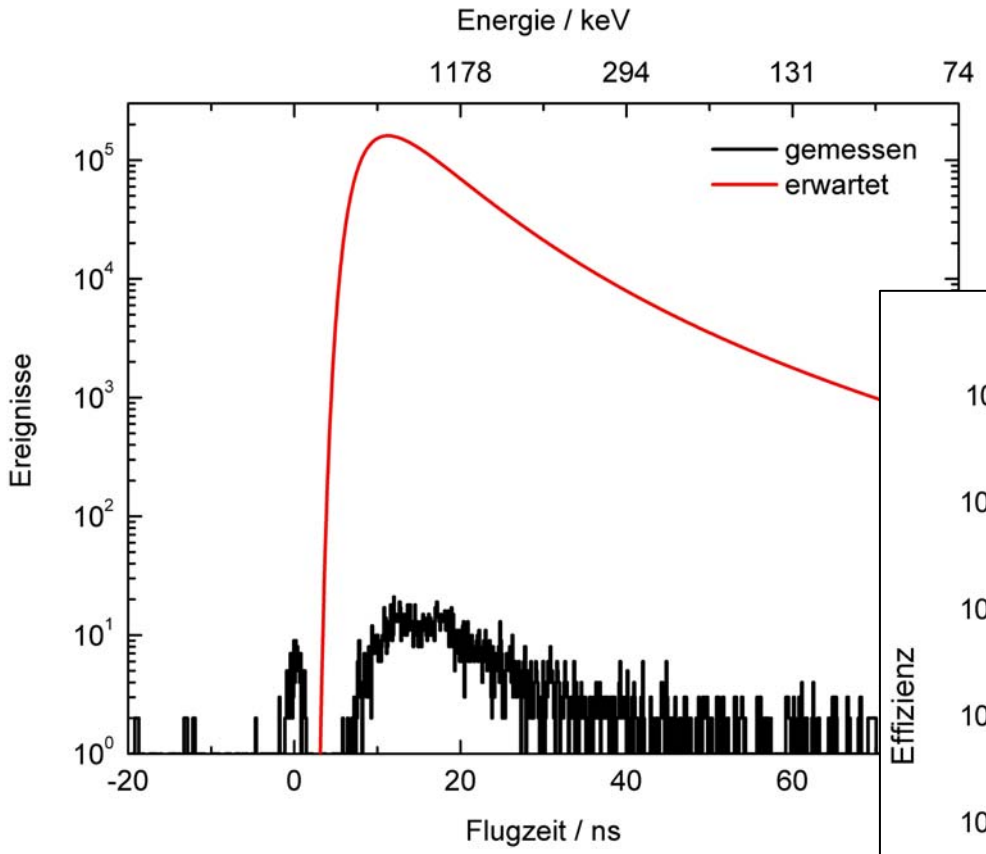
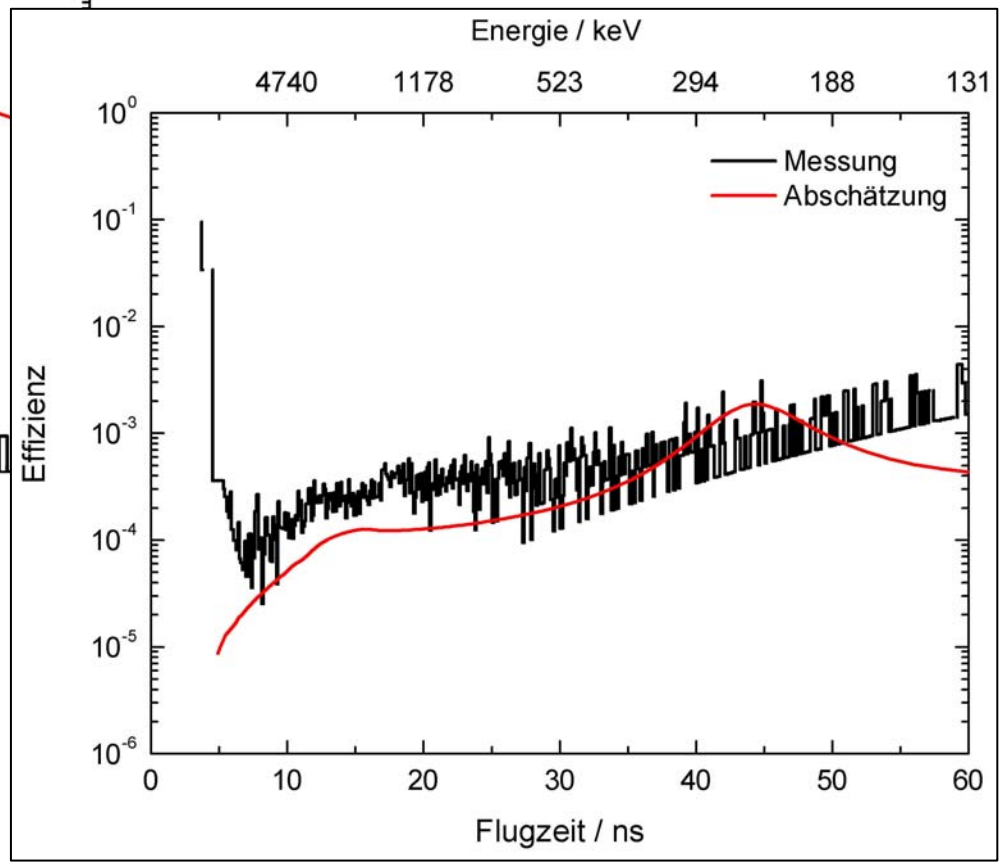
Je nach eintreffendem Teilchen, werden verschiedene Komponenten des Szintillations-Lichtes unterschiedlich stark angeregt

→ Aus dem Verhältnis von langer zu kurzer Komponente kann man auf die Teilchensorte zurückschließen

ZnS-Detektor – gemessene Spektren





Zeitauflösung: ca. 2,4 ns (FWHM)

ZnS-Detektor - Effizienz