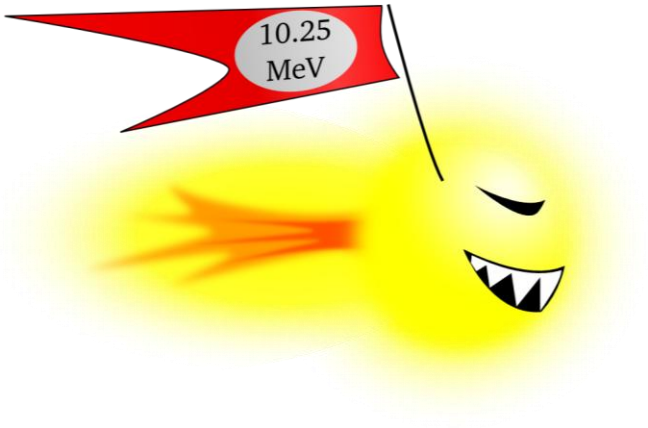
Erzeugung von und Experimente mit energetisch markierten Photonenstrahlen

Creation of and experiments with energetically tagged photon beams



Bastian Löher
Seminarvortrag

im Rahmen der Vortragsreihe

„Kernstruktur und Nukleare Astrophysik“

im Wintersemester 2008/2009

SFB 634

Gliederung

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Motivation und Einleitung
- Prinzip eines Photonentaggers
- **Experimenteller Aufbau NEPTUN und Datenaufnahme**
- **Datenauswertung und Ergebnisse**
- Vergleich mit anderen Aufbauten
- Zusammenfassung und Ausblick

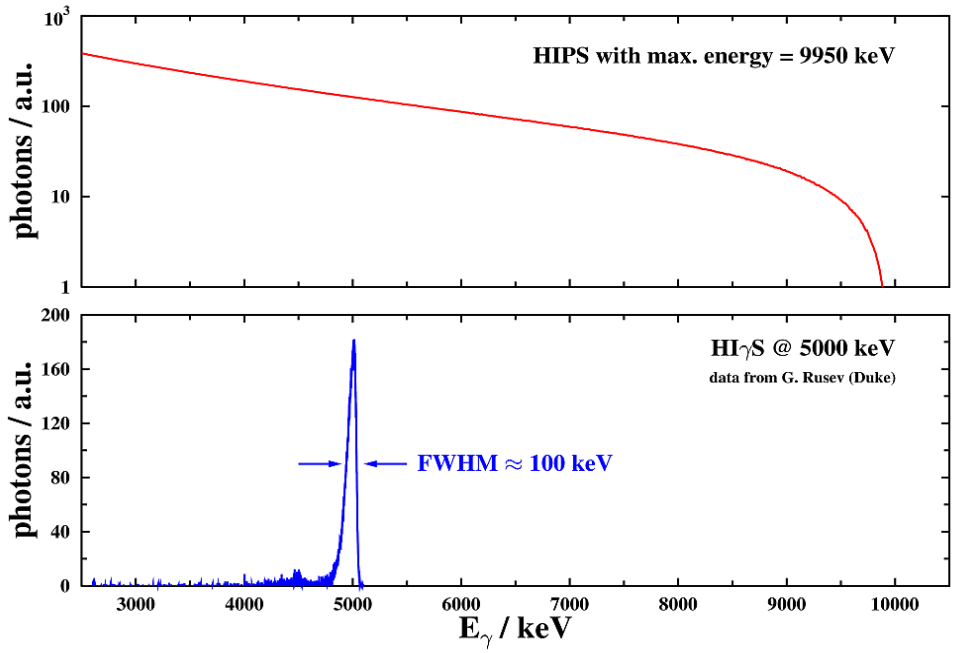
Gliederung

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Motivation und Einleitung
- Prinzip eines Photonentaggers
- **Experimenteller Aufbau NEPTUN und Datenaufnahme**
- **Datenauswertung und Ergebnisse**
- Vergleich mit anderen Aufbauten
- Zusammenfassung und Ausblick

Motivation

- Erzeugung von Photonenstrahlen
  - Bremsstrahlung
    - Kontinuierliches Spektrum
  - Laser-Compton-Rückstreuung
    - Scharf definierte Photonenenergie (durch Kollimator bestimmt)

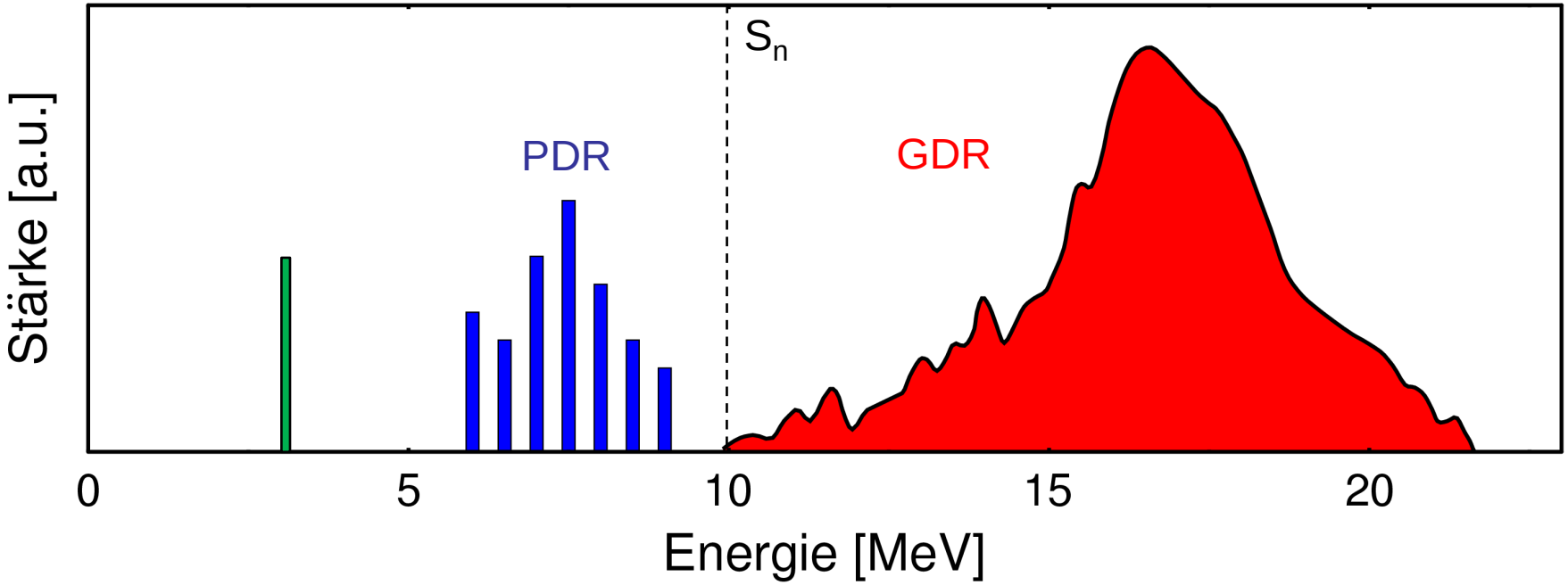


- Am S-DALINAC nur Bremsstrahlung möglich (HIPS, NEPTUN)

Motivation

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

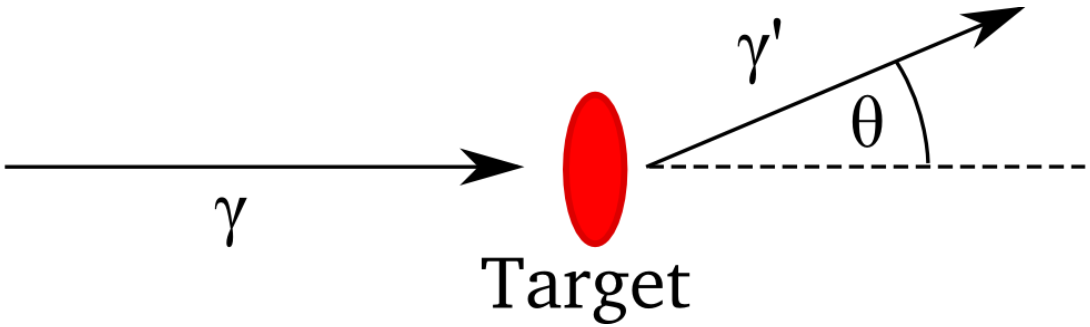
- Wozu Photonenstrahlen?
  - Messung der Photoresponse von Kernen

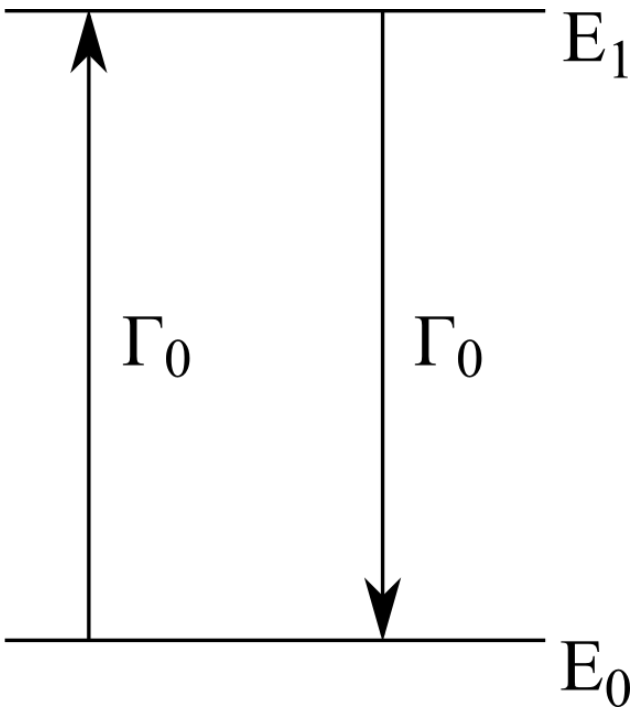


SFB 634

Motivation

- Wozu Photonenstrahlen?





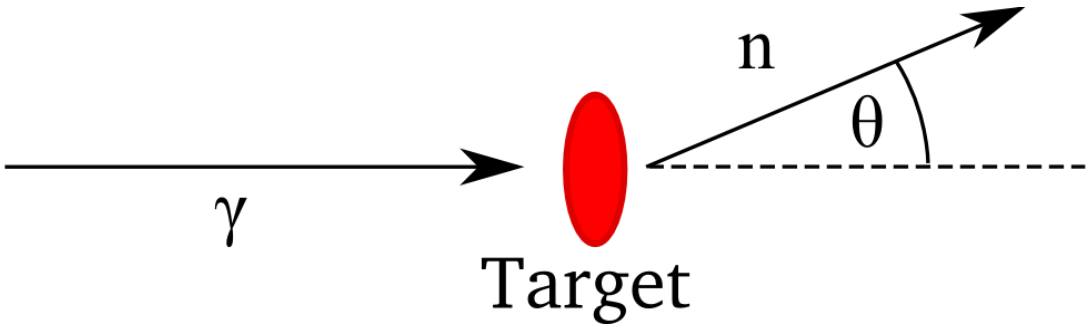
- Kernresonanzfluoreszenz (γ,γ‘)
  - Unterhalb der Separationsschwelle
  - Bestimmung von Energieniveaus, Multipolcharakter der Strahlung und Übergangsstärken

Motivation

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Wozu Photonenstrahlen?

$$\gamma + {}^{A}_{Z}X_{N} \xrightarrow{(\gamma,n)} {}^{A-1}_{Z}X_{N-1} + \boxed{n}$$



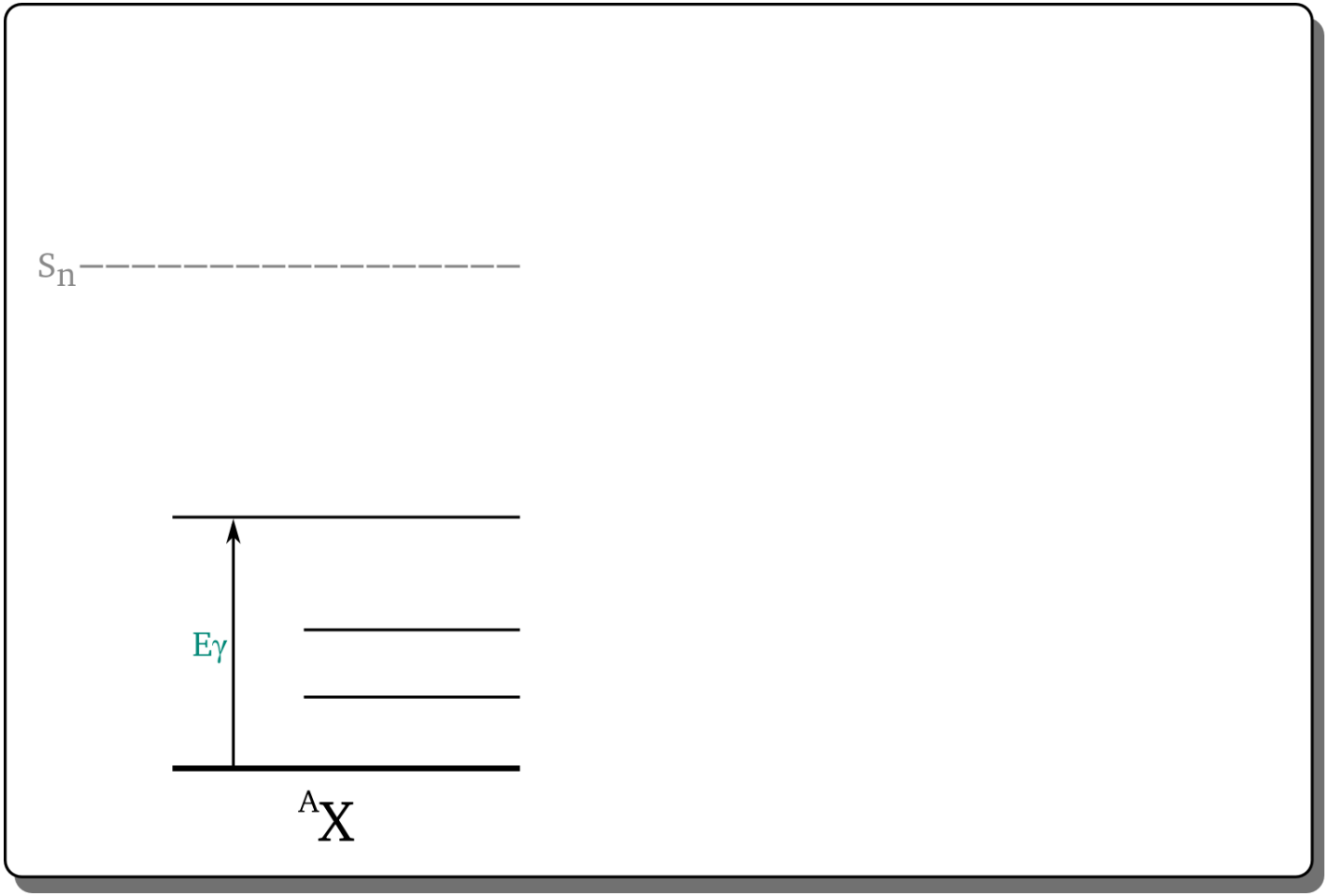
$${}^{A-1}_{Z}X_{N-1} \xrightarrow{\beta^-} {}^{A-1}_{Z-1}X^{*}_{N} + \beta^-$$

- Photodissoziation (γ,n), (γ,α), ...
  - Oberhalb der Separationsschwelle
  - Direkte Messung der Ejektile oder
  - Messung von Photonen aus Betazerfall der Produkte mit HPGe

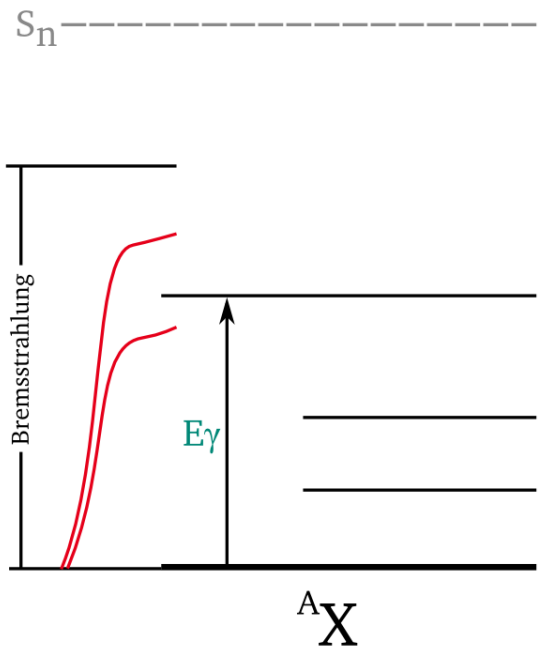
$${}^{A-1}_{Z-1}X^{*}_{N} \longrightarrow {}^{A-1}_{Z-1}X_{N} + \boxed{\gamma'}$$

➡ Neue Erkenntnisse in der Kernstruktur und Astrophysik

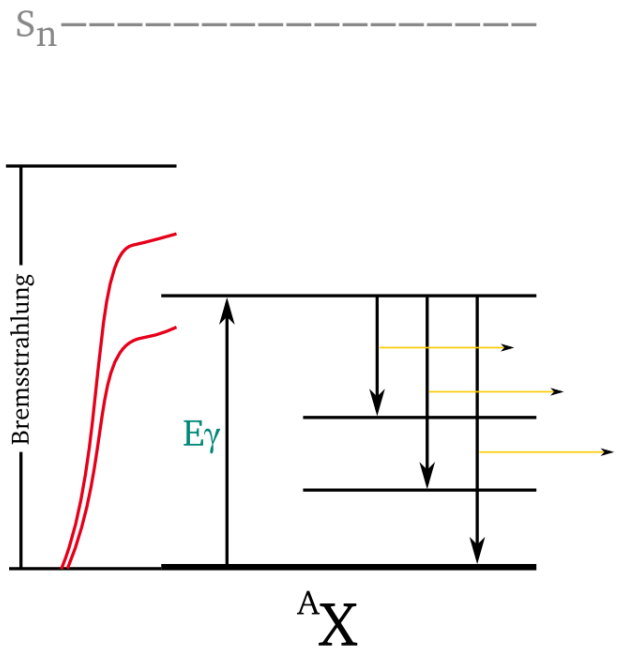
Motivation



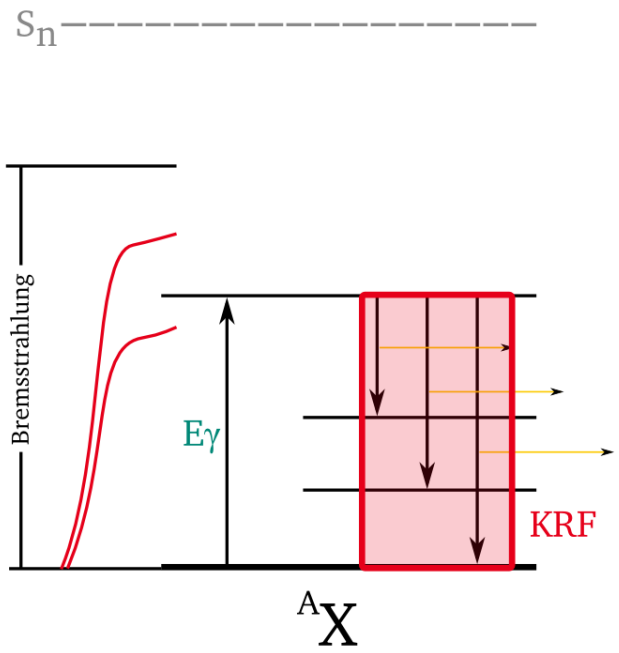
Motivation



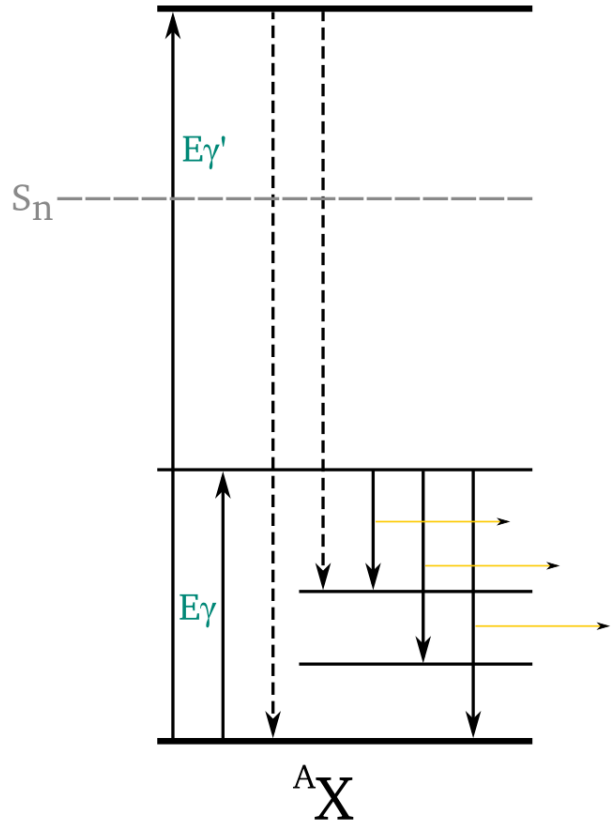
Motivation



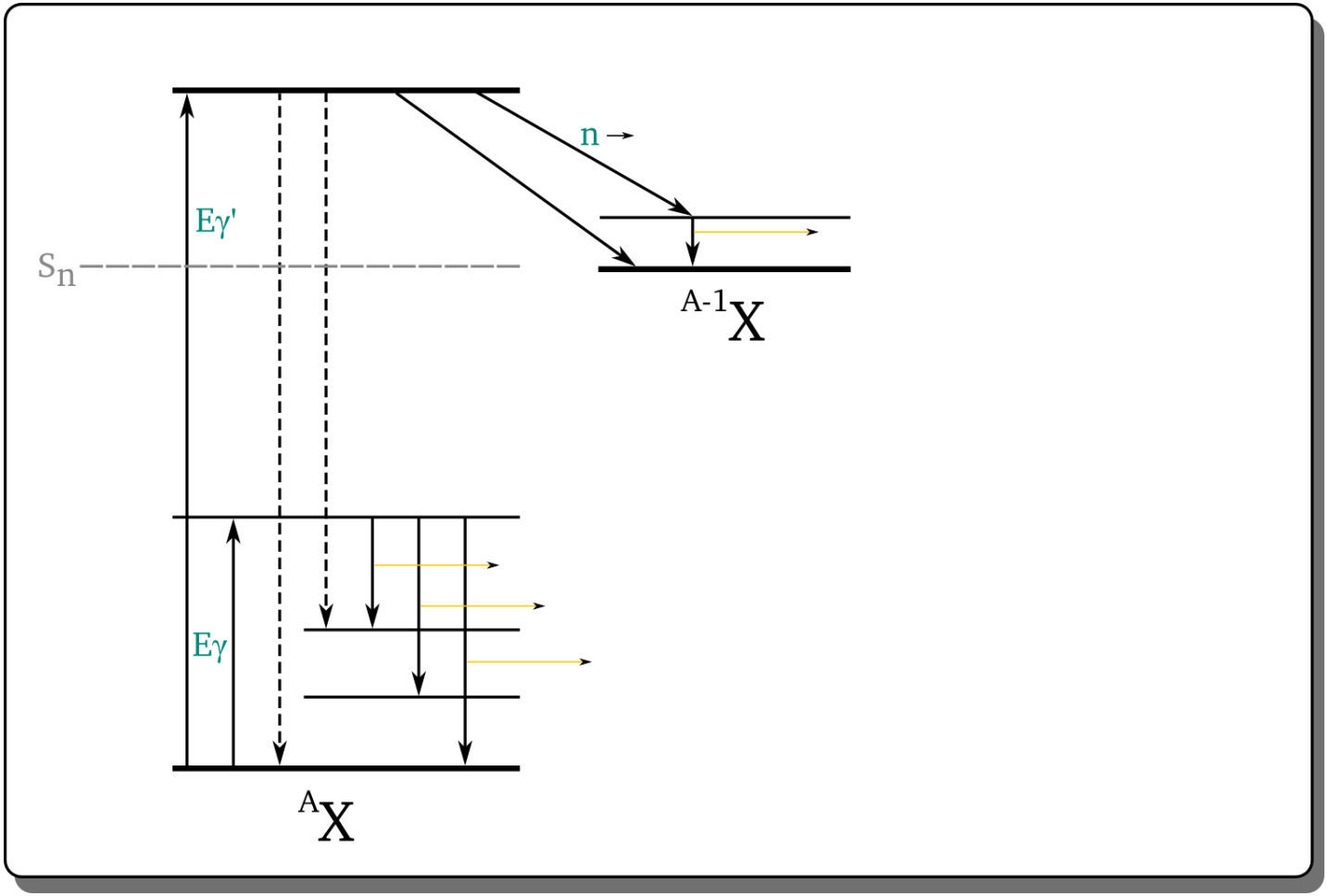
Motivation



Motivation

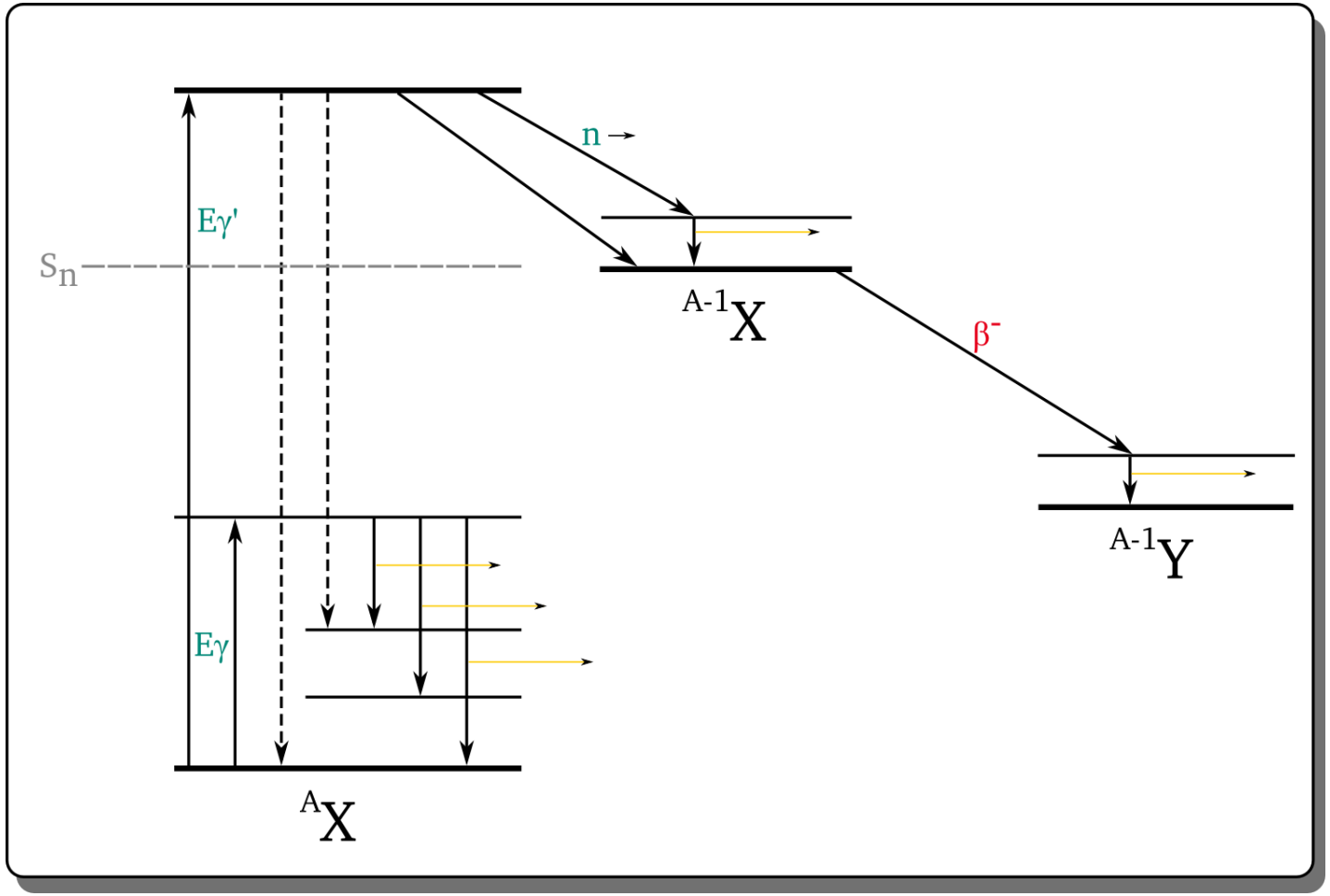


Motivation



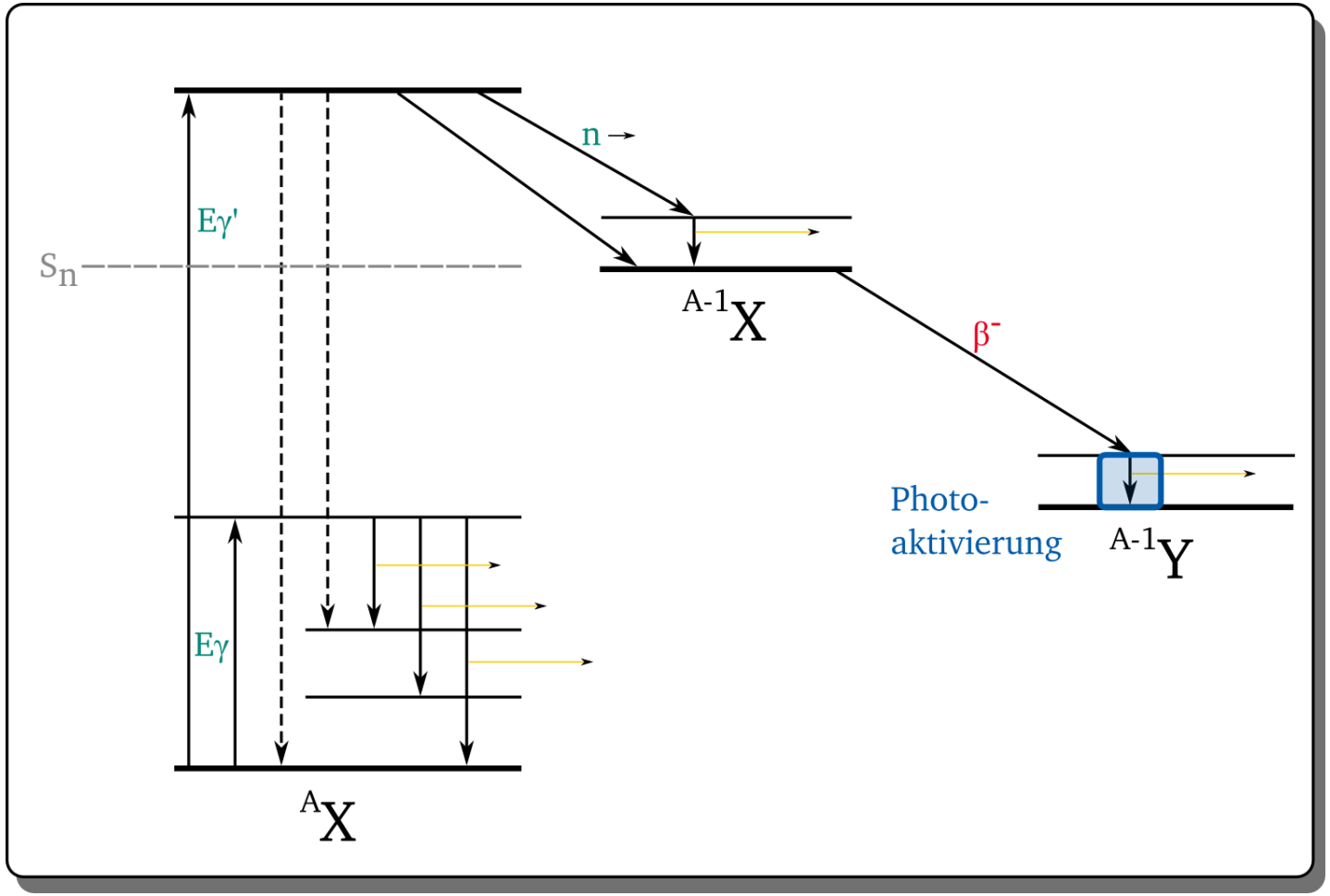
SFB 634

Motivation

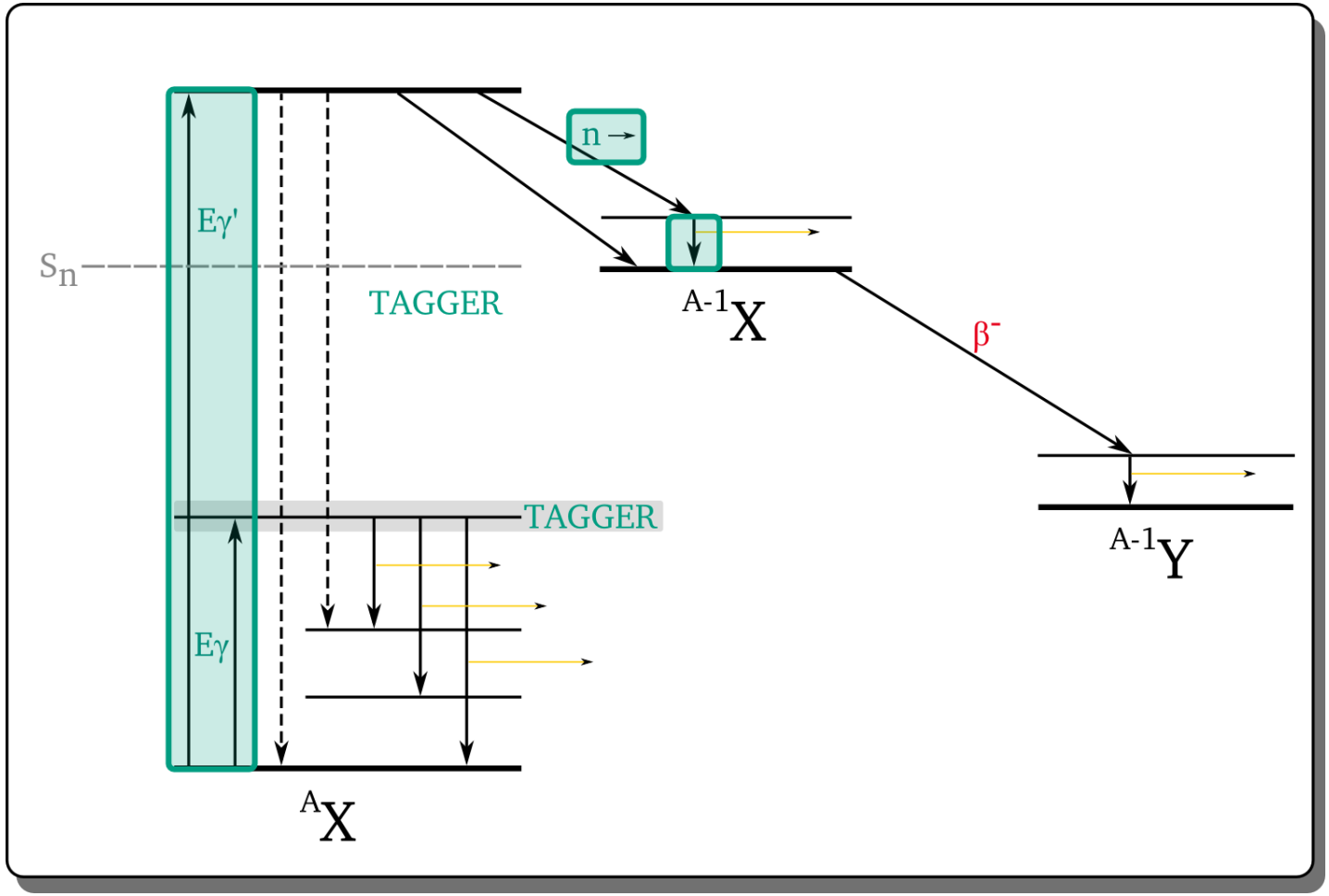


SFB 634

Motivation



Motivation



SFB 634

Motivation

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Wozu energetisch markierte (*tagged*) Photonenstrahlen?
  - Hohe Energieauflösung (NEPTUN bis 25 keV bei 10 MeV)
    - Kenntnis des Eingangskanals
    - Genaue Bestimmung energieabhängiger Größen (z.B. direkte Bestimmung von Wirkungsquerschnitten)
    - Detektortests (Effizienz, Antwortfunktion)
  - Untersuchung der Kerne oberhalb der Separationsschwelle
    - Pygmy-Dipolresonanzen
    - Photodissoziation

Gliederung

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Motivation und Einleitung
- Prinzip eines Photonentaggers
- **Experimenteller Aufbau NEPTUN und Datenaufnahme**
- **Datenauswertung und Ergebnisse**
- Vergleich mit anderen Aufbauten
- Zusammenfassung und Ausblick

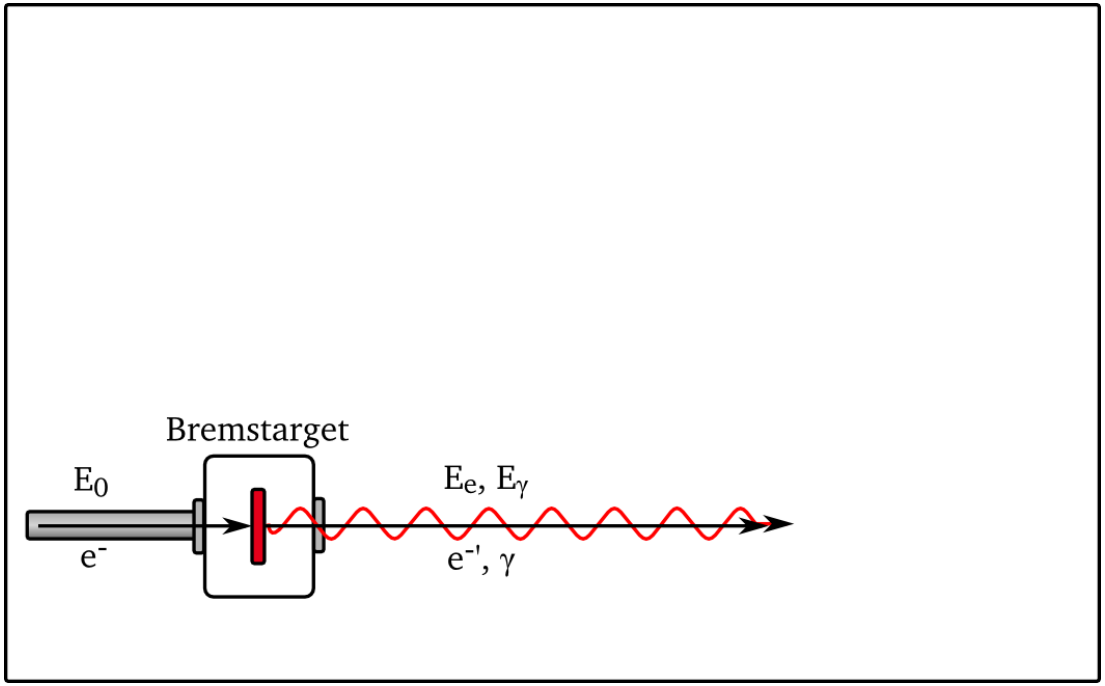
Prinzip des Photonentaggers Überblick

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Photonentagging in 4 Schritten

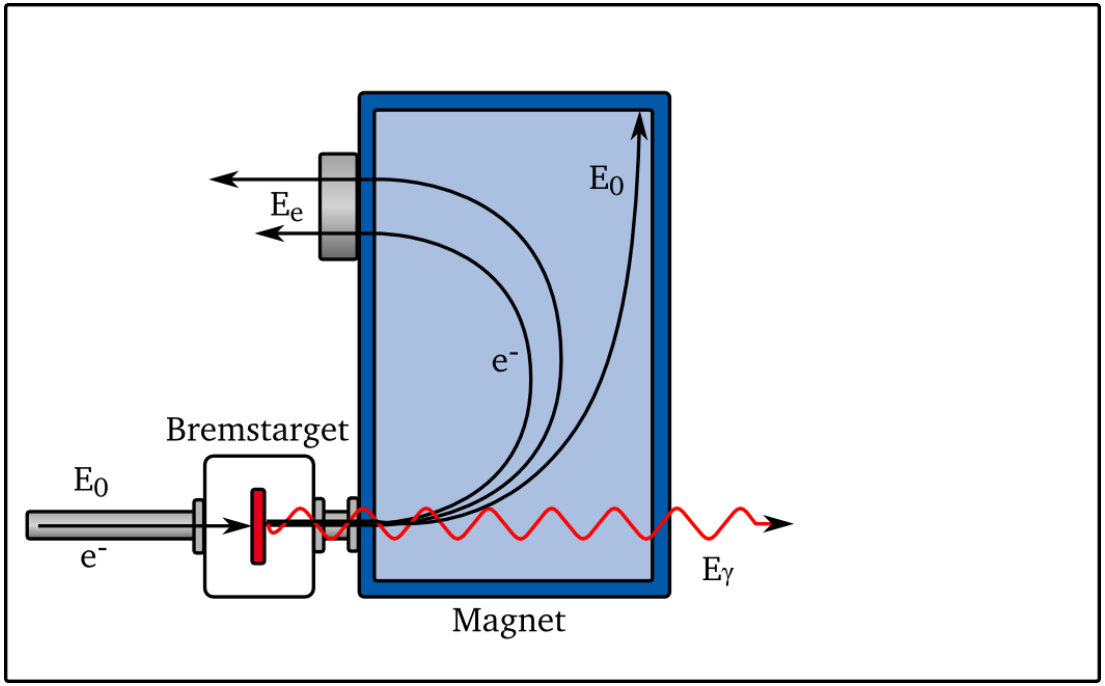
1. Elektronenstrahl an Bremstarget erzeugt Photonenstrahl
2. Gestreute Elektronen im Magneten abgelenkt und in dessen Fokalebene detektiert
3. Bestimmung der Energie des gestreuten Elektrons durch Position in der Fokalebene
4. Bestimmung der Energie des erzeugten Bremsstrahlungsphotons durch Energieerhaltung

Prinzip des Photonentaggers
Erzeugung von Photonen



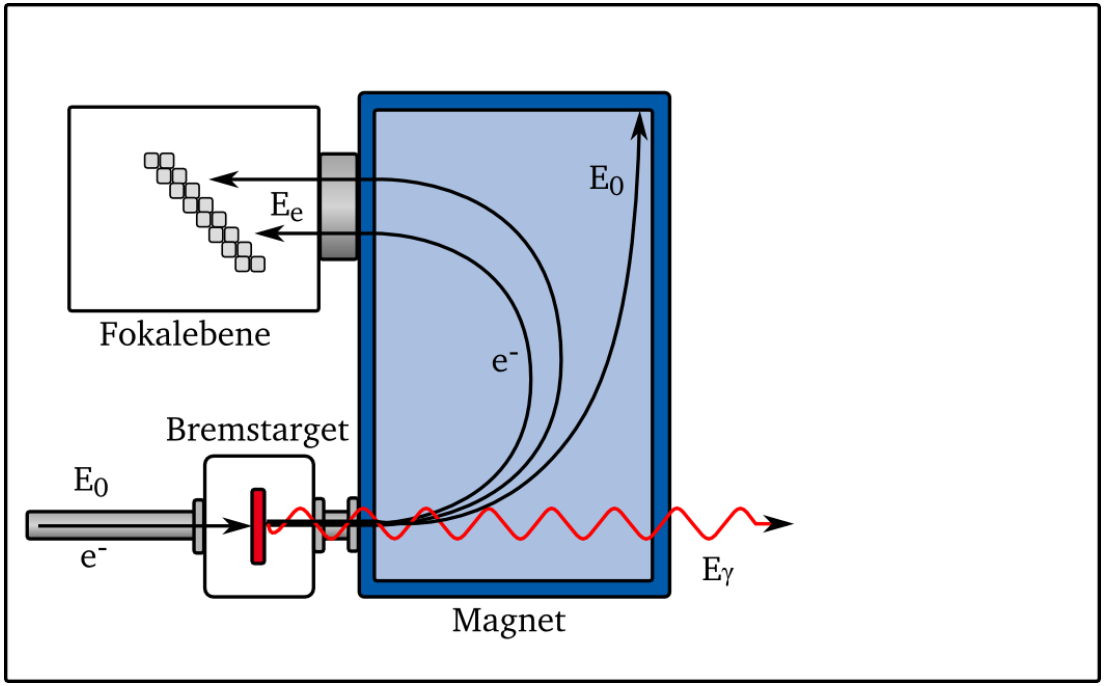
- Elektron wird an Bremstarget gestreut
  - Erzeugung von maximal einem Photon pro Elektron (<1%)

Prinzip des Photonentaggers
Ablenkung der Elektronen



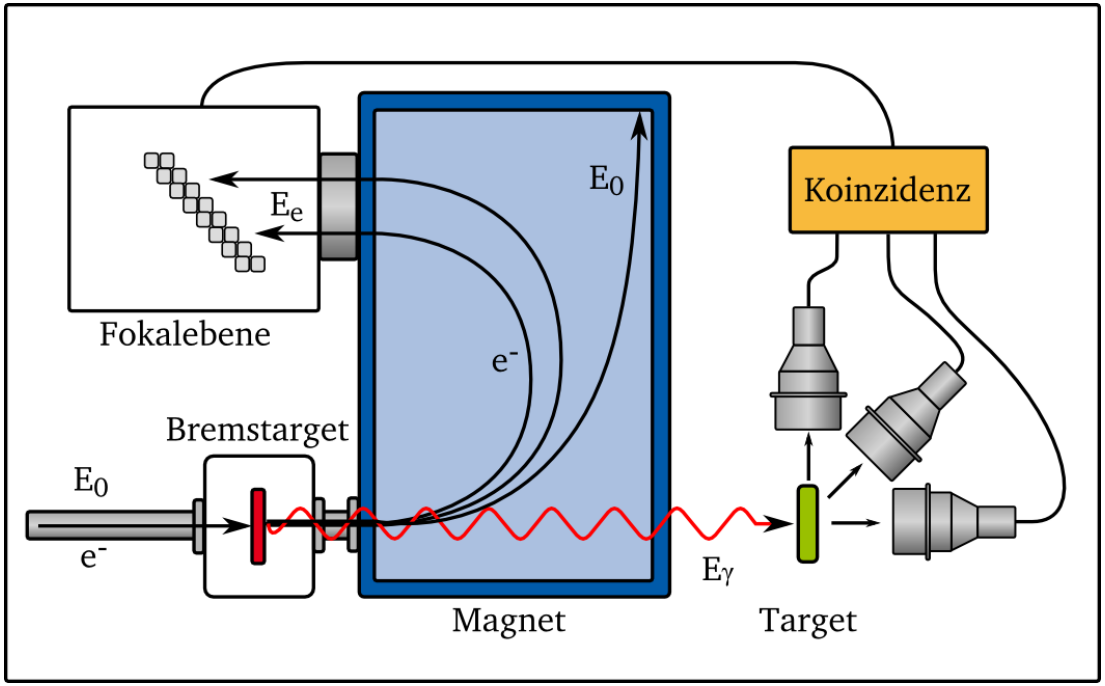
- Magnetfeld zwingt Elektronen auf Bahn mit Ablenkradius $r = \frac{p}{e \cdot B}$
  - r variiert mit der Elektronenenergie $E_e = \sqrt{(pc)^2 + (mc^2)^2}$
  - Photonen werden vom Feld nicht beeinflusst

Prinzip des Photonentaggers
Bestimmung von E_e



- Elektronen treffen auf segmentierten Detektor in Fokalebene
  - Jedes Segment entspricht einer bestimmten Energie
  - Energiebereich durch Stärke des Magnetfeldes festgelegt

Prinzip des Photonentaggers
Bestimmung von E_γ



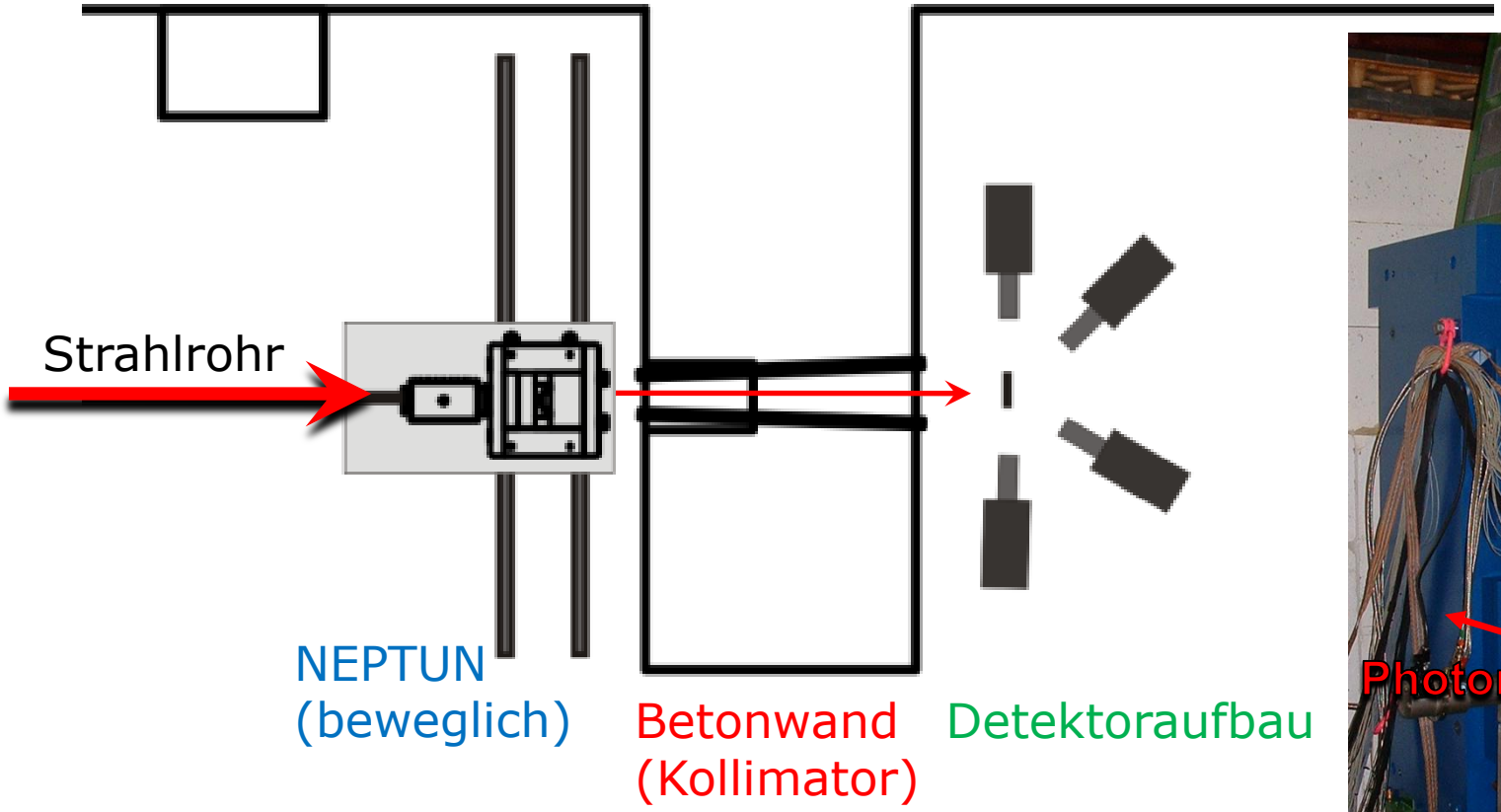
- Photonen treffen auf Target
  - Koinzidenz mit Fokalebene ordnet Photonen und Elektronen zu
  - Photonenenergie aus Energieerhaltung: $E_\gamma = E_0 - E_e$

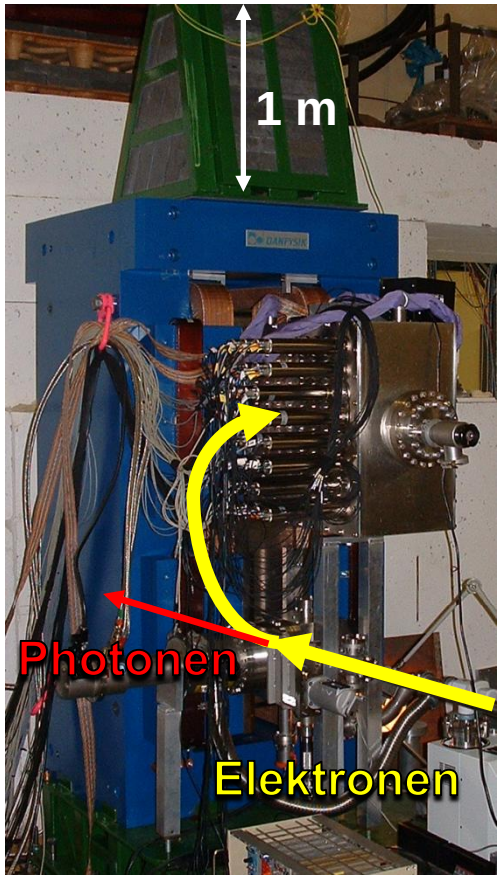
Gliederung

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

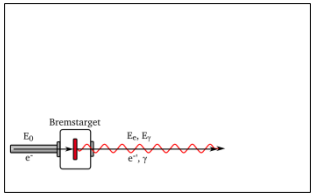
- Motivation und Einleitung
- Prinzip eines Photonentaggers
- **Experimenteller Aufbau NEPTUN und Datenaufnahme**
- **Datenauswertung und Ergebnisse**
- Vergleich mit anderen Aufbauten
- Zusammenfassung und Ausblick

NEPTUN Tagger
Taggeraufbau





NEPTUN Tagger Bremstarget



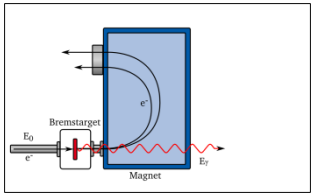
TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Variables Bremstarget
  - Drei Goldtargets (1, 10, 25 µm)
  - In der Regel 10 µm Target verwendet
  - Kompromiss zwischen hoher gestreuter Intensität und geringer Wahrscheinlichkeit für Mehrfachstreuung

- Energien
  - Einschussenergie (keine Rezirkulation) zwischen 28 und 34 MeV
  - Energie der gestreuten Elektronen zwischen 8 und 26 MeV
  - Energie der markierten Photonen zwischen 6 und 20 MeV
  - Energieverbreiterung durch Straggling 5 keV

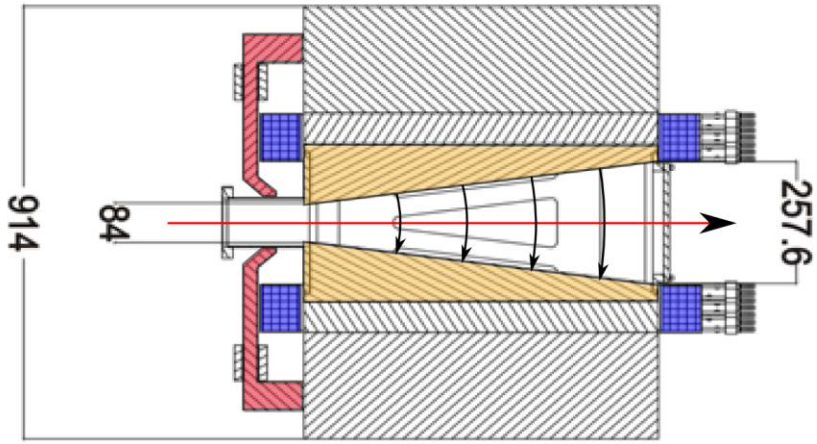
- Produktionsrate: $>10^4$ (s keV)$^{-1}$

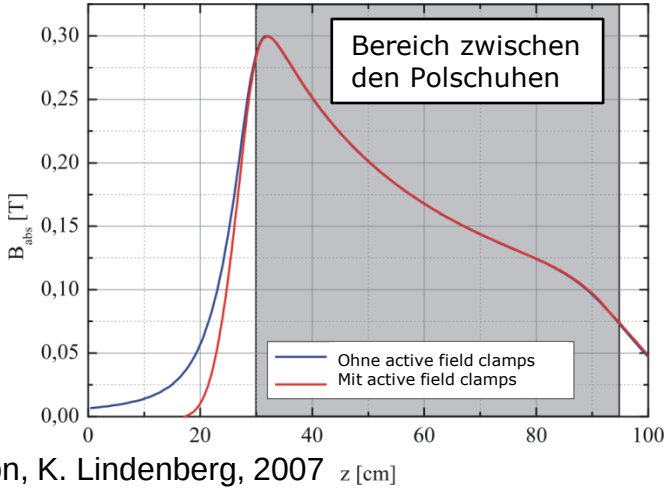
NEPTUN Tagger Magnetdesign



TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Ziel
  - Radiale Ablenkung der Elektronen unabhängig von Streuwinkel
- Clam-Shell-Magnet
  - geneigte Polschuhe (orange)
  - radialsymmetrisches Feld
  - Neigungswinkel 8°, da meist Streuwinkel < 5°
- Active Field Clamps (rot)
  - Reduktion des Randfeldes durch gegenpoliges Magnetfeld

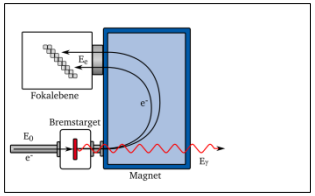




H. Richardson, Proc. Phys. Soc. **59** (1947) 791

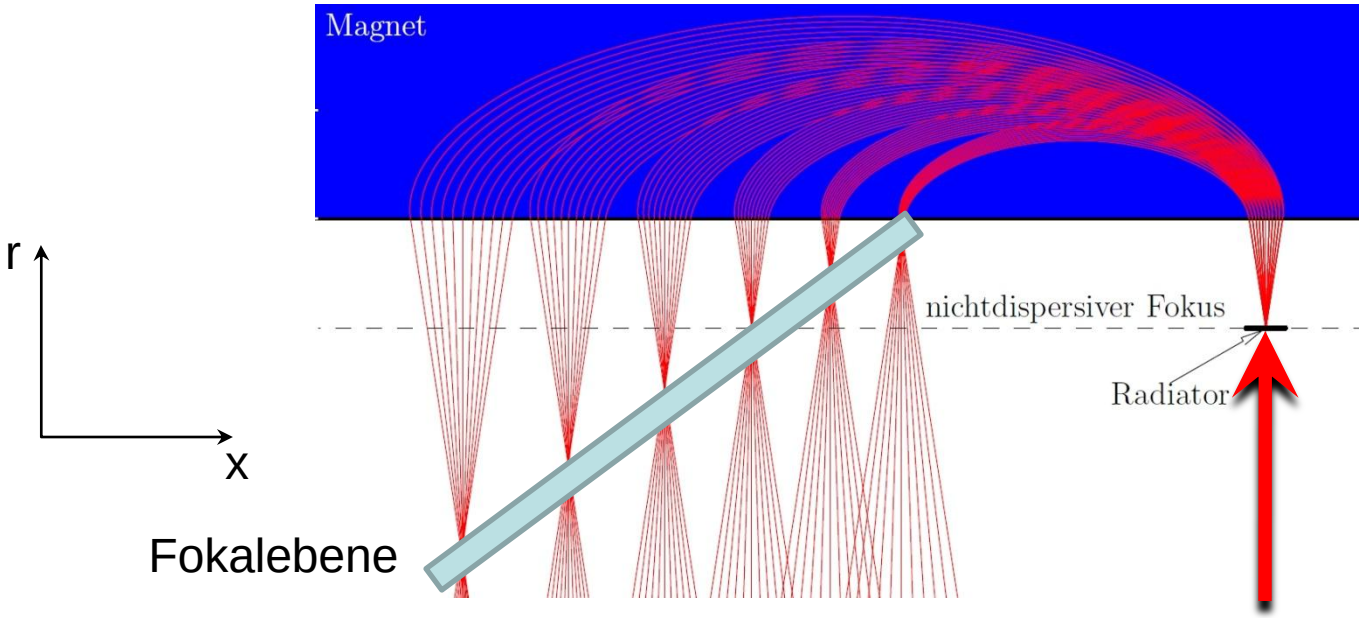
Aus Dissertation, K. Lindenberg, 2007

NEPTUN Tagger Fokalebene



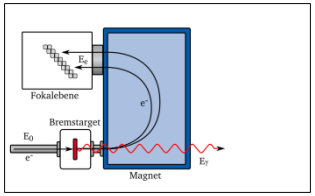
TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Geometrie der Fokalebene
  - Ziel: Alle abgelenkten Elektronen detektieren
  - Energetische Verteilung der Elektronen führt zu Dispersion
  - Berechnete Fokalebene ist annähernd linear ($\Delta x \approx 1$ mm)



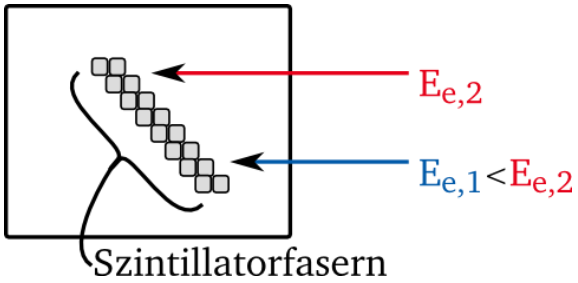
Dissertation K. Lindenberg, 2007

NEPTUN Tagger Fokalebene



TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

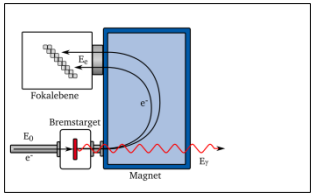
- Segmentierte Fokalebene aus Plastik-Szintillatorfasern



- 1x1 mm^2 Querschnitt
- Ortsauflösung von 1 mm
- Gute Zeitauflösung (wenige ns)
- flexible Geometrie
- Erzeugung von ~2000 Szintillationsquanten pro mm Propagation
- freie Weglänge etwa 42 cm
  - ➢ Länge möglichst minimieren

Diplomarbeit J. Endres, 2007

NEPTUN Tagger Fokalebene



TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Photomultiplier erzeugen Signale aus Szintillationslicht
  - Über Lichtleiter angebunden ⟶ unabhängig von Geometrie
  - Kopplungsverluste etwa 50 %
  - Schnell ($\Delta t \approx$ 5 ns) und sehr sensitiv (10 Photonen = 1 Ereignis)

- Aufbau zurzeit mit 32 Szintillatorfasern ($\Delta E \approx$ 0.8 MeV)
- Erweiterung bis zu 128 geplant
  - Energiebereich: 3 MeV

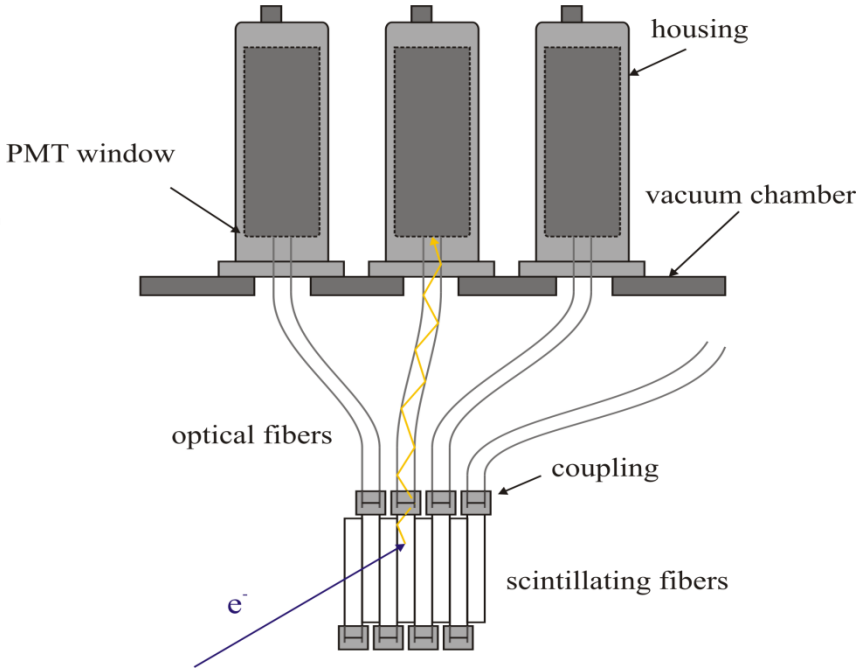
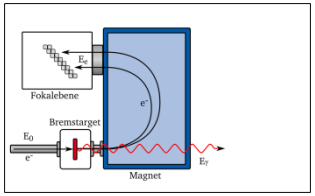


Bild: Diplomarbeit, J. Hasper, 2005

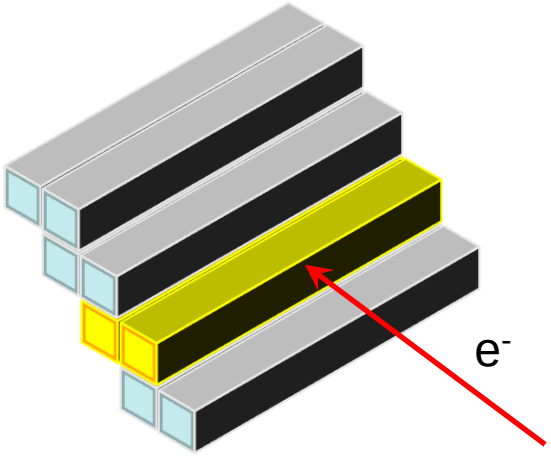
SFB 634

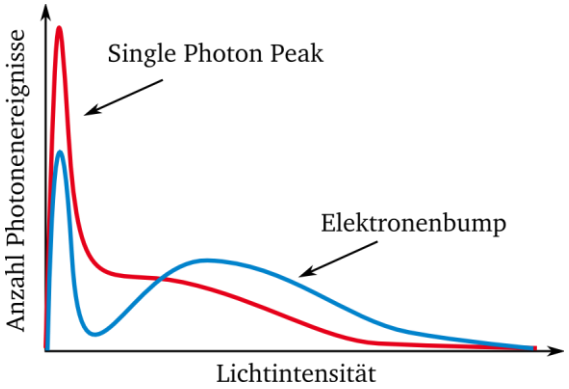
NEPTUN Tagger Fokalebene



TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

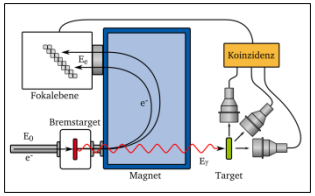
- Neue Entwicklung:
  - Verwendung von Doppelfasern
  - 2 Lichtleiter pro Faserpaar
- Längerer Weg des Elektrons im Szintillator
  - Mehr Szintillationslicht
  - Stärkere Trennung von Photopeak und Elektronenbump
- Stark verbesserte Ausbeute
  - Höhere Effizienz (bis ~100%)





Bachelorarbeit C. Wälzlein, 2008

NEPTUN Tagger Datenaufnahme

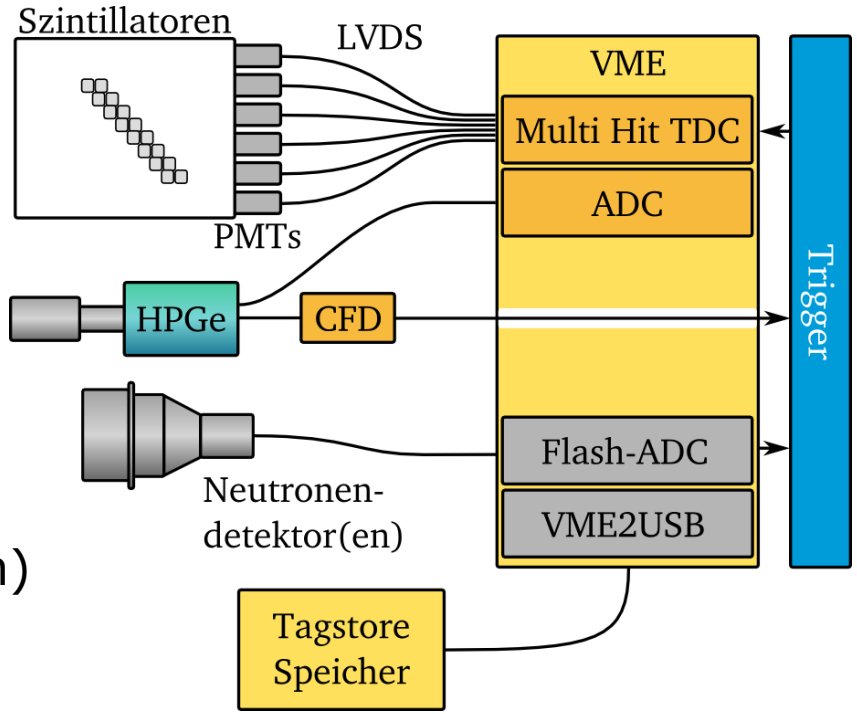


TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Zweigeteilte koinzidente Datenaufnahme

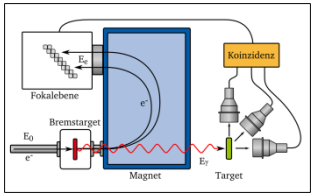
1. Photomultiplier mit integriertem Diskriminator
   - 32 bis 128 Kanäle
   - Einstellung über CAN-Bus
   - Auslese mit Multi-Hit-TDC

2. Detektor-Kanäle
   - 1 bis 20 Detektoren (z.B. HPGe, Neutronendetektoren)
   - erzeugen Trigger



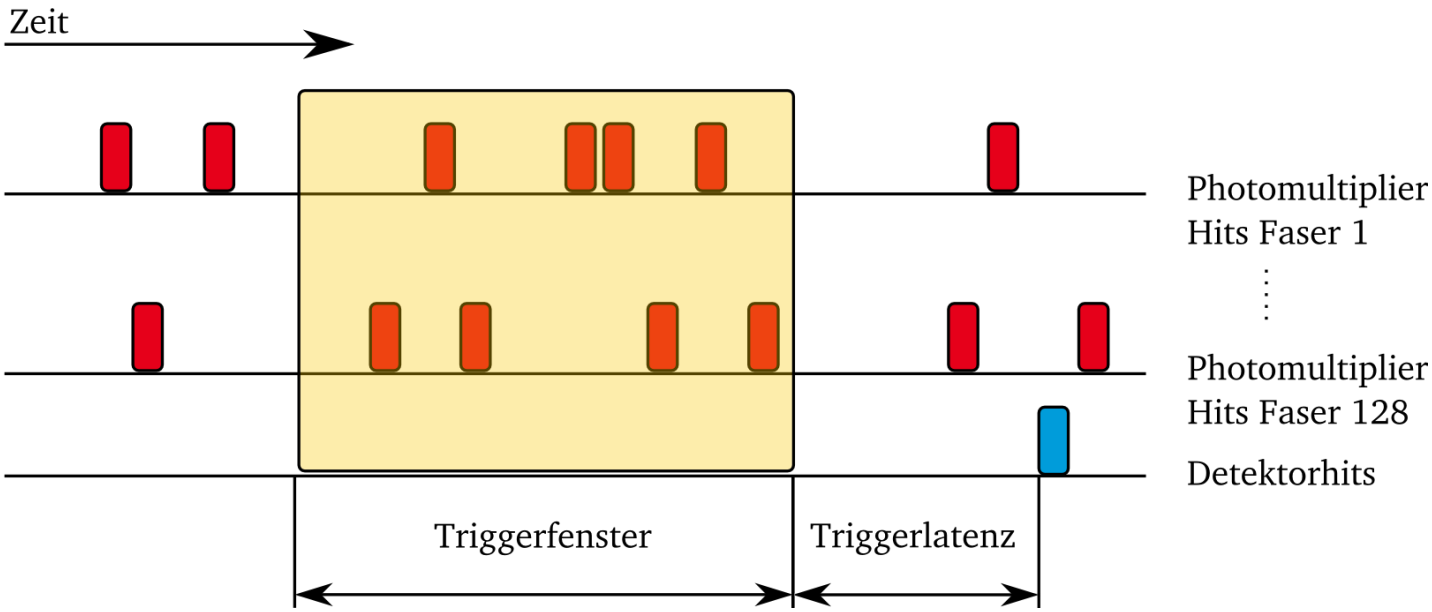
SFB 634

NEPTUN Tagger Datenaufnahme



TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Multi-Hit-TDC Beispiel:



- Alle Hits im Triggerfenster (~µs breit) werden gespeichert
- Triggerlatenz gleicht Signalwege aus

Gliederung

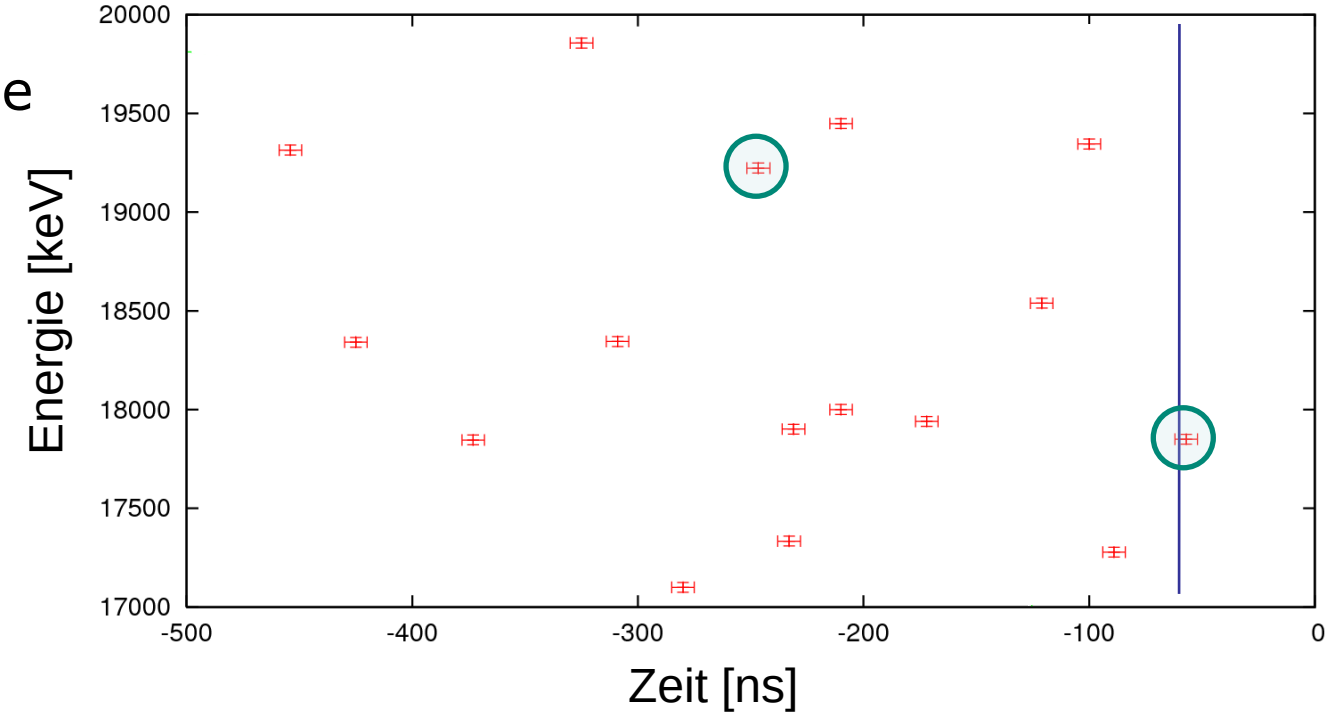
TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Motivation und Einleitung
- Prinzip eines Photonentaggers
- **Experimenteller Aufbau NEPTUN und Datenaufnahme**
- **Datenauswertung und Ergebnisse**
- Vergleich mit anderen Aufbauten
- Zusammenfassung und Ausblick

Datenauswertung offline

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Zuordnung Faser <> Energie
- Auftragung über Flugzeit
- (γ,γ`): feste Flugzeit
- (γ,n): Energieabhängige Flugzeit



$$E_e = E_0 - E_\gamma \qquad E_\gamma = S_n + E_{kin} \qquad E_e = E_0 - S_n - \frac{1}{2} m \frac{d^2}{t_f^2}$$

SFB 634

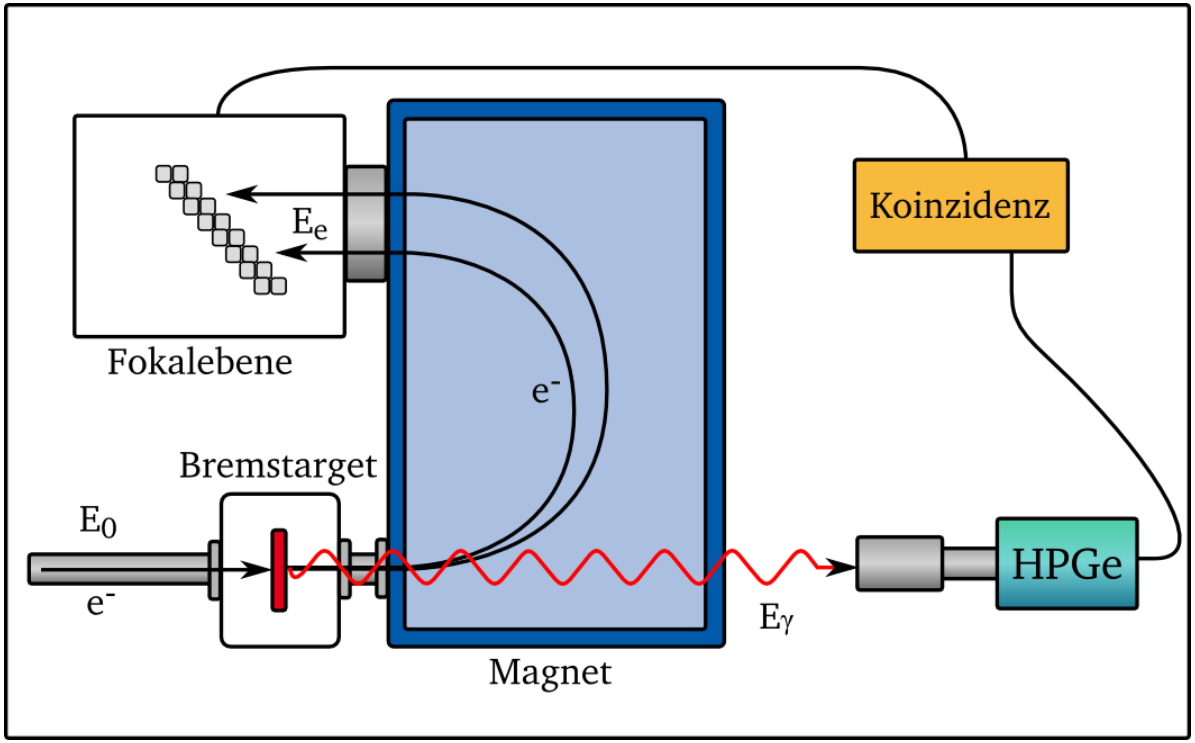
Datenauswertung offline

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Zuordnung von Neutronen schwierig, wenn Produktkerne verschiedene Zustände besetzen
  - meist kleine Energiedifferenzen
  - hohe Energieauflösung nötig
  - erreichbar durch größere Flugzeiten

Ergebnisse
Erstes Experiment

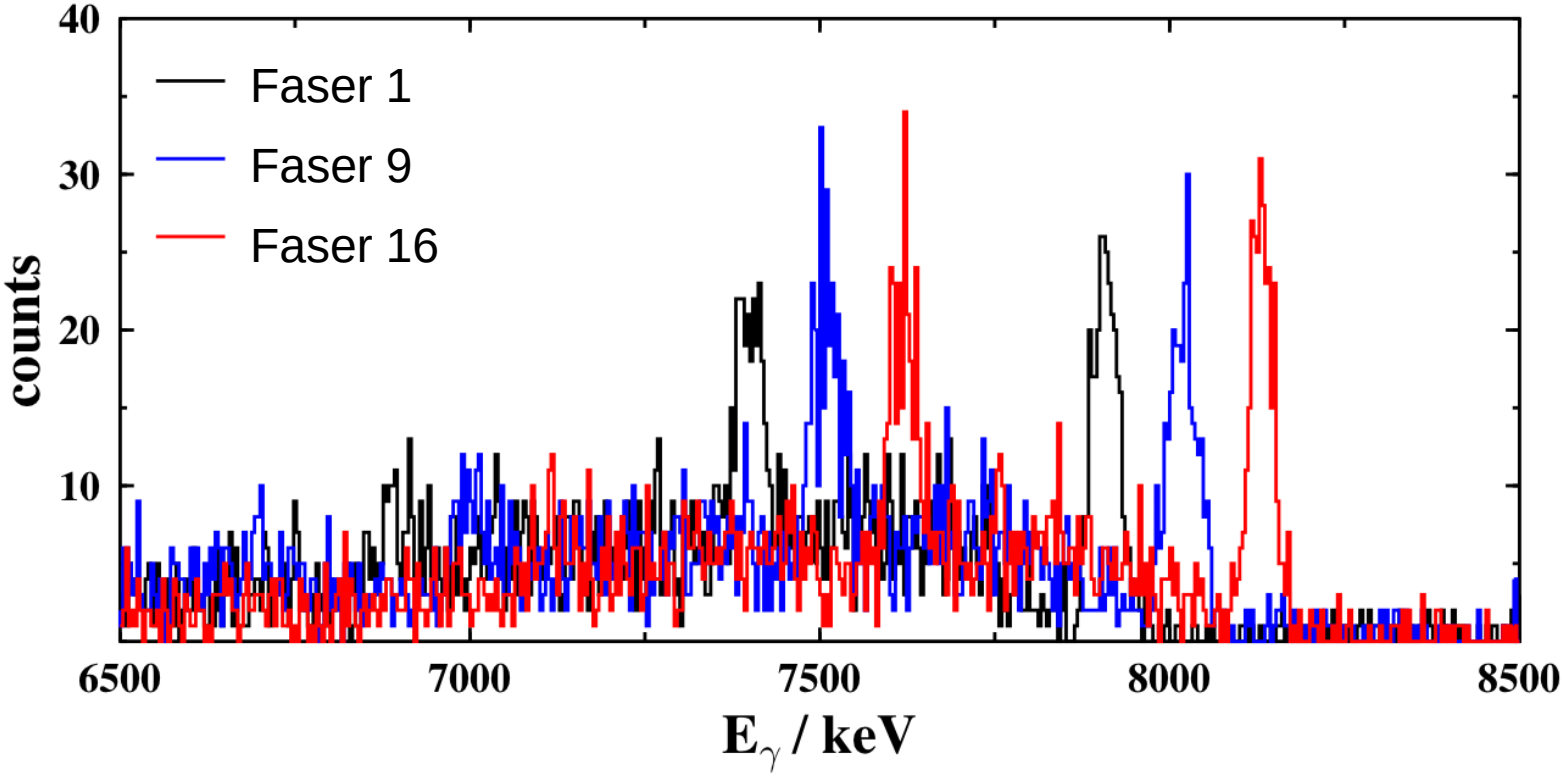
- Aufbau mit HPGe Detektor im Strahl
  - Messung des Strahlprofils



Ergebnisse
Erstes Experiment Dez. 2007

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Spektrum von drei verschiedenen Fasern

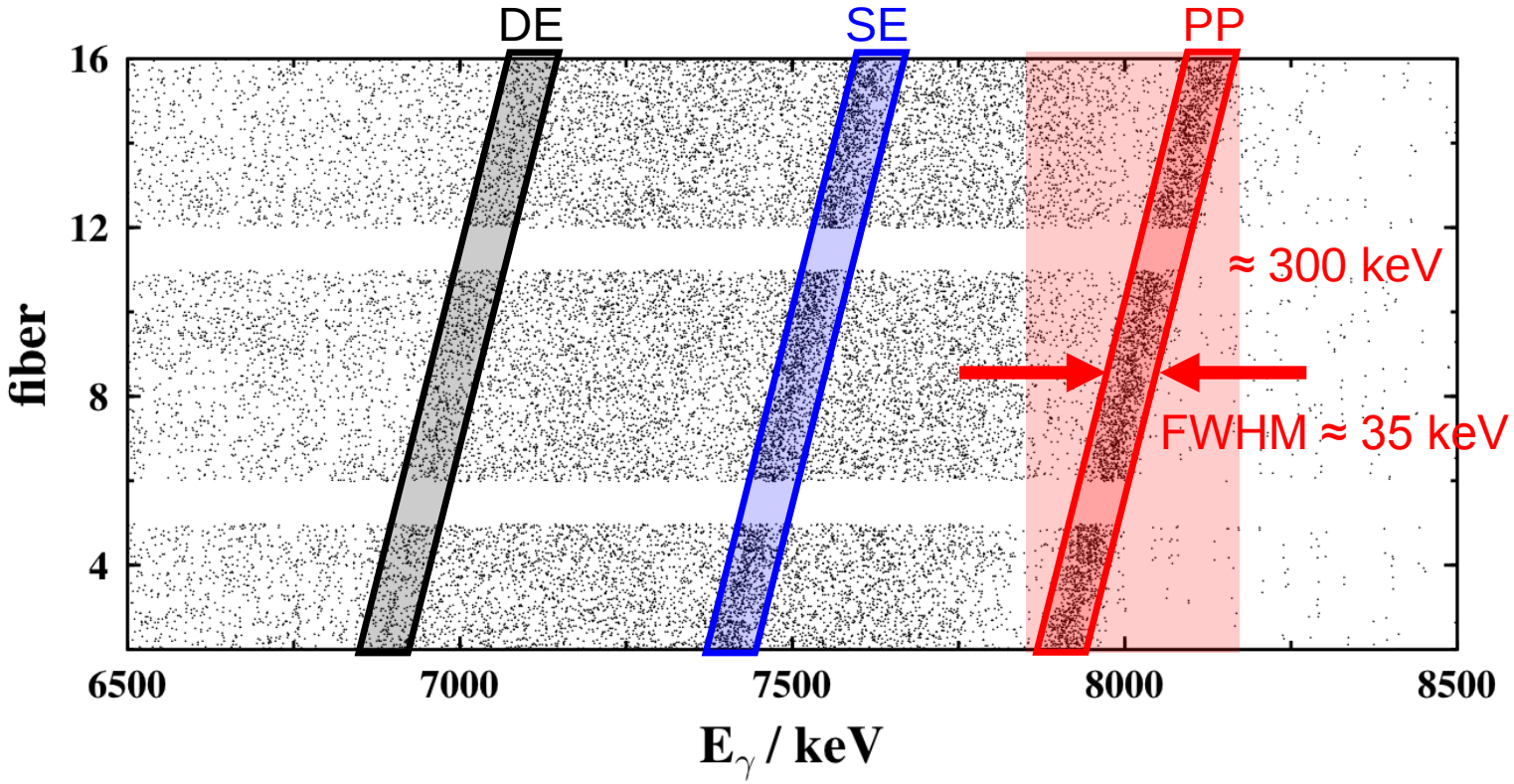


SFB 634

Ergebnisse
Erstes Experiment Dez. 2007

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Spektrum aller Fasern

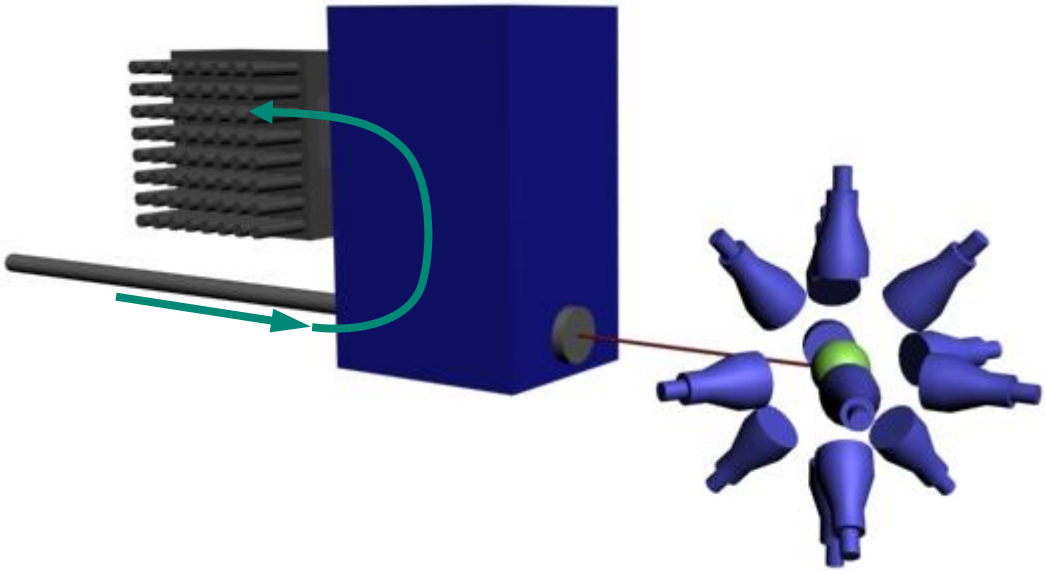


Fazit: NEPTUN erreicht gute Auflösung im ersten Experiment

Ergebnisse
(γ,n) - Experimente

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Bislang an NEPTUN keine (γ,n)-Experimente durchgeführt
  - $E_\gamma > S_n$
- In Planung:
  - Neutronendetektor-Array in 4π-Geometrie
  - Digitale Datenaufnahme mit Photonendiskriminierung



Gliederung

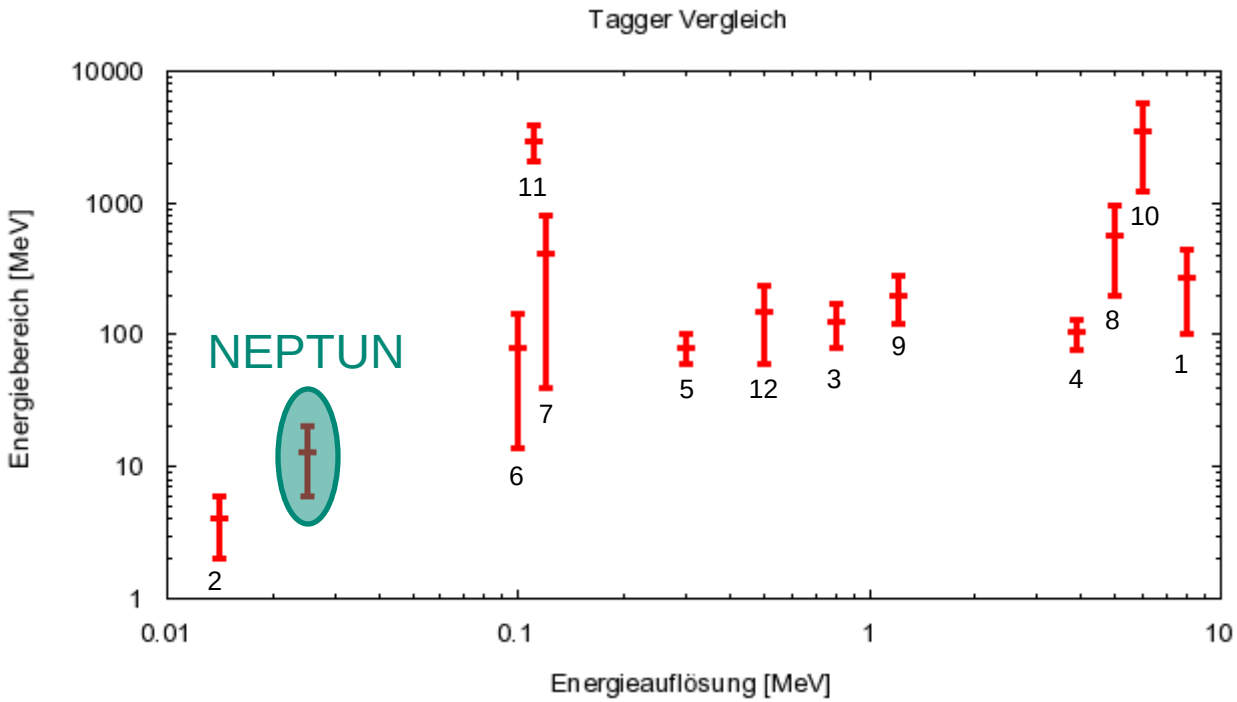
TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Motivation und Einleitung
- Prinzip eines Photonentaggers
- **Experimenteller Aufbau NEPTUN und Datenaufnahme**
- **Datenauswertung und Ergebnisse**
- Vergleich mit anderen Aufbauten
- Zusammenfassung und Ausblick

Weitere Experimente
Vergleich Energiebereich

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Allgemein
  - wenige Nieder-energietagger
- NEPTUN
  - deckt bisher offenen Bereich mit hoher Auflösung ab
  - wird daher neue Erkenntnisse liefern

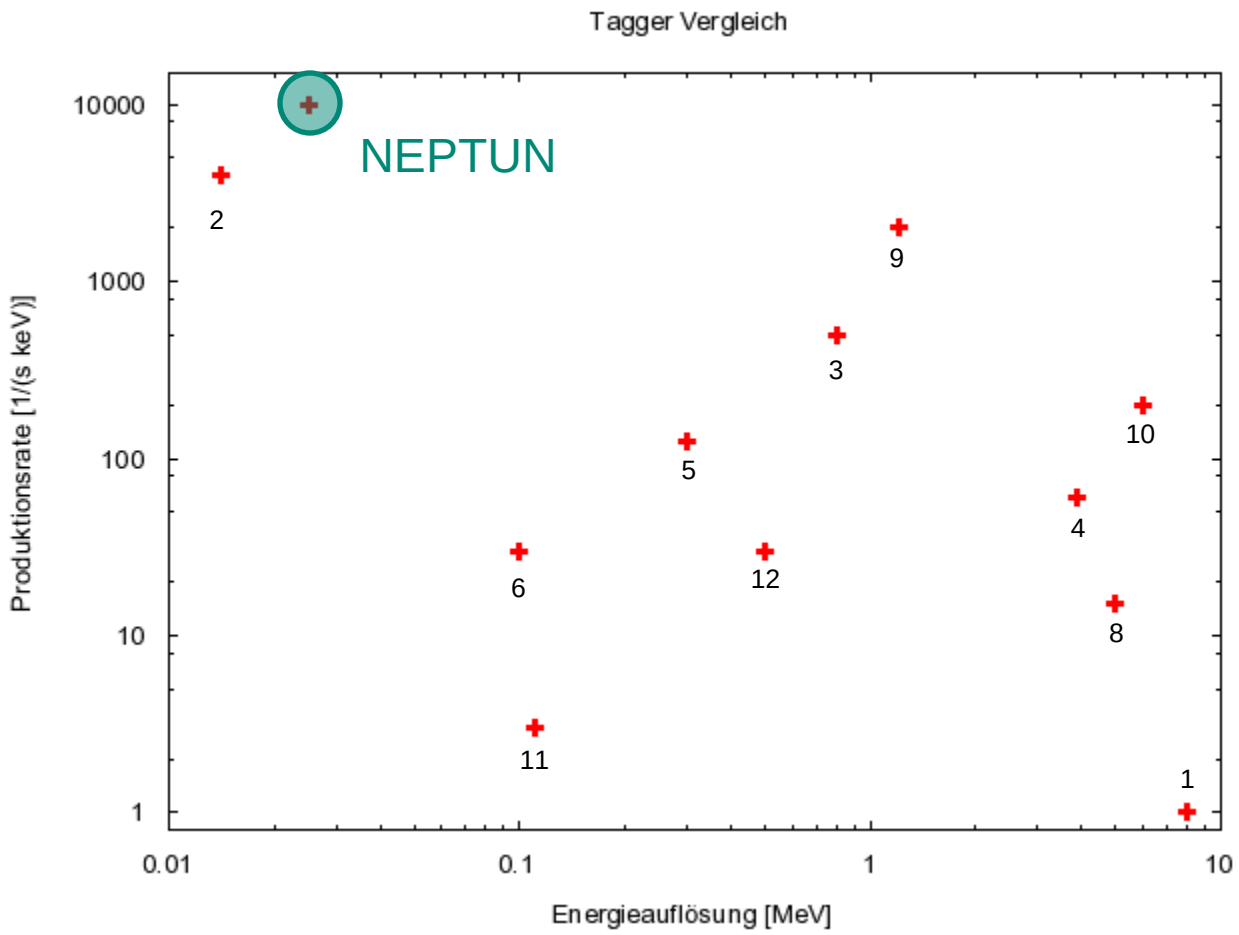


1 J. Arends (Bonn), 1982
2 J.W. Knowles (Illinois), 1982
3 J.D. Kellie (Mainz), 1985
4 T. Terasawa (Sendai), 1986
5 J.O. Adler (Lund), 1990
6 K.-H. Krause (Mainz), 1991
7 I. Anthony (Mainz), 1991
8 P. Detemple (Bonn), 1992
9 J.M. Vogt (Saskatchewan), 1993
10 D.I. Sober (JLab), 2000
11 J. Naumann (Bonn), 2003
12 K. Hirose (Tohoku), 2006

Weitere Experimente
Vergleich Produktionsrate

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Allgemein
  - Höhere Produktionsrate bedeutet meist geringere Auflösung
- NEPTUN
  - Hohe Auflösung bei hoher Produktionsrate
  - dafür kleiner Bereich simultan

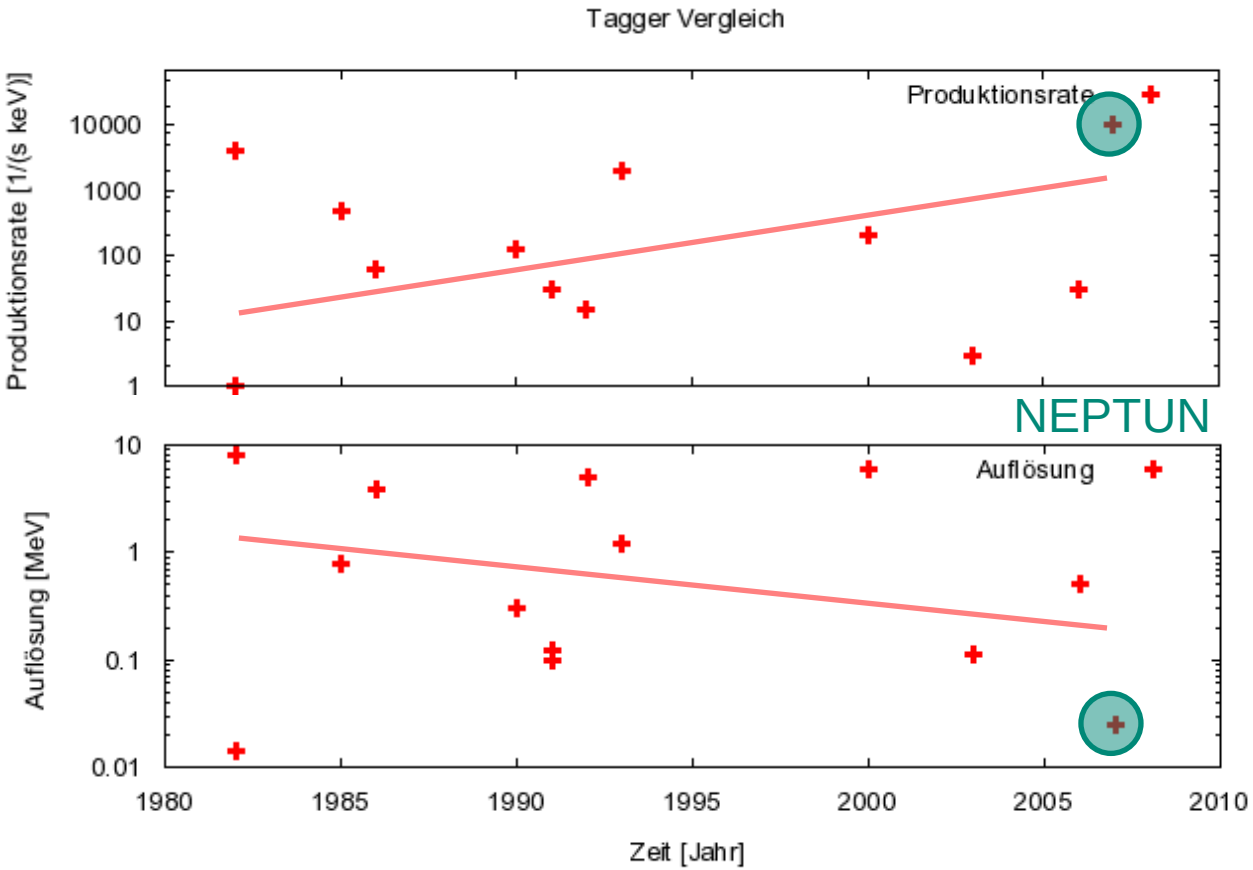


SFB 634

Weitere Experimente
Zeitliche Entwicklung

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Allgemein
  - Produktionsrate wächst
  - Auflösung steigt
  - Exponentielle Entwicklung
- NEPTUN
  - Im Bereich hoher Produktions-raten und hoher Auflösung



SFB 634

Gliederung

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Motivation und Einleitung
- Prinzip eines Photonentaggers
- **Experimenteller Aufbau NEPTUN und Datenaufnahme**
- **Datenauswertung und Ergebnisse**
- Vergleich mit anderen Aufbauten
- Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Funktionsprinzip eines Photonentaggers beschrieben
  - Photonenstrahlen durch Detektion gestreuter Elektronen energetisch markiert (Energieauflösung bis 25 keV)
- Beispielhaft: Entwicklung NEPTUN-Tagger für niedrige Energien (6-20 MeV)
  - Pygmy-Dipolresonanz
- Weitere Tagger-Experimente für andere Energiebereiche & Einsatzzwecke
  - hohe Energien (>100 MeV)
  - große Energiebereiche (>700 MeV) simultan

Ausblick NEPTUN

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Erweiterung der Fokalebene
  - Erweiterung auf 128 Szintillatoren
  - Abdeckungen von größerem Energiebereich (~3 MeV)
- Integration verschiedener Detektorsysteme an NEPTUN
  - (γ,γ‘)-Aufbau
  - (γ,n)-Aufbau mit neuem Detektorarray
- Umstellung der Datenaufnahme auf digitale Auslese
  - Automatische Diskriminierung des Photonenuntergrundes
  - Realtime-Datenauslese