

Transmutation radioaktiven Abfalls - Grundlagen, Methoden, Perspektiven

A. R. Junghans
Forschungszentrum Dresden-Rossendorf

Energieforschungskonzept für Deutschland
Hochradioaktiver Abfall
Schnelle Neutronen zur Transmutation
Messung transmutationsrelevanter
Kernreaktionen am FZD

Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina/
Nationale Akademie der Wissenschaften
acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften
Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften
(für die Union der deutschen Akademien der Wissenschaften)

Konzept für ein integriertes Energieforschungsprogramm für Deutschland

<http://www.acatech.de/>

Forschungspotentiale

Modul 1: Erneuerbare Energien

Modul 2: Fossile Energien

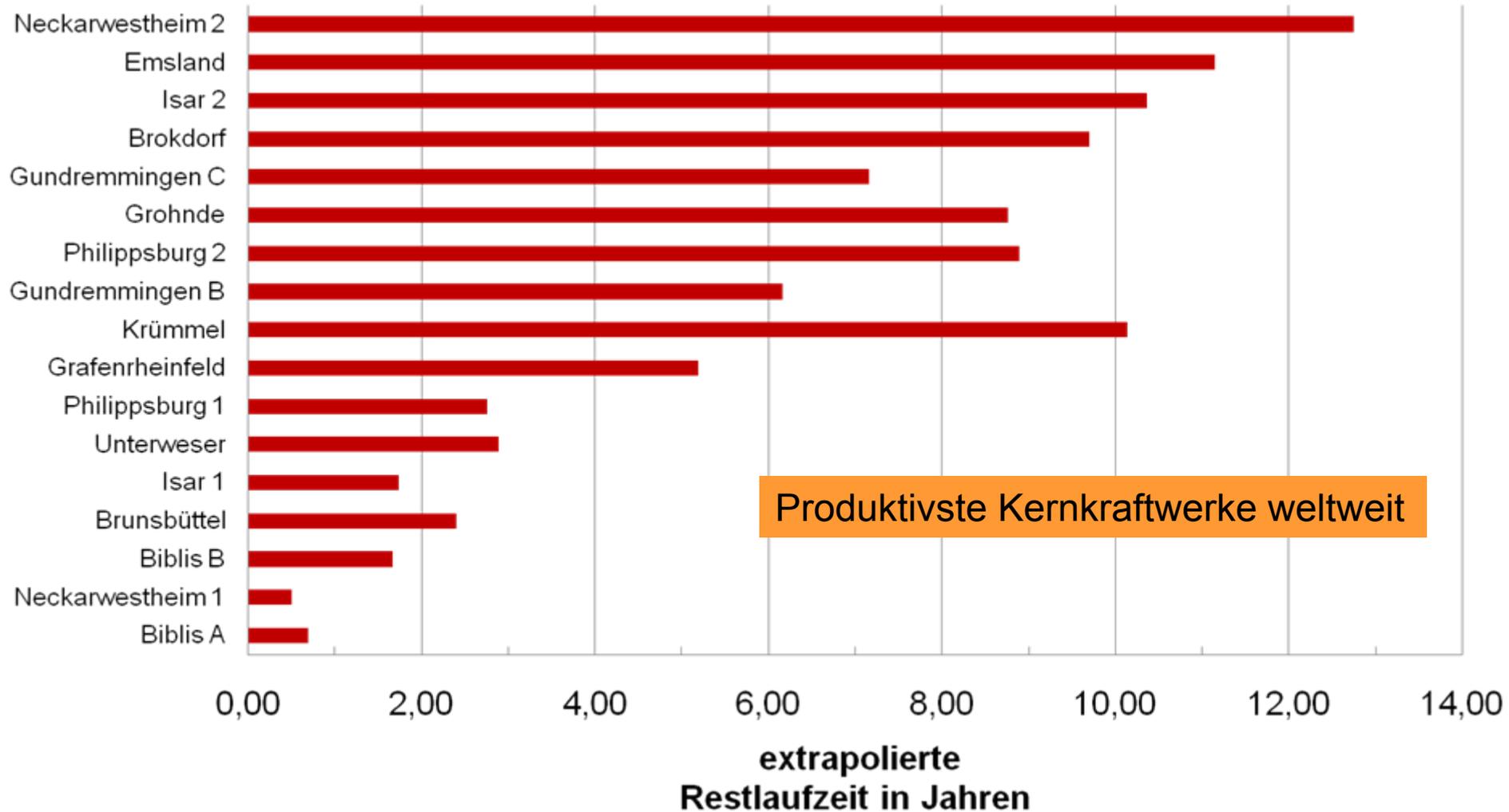
Modul 3: Kernenergie

Quelle: acatech
Konzept
für ein integriertes
Energieforschungsprogramm
für Deutschland

Modul 3: Kernenergie

Deutschland hat – im Gegensatz zu den meisten anderen europäischen Staaten – den Ausstieg aus der Kernenergie beschlossen. Im Zuge dieses Beschlusses wurde auch die restliche Forschungsförderung mit Bundesmitteln zur nuklearen Sicherheits- und Endlagerforschung auf ein Minimum reduziert. Auch wenn Deutschland an diesem Beschluss festhalten und die Kernkraftwerke in den nächsten ca. 15 Jahren stilllegen sollte, ist ein hoher zusätzlicher **Forschungsbedarf** zu den Themenbereichen **nukleare Sicherheit, Endlagerung und Strahlenforschung** unabdingbar. Die sehr hohen deutschen Sicherheitsstandards weiterzuentwickeln und in die Entwicklung, den Betrieb und den Bau künftiger Kernkraftwerke andernorts auf der Welt einfließen zu lassen ist im allgemeinen Interesse wie im nationalen Eigeninteresse.

Restlaufzeiten der deutschen Kernkraftwerke



Abgebrannter Kernbrennstoff aus Kernkraftwerken weltweit

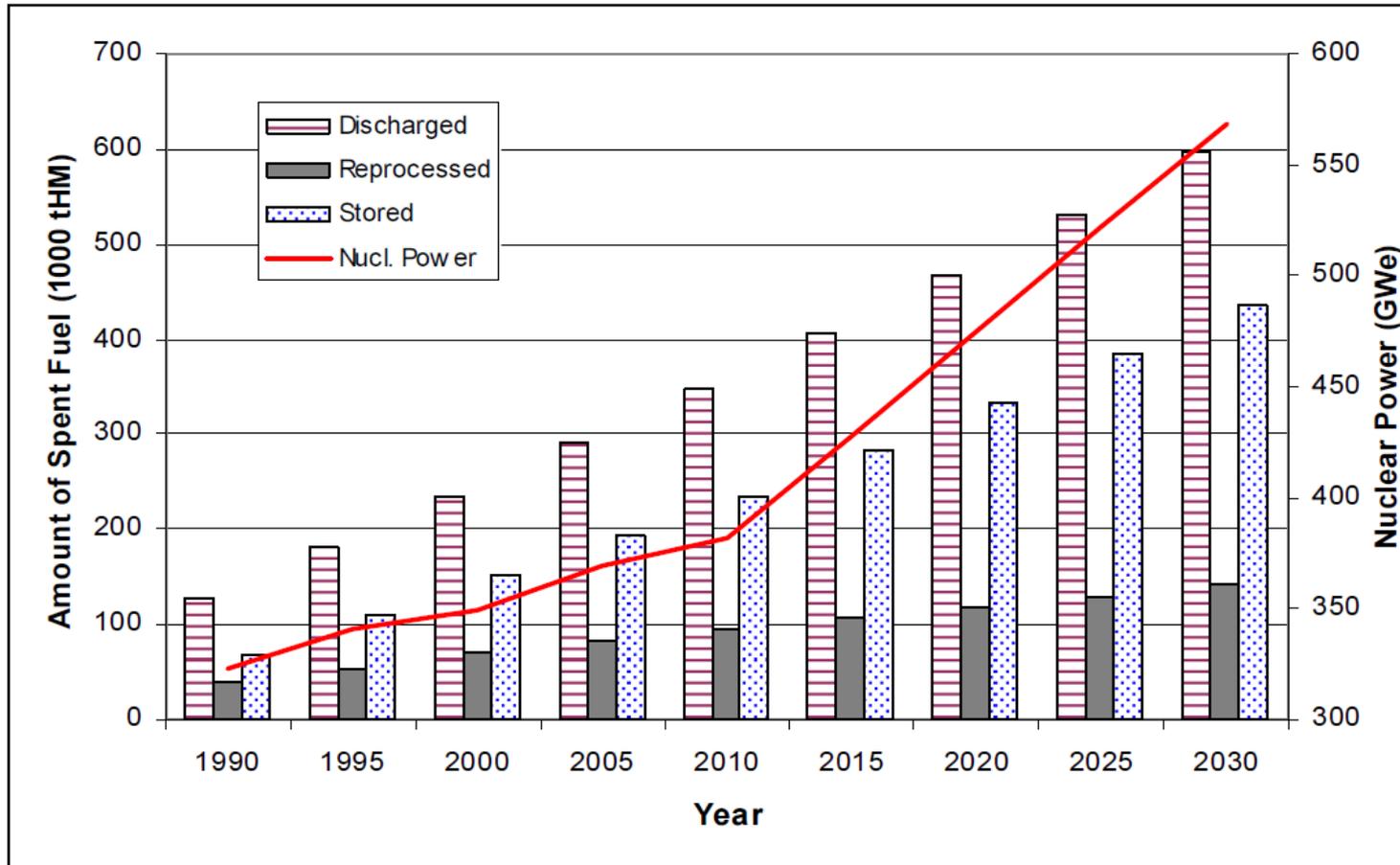
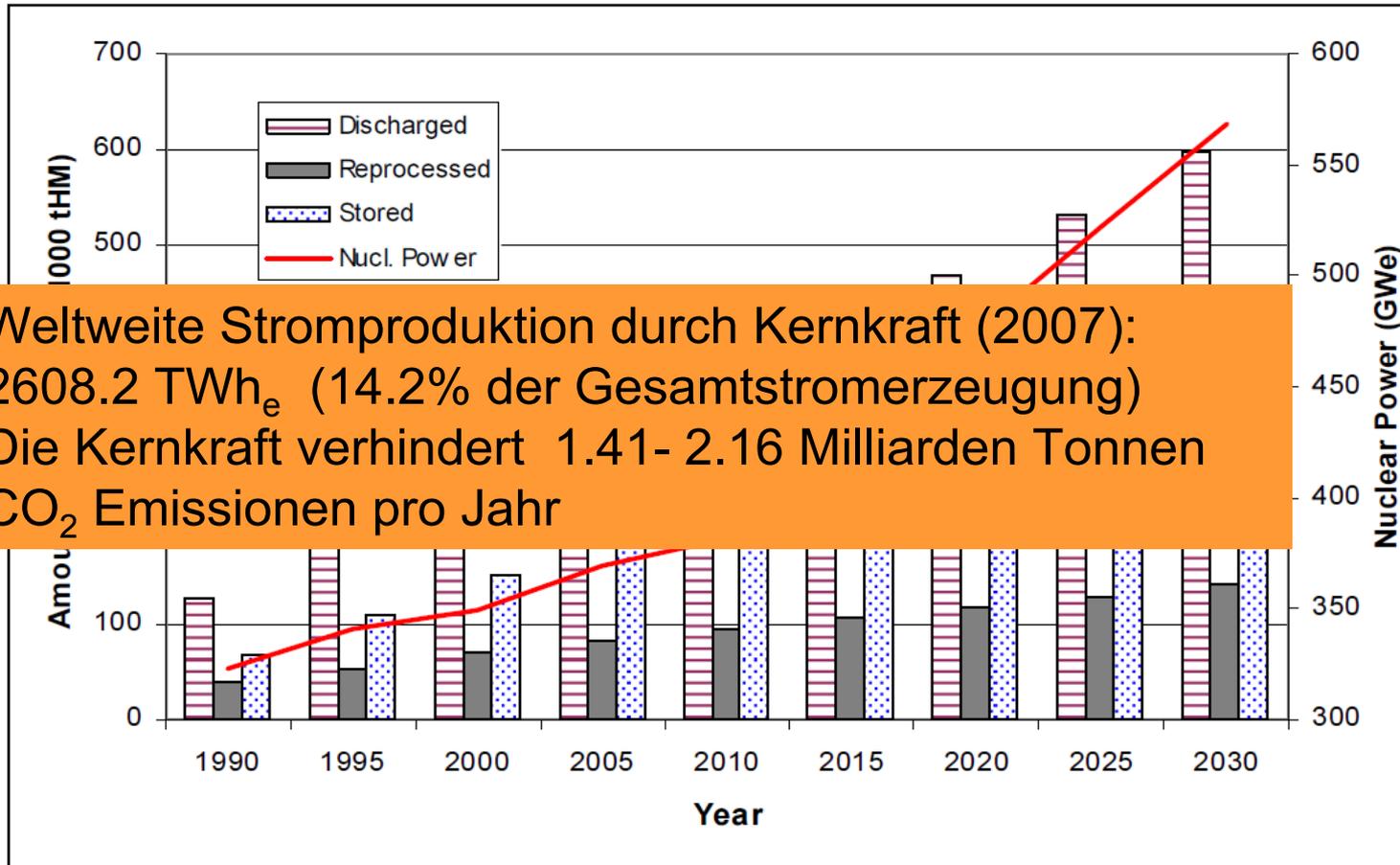


Fig. 14. Cumulative spent fuel discharged, stored and reprocessed from 1990 to 2030.

Quelle: IAEA-TECDOC-1613, April 2009

basierend auf dem Median der IAEA-RDS-1 Kernenergie-Zukunftsabschätzung

Abgebrannter Kernbrennstoff aus Kernkraftwerken weltweit



Weltweite Stromproduktion durch Kernkraft (2007):
 2608.2 TWh_e (14.2% der Gesamtstromerzeugung)
 Die Kernkraft verhindert 1.41- 2.16 Milliarden Tonnen
 CO₂ Emissionen pro Jahr

Fig. 14. Cumulative spent fuel discharged, stored and reprocessed from 1990 to 2030.

Quelle: IAEA-TECDOC-1613, April 2009

basierend auf dem Median der IAEA-RDS-1 Kernenergie-Zukunftsabschätzung

Anfall und Entsorgung von abgebranntem Kernbrennstoff

Anfall in Europa:

Kernreaktoren:	145
Leistung:	125 GWe
Abgebr. Brennstoff	2500 t/a

Entsorgung:

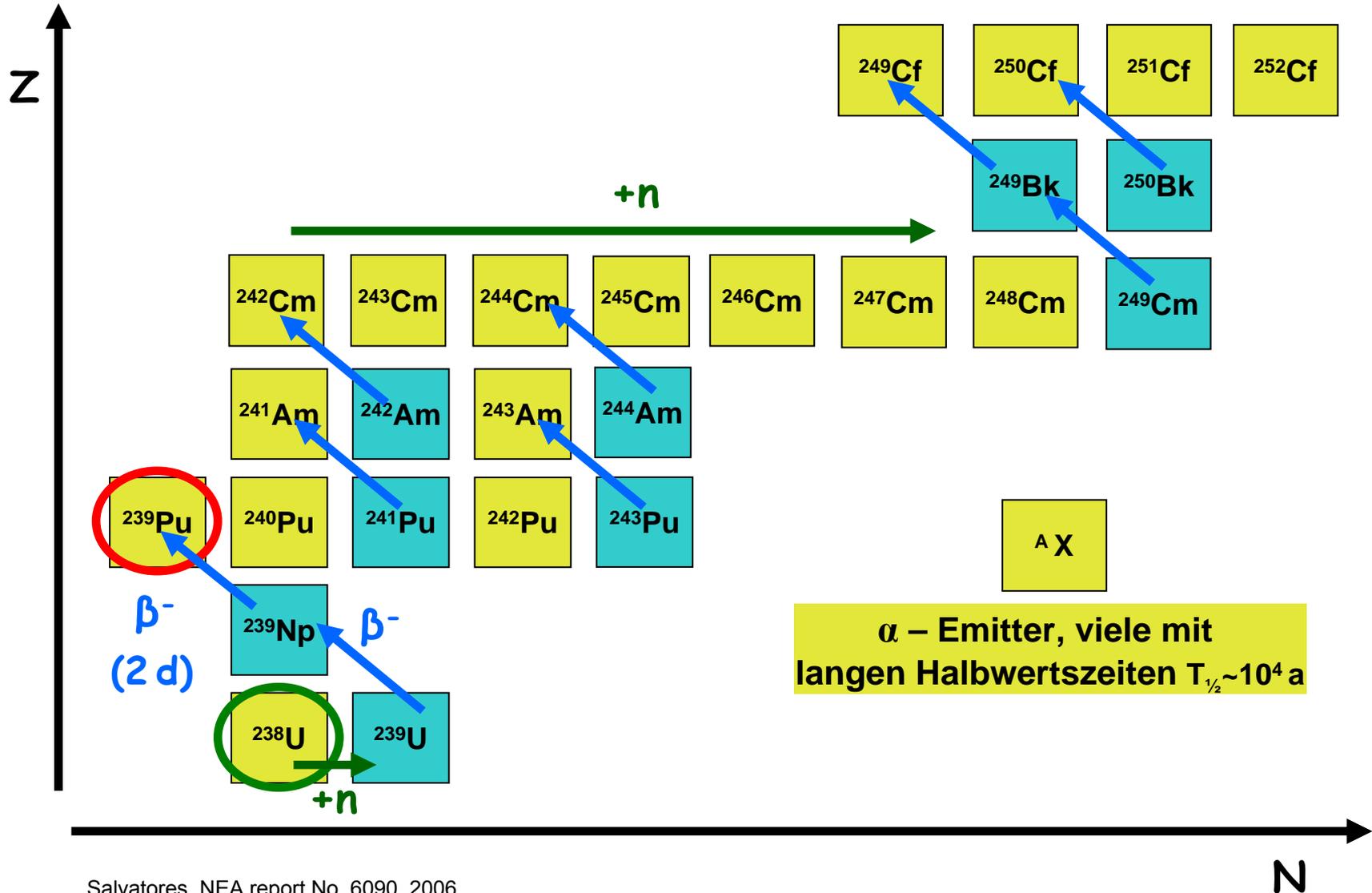
Wiederaufarbeitung:

Abtrennung von Uran und Plutonium
 Endlagerung von verglastem
 hochradioaktivem Abfall
 (Spaltprodukte, minore Aktiniden)

Direkte Endlagerung:

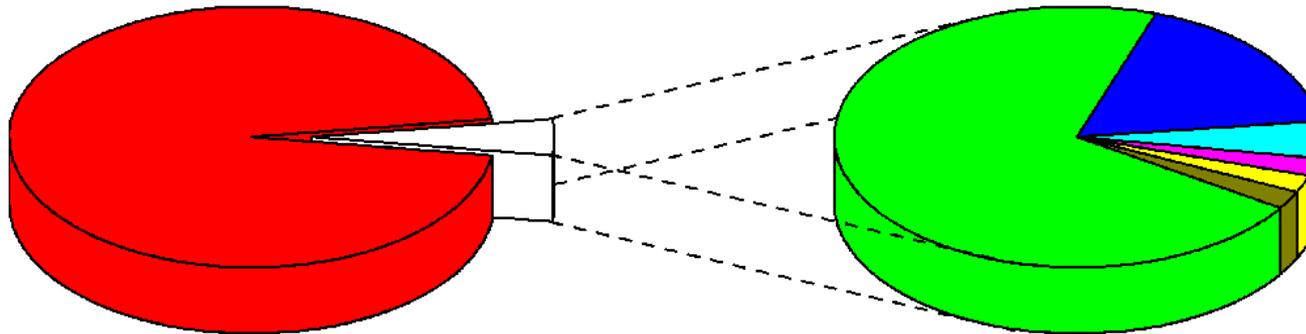
Zwischen- und Endlagerung der
 abgebrannten Brennelemente.
 Endlager sind noch nicht in Betrieb,
 nur in Planung.

Bildung von minoren Aktiniden im U-Pu Zyklus (thermische Neutronen)



Salvatores, NEA report No. 6090, 2006

Abgebrannter Kernbrennstoff (SNF) 33 GWd/t 10 a Abklingen



- Uran (95,5 %)
- stabile Spaltprodukte (3,2 %)
- Plutonium (0,8 %)
- kurzlebige Cs und Sr (0,2 %)
- minore Actinide (0,1 %)
- langlebige I und Tc (0,1 %)
- andere langlebige Spaltprodukte (0,1 %)

Häufigster Bestandteil: ^{238}U
 Spaltprodukte und Minore Aktiniden $\approx 1 \text{ kg / t}$

1 tonne of SNF contains:
 955.4 kg U
 8.5 kg Pu

Minor actinides (MAs)
 0.5 kg ^{237}Np
 0.6 kg Am
 0.02 kg Cm

Long-lived fission products (LLFPs)
 0.2 kg ^{129}I
 0.8 kg ^{99}Tc
 0.7 kg ^{93}Zr
 0.3 kg ^{135}Cs

Short-lived fission products (SLFPs)
 1 kg ^{137}Cs
 0.7 kg ^{90}Sr

Stable isotopes
 10.1 kg lanthanides
 21.8 kg other stable

Hochradioaktiver Abfall aus deutschen Kernkraftwerken

- 01.07.2005 Verbot der Aufarbeitung bestrahlter Kernbrennstoffe (Atomgesetz)
- 01.01.2022 Voraussichtliches Ende der Kernenergieproduktion in Deutschland

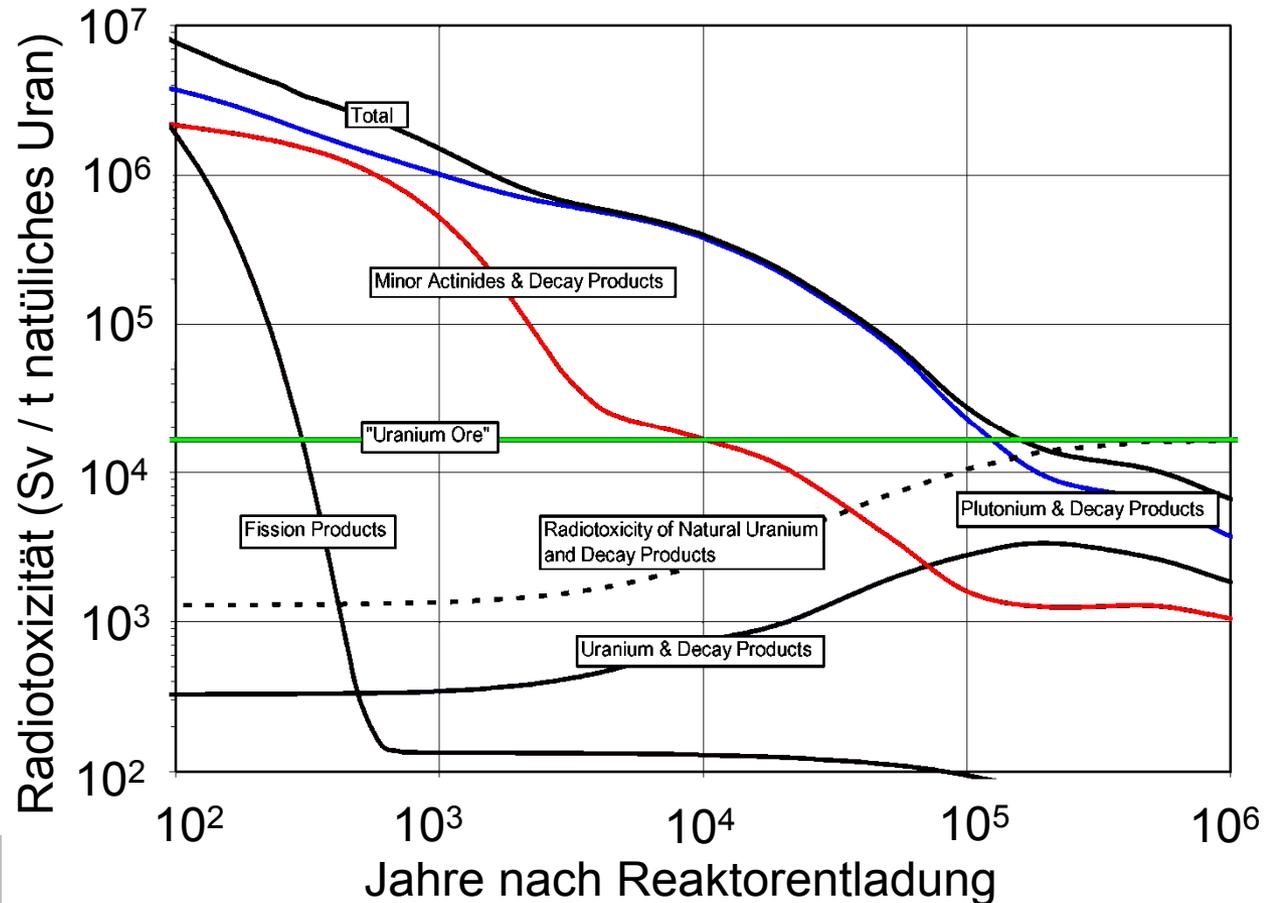
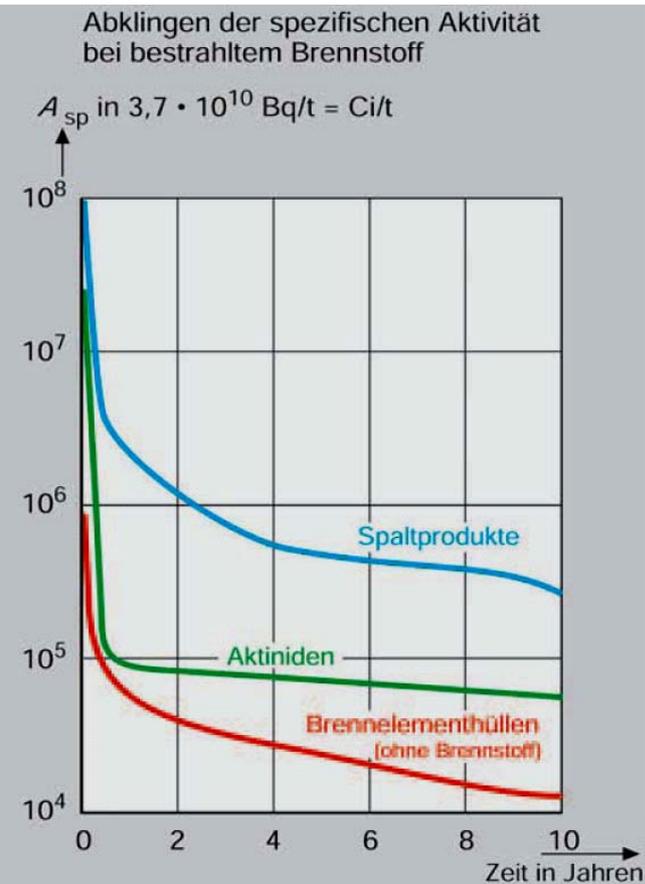
Quantity	PWRUOX	PWRMOX	BWRUOX	BWRMOX	Total SF	HLW
Total (t)	5350	773	3470	246	9840	215.0
U (t)	5060	702	3310	227	9290	0.7
Pu (t)	51.7	34.3	32.9	7.95	127	0.2
Np (t)	3.6	0.234	2.16	0.0497	6.04	2.9
Am (t)	4.6	4.96	3.48	1.17	14.2	3.6
Cm (t)	0.23	0.226	0.148	0.0644	0.669	0.1

Quelle: M. Salvatores, et al., NFCSim Scenario Studies of German and European Reactor Fleets, 2004

SF = Verbrauchter Kernbrennstoff (spent nuclear fuel)

HLW = Hochradioaktiver Abfall (Spaltprodukte,...) (high level waste)

Radiotoxizität abgebrannten Kernbrennstoffs



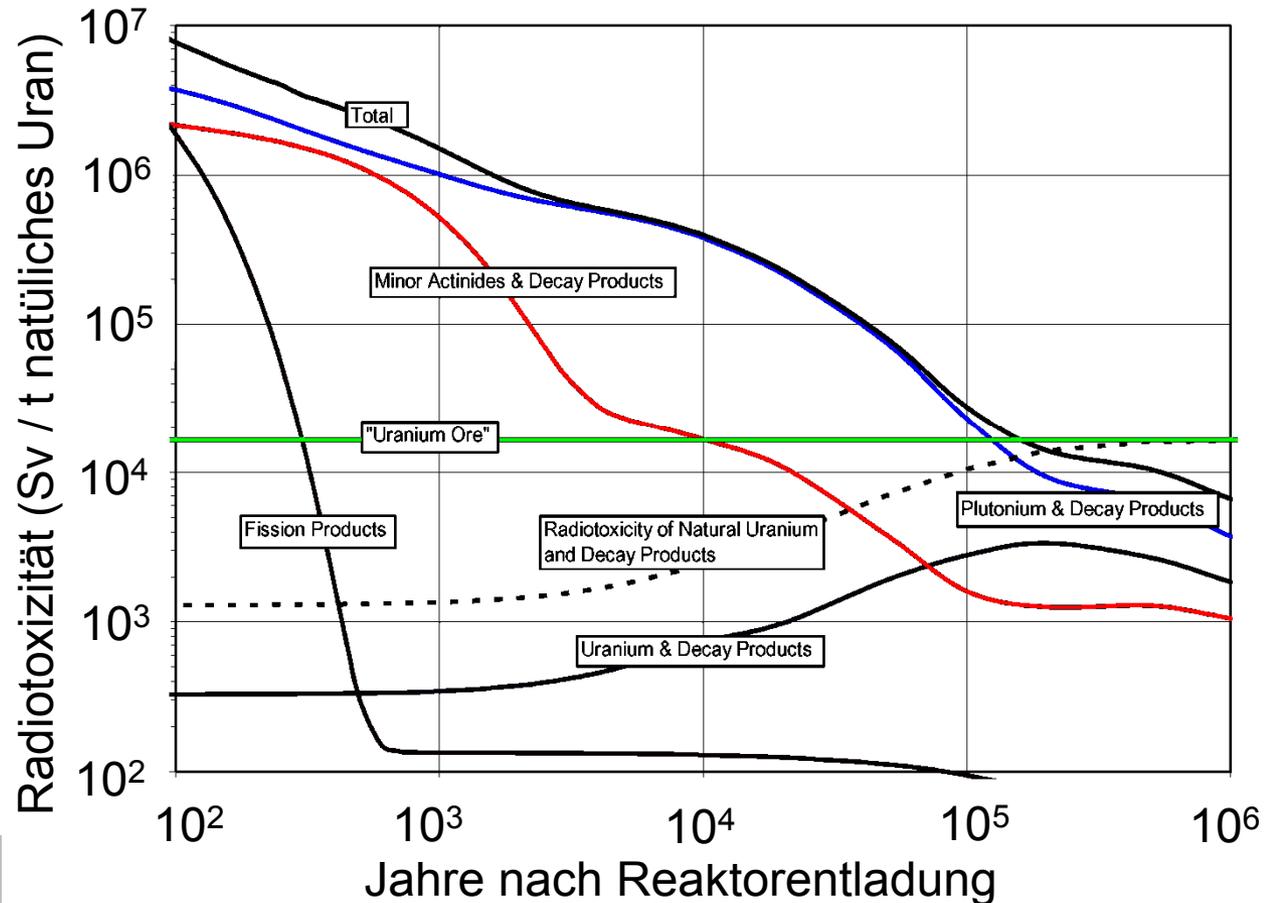
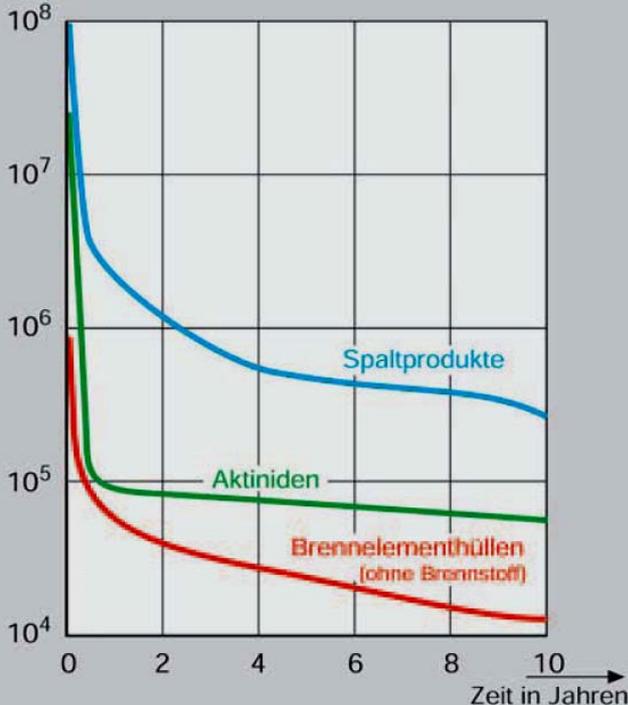
Salvatores, NEA report No. 6090, 2006

Bezugspunkt: Radiotoxizität des natürlichen Urans, das zur Herstellung von 1 t angereicherten U-Kernbrennstoffs benötigt wird (4.2% ^{235}U) (7.83 t nat. U) Im Gleichgewicht mit seinen Zerfallsprodukten $1.47 \cdot 10^5$ Sv

Radiotoxizität abgebrannten Kernbrennstoffs

Abklingen der spezifischen Aktivität bei bestrahltem Brennstoff

A_{sp} in $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq/t = Ci/t



Die langlebige Radiotoxizität wird durch Plutonium und die minoren Aktiniden dominiert. Die kurzlebige Radiotoxizität durch die Spaltprodukte. Es gibt so gut wie keine Spaltprodukte mit Halbwertszeiten $30 \text{ a} < t_{1/2} < 10^5 \text{ a}$ (ausser den unbedeutenden Nukliden ^{79}Se , ^{151}Sm , ^{166m}Ho)

Endlagerung und Transmutation

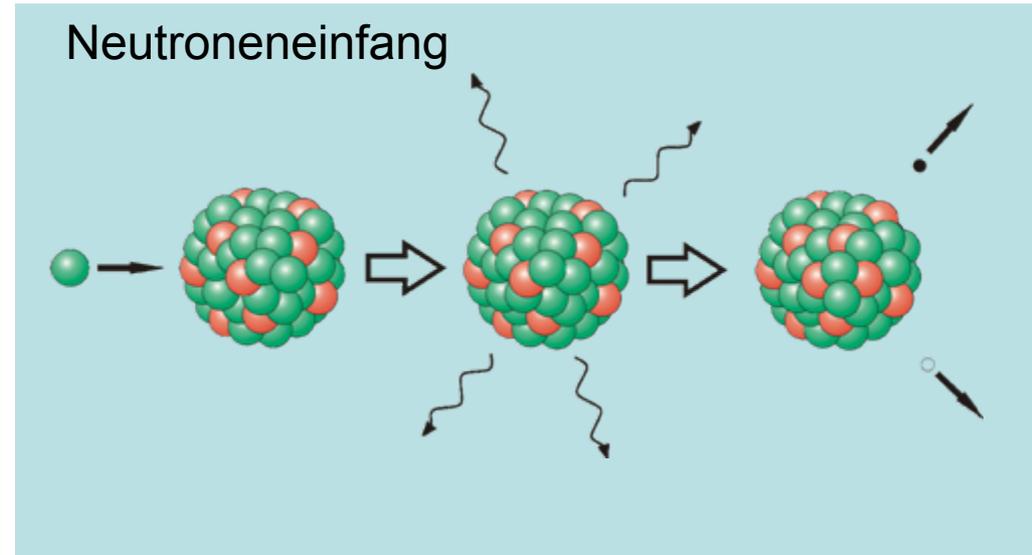
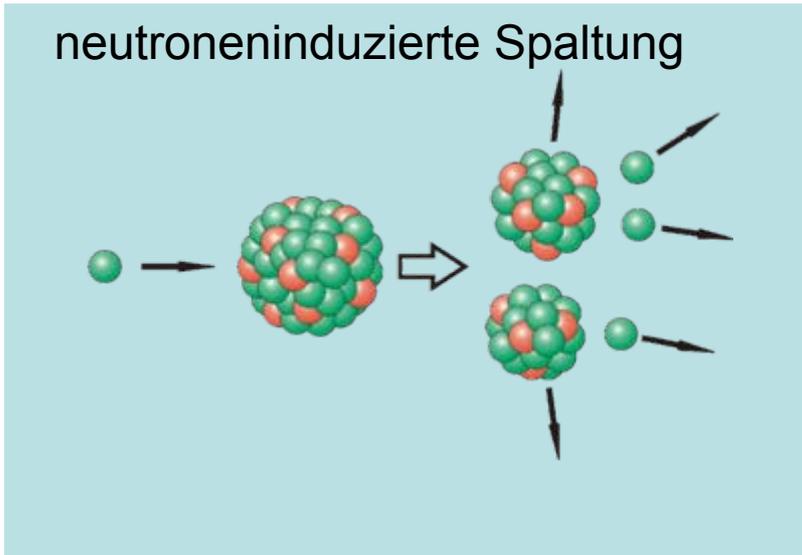
Fragestellung:

Sichere Endlagerung der hochradioaktiven Abfälle für mehr als 100 000 Jahre

Ziel:

- Minimierung der langlebigen radioaktiven Abfälle
(Plutonium und minore Aktiniden, langlebige Spaltfragmente)
- Transmutation in kurzlebigeren Nuklide

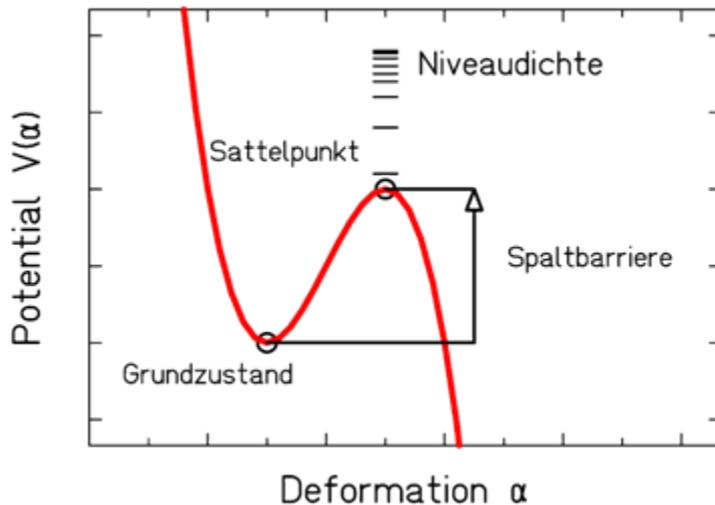
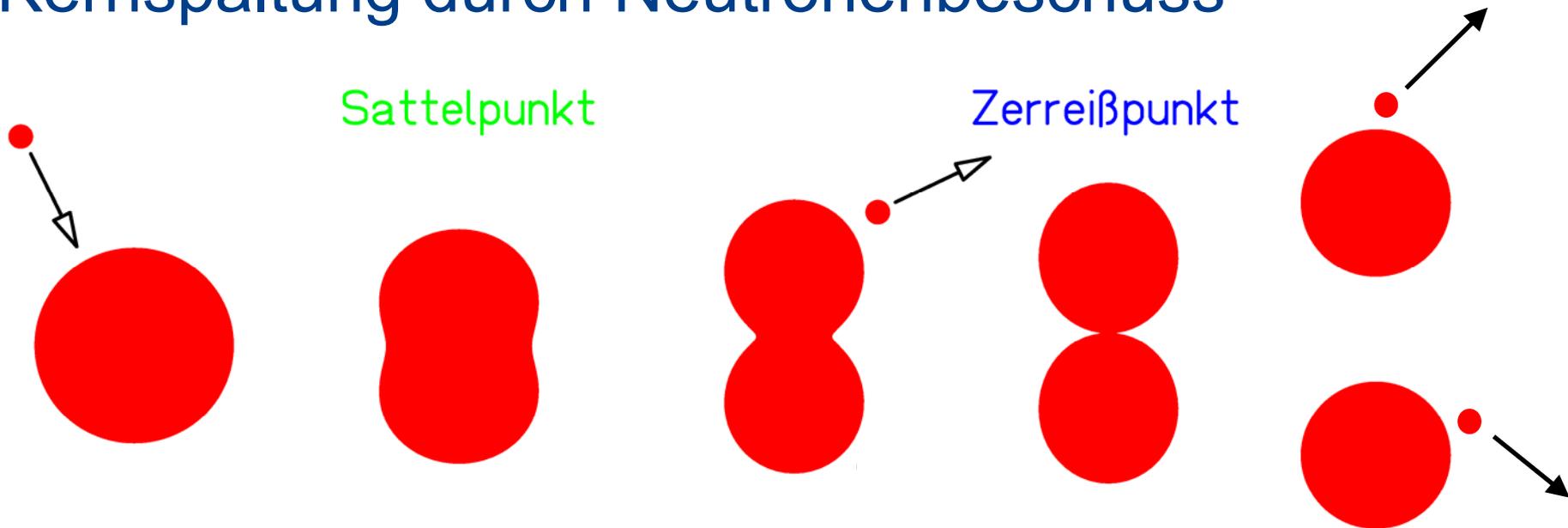
Transmutation von schweren Atomkernen



Neutronenbeschuss \rightarrow Spaltung schwerer Atomkerne \rightarrow Spaltprodukte meist kurzlebig

Neutronenbeschuss \rightarrow Einfang von Neutronen \rightarrow Bildung einen langlebigen Endkerns.

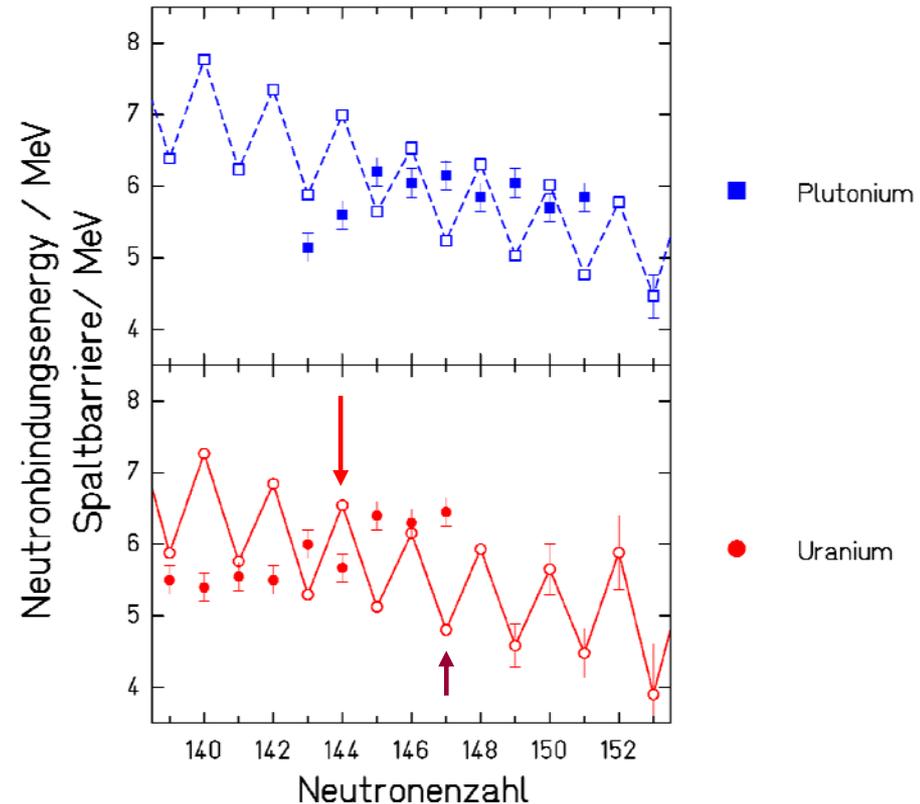
Kernspaltung durch Neutronenbeschuss



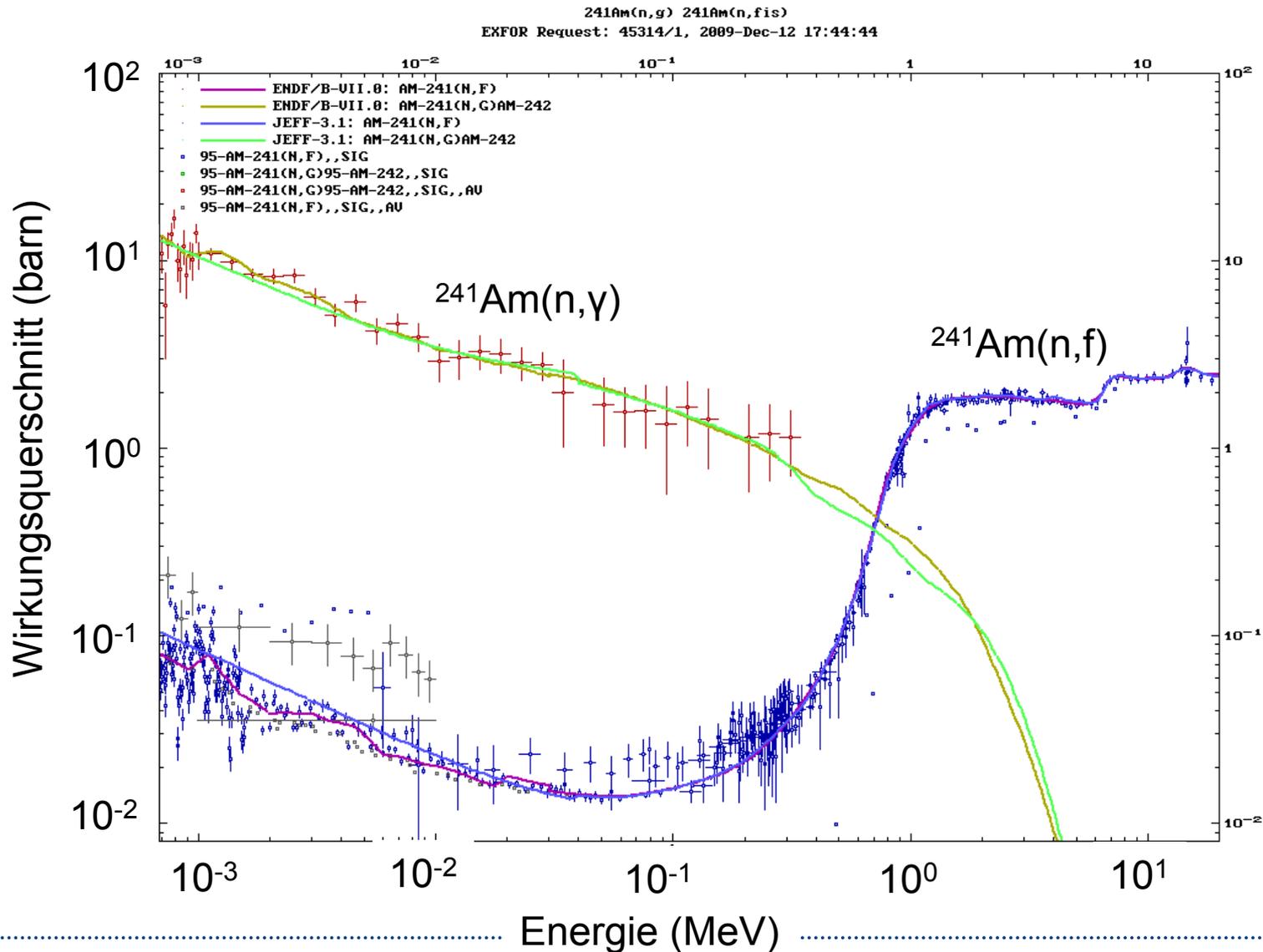
- Neutronenbeschuss → angeregter Atomkern
- Atomkern deformiert sich (Schwingungen)
Grundzustand → Sattelpunkt (N. Bohr, 1939)
- Deformation verbraucht Energie bis bis zum Sattelpunkt: Spaltbarriere
- Weitere Deformation führt zur Kernspaltung
→ Spaltfragmente plus Neutronen

Spaltbarkeit schwerer Kerne

- Oberhalb der Spaltbarriere kann Kernspaltung stattfinden.
 - Neutronenbindungsenergie bei Kernen mit gerader Neutronenanzahl N höher als bei ungeradem N
 → Gerade-Ungerade Effekt
 - $^{235}\text{U} + n$ ($N = 143+1$)
 Spaltbarriere niedriger als Neutronenbindungsenergie → Spaltung durch langsame Neutronen
 - $^{238}\text{U} + n$ ($N = 146+1$)
 Spaltbarriere höher als Neutronenbindungsenergie
 Spaltung nur durch schnelle Neutronen
- Ausreichend schnelle Neutronen können alle schweren Kerne spalten.



Neutroneneinfang – Neutroneninduzierte Spaltung



Thermisches vs. Schnelles Neutronenspektrum

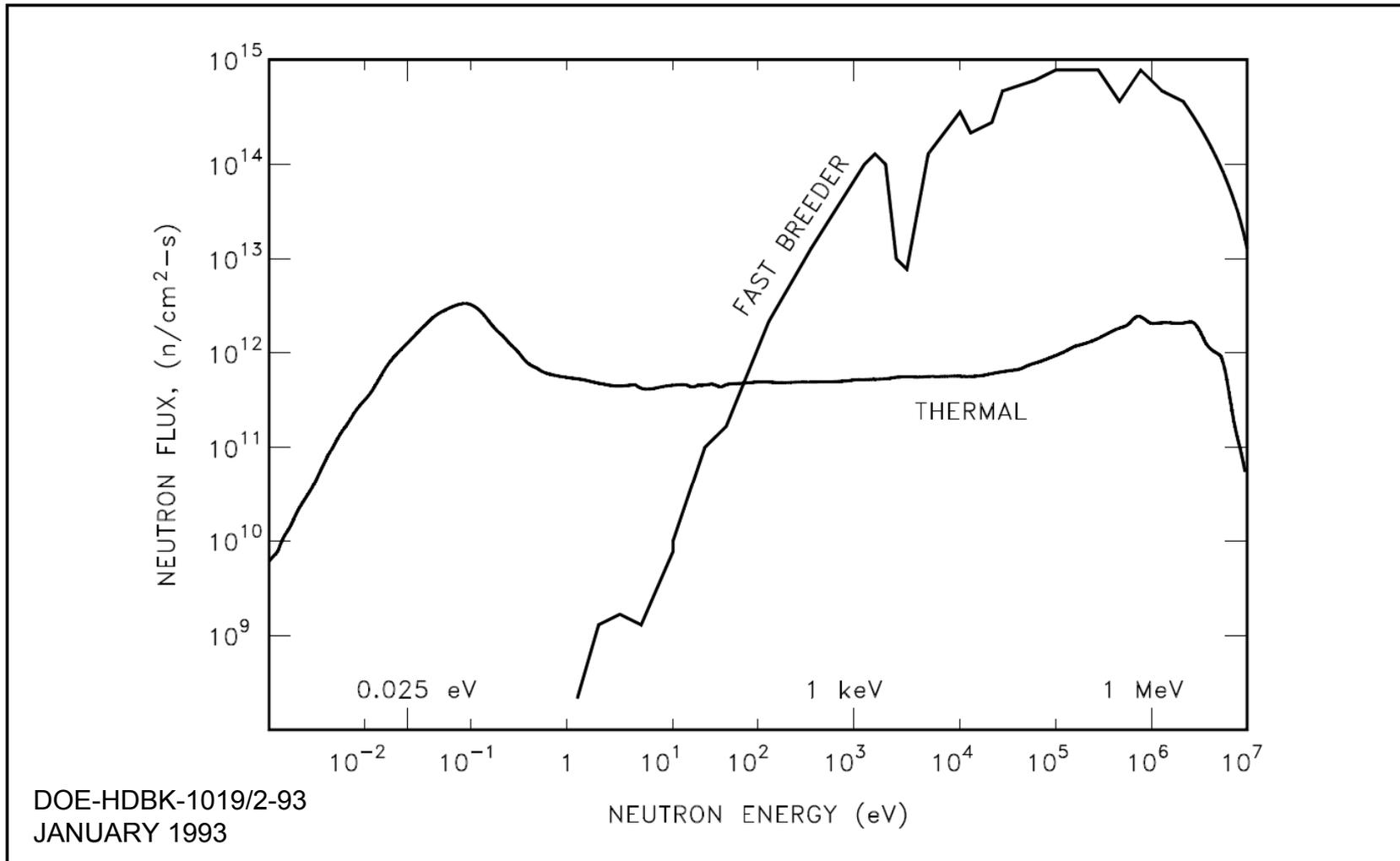


Figure 3 Comparison of Neutron Flux Spectra for Thermal and Fast Breeder Reactor

Thermisches vs. Schnelles Neutronenspektrum

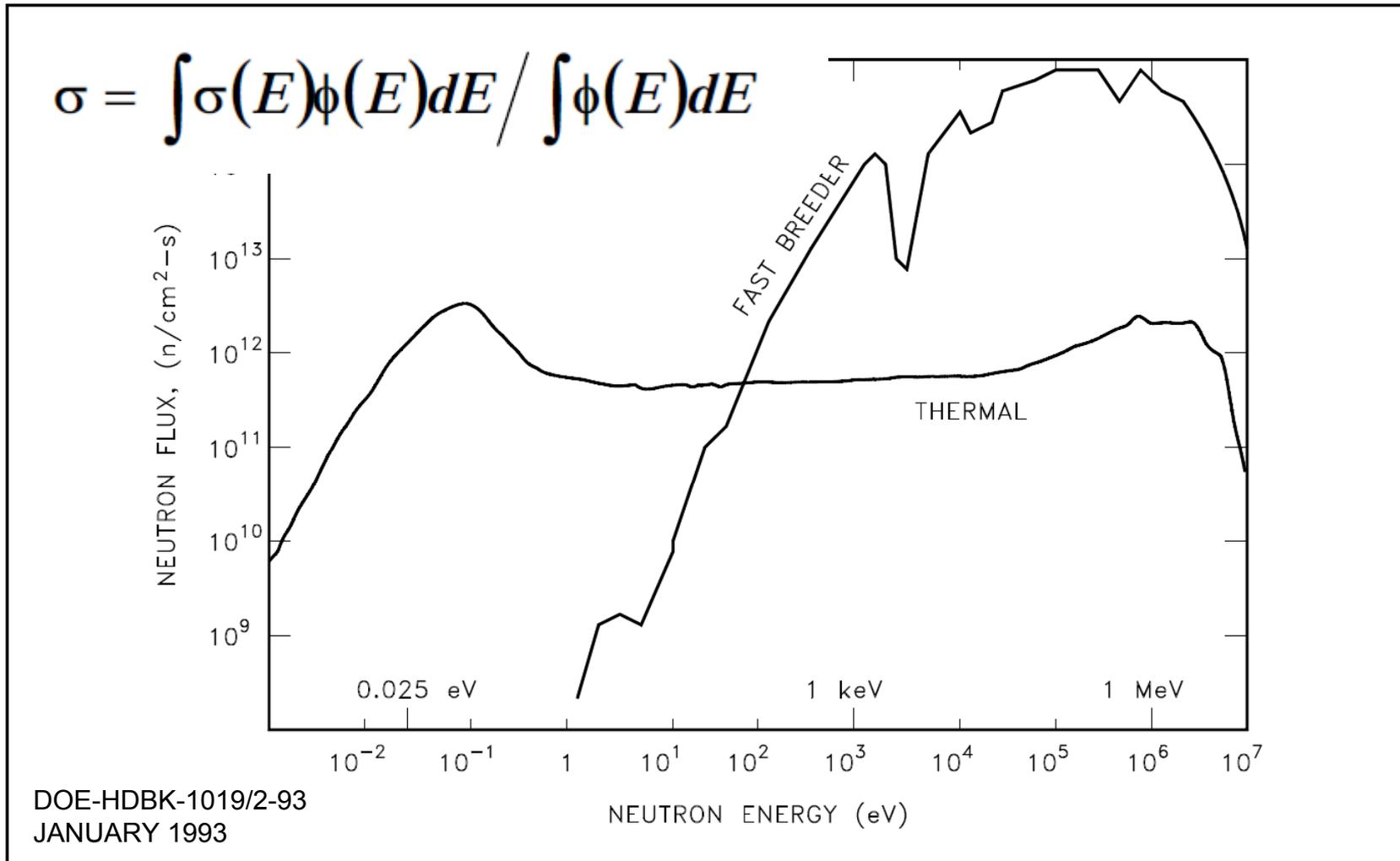
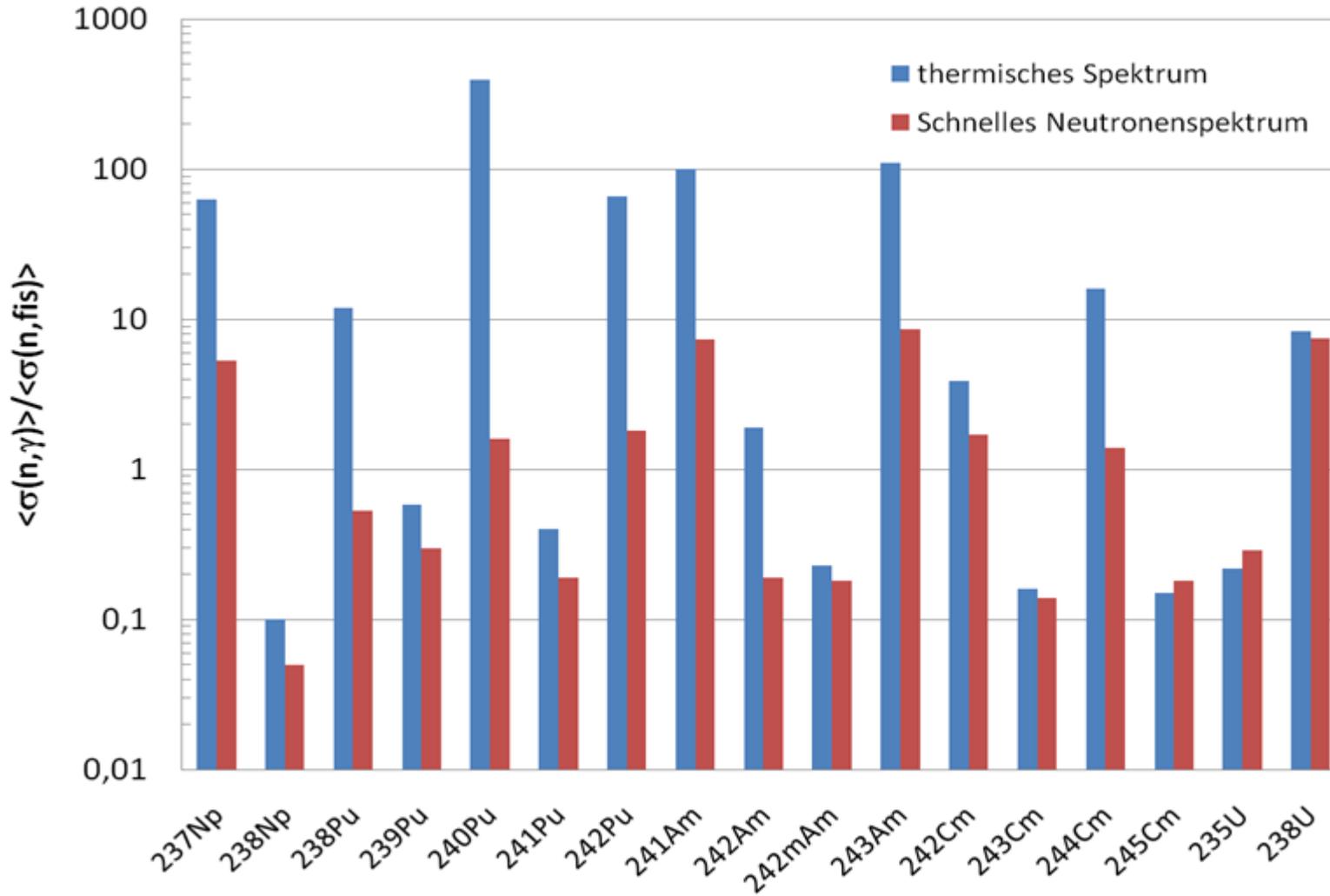


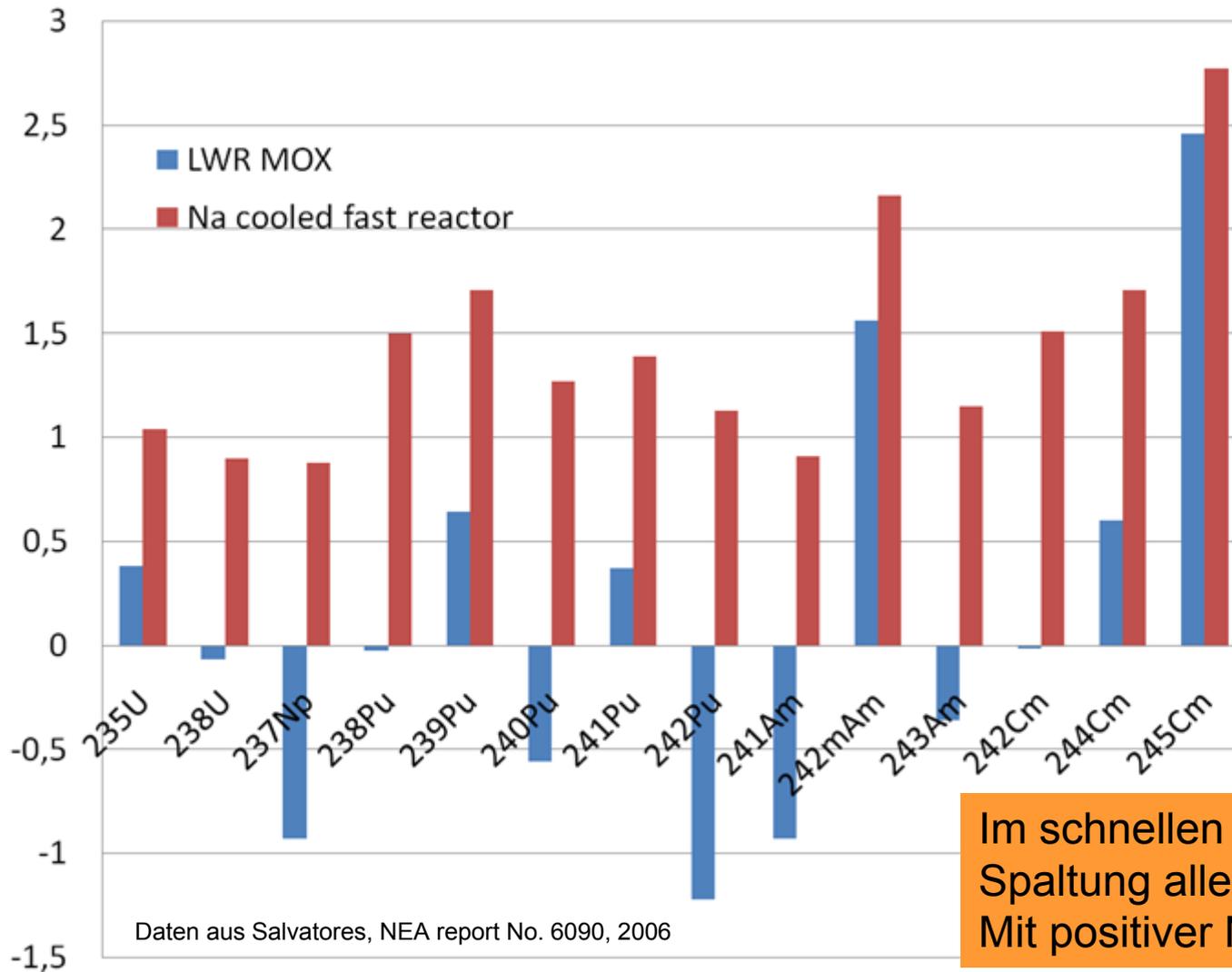
Figure 3 Comparison of Neutron Flux Spectra for Thermal and Fast Breeder Reactor

Verhältnis Neutroneneinfang / Spaltung



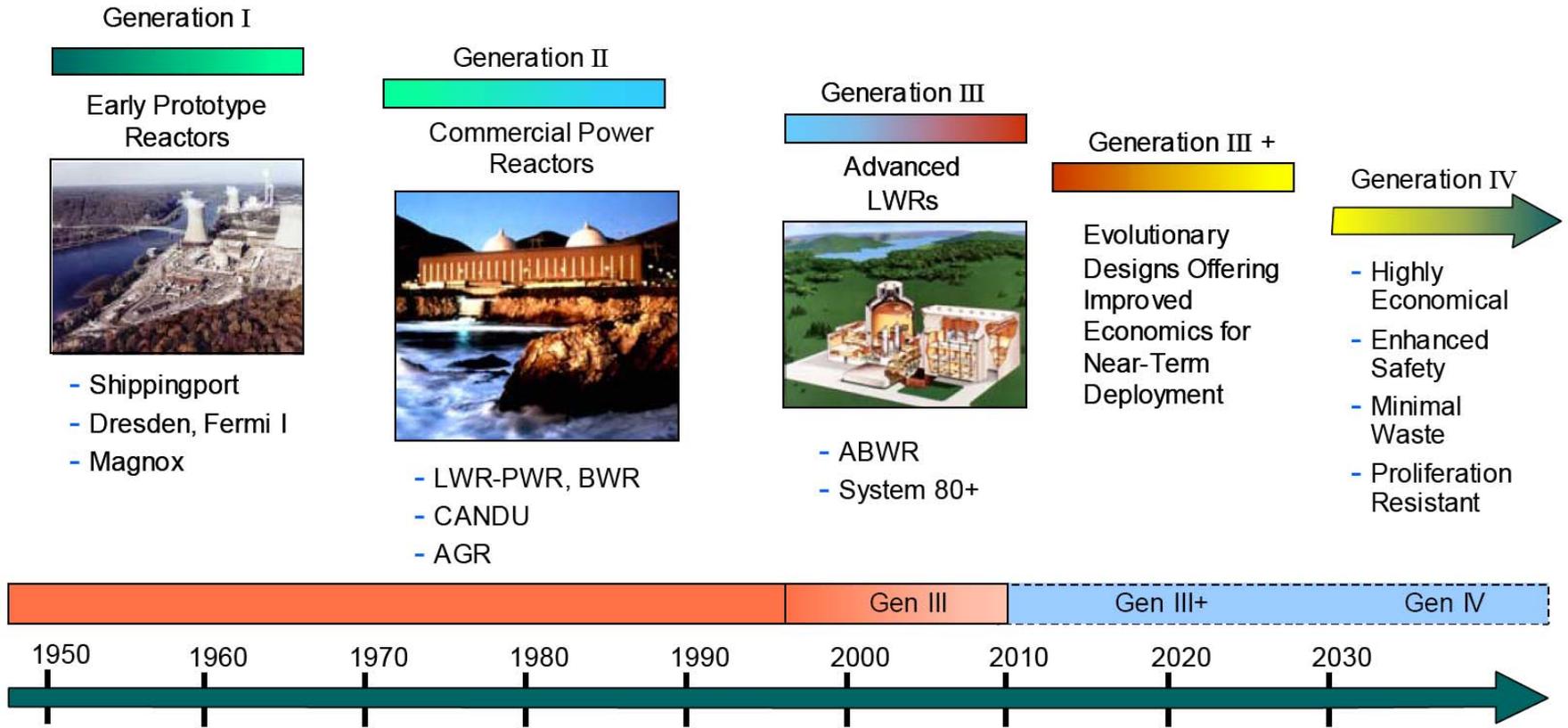
Daten aus Salvatores, NEA report No. 6090, 2006

Neutronbilanz / Spaltung



Im schnellen Neutronenspektrum
Spaltung aller Minoren Aktiniden
Mit positiver Neutronenbilanz

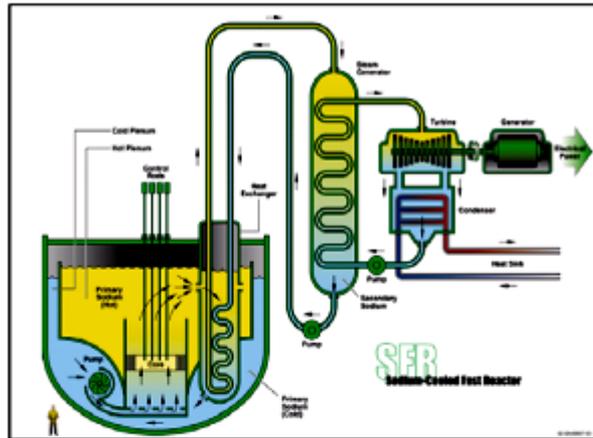
Kernreaktorentwicklung



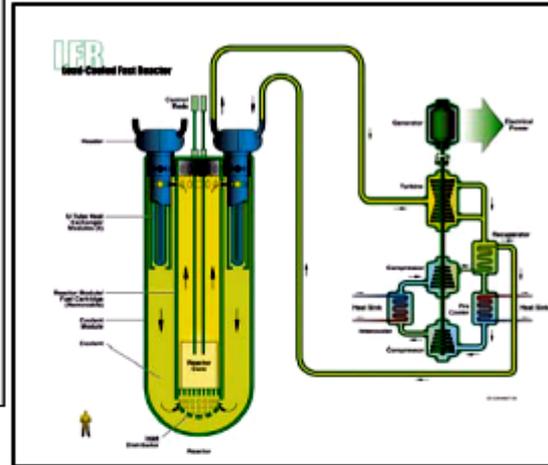
A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems

Zur Zeit genutzte Kernreaktoren gehören zu Generation II
(Finnland: Olkiluoto 3 im Bau gehört zu Generation III EPR)

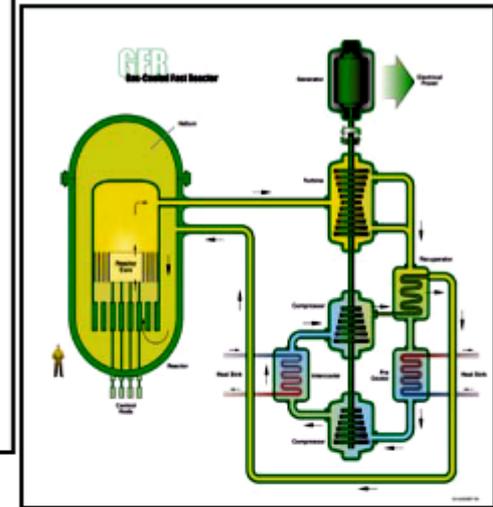
Kernreaktoren der IV. Generation



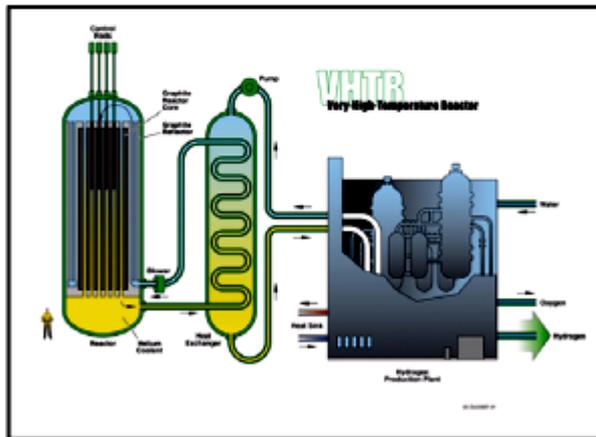
Sodium Fast Reactor



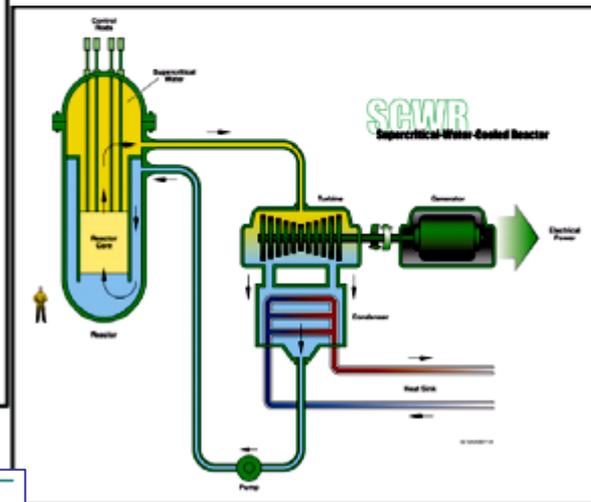
Lead Fast Reactor



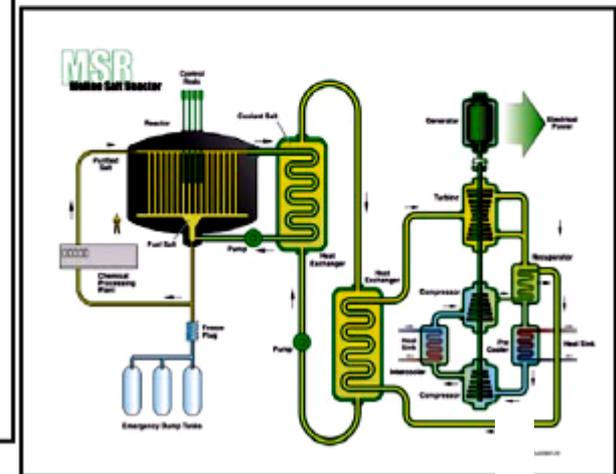
Gas Fast Reactor



Very High Temperature Reactor



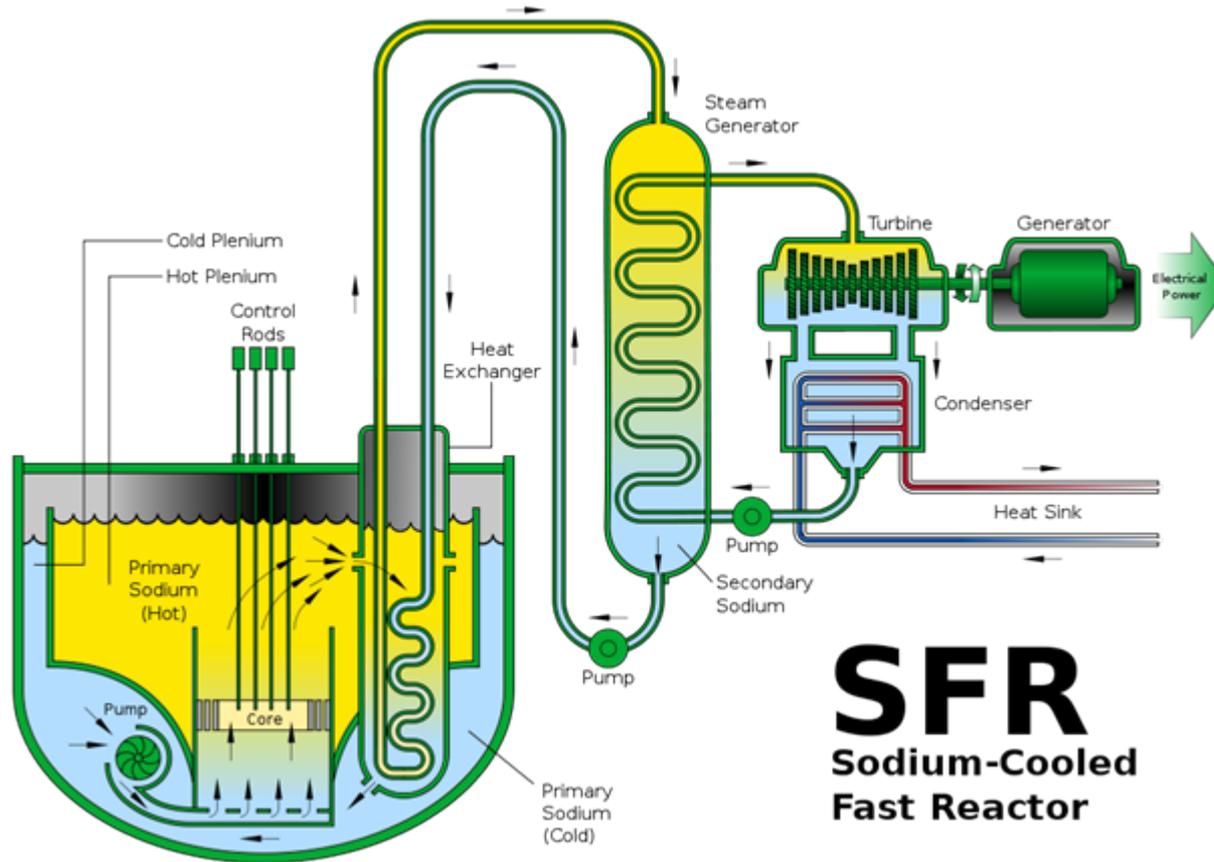
Supercritical Water Reactor



Molten Salt Reactor



Natrium-gekühlter schneller Reaktor



SFR
Sodium-Cooled
Fast Reactor

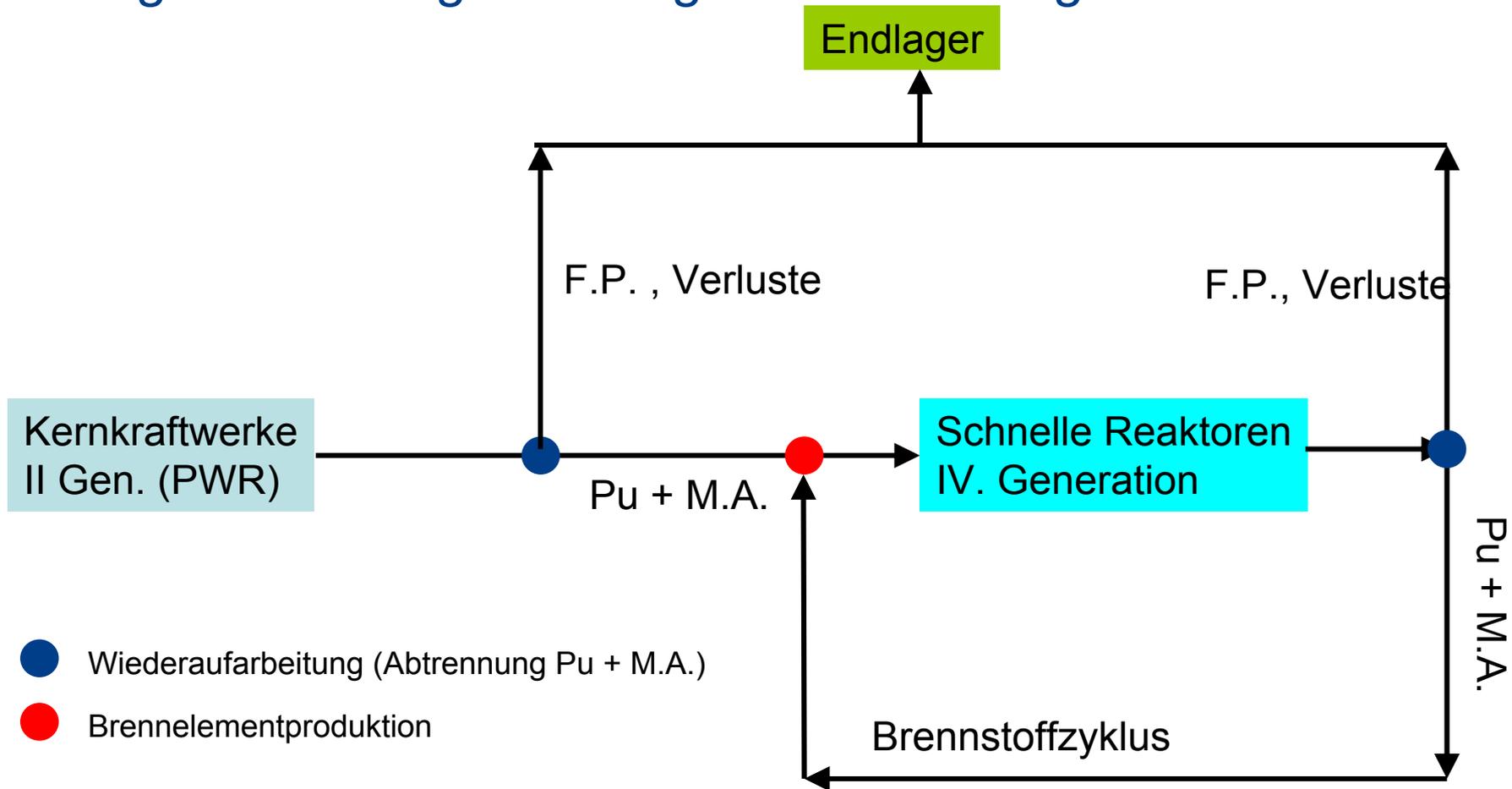
Zur Transmutation:
Pu-M.A.-Zr Brennstoff
Metallische Matrix

Homogenes Recycling von
Pu und M.A.

Pyrometallurgische
Wiederaufarbeitung
(on site)

Transmutationseigenschaften
schon weitgehend untersucht.
Einsetzbar ab
Ca. 2015 (Oxid- Brennstoff)

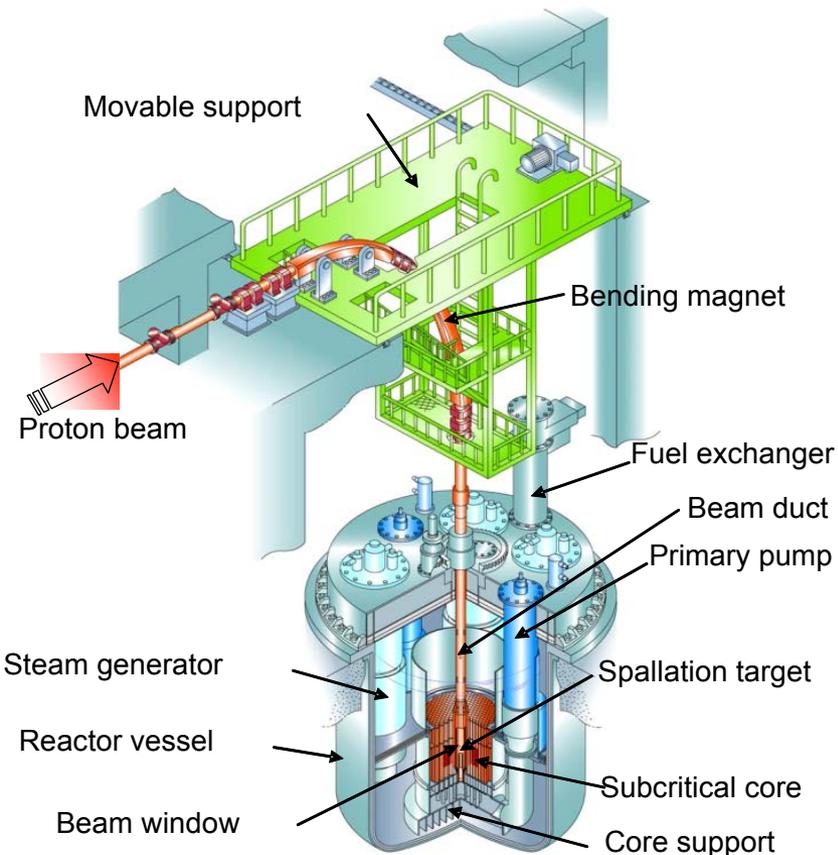
Nachhaltige Kernenergienutzung: Partitionierung & Transmutation



- ➔ Endlagerung von Spaltprodukten (F.P.)
- ➔ Keine Endlagerung von Pu + Minoren Aktiniden (M.A.)
- ➔ homogenes Recycling von Pu + M.A. (Proliferationresistenz)

Quelle: M. Salvatores, Physics and Safety of Transmutation Systems, NEA nuclear science report 6090, 2006

Beschleunigergestützte unterkritische Systeme (ADS)



- Accelerator driven intense thermal neutron source, C.D. Bowman 1992, Energy Amplifier, C. Rubbia, 1995
- Unterkritischer Reaktorkern $k \approx 0.97$
Thermische Leistung: 400 MWt
- Höchstleistungs-Protonenbeschleuniger 800 MeV
ca. 10 mA Strahlstrom **8 MW- Strahlleistung**
- Kühlung durch Pb, Pb/Bi oder Na
- Kritikalität durch Spallationsneutronen
ca. 15-30 n / Proton steuerbar

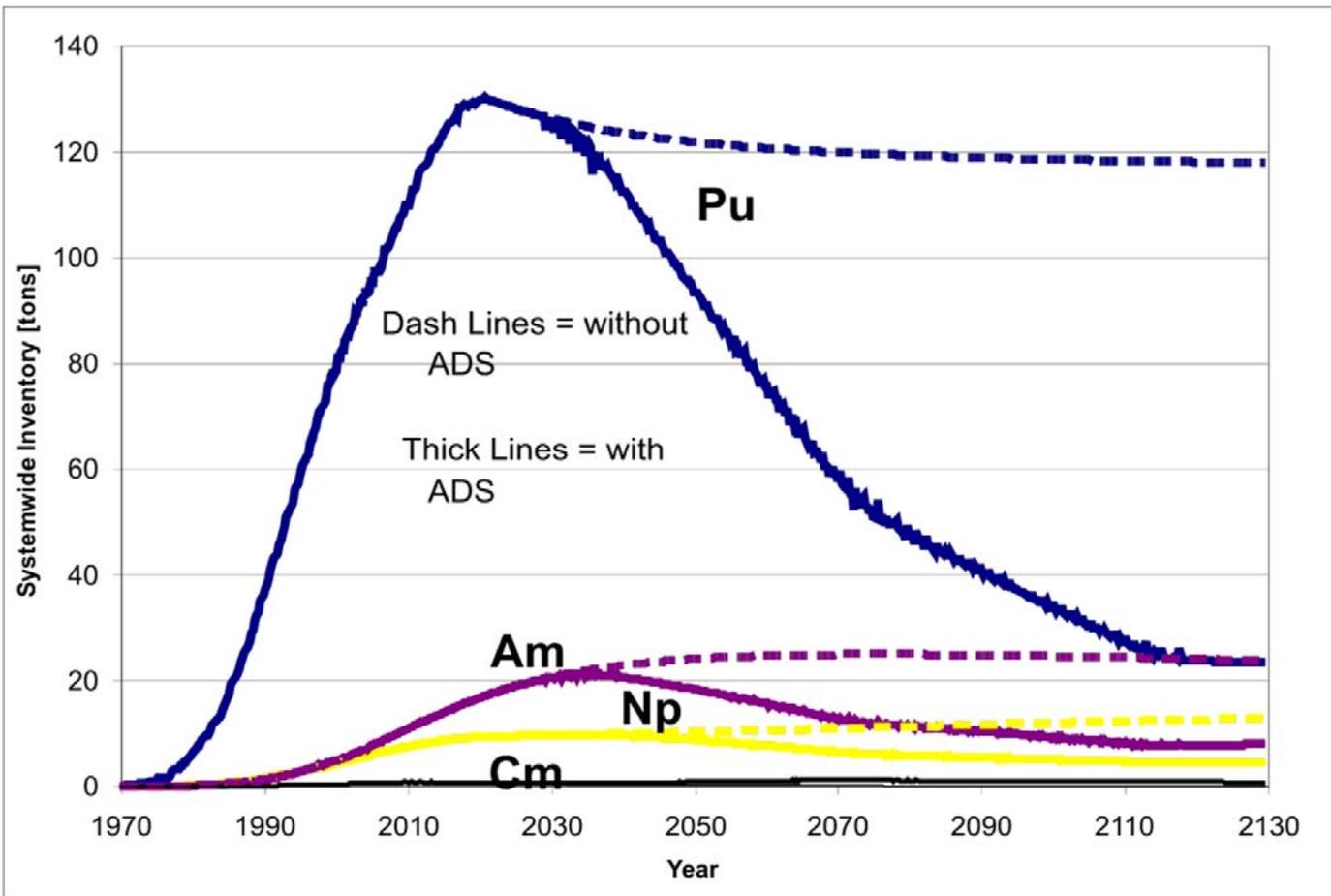
Herausforderungen:

Zuverlässigkeit des Beschleunigers
(Linac, Cyclotron)

Entwicklung des Spallationstargets (Fenster)

Abb. Hiroyuki OIGAWA
Euratom PARTRA Cluster Meeting Karlsruhe
Feb. 2008

ADS Studie zur Transmutation in Deutschland

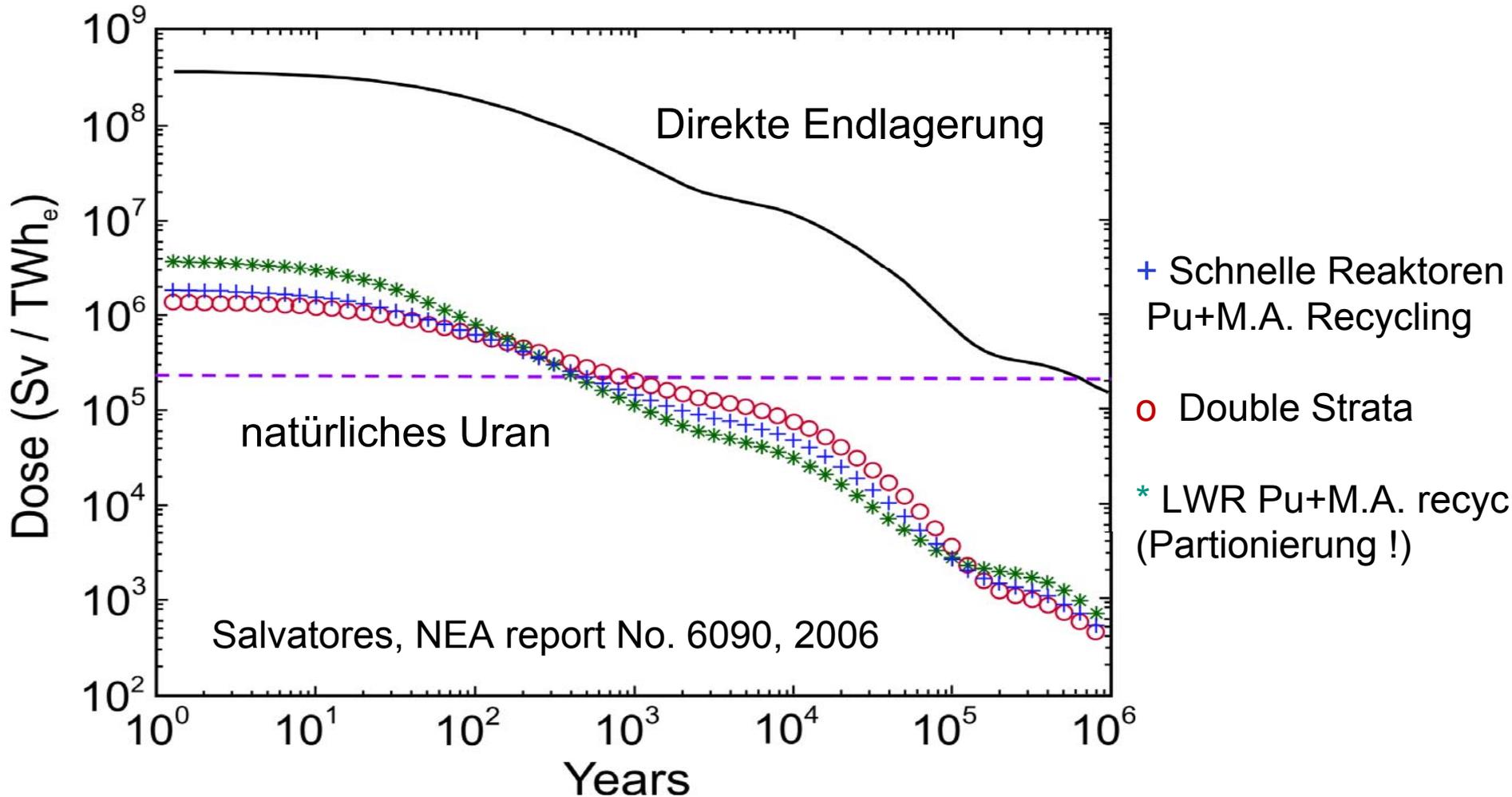


Beginn: 2030
 8 ADS Transmuter
 (840 MWth)
 3 ADS Transmuter

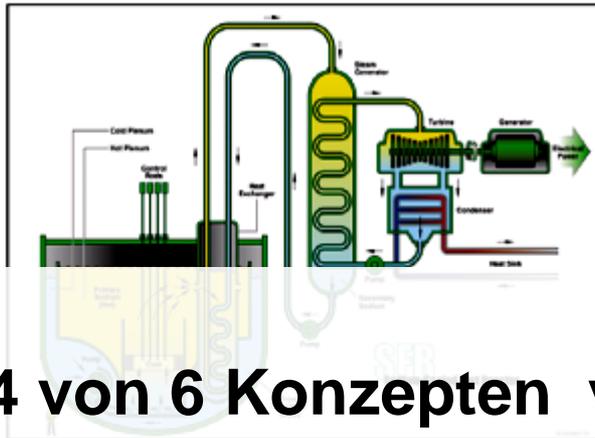
Transmutation
 von 100 t Pu
 und Minoren
 Aktiniden
 In 100 Jahren

Bild: M. Salvatores et al., NEA report 6194, 2009

Transmutation von verbrauchtem Kernbrennstoff



→ Reduktion der Radiotoxizität um Faktor ≈ 100 . Endlagerung nur für ca. 1000 Jahre nötig



Sodium Fast Reactor



Gas-Cooled Fast Reactor

4 von 6 Konzepten verwenden schnelle Neutronen

→ Zur Entwicklung von Transmutationsanlagen werden neutroninduzierte Kerndaten benötigt

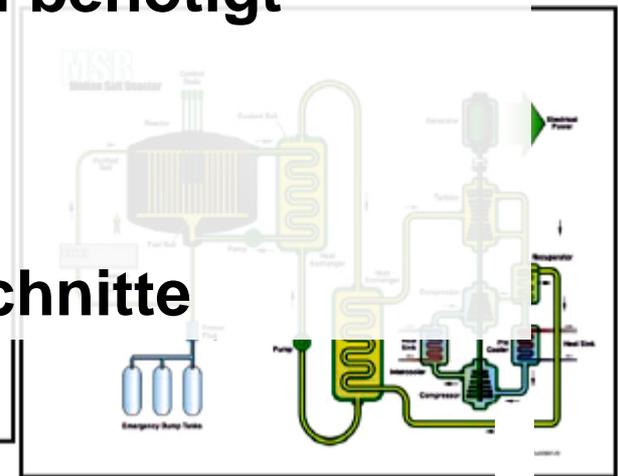
→ Neutroneninduzierte Spaltung

→ Inelastische Neutronenstreuquerschnitte

Very High Temperature Reactor



Supercritical Water Reactor



Molten Salt Reactor

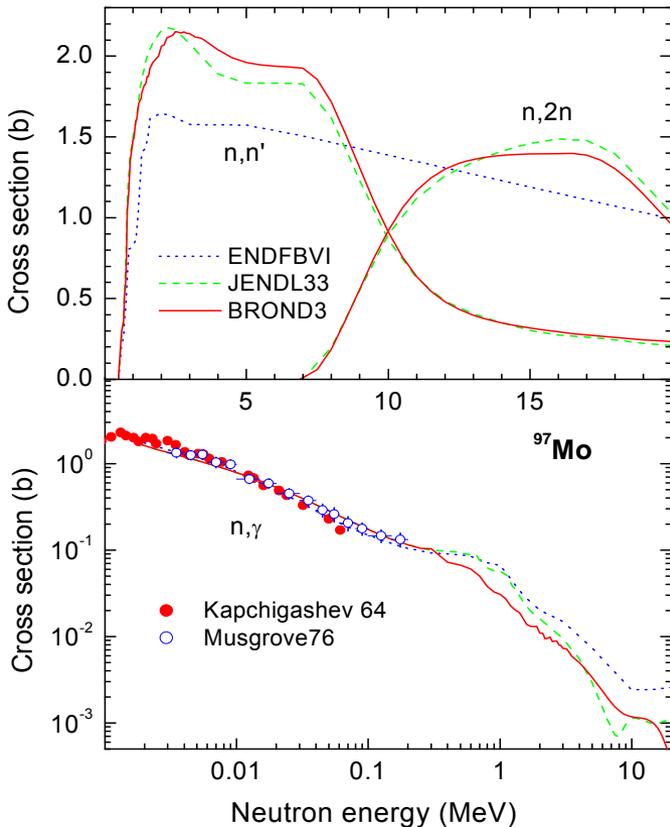
Transmutationsrelevante Wirkungsquerschnitte

Table 32. Summary of Highest Priority Target Accuracies for Fast Reactors

		Energy Range	Current Accuracy (%)	Target Accuracy (%)
U238	σ_{inel}	6.07 ÷ 0.498 MeV	10 ÷ 20	2 ÷ 3
	σ_{capt}	24.8 ÷ 2.04 keV	3 ÷ 9	1.5 ÷ 2
Pu241	σ_{fiss}	1.35MeV ÷ 454 eV	8 ÷ 20	2 ÷ 3 (SFR, GFR, LFR) 5 ÷ 8 (ABTR, EFR)
Pu239	σ_{capt}	498 ÷ 2.04 keV	7 ÷ 15	4 ÷ 7
Pu240	σ_{fiss}	1.35 ÷ 0.498 MeV	6	1.5 ÷ 2
	v	1.35 ÷ 0.498 MeV	4	1 ÷ 3
Pu242	σ_{fiss}	2.23 ÷ 0.498 MeV	19 ÷ 21	3 ÷ 5
Pu238	σ_{fiss}	1.35 ÷ 0.183 MeV	17	3 ÷ 5
Am242m	σ_{fiss}	1.35MeV ÷ 67.4keV	17	3 ÷ 4
Am241	σ_{fiss}	6.07 ÷ 2.23 MeV	12	3
Cm244	σ_{fiss}	1.35 ÷ 0.498 MeV	50	5
Cm245	σ_{fiss}	183 ÷ 67.4 keV	47	7
Fe56	σ_{inel}	2.23 ÷ 0.498 MeV	16 ÷ 25	3 ÷ 6
Na23	σ_{inel}	1.35 ÷ 0.498 MeV	28	4 ÷ 10
Pb206	σ_{inel}	2.23 ÷ 1.35 MeV	14	3
Pb207	σ_{inel}	1.35 ÷ 0.498 MeV	11	3
Si28	σ_{inel}	6.07 ÷ 1.35 MeV	14 ÷ 50	3 ÷ 6
	σ_{capt}	19.6 ÷ 6.07 MeV	53	6

- Neutroneninduzierte Reaktionen bestimmen integrale Reaktorparameter (k_{eff} , andere Reaktivitätskoeffizienten sowie den Abbrand und Möglichkeiten der Transmutation)
- Inelastische Streuquerschnitte an Aktiniden und Strukturmaterialien sind relevant (Fe, Na, Bi, Pb, Zr)
- Spaltquerschnitte von Minoren Aktiniden
- Energiebereich von nELBE ideal geeignet
- Viele Reaktionen sind nur ungenau oder gar nicht bekannt. Hohe Anforderungen an das Experiment und die Neutronenquelle

nELBE Forschungsprogramm:



A. V. Ignatyuk, priv.com. 2008

- Untersuchung von Reaktionen schneller Neutronen mit Relevanz für nukleare Transmutation und Entwicklung von GenIV Reaktorsystemen

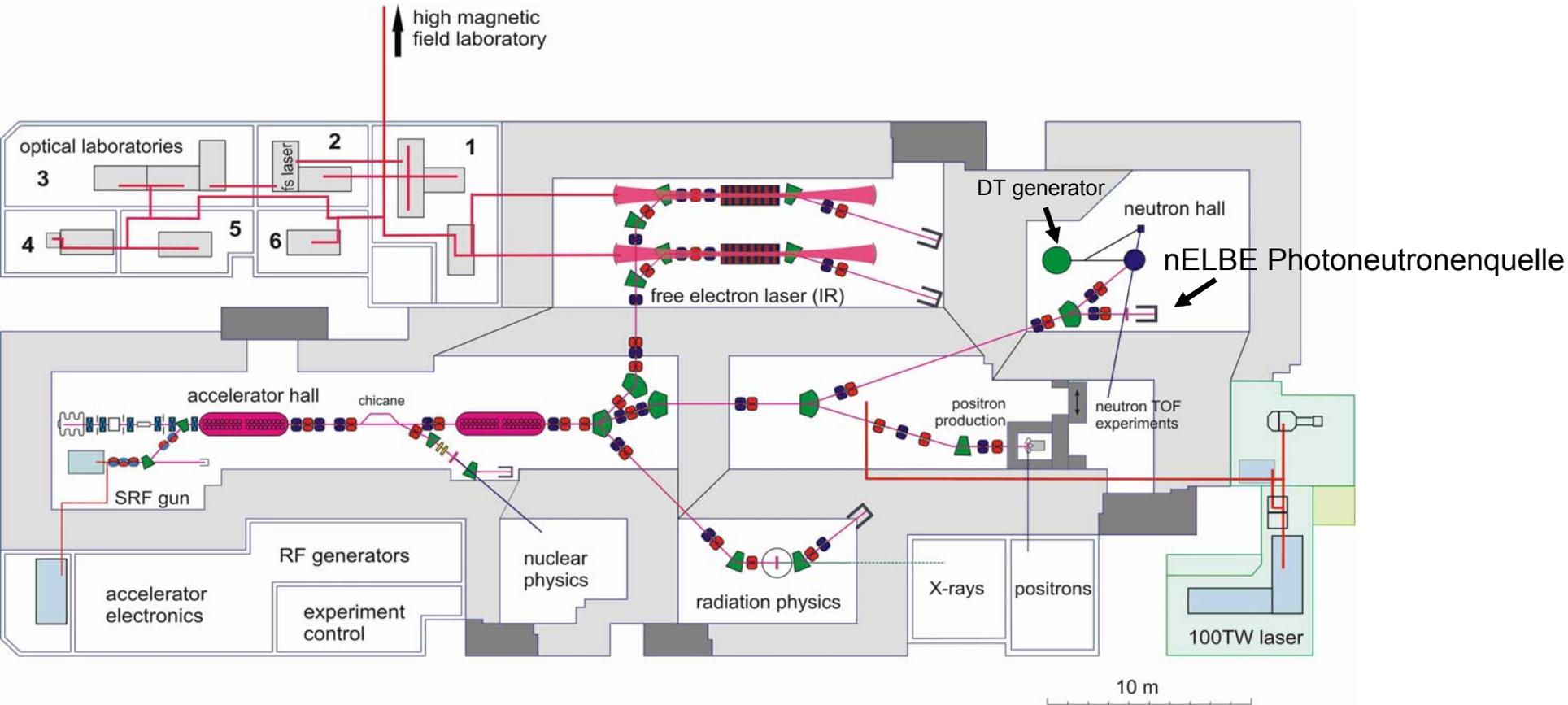
1. Inelastische Neutronenstreuung ($n,n'\gamma$)
 ^{56}Fe , Mo , Pb , ^{23}Na und totale Neutronenquerschnitte σ_{tot} (Ta , Au , Al , C , H)

2. Untersuchung von minoren Aktiniden (radioaktive Targets)

Minore Aktiniden Targets von CERN n-TOF
 ^{239}Pu , ^{242}Pu , ^{235}U , ^{238}U BMBF-Projekt



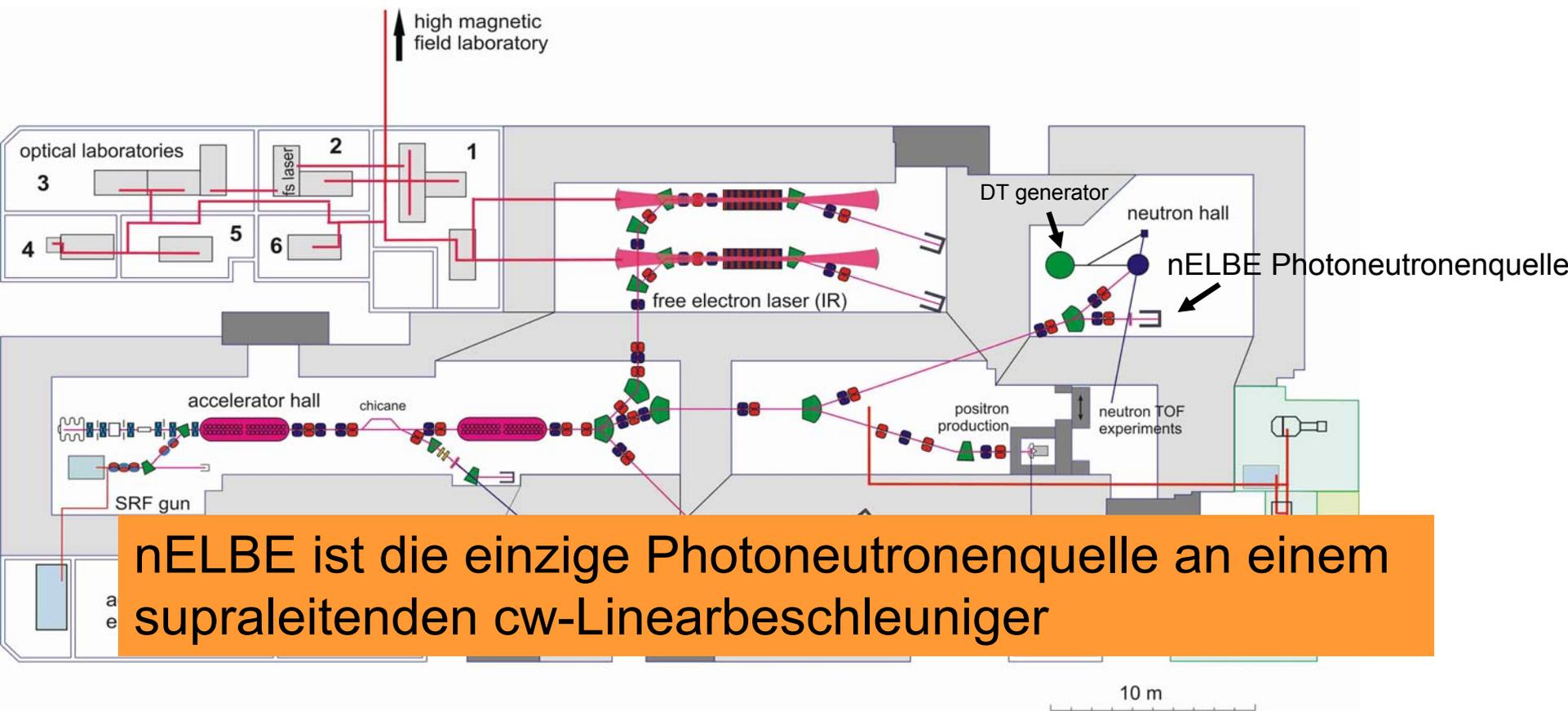
ELBE: Electron Linear accelerator with high Brilliance and low Emittance



- 1: Diagnostic station, IR-imaging and biological IR experiment
- 2: Femtosecond laser, THz-spectroscopy, IR pump-probe experiment
- 3: Time-resolved semiconductor spectroscopy, THz-spectroscopy

- 4: FTIR, biological IR experiment
- 5: Near-field and pump-probe IR experiment
- 6: Radiochemistry and sum frequency generation experiment, photothermal deflection spectroscopy

ELBE: Electron Linear accelerator with high Brilliance and low Emittance

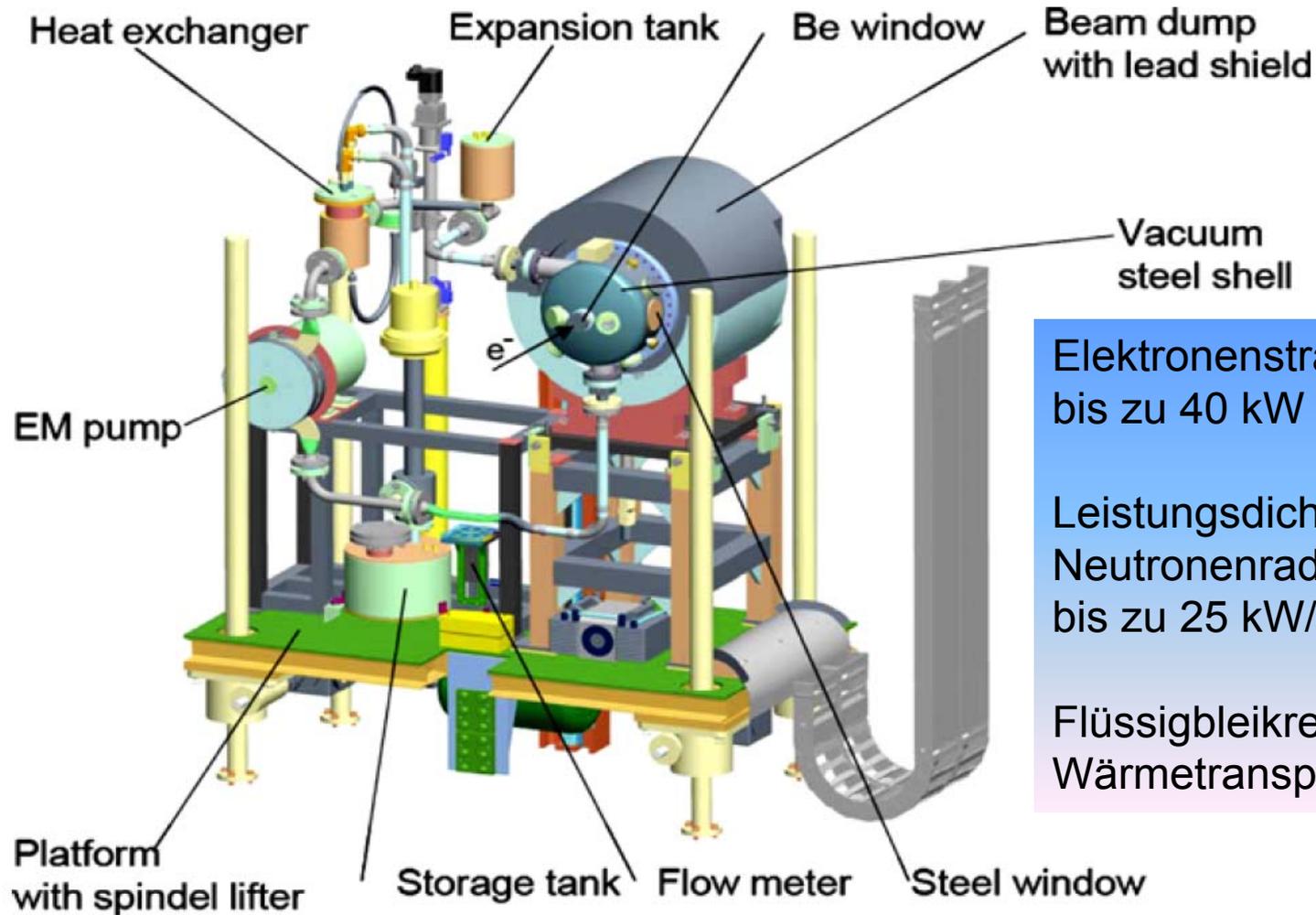


nELBE ist die einzige Photoneutronenquelle an einem supraleitenden cw-Linearbeschleuniger

- 1: Diagnostic station, IR-imaging and biological IR experiment
- 2: Femtosecond laser, THz-spectroscopy, IR pump-probe experiment
- 3: Time-resolved semiconductor spectroscopy, THz-spectroscopy

- 4: FTIR, biological IR experiment
- 5: Near-field and pump-probe IR experiment
- 6: Radiochemistry and sum frequency generation experiment, photothermal deflection spectroscopy

nELBE Photoneutronentarget



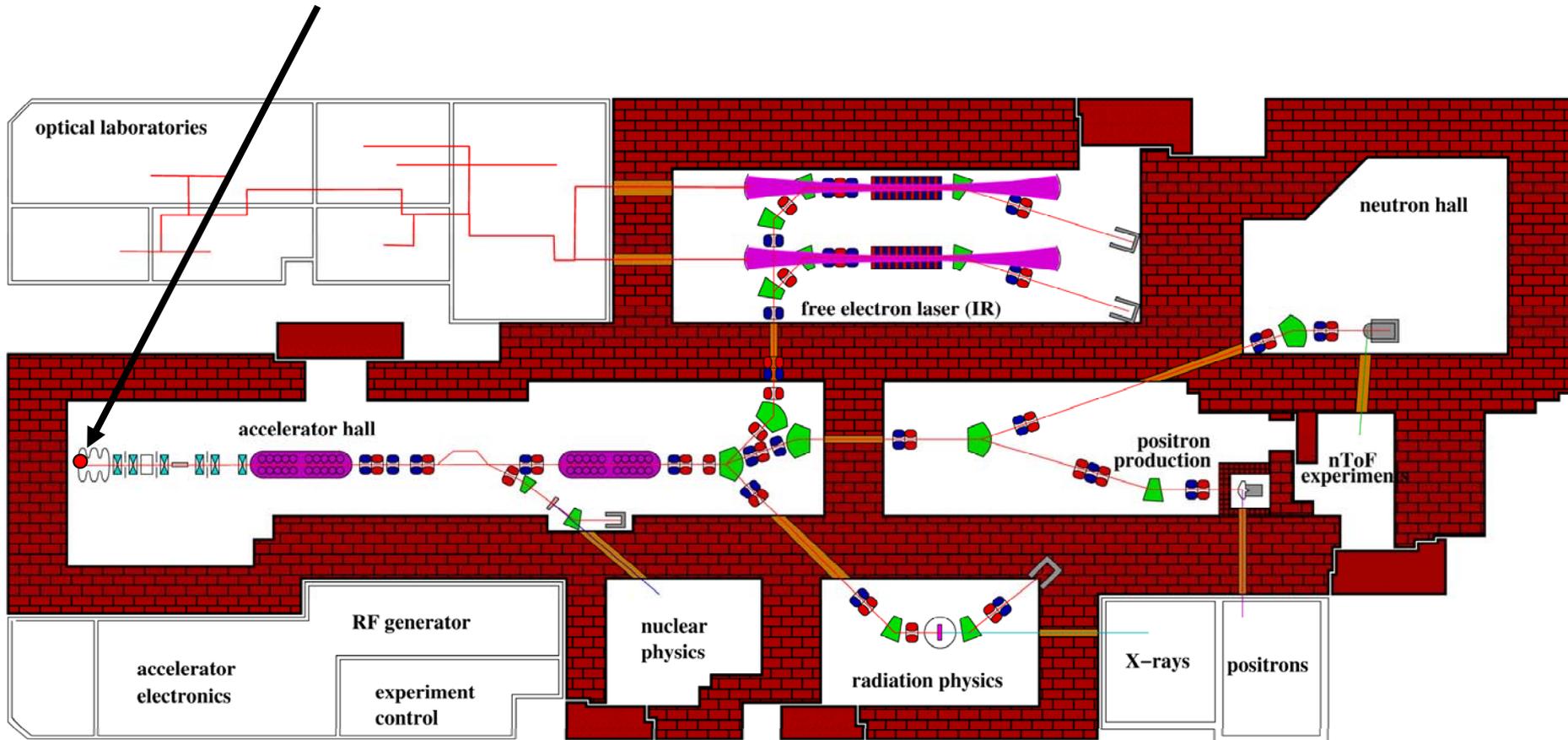
Elektronenstrahlleistung
bis zu 40 kW

Leistungsdichte im
Neutronenradiator
bis zu 25 kW/cm^3

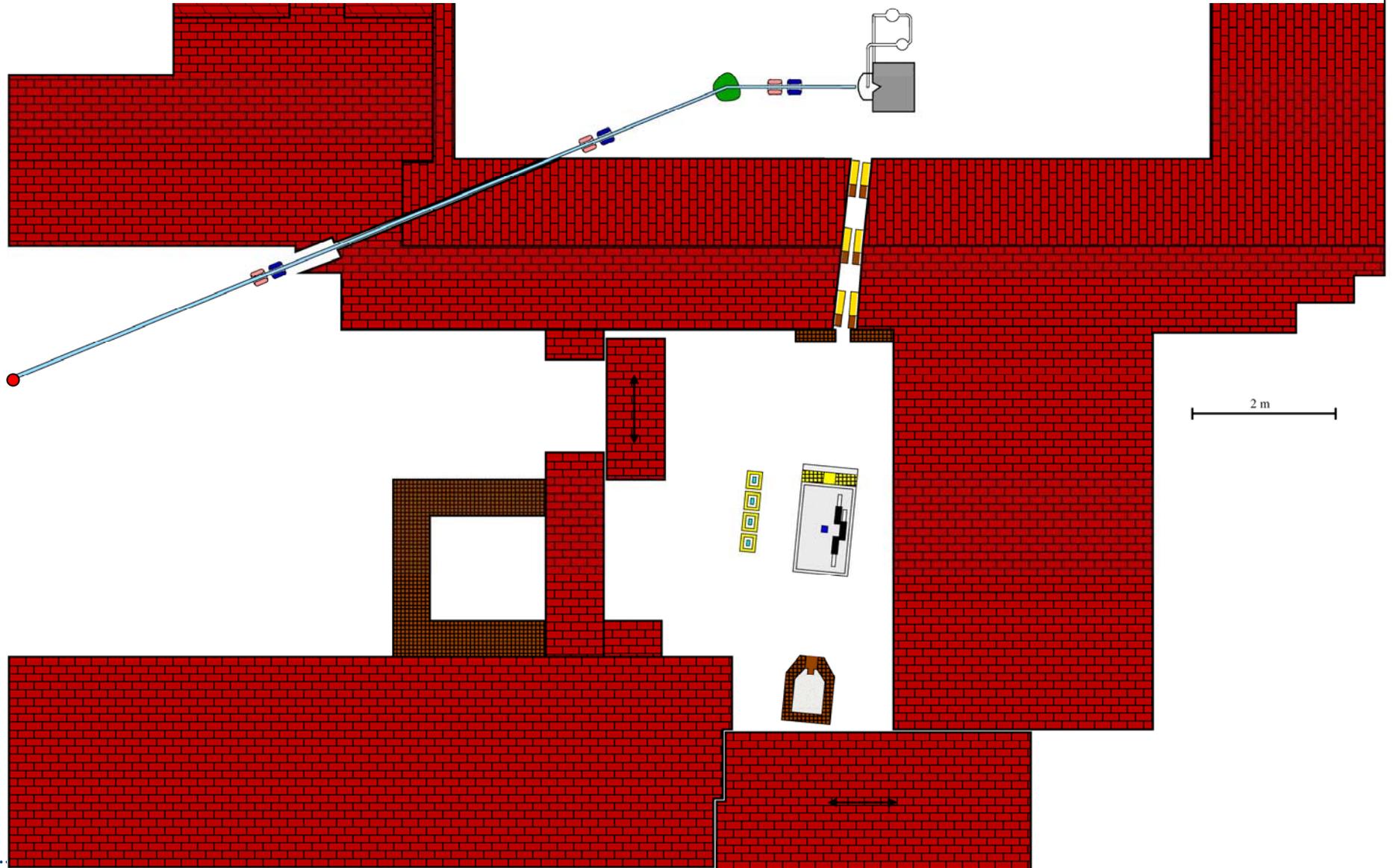
Flüssigbleikreislauf zum
Wärmetransport

Messung inelastischer Neutronen- Streuung an nELBE von Dipl. Phys. Roland Beyer

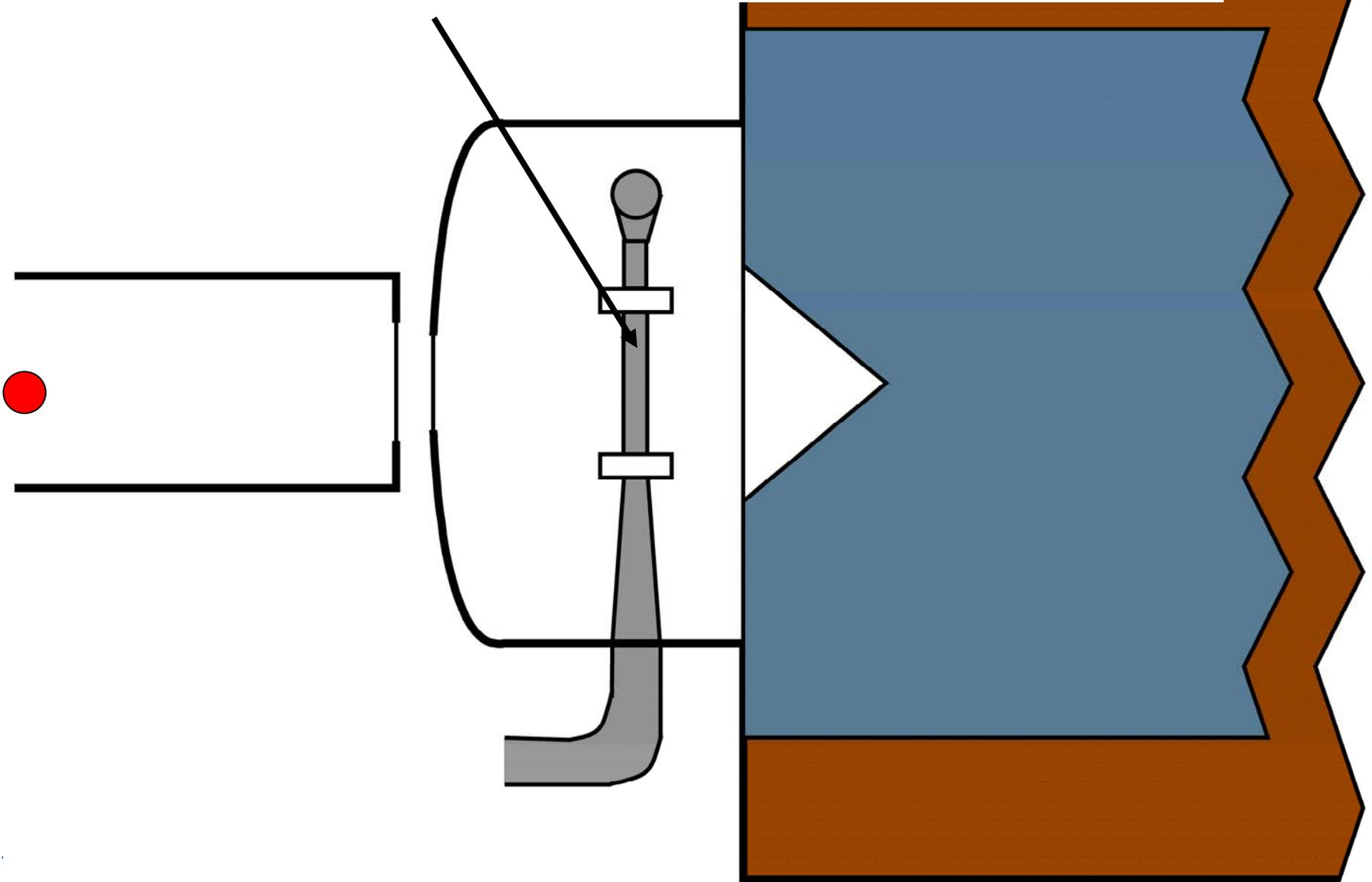
Ein Elektron wird beschleunigt ...



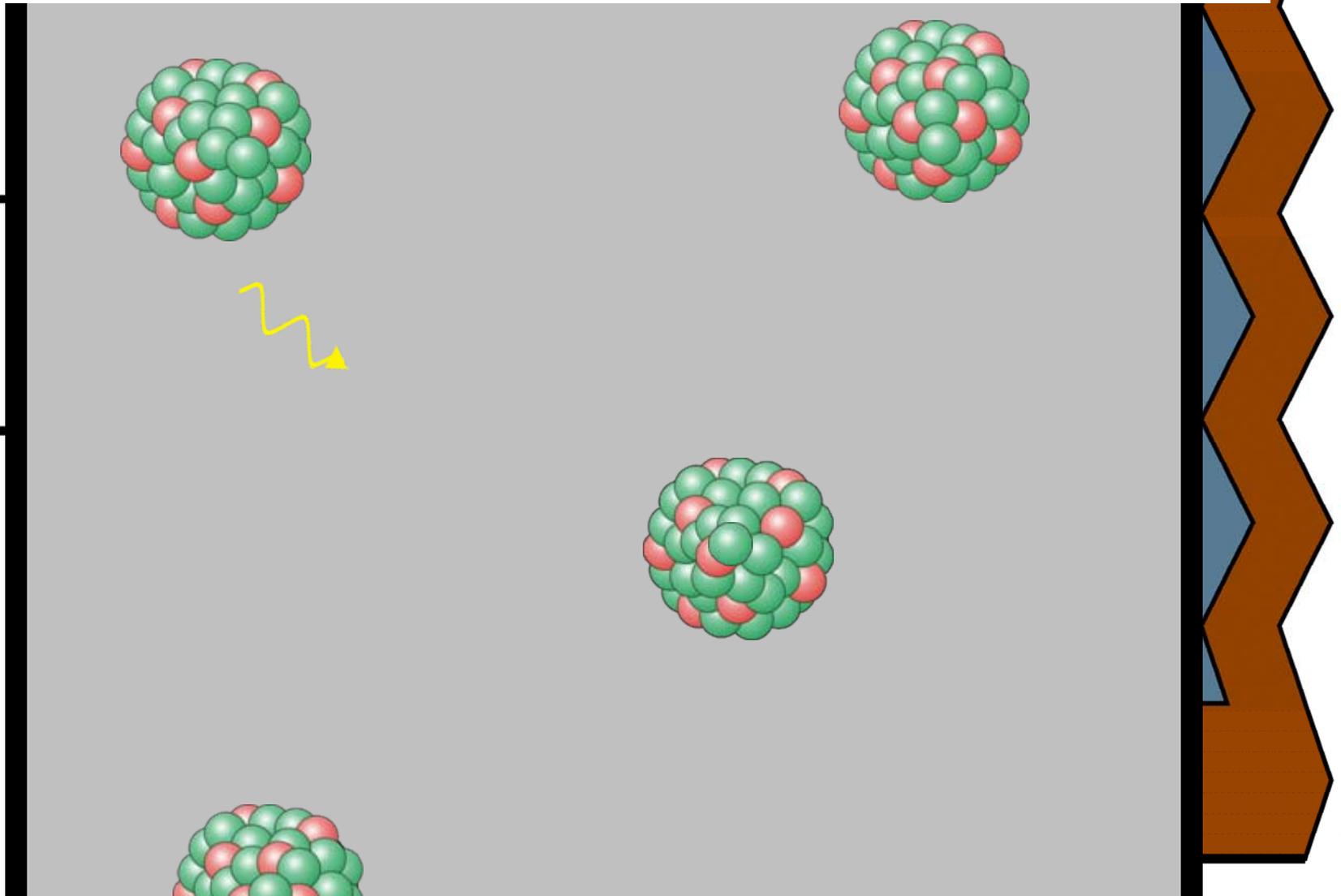
... und trifft auf die Neutronenquelle.



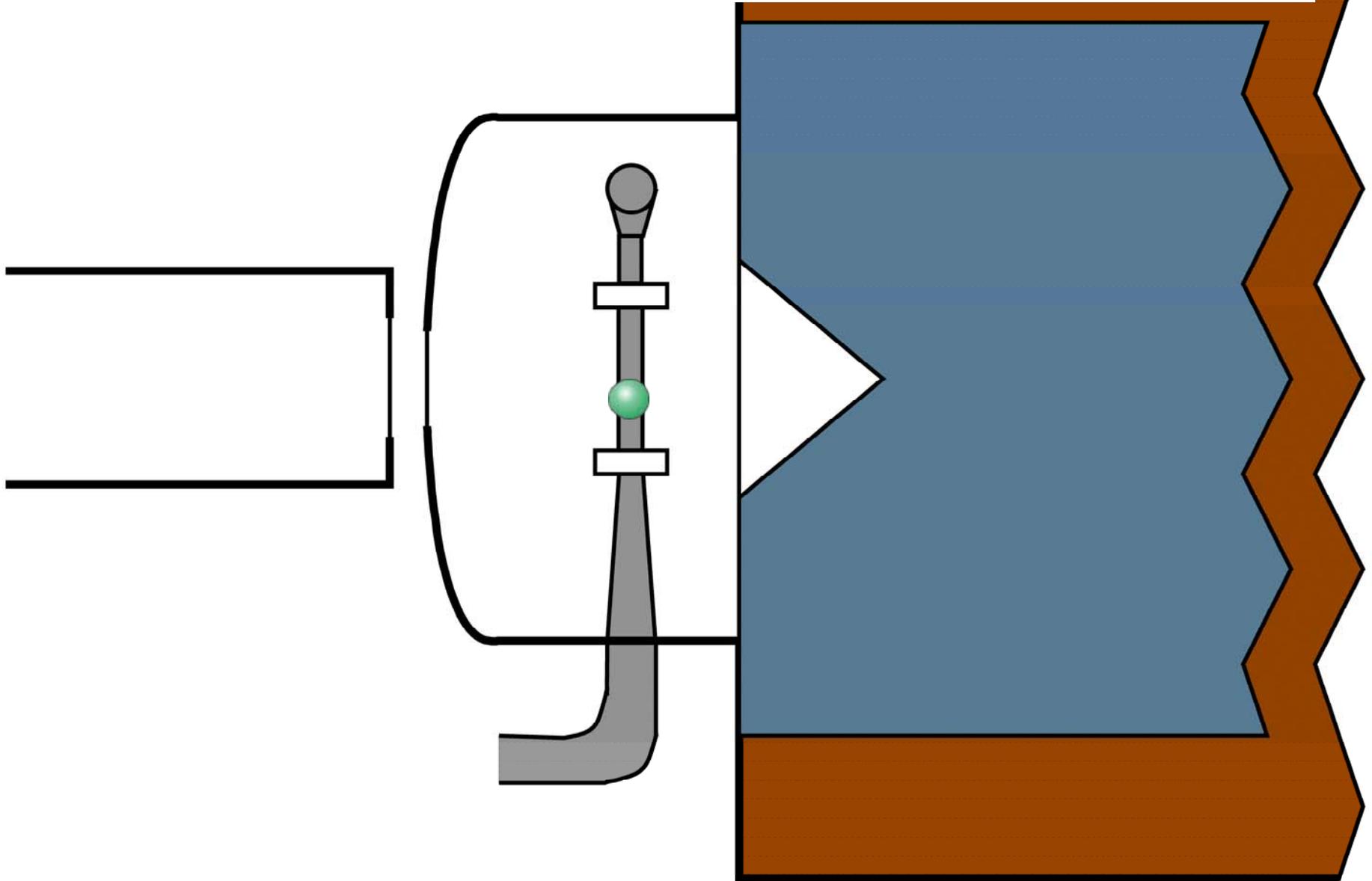
Durch die fließt flüssiges Blei.



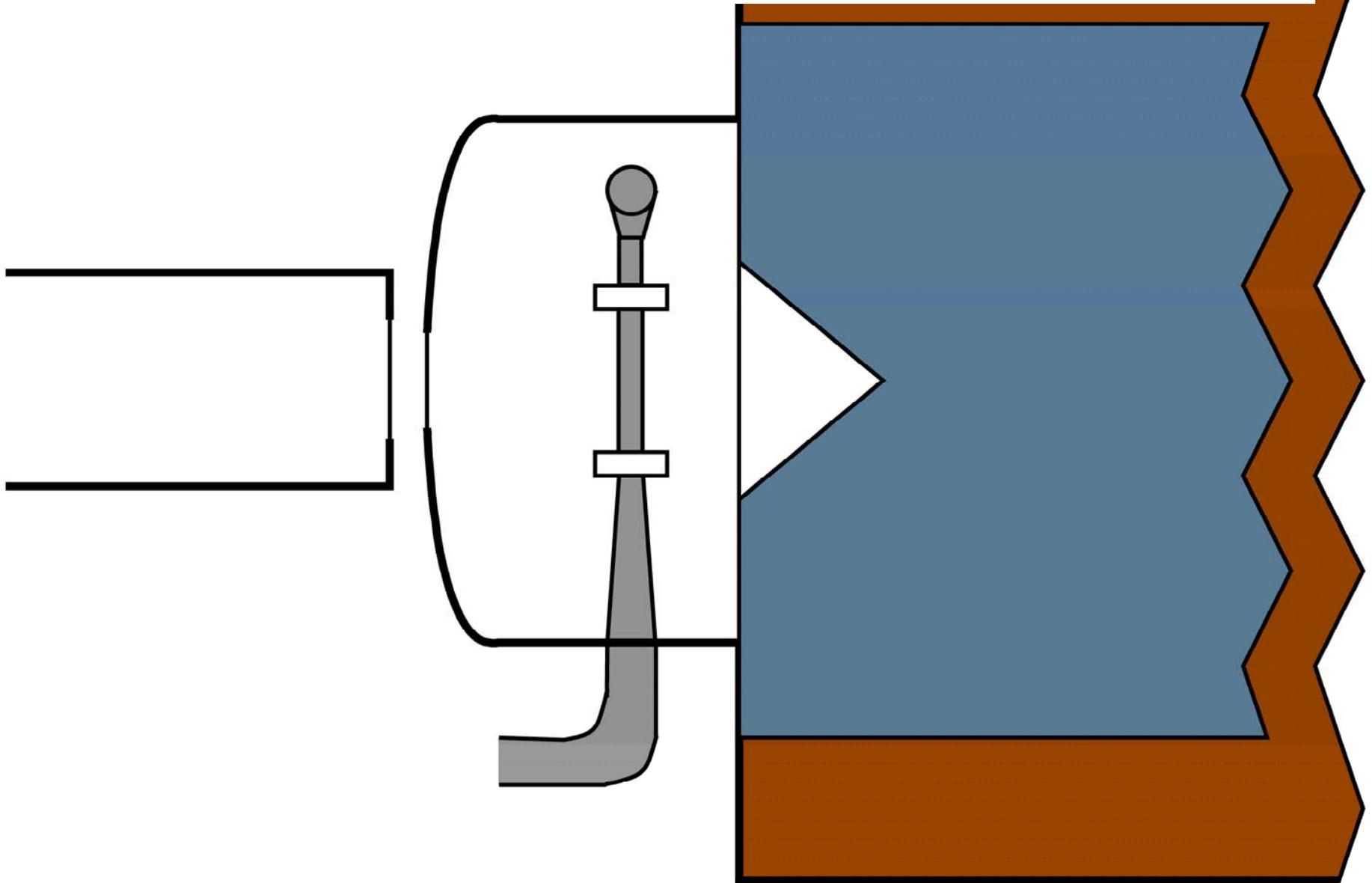
die ein Neutron aus einem Blei Kern
herausschlagen kann.



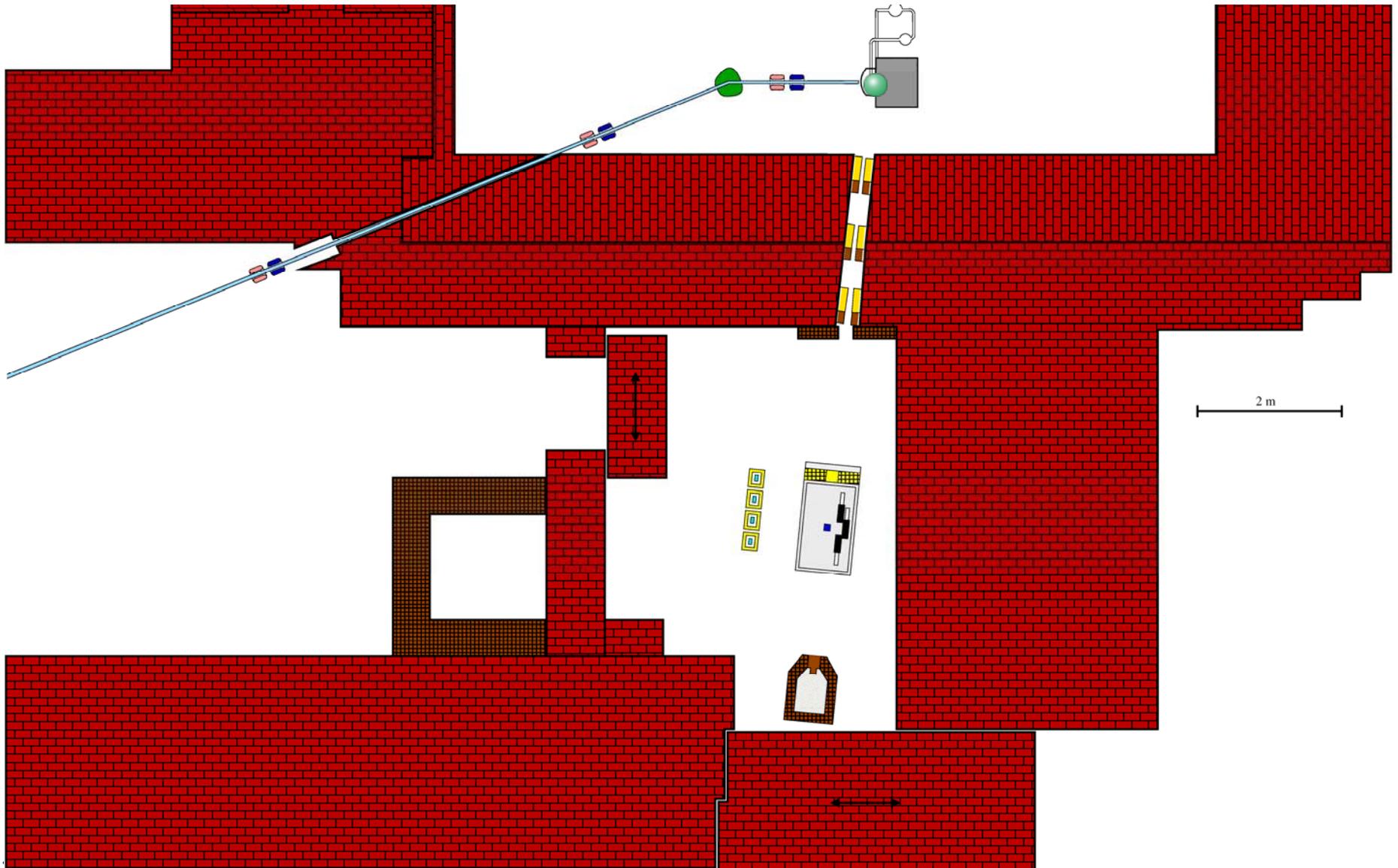
Das Neutron verlässt die Quelle ...



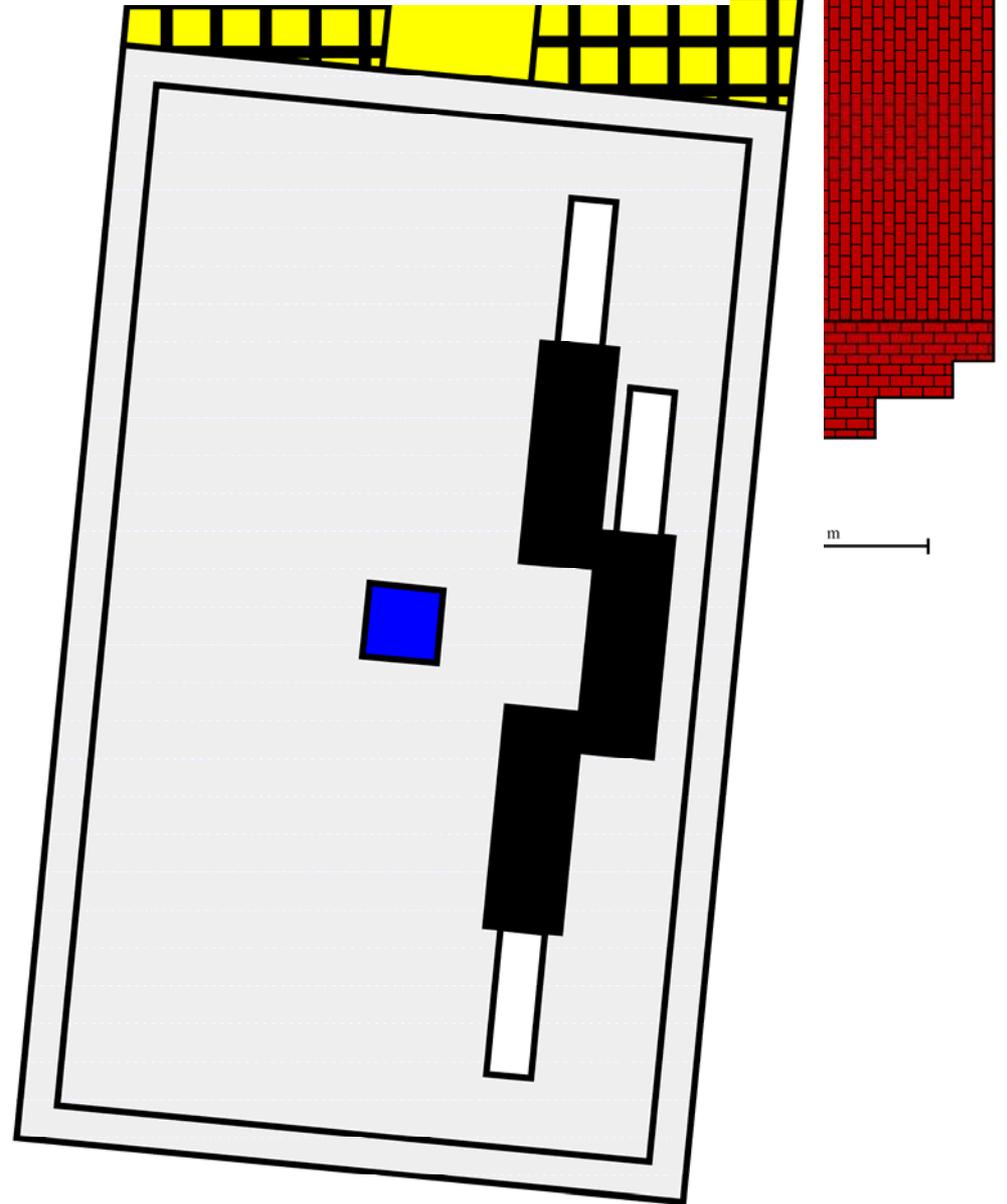
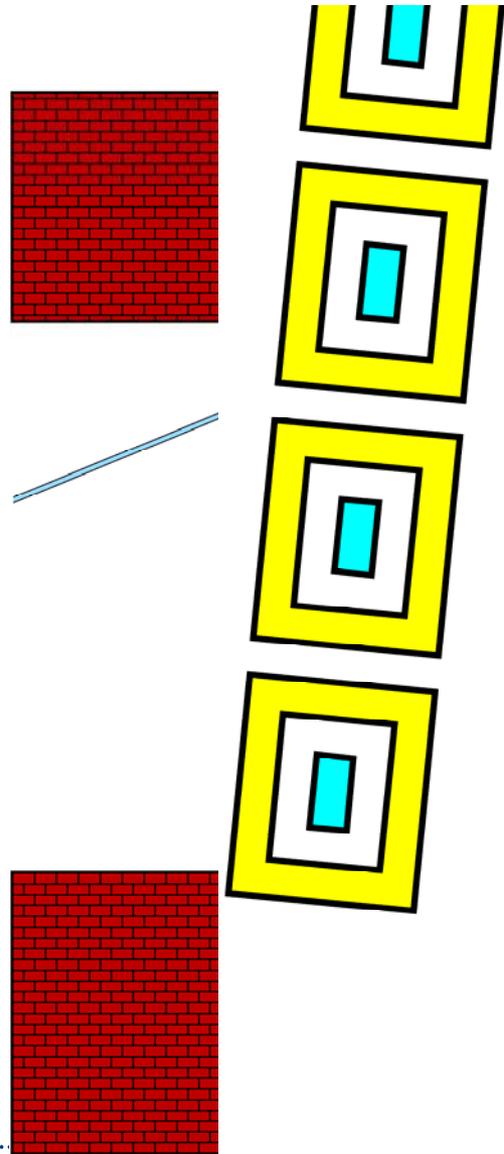
Das Neutron verlässt die Quelle ...



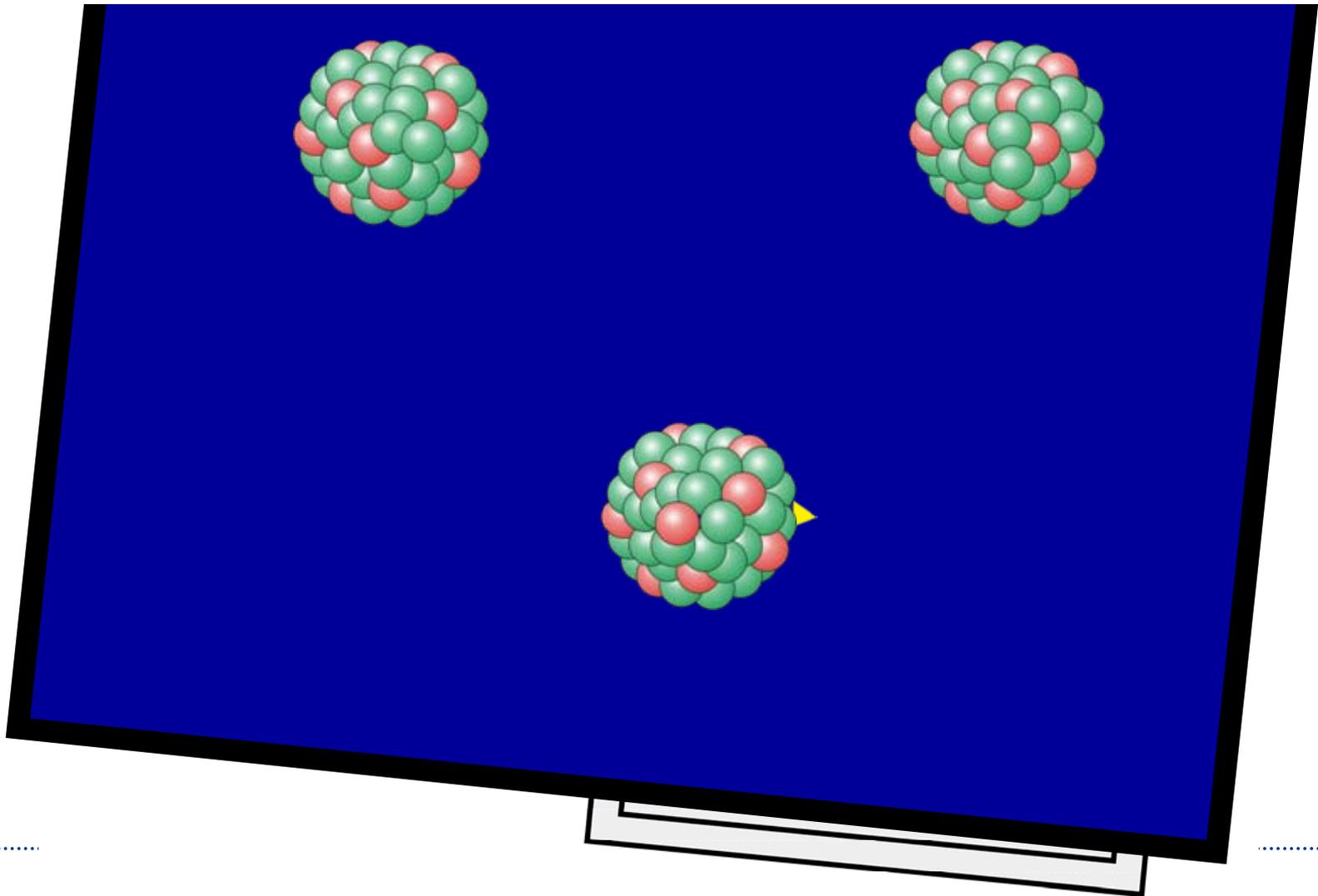
... und fliegt in den Experiment-Bereich.



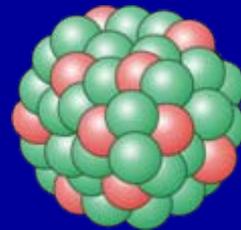
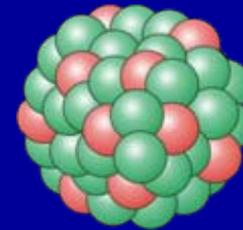
Dort trifft es auf die Probe.



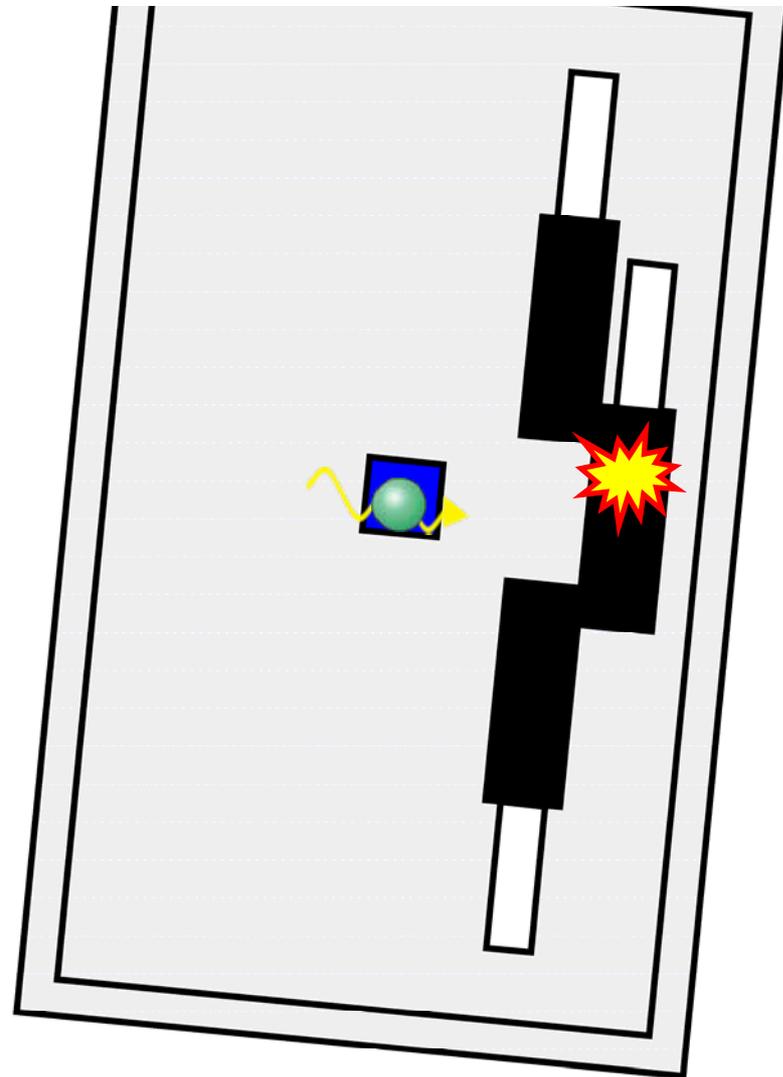
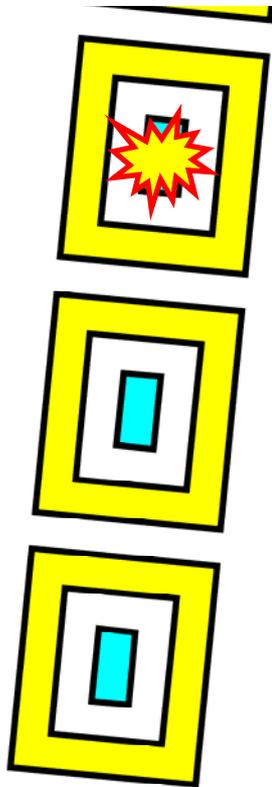
Die überschüssige Energie gibt seiner
der Kern als Photon wieder ab. ab.



Neutron und Photon verlassen die Probe ...

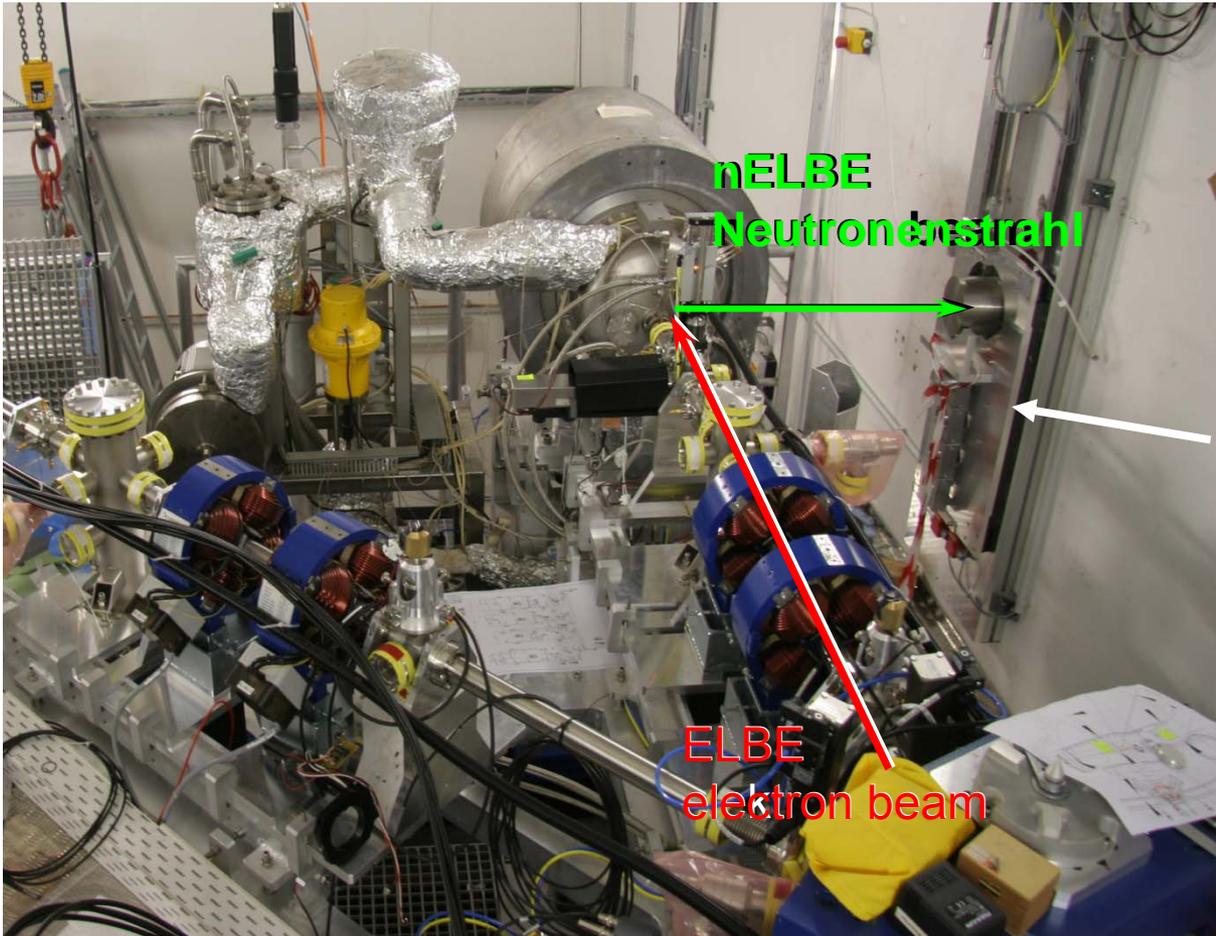


und werden von verschiedenen Detektoren nachgewiesen.



Ende

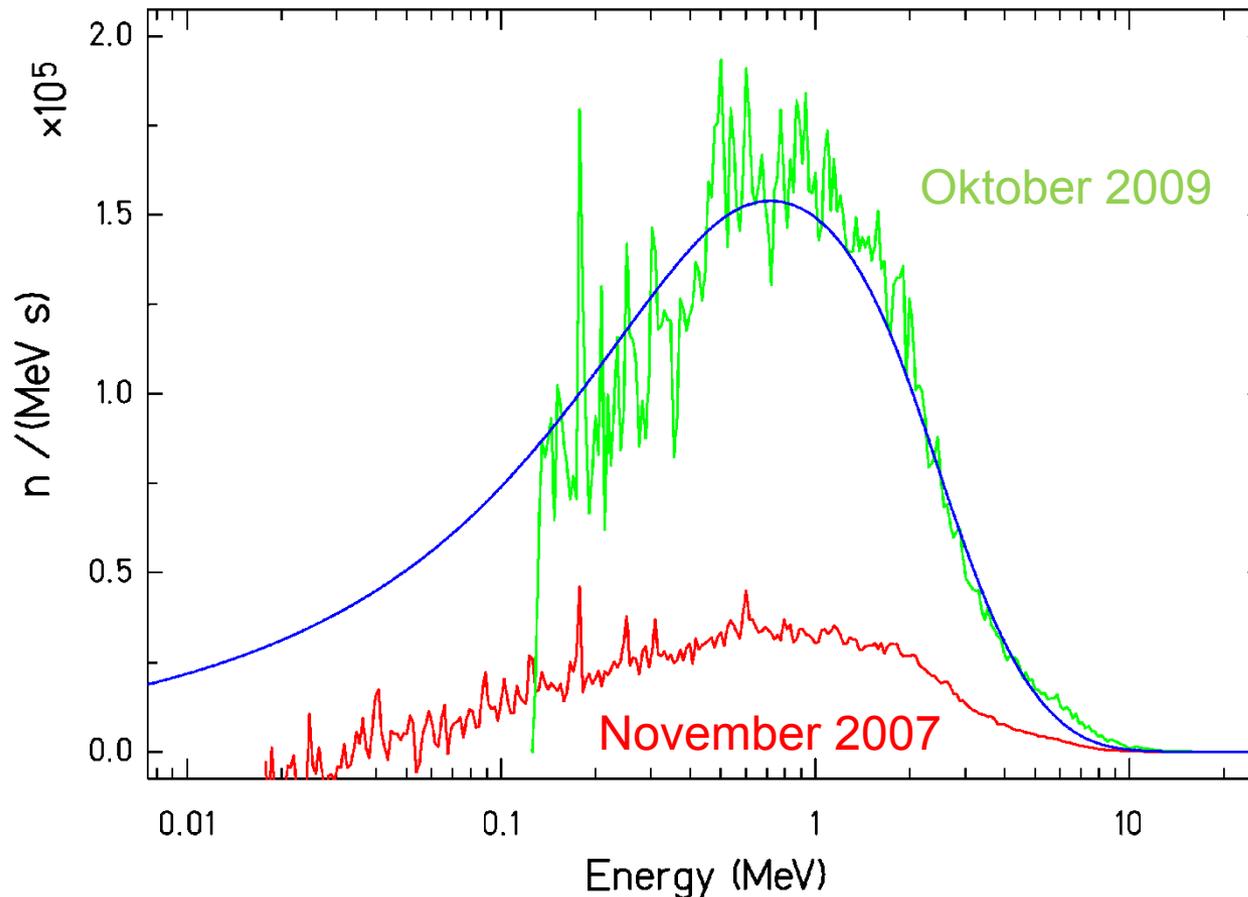
nELBE – Photoneutronenquelle in der TUD Neutronenhalle



Targetleiter und
Strahlverschluss

Realisierung: R. Schlenk, S. Schneider, Zentralabteilung Forschungstechnik

nELBE Neutronenspektrum



Messung mit
 ^{235}U Spaltkammer
 $\Delta t(\text{FWHM}) = 4 \text{ ns}$
 $n_t = 5 \text{ mg/cm}^2$
 28.10.2009:
 Neutronenquellstärke:
 $1.4 \cdot 10^{11} \text{ n/s}$
 Neutronen auf Target:
 $4.5 \cdot 10^4 \text{ n/(cm}^2 \text{ s)}$

$\langle I_{e^-} \rangle = 19 \mu\text{A}$
 Max. thermion. Injektor
 bei 200 kHz Rate

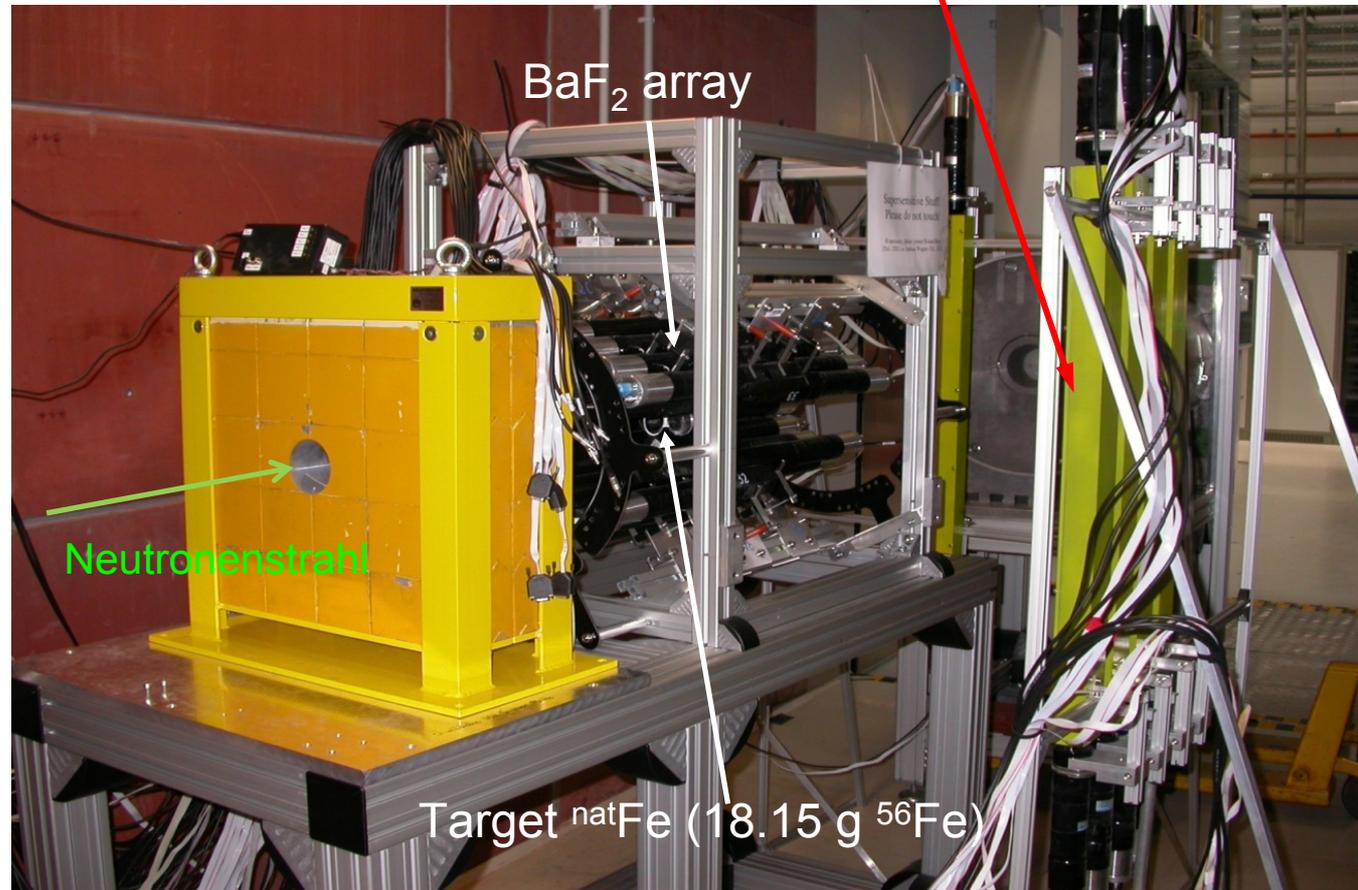
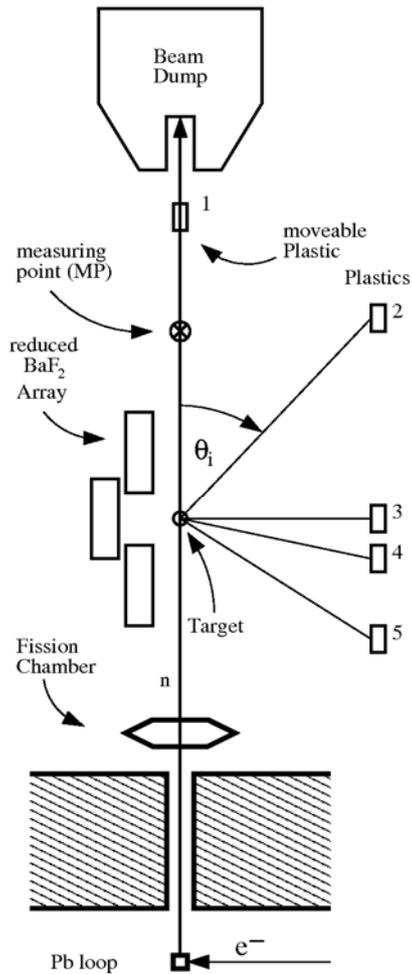
Spaltkammer als Primärstrahlmonitor (Leihgabe PTB)

Spektrum ähnlich dem schnellen Neutronenspektrum aus $^{235}\text{U}(n,f)$ (ENDF-VII)

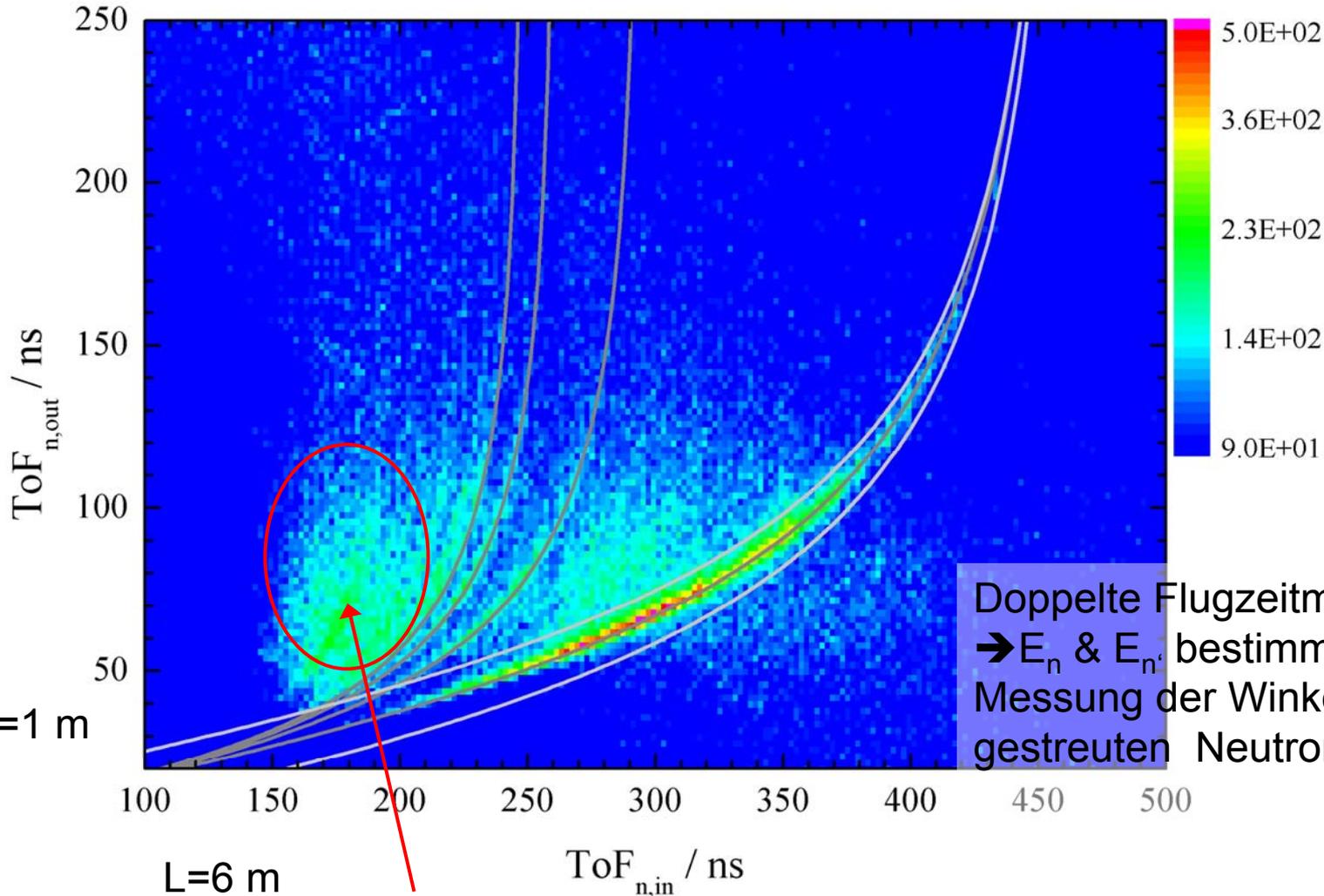
$^{56}\text{Fe}(n, n'\gamma)$ Experiment März 2009

Flugzeitmessung des einfallenden und des gestreuten Neutrons
(Kein GammaproduktionsWQ)

Plastik-Szintillatoren
mit niedriger Nachweisschwelle
R. Beyer et al.,
NIM A 575 (2007) 449



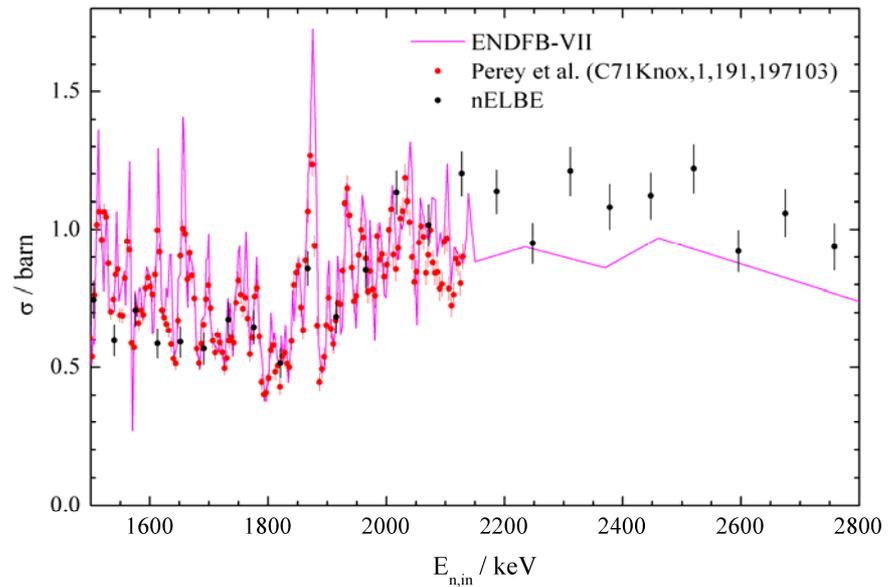
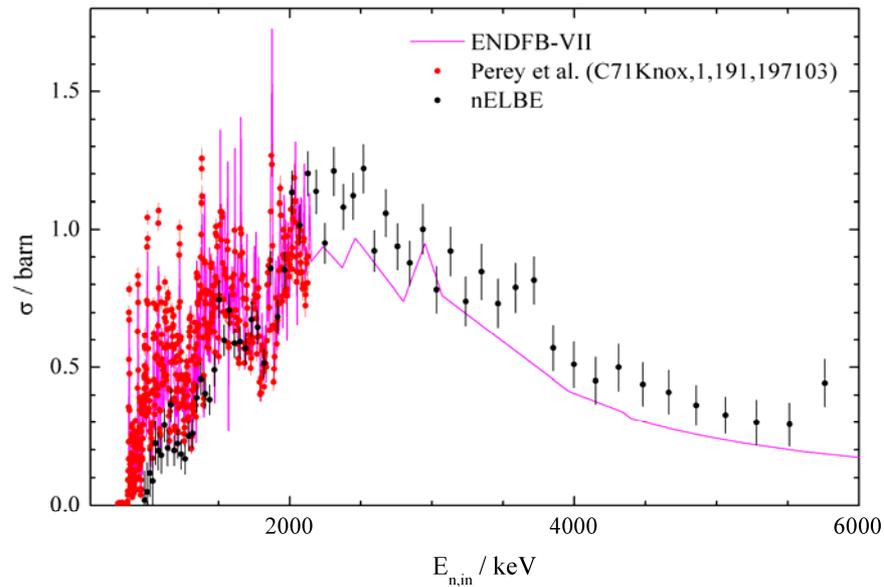
$^{56}\text{Fe}(n,n'\gamma)$ Doppelte Flugzeitmessung



Doppelte Flugzeitmessung:
 → E_n & $E_{n'}$ bestimmt
 Messung der Winkelverteilung der gestreuten Neutronen

Inelastische Streuung zu hochangeregten Kernniveaus
 „Moderation“ des Neutronenspektrums

Inelastische Streuung $^{56}\text{Fe}(n,n'\gamma)$ 1. angeregter Zustand



Beiträge der einzelnen angeregten Zustände in $^{56}\text{Fe}^*$ werden experimentell aufgelöst.

Vorläufige Daten, Roland Beyer

Ergebnisse und Ausblick

- Schnelle Neutronen sind der entscheidende Faktor für die Transmutation langlebiger minorer Aktinide in kurzlebigerere Spaltprodukte.
- Die Endlagerproblematik wird durch Partitionierung und Transmutation auf historische Zeiträume reduziert (< 1000 Jahre)
- Zur Entwicklung von Transmutationsanlagen (schnelle Reaktoren, ADS) werden genaue Daten für Reaktionen mit schnellen Neutronen benötigt. z.B. $(n, n'\gamma)$ (n, tot) und (n, f) mit radioaktiven Targets.
- BMBF Verbundprojekt
„Transmutationsrelevante kernphysikalische Untersuchungen ...“
zusammen mit TU Dresden, Uni Mainz, TU München, Uni Köln und PTB Braunschweig seit 01.10.2009

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

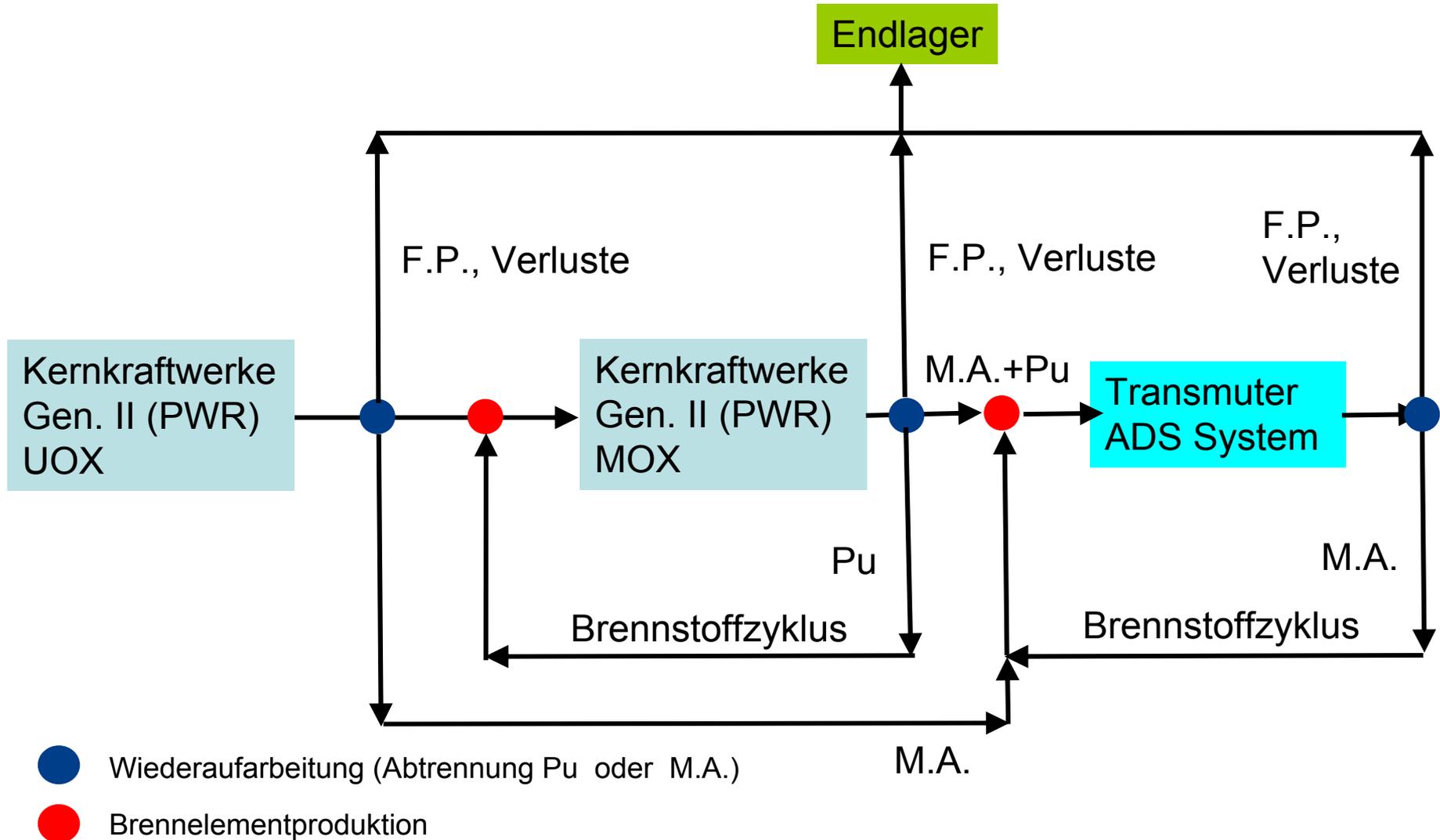
Projekt Nukleare Transmutation

- Roland Beyer, Evert Birgersson, Anna Ferrari, Daniel Gehre*, Roland Hannaske, Mathias Kempe, Toni Kögler, Michele Marta, Ralf Massarczyk, Andrija Matic, Georg Schramm
- Arnd Junghans, Daniel Bemmerer, Eckart Grosse*, Klaus-Dieter Schilling, Ronald Schwengner, Andreas Wagner
- Entwicklung der nELBE Photoneutronenquelle gemeinsam mit Institut für Sicherheitsforschung, Frank-Peter Weiss und DFG Projekt mit dem IKTP Hartwig Freiesleben, Klaus Seidel

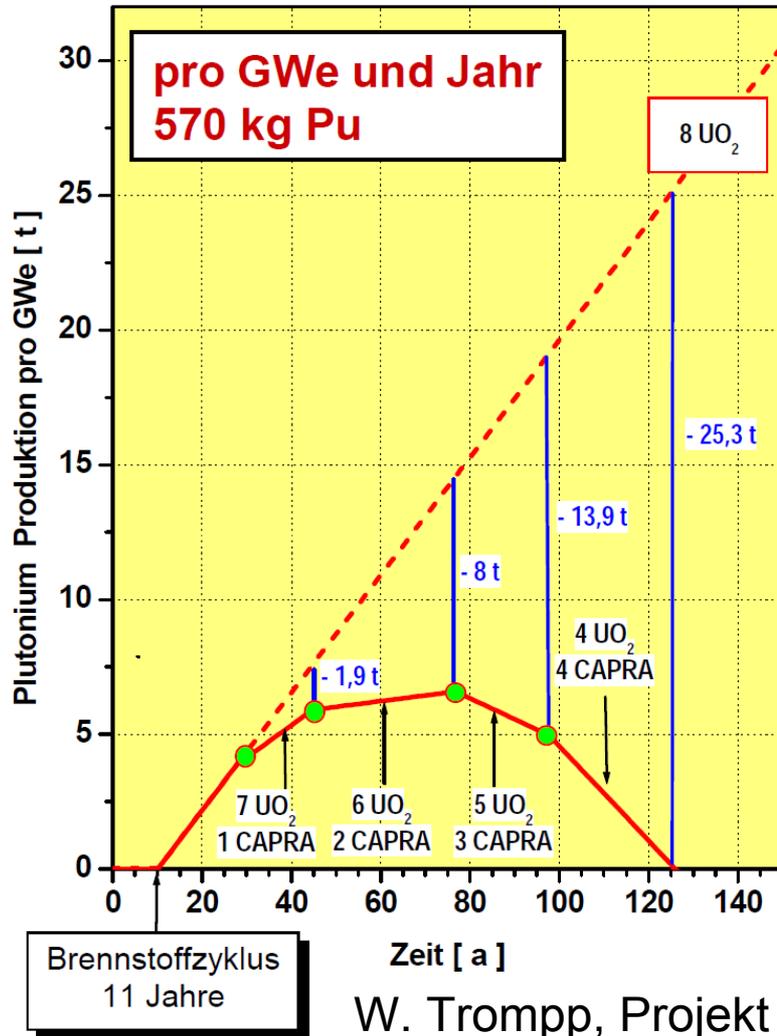
* (auch IKTP Dresden)

Ende der Vortragsfolien

„Double Strata“ Konzept zur Transmutation

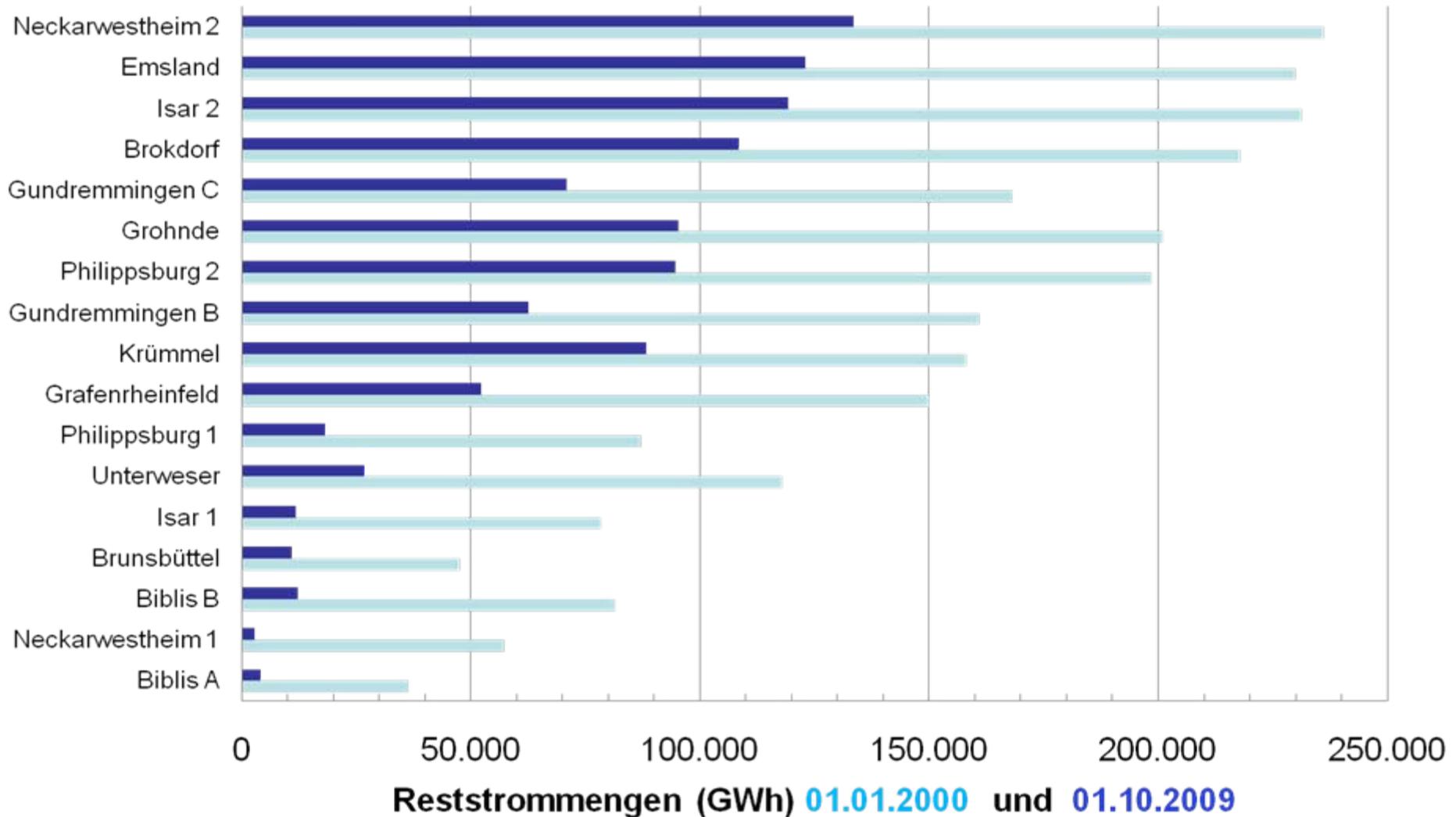


Transmutation mit schnellen Reaktoren



W. Trompp, Projekt Nuklear, KIT, 2005

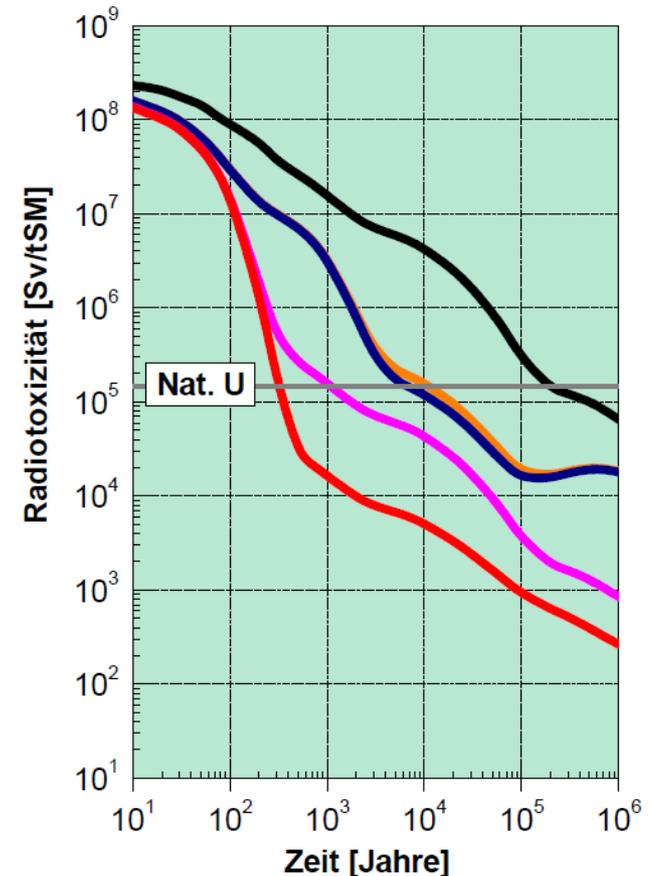
Bekanntmachung gemäß § 7 Abs.1c Satz 4 AtG, Bundesamt für Strahlenschutz



Einfluss der Abtrennung auf die Radiotoxizität

Abtrennung	Radiotoxizität auf Niveau von Natururan (nach Jahren)
keine	200.000
99 % Pu	11.300
99,9 % Pu	6.500
99 % Pu, MA	1100
99,9 % Pu, MA	320

Quelle: Klaus Gompper, INE, Karlsruhe



Langlebige Spaltfragmente

Table 3.2. Properties of major LLFPs

Isotope	Decay type	Half-life, yr	Capture cross-section*, b		Remark
			Fast	Thermal	
⁷⁹ Se	β^-	6.5×10^4	0.002	0.33	Non-transmutable
⁹⁹ Tc	β^-	2.1×10^5	0.45	9.32	Transmutable
¹²⁶ Sn	β^-	1.0×10^5	0.007	0.03	Non-transmutable
¹²⁹ I	β^-	1.6×10^7	0.35	3.12	Transmutable
¹³⁵ Cs	β^-	2.3×10^6	0.07	2.48	Transmutable

* ORIGEN2 library (standard PWR spectrum).

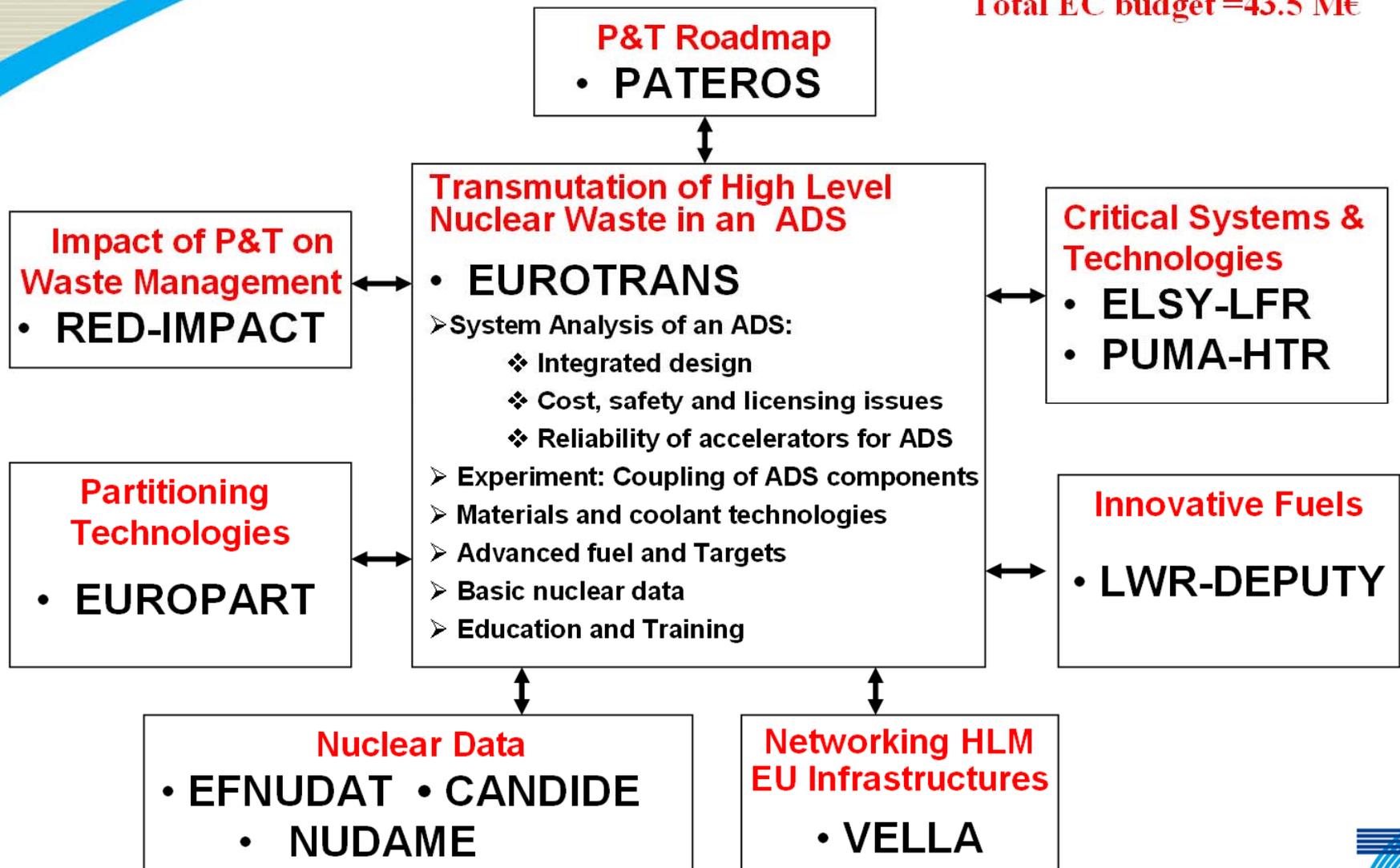
Y.H. Kim, NEA report 6090, 2006

- Langlebige Spaltfragmente mit kleinen Neutroneneinfangquerschnitten.
- ¹²⁹I untersucht mit laserinduzierter Transmutation (Ledingham et al. 2003)
 $\sigma = 97 \pm 40$ mbarn
- Transmutation nur möglich durch (γ, n) Reaktionen d.h. hoher Fluss $E_\gamma > S_n$

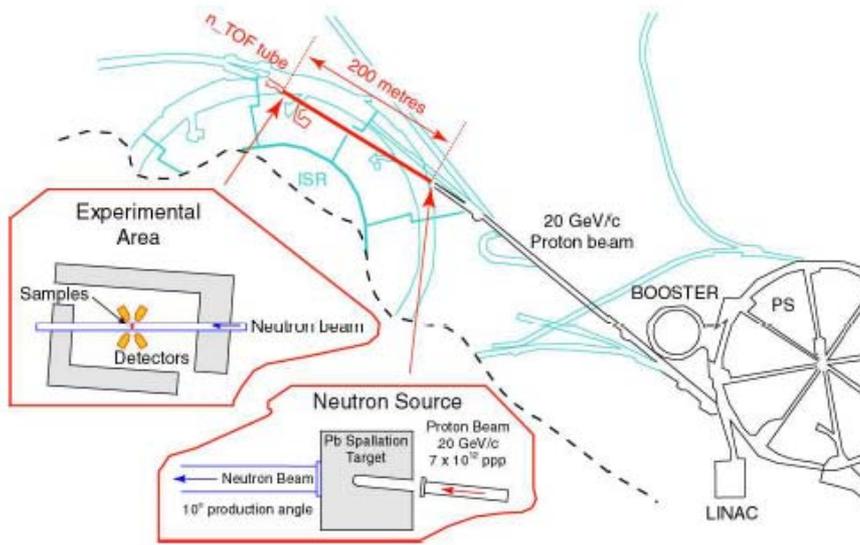


FP6 (2002-06) Projects on P&T

Total EC budget = 43.5 M€

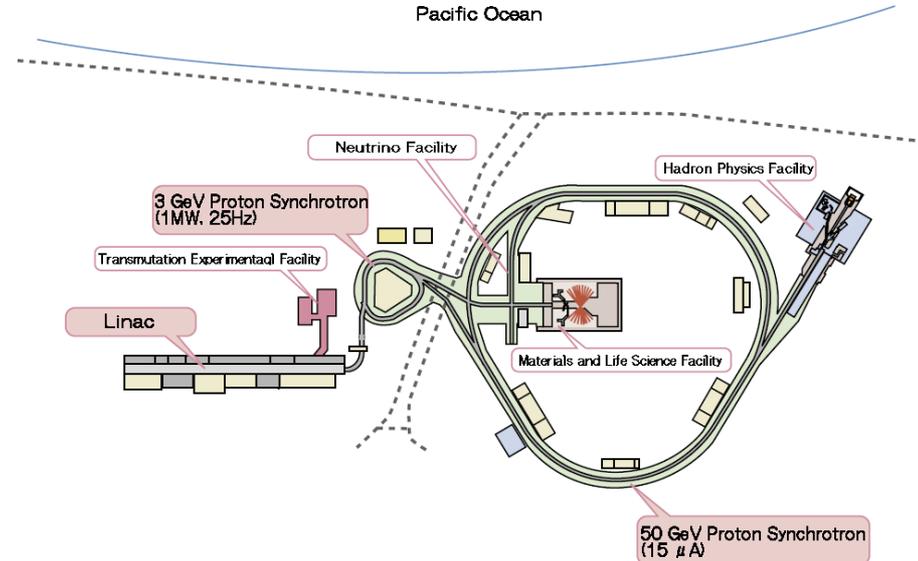


Internationaler Vergleich



CERN n_TOF Phase 2

Senkrechte 20 m Flugstrecke
 Faktor 100 höherer Neutronenfluss
 geringerer „Photon flash“ Untergrund



J-PARC, Tokai Mura

Material and Life Science Facility
 BL-04 für Transmutationforschung
 Neutroneneinfang bis 100 keV Curium,
 Langlebige Spaltprodukte
 Transmutation Physics Experimental Facility (TEF-P)
 Kritisches Target U, Pu, MA mit 10 W Protonen
 ADS Target Test Facility (TEF-T)
 Flüssigmetall-Spallationstarget Pb-Bi ,
 600 MeV 200 kW Protonen

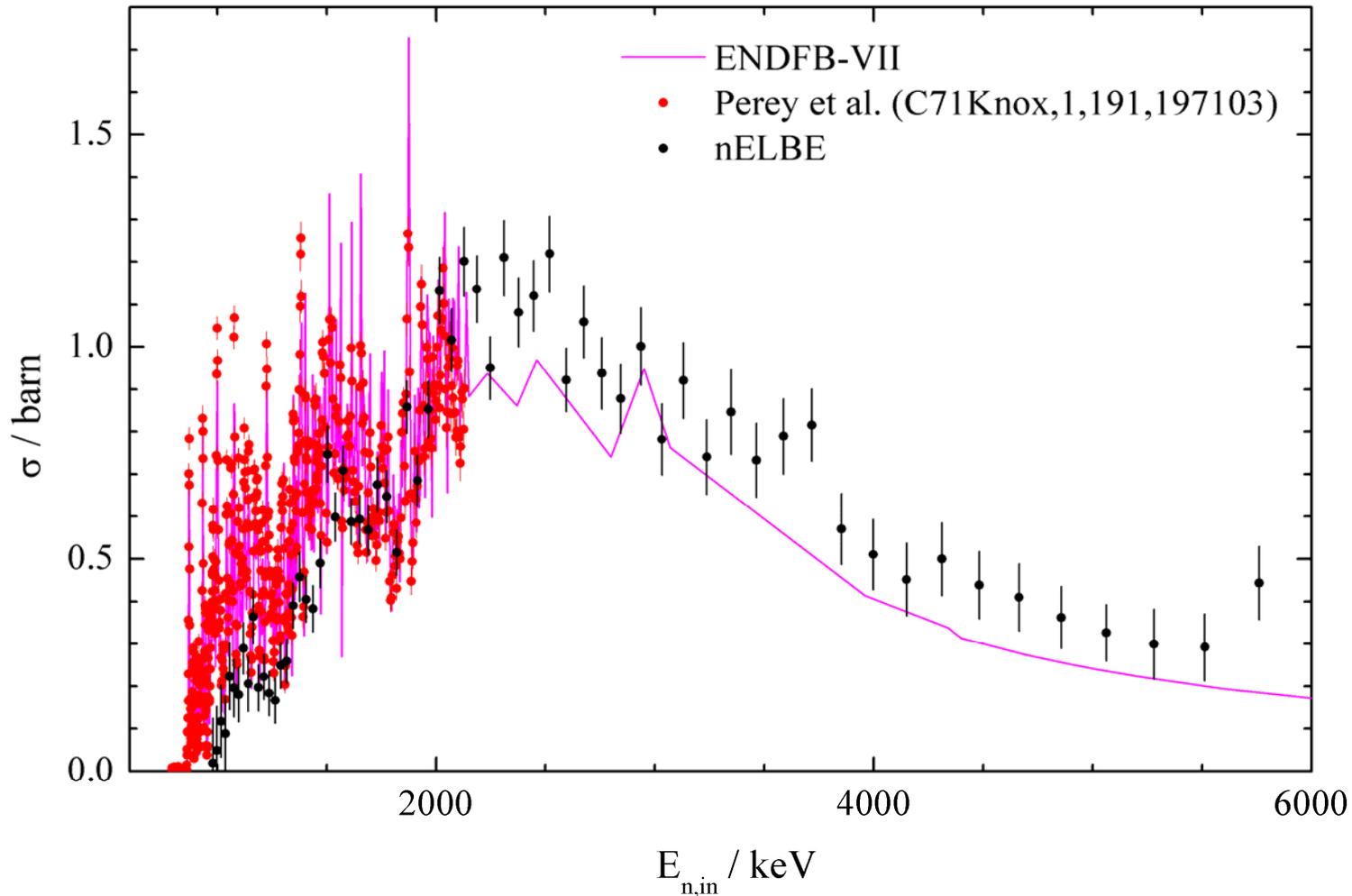
ToF – facilities producing fast neutrons

n-ToF-device	p, linac + ring					e, linac			ELBE			
	CERN n-ToF		JPARC MLF		ORNL SNS	LANL LANSCE	IREN + $^{239}\text{Pu}^*$		ORNL ORELA	IRMM GELINA	FZD n-ELBE	ELBE + photo-gun
beam power / kW	10		100	1000 ⁺	1000	80	10		8	7	5	40
rep. rate / s ⁻¹	0.4		25		60	20	150		500	800	8·10 ⁵	5·10 ⁵
flight path L / m	183	20 ⁺	≈ 25		84	20	60	500	40	20	5	5
n-pulse length / ns	> 7		100		500	125	400		> 4	> 1	< 1	< 1
E _{min} / eV	0.1	0.1	≈ 0.1		0.1	1	10		10	10	5·10 ⁴	4·10 ⁴
E _{max} / eV	3·10 ⁸		≈ 10 ⁶		≈ 10 ⁸	≈ 10 ⁶	5·10 ⁶		5·10 ⁶	4·10 ⁶	7·10 ⁶	7·10 ⁶
ΔE/E @ 1MeV	0.5%	5%	< 2 %		> 10 %	≈ 17 %	9%	1%	< 4 %	< 2 %	< 2 %	< 2 %
n-flux Φ_L at 1MeV (s·cm ² ·MeV) ⁻¹ exp. site	2·10 ⁴	2·10 ⁶	10 ⁶	5·10 ⁷	10 ⁷	≈ 3·10 ⁵	10 ⁵	10 ³	10 ⁴	4·10 ⁴	10 ⁵	4·10 ⁶
Q = $\Phi_L / \Delta E/E$	4·10 ⁶	4·10 ⁷	5·10 ⁸	2·10 ¹⁰	< 10 ⁸	4·10 ⁷	10 ⁶	10 ⁵	2·10 ⁵	2·10 ⁶	5·10 ⁶	2·10 ⁸

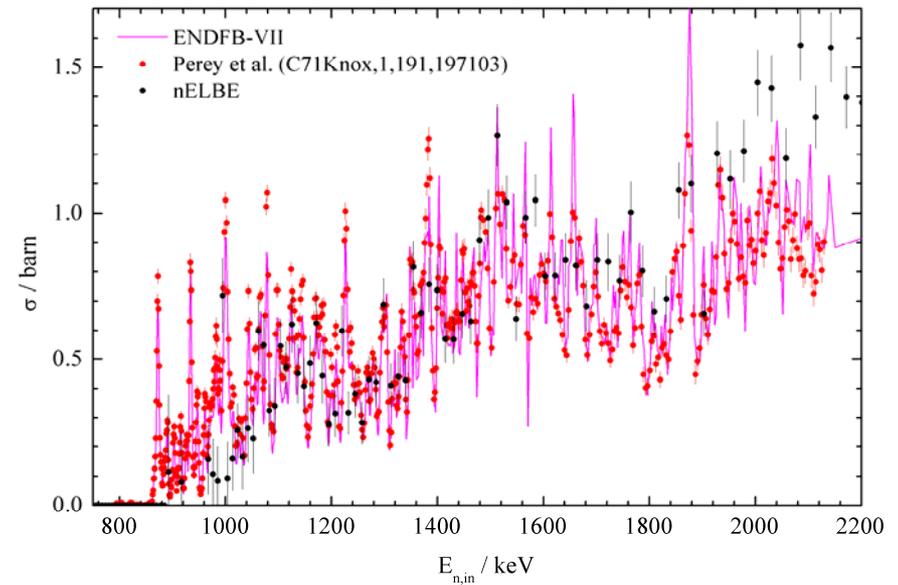
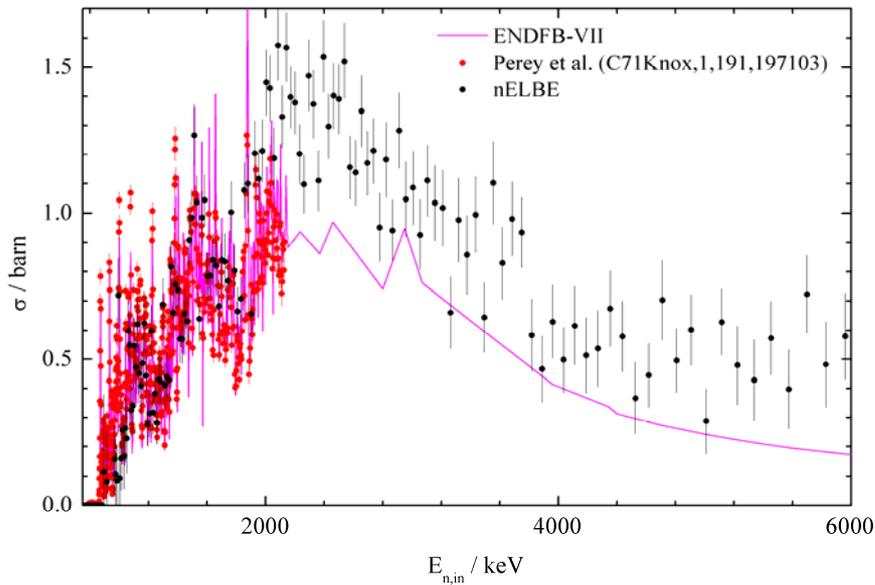
⁺ Projekt

Facilities for materials research, * delayed neutrons
nuclear research also possible from fission !

Inelastische Streuung $^{56}\text{Fe}(n,n'\gamma)$



Inelastische Streuung $^{56}\text{Fe}(n,n'\gamma)$

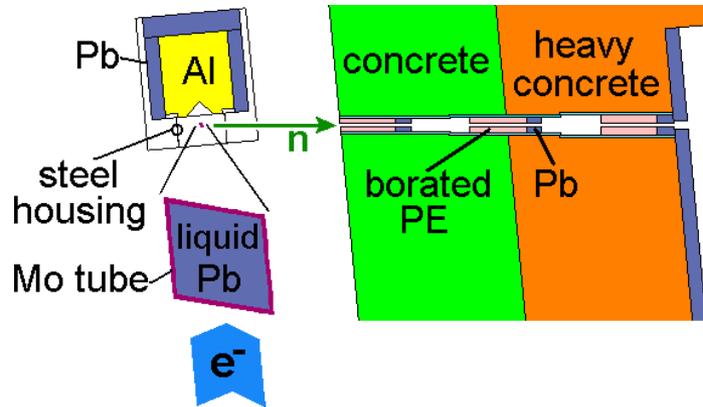


Vorläufige Ergebnisse, Problem: Absolutnormierung bei $E_n > 1.8 \text{ MeV}$

nELBE Beteiligung in EFNUDAT

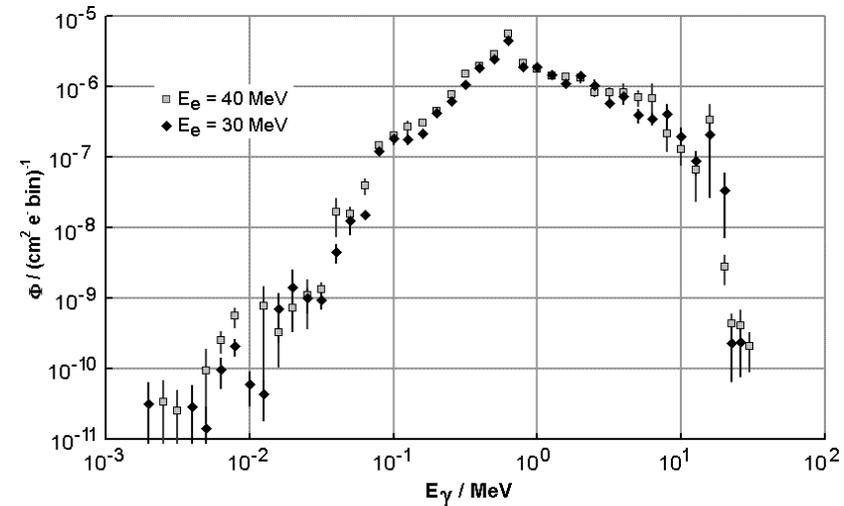
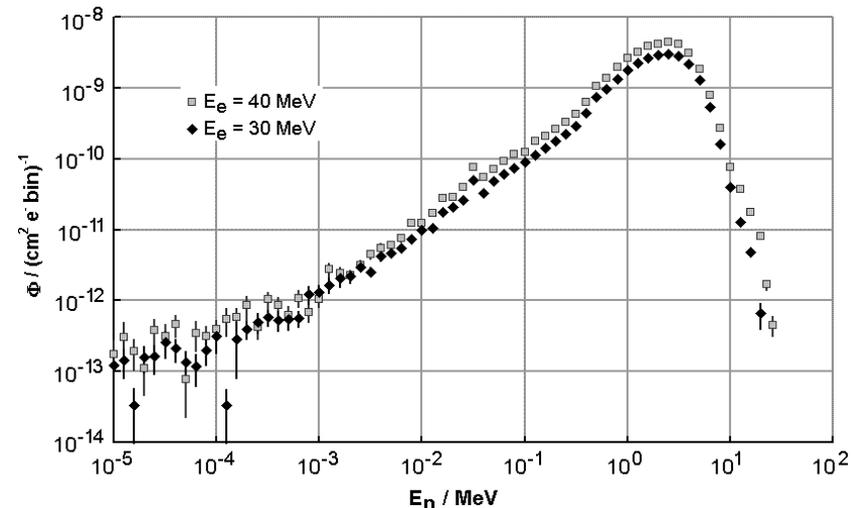
- Joint Research Activities:
 - Entwicklung eines digitalen Datenerfassungssystems mit schnellen Digitizern
 - Qualitätssicherung der Messungen (Plastikszintillatoren für Flugzeitmessung mit niedriger Nachweisschwelle)
 - Targetentwicklung (Neutronenproduktionstargets + radioaktive Targets)
- Networking Activities: Workshops
- Transnational Access Activity: Support of external user groups

MCNP: Neutron and photon source spectra



- *Mode e p n* calculation with photonuclear physics turned on
- Photonuclear cross sections for Pb and Mo adopted
- Electrons started uniformly outside Mo channel from circular disc, $\varnothing = \varnothing_{\text{beam}} = 8 \text{ mm}$
- Neutron and photon source distributions detected in collimator direction
- Distributions used as source spectra in later simulations – n & γ started uniformly from a cylindric volume (= intersection between e^- beam and Mo/Pb radiator)

→ J. Klug et al. NIM A 577 (2007) 641



nELBE Experimentaufbau

Target ladder:

- W beam shutter
- Al 40 mm
- Ta 25.5 mm
- Ta 35.2 mm
- empty

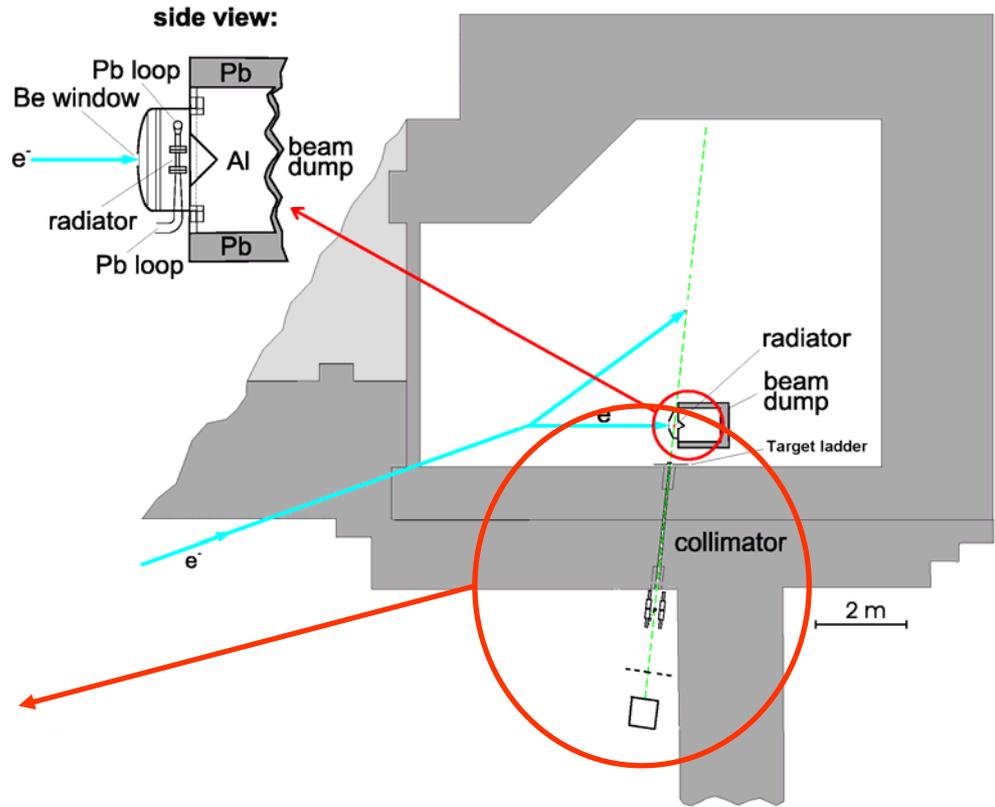
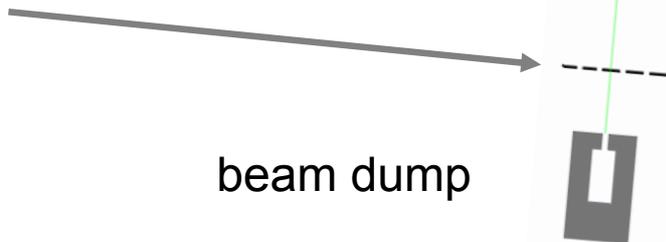
Target ladder

collimator



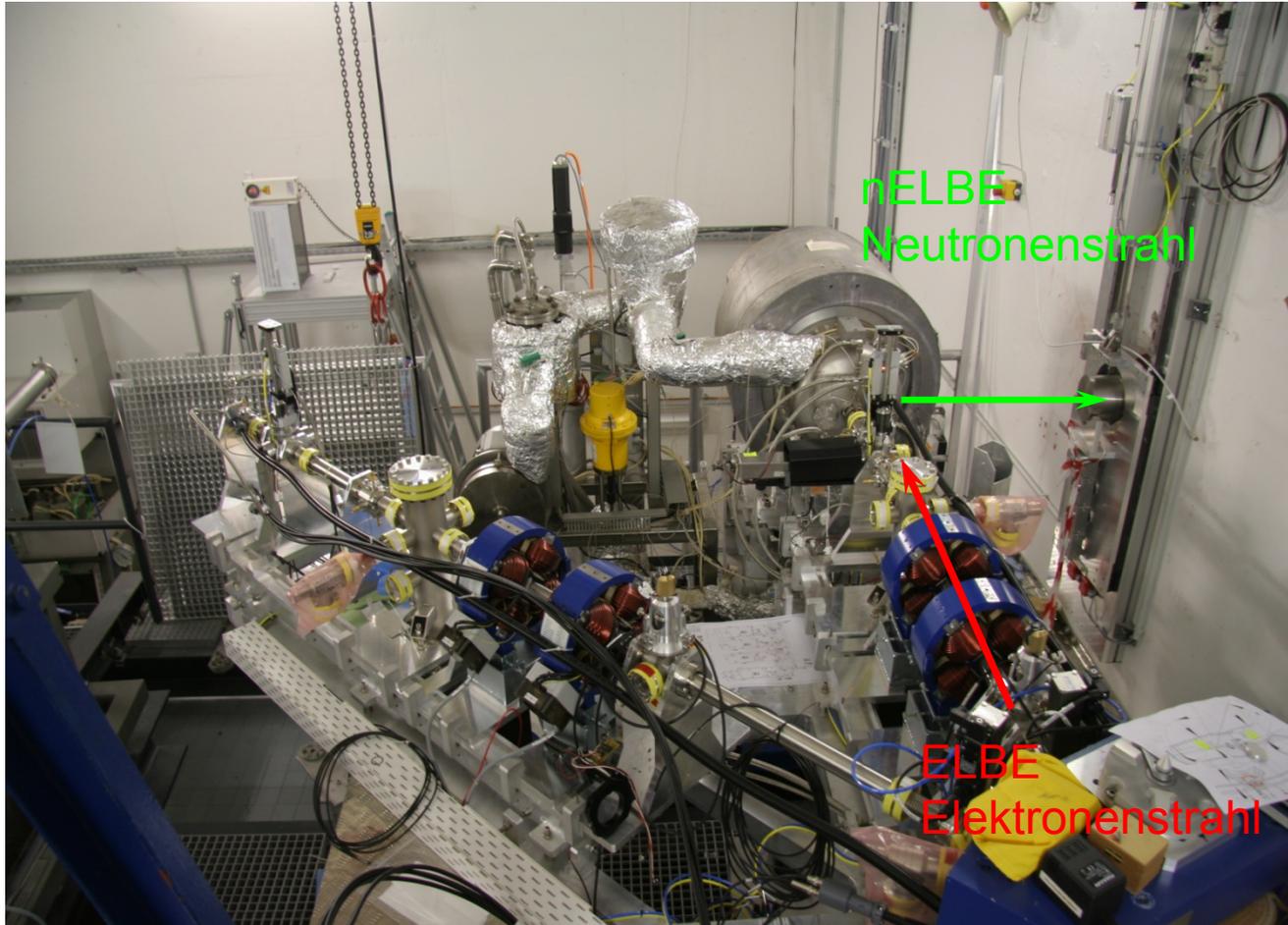
Plastic scintillator + 1cm Pb shield

beam dump



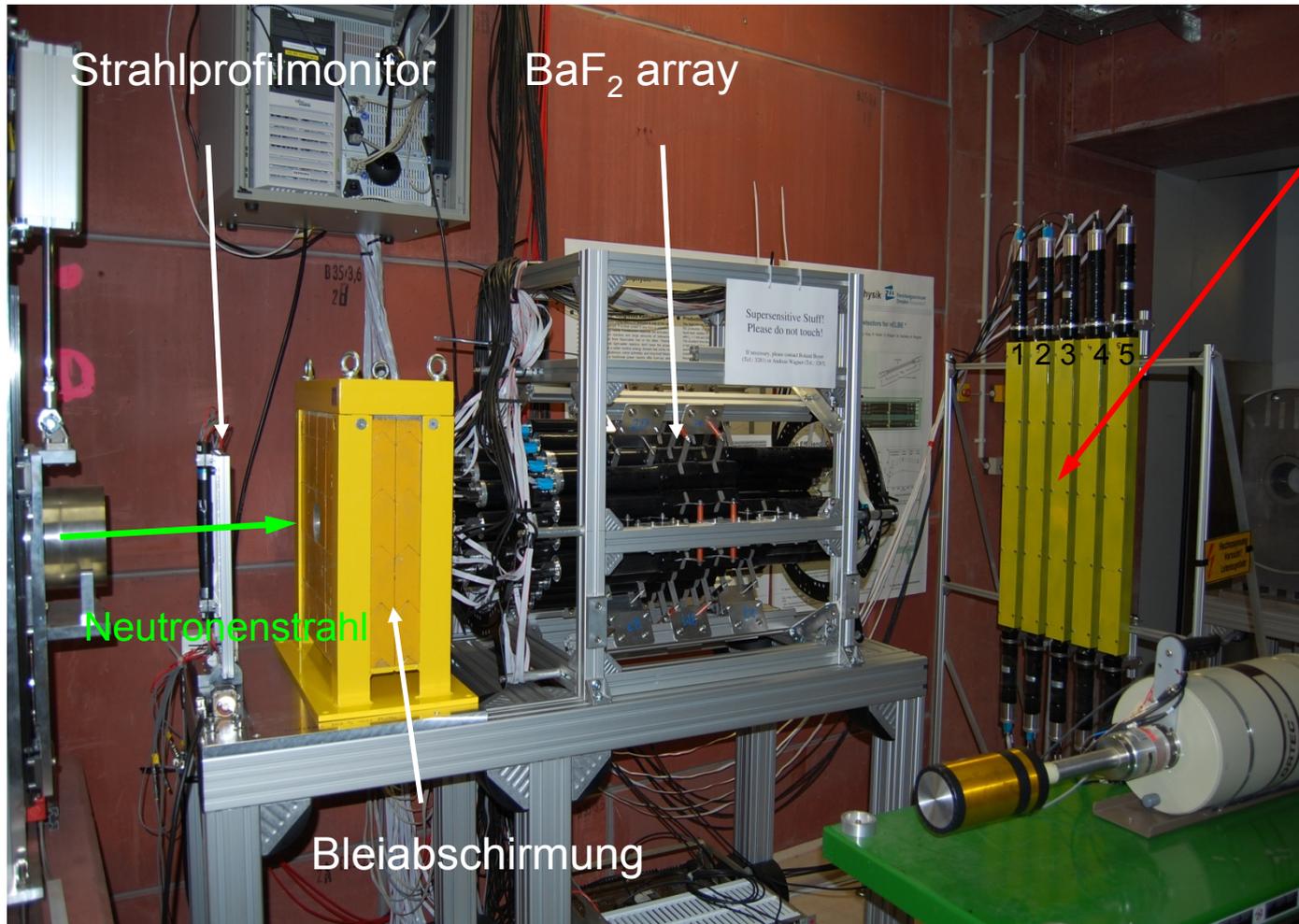
Measurement from Jan 30 – Feb 02,08
 Target cycling in 20 min intervals
 MBS(VME) listmode DAQ
 flight path: 653 cm
 total measurement time: 50 h

Neutronenflugzeitanlage nELBE



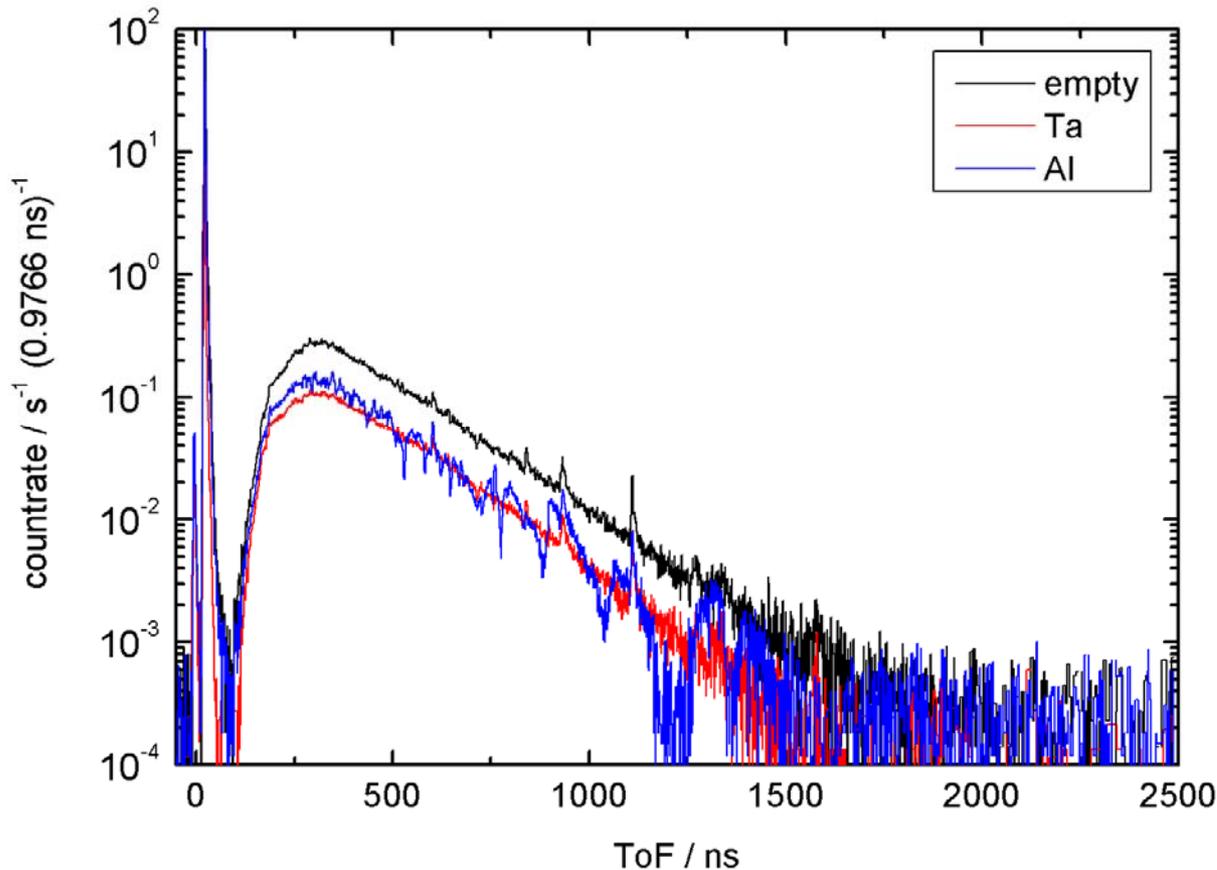
Neutronenerzeugung in einem Flüssigbleikreislauf

nELBE Experimentaufbau



5 Plastik-Szintillatoren
zur Flugzeitmessung
mit zusätzlicher
Bleiabschirmung
(d=1 cm)

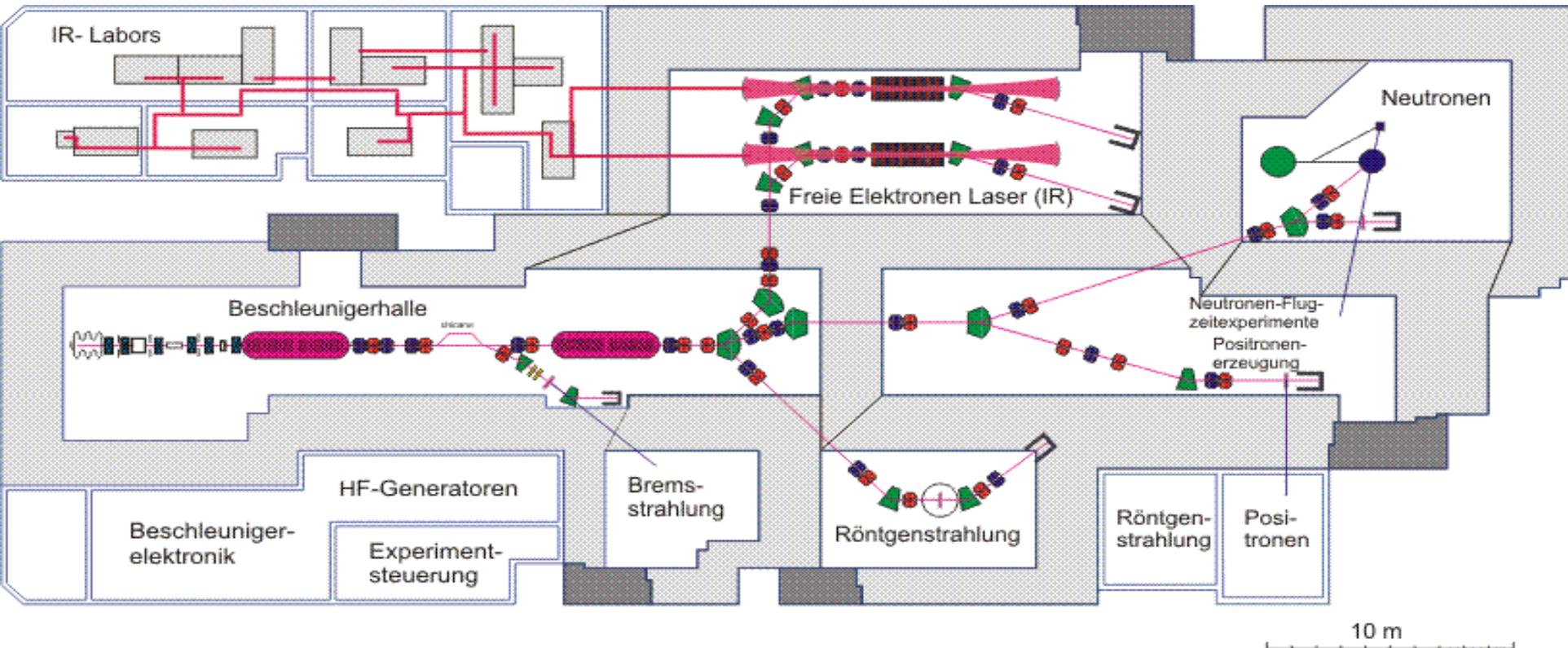
Background corrected Time of Flight Spectra



100 kHz pulse rate,
 $<1 \mu\text{A}$ average beam current
 neutron intensity: 500 n/s

photon peak width: 750ps FWHM
 dominated by time resolution of
 the plastic scintillators

Strahlungsquelle ELBE



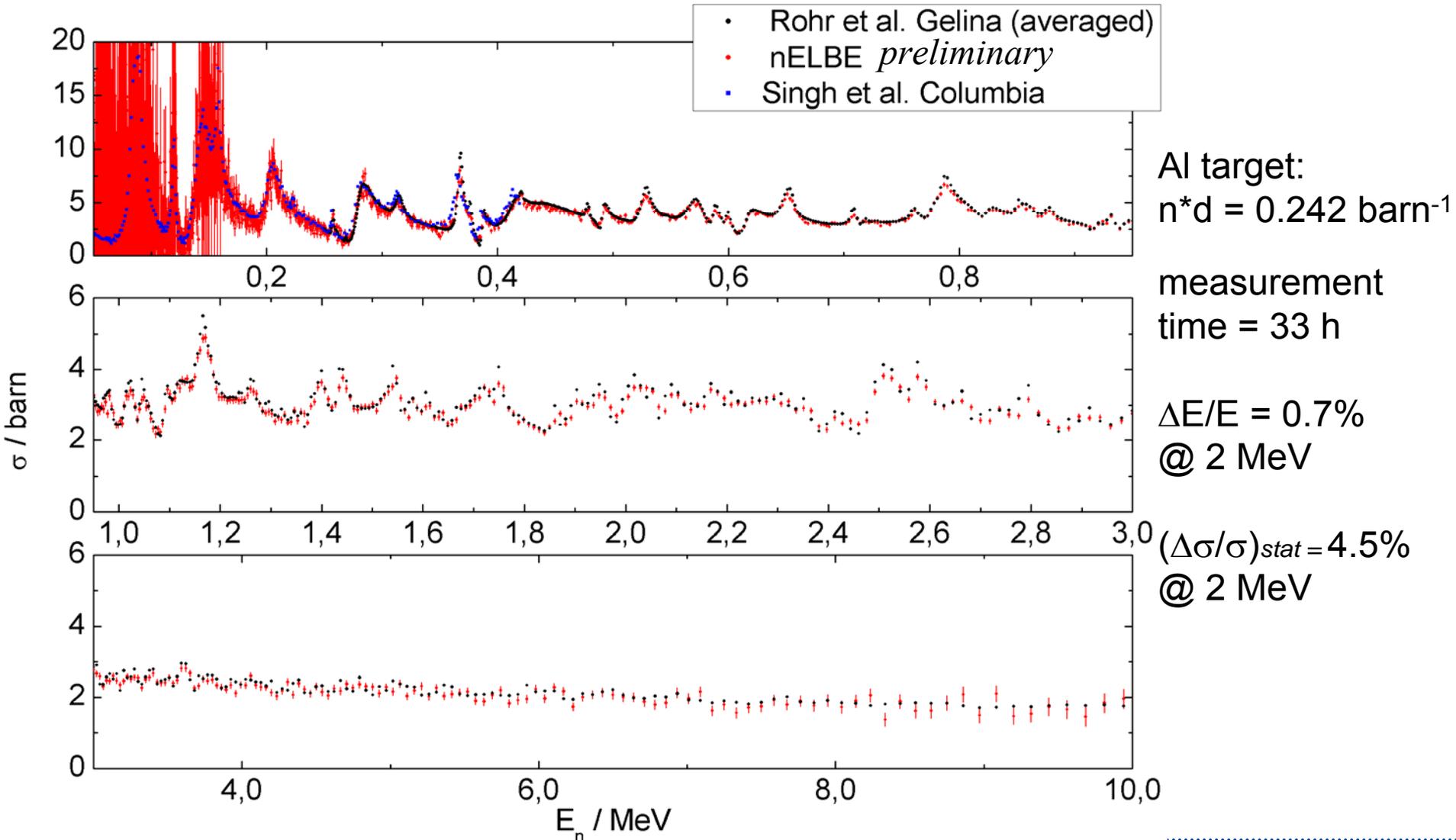
Sekundärstrahlen an ELBE:

- kohärente Infrarotstrahlung (5 - 150 μm)
- quasi-monochromatische Röntgenstrahlung (10 - 100 keV)
- (polarisierte) Bremsstrahlung (5 - 20 MeV)
- gepulste Neutronenstrahlen (ca. 0.1 - 10 MeV)
- gepulste monoenergetische Positronen (1 - 30 keV)

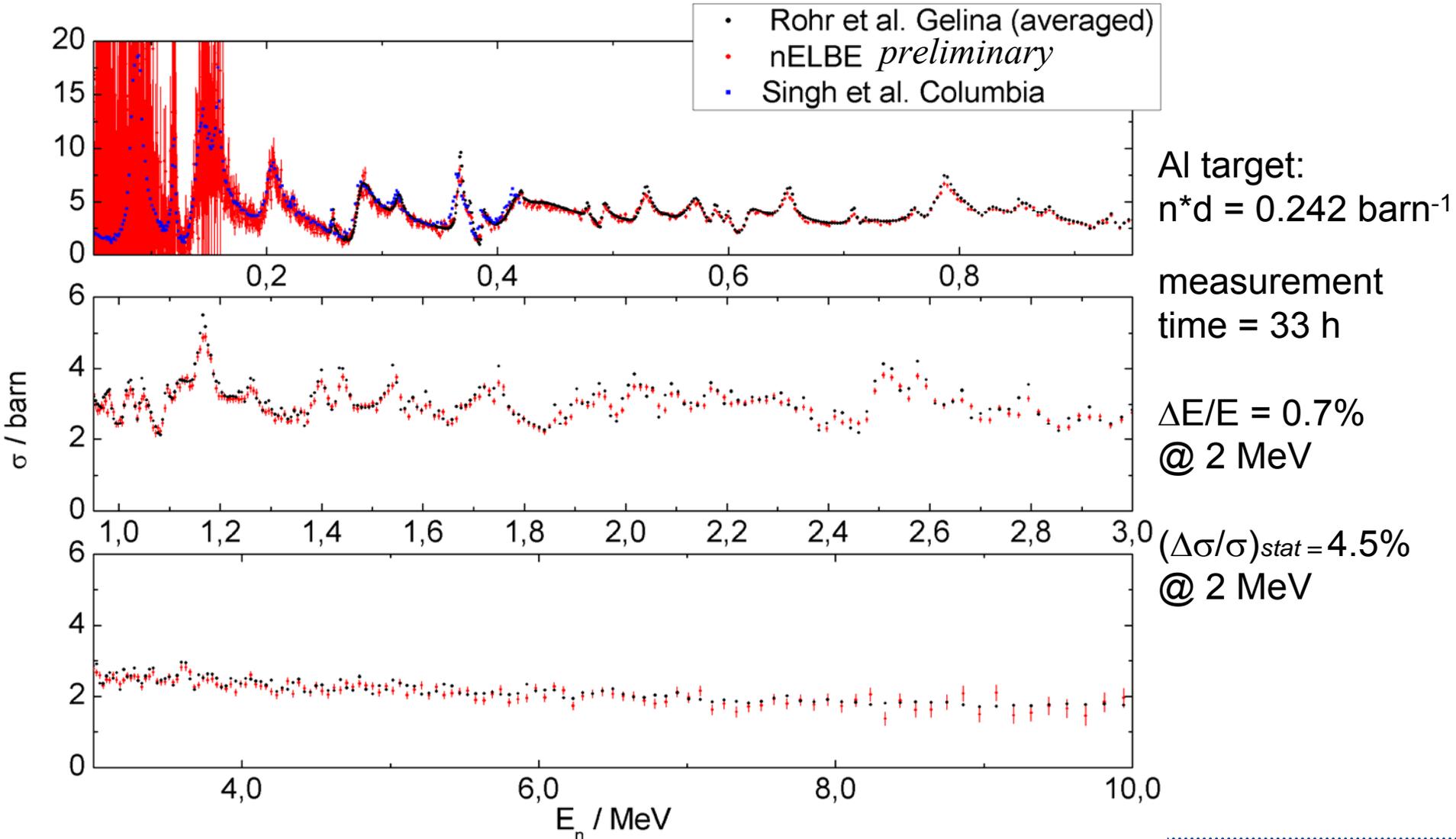
Experimente zur Transmutation



Al-Transmission Measurements



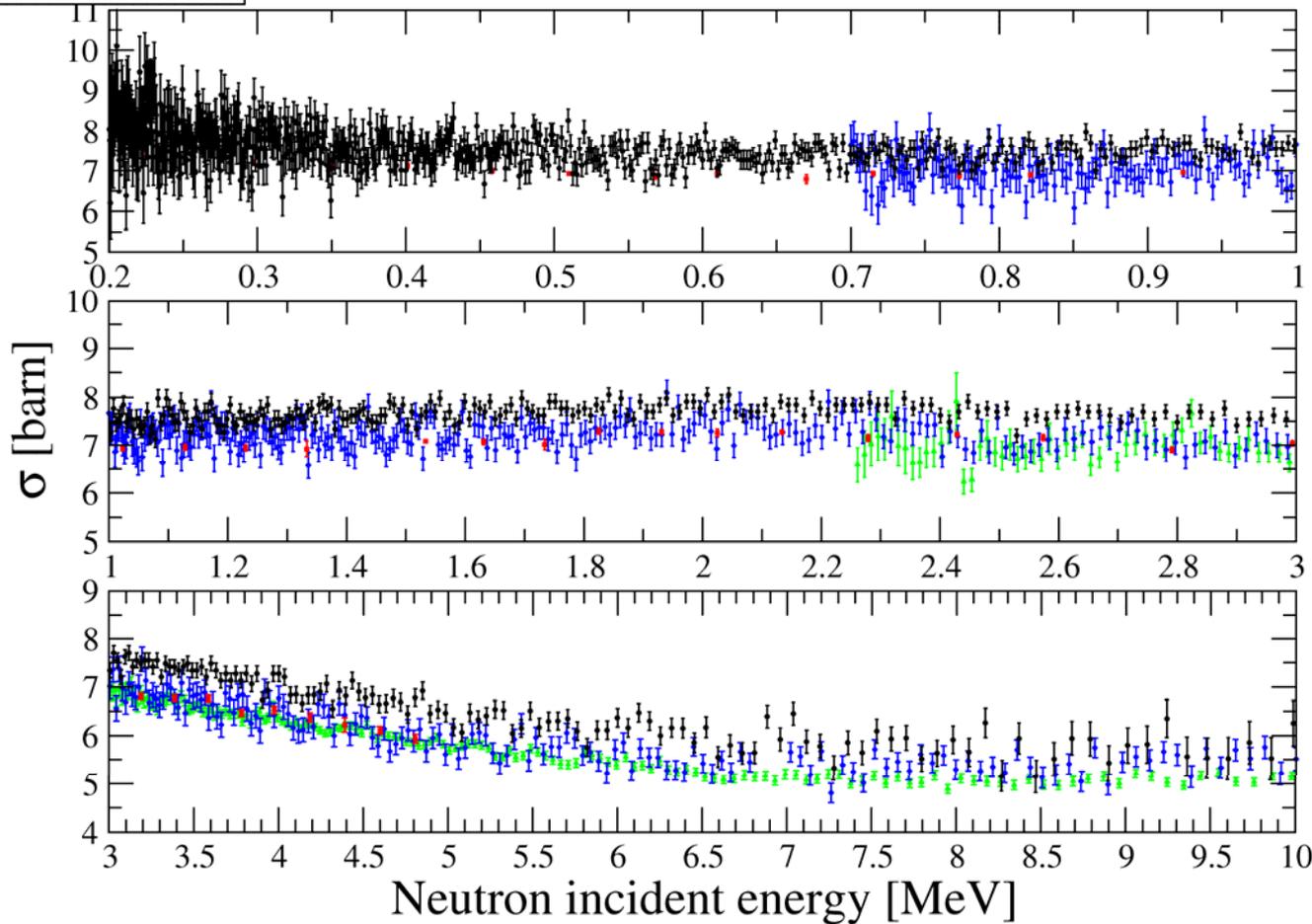
Totaler Neutronenwirkungsquerschnitt von ^{27}Al



Totaler Neutronenwirkungquerschnitt von ^{nat}Ta

- Foster_1972
- Martin_1966
- Poenitz_1981
- nELBE_Feb_08

Neutron total cross section for ^{nat}Ta



Ta target:
 $n \cdot d = 0.142 \text{ barn}^{-1}$

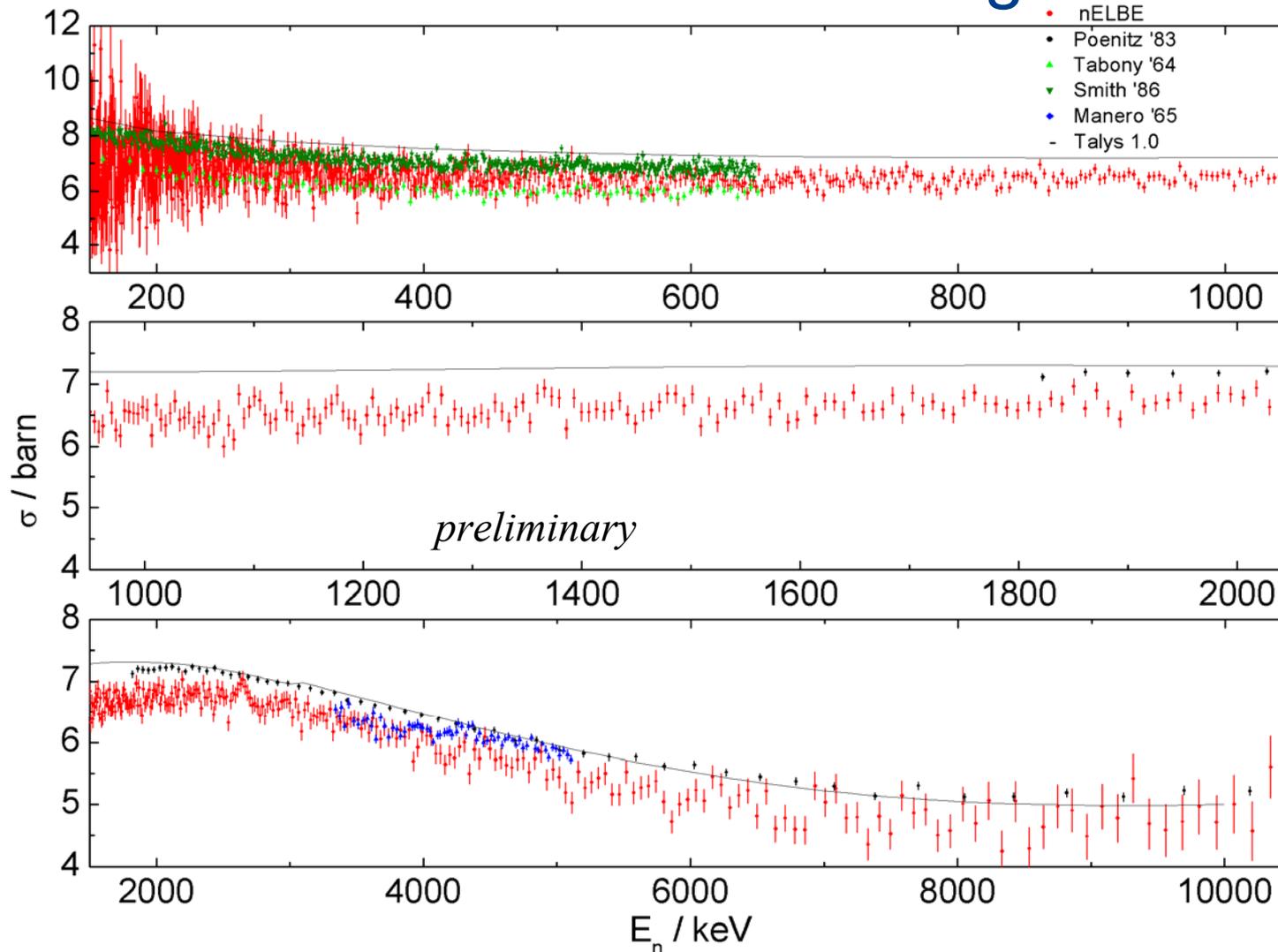
Messzeit= 33 h

$\Delta E/E = 0.7\%$
 @ 2 MeV

$(\Delta\sigma/\sigma)_{stat} = 1.9\%$
 @ 2 MeV

Korrekturen zur
 Normierung

Tantal – Transmissions-Messung



— Talys

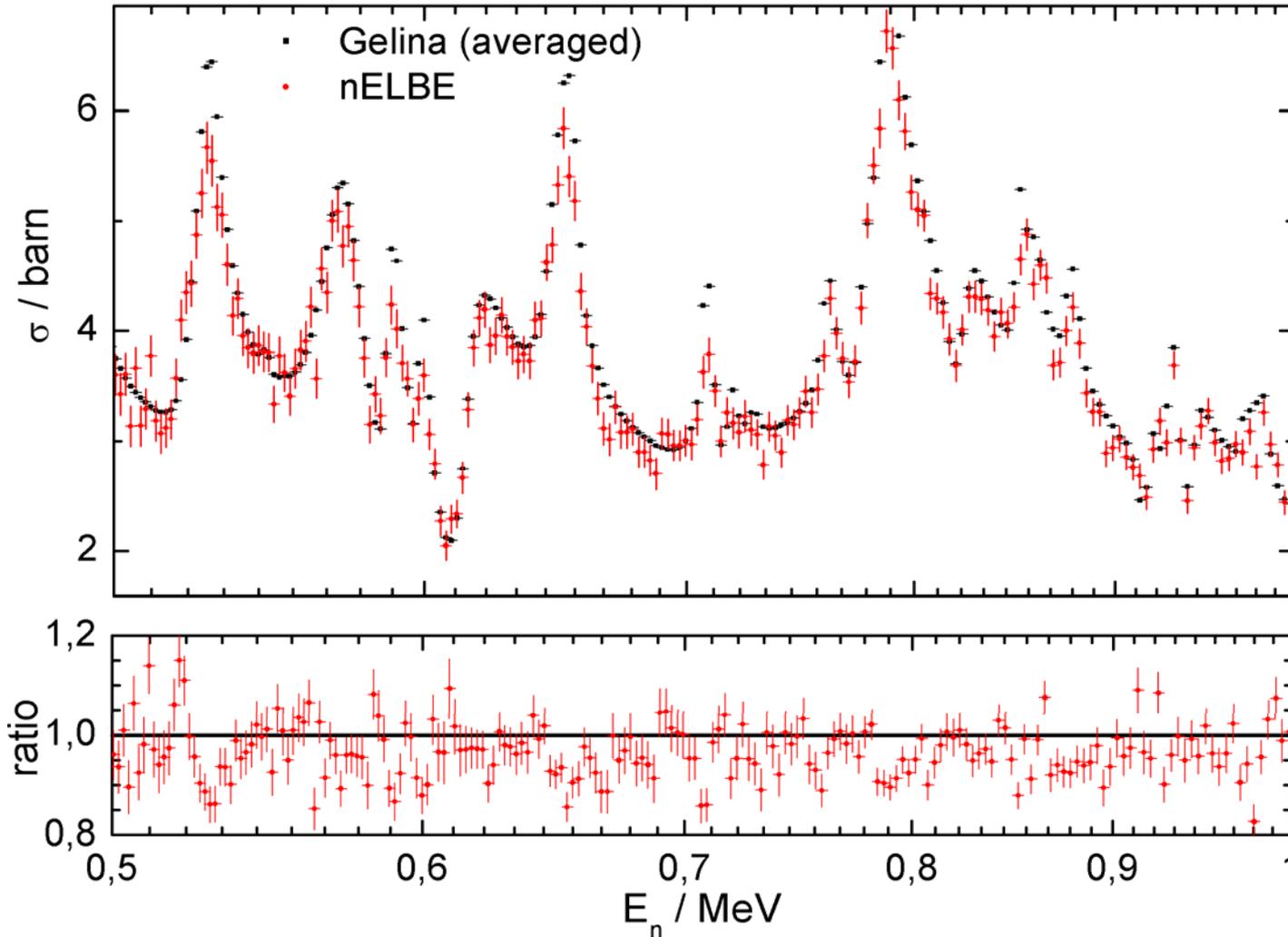
Ta target:
 $n \cdot d = 0.142 \text{ barn}^{-1}$

Messzeit = 33 h

Energieauflösung
 $\Delta E/E = 0.7\%$
 @ 2 MeV

Statistische
 Ungenauigkeit
 $(\Delta\sigma/\sigma)_{stat} = 1.9\%$
 @ 2 MeV

Al-Transmission Measurement



Absolute values
agree to 3%

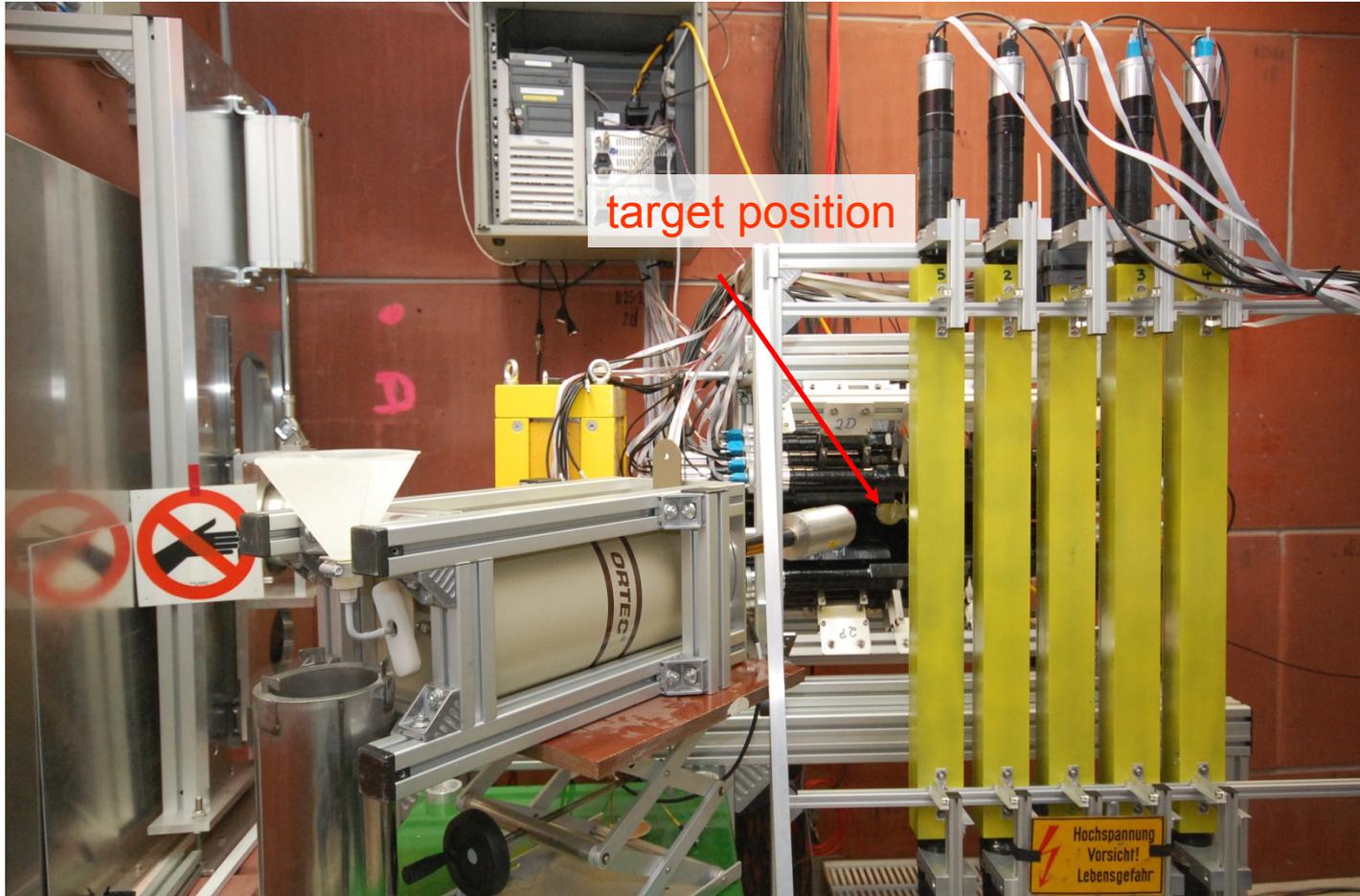
Inscattering correction
to be completed

Neutron beam intensity comparison

Facility	CERN n-ToF	CERN n-ToF Phase-2	LANL NSC	ORNL SNS	FZK VdG	ORNL ORELA	IRMM GELINA	nELBE	nELBE with SRF-gun
Pulse charge / nC	ca. 10^3	ca. 10^3	$4 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^4$	0.01	ca. 100	ca. 100	0.08	1.8
Power / kW	10	10	60	1000	0.4	8	7	5	40
Pulse rate / s ⁻¹	0.4	0.4	20	60	$2.5 \cdot 10^5$	500	800	$5 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^5$
Flight Path / m	183	Ca. 20	60	84	0.8	40	20	4	4
n-pulse length / ns	>7	>7	125	100-700	ca. 1	>4	>1	< 0.4	< 0.4
E _{min} / eV	0.1	0.1	1	0.1	10^3	10	10	$2 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$
E _{max} / eV	$3 \cdot 10^8$	$3 \cdot 10^8$	ca. 10^8	ca. 10^8	$2 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^6$	$4 \cdot 10^6$	$7 \cdot 10^6$	$7 \cdot 10^6$
resolution at 1 MeV / %	0.5%	5%	> 10 %	> 20 %	ca. 5 %	< 1 %	< 2 %	ca. 1 %	ca. 1 %
n flux density / s ⁻¹ cm ⁻² (E decade) ⁻¹	10^5	ca. 10^7	ca. 10^6	$10^6 - 10^7$	ca. 10^4	10^4	$4 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^6$

↑
shutdown
new: FRANZ neutron source
Frankfurt

Inelastic Neutron Scattering Setup



Coincident detection of scattered neutrons and gamma rays with

34 BaF₂ detectors
5 Plastic scintillators

Trigger Module developed based on FPGA CAEN V1495

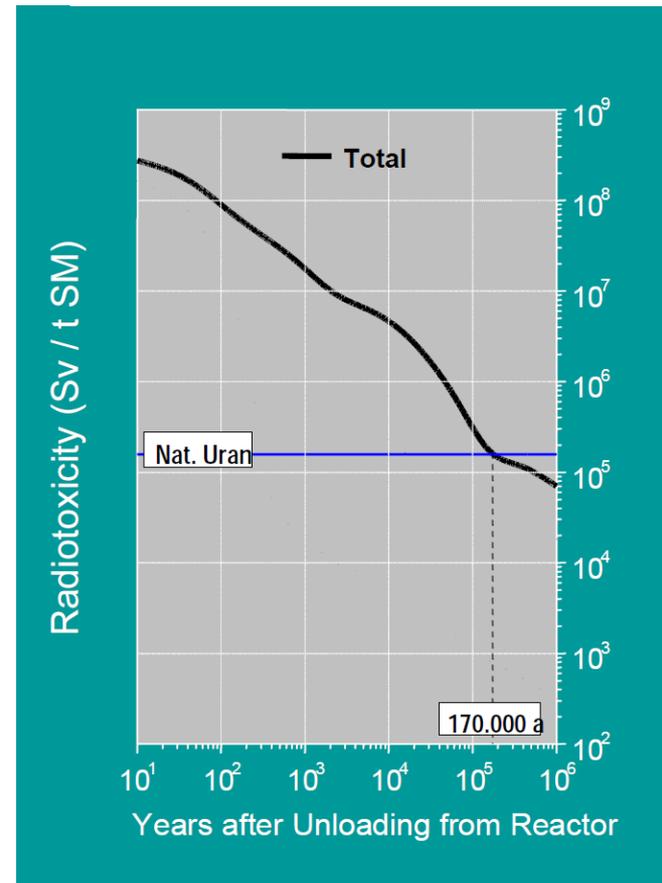
Fission chamber (ORTEC) for neutron intensity

Intensity: $8 \cdot 10^4/s$
 $\langle I \rangle = 2-3 \mu A$

First experiment finished 12 hours ago !

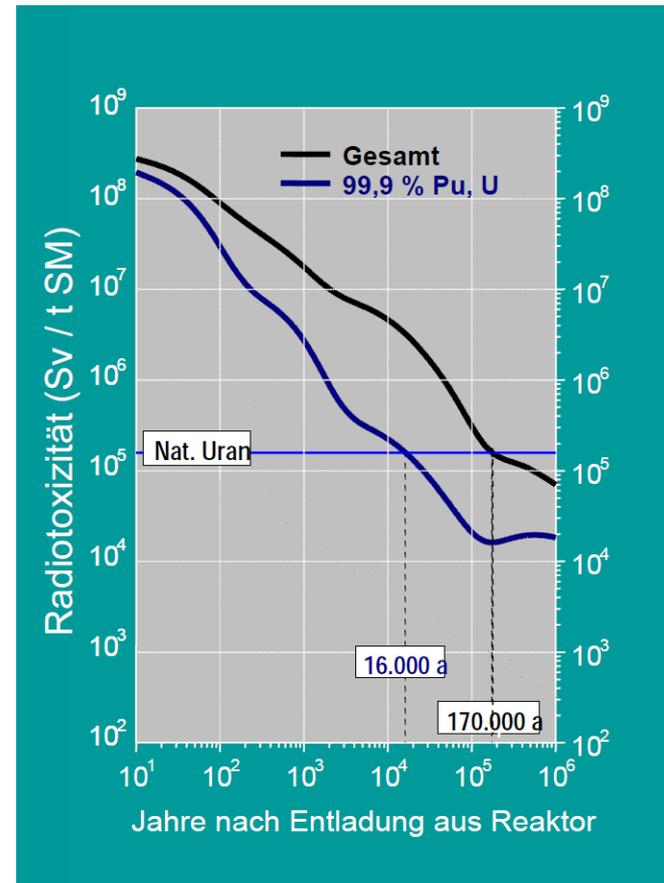
Radiotoxizitätsverminderung durch Transmutation

- Endlagerung des abgebrannten Kernbrennstoffs (SNF) ohne Abtrennung oder Transmutation



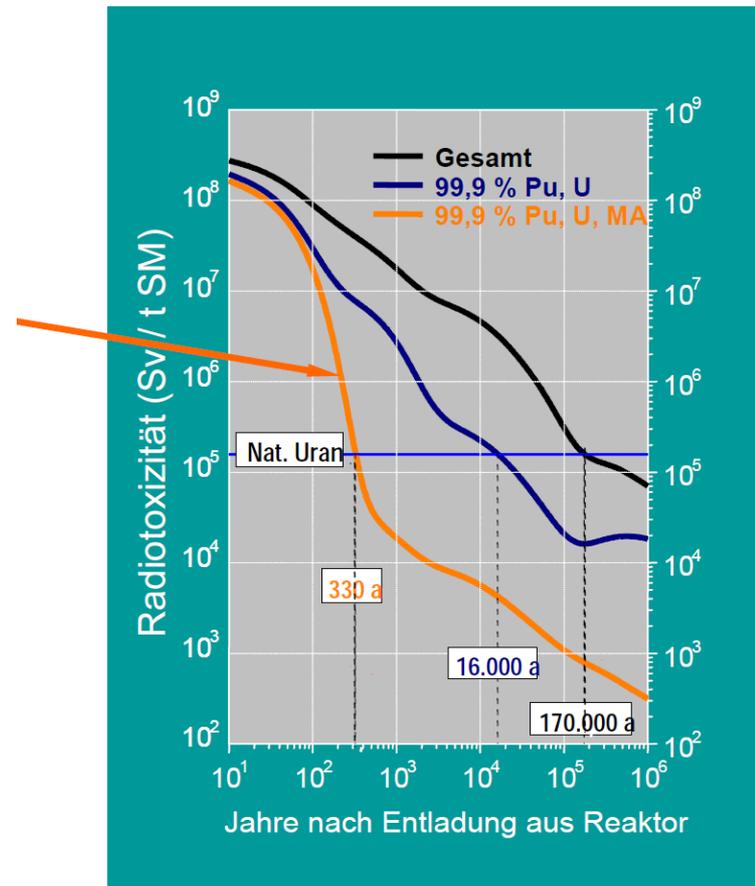
Radiotoxizitätsverminderung durch Transmutation

- Abtrennung und Transmutation von 99,9% des Uran und Plutonium



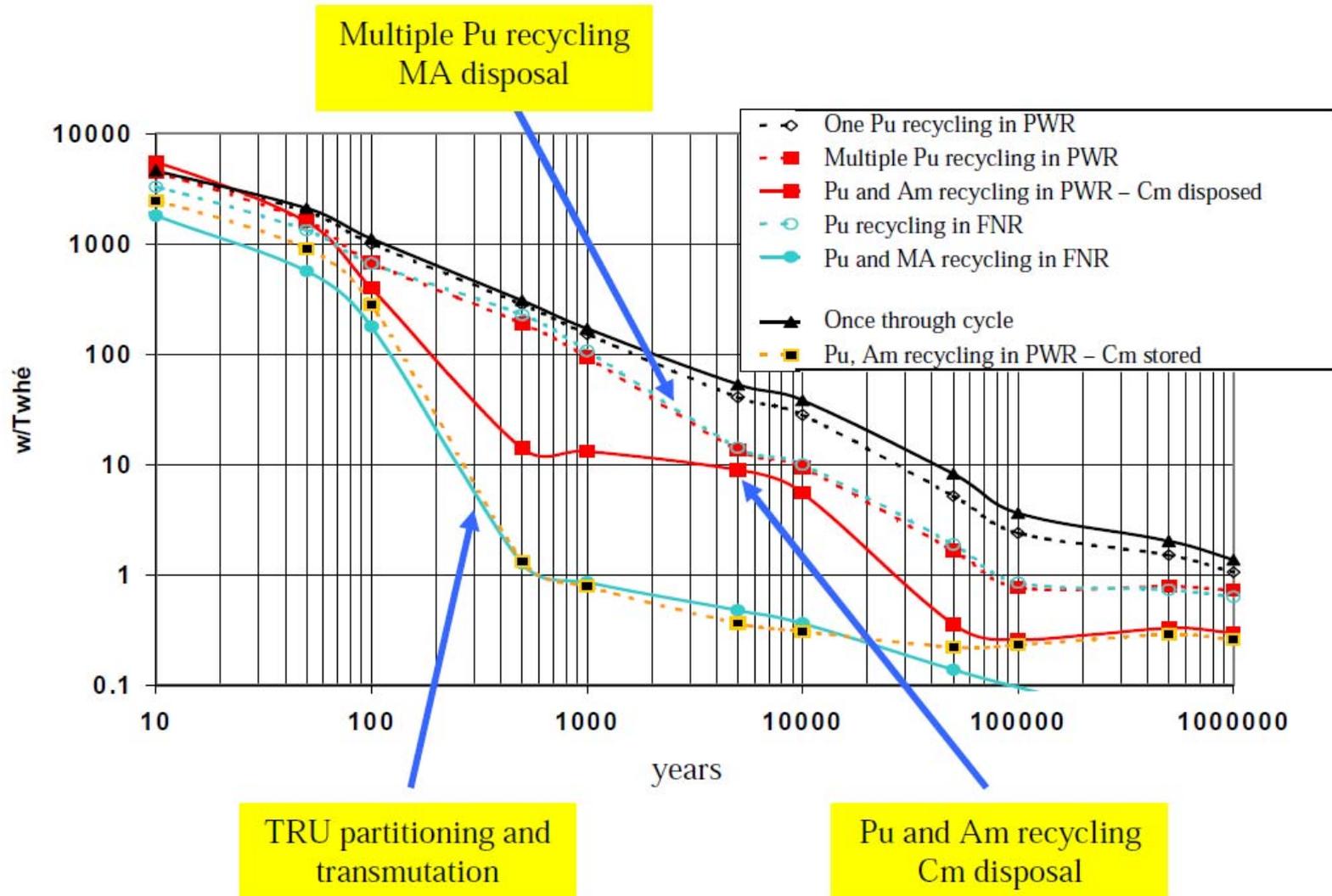
Radiotoxizitätsverminderung durch Transmutation

- Abtrennung und Transmutation von 99,9% des Urans und Plutoniums und der **minoren Aktiniden**
- Endlagerung nur noch über historische Zeiträume nötig



Quelle: J. Knebel, FISA 2009, Prag

Figure 1.14. Heat load in a repository



Sustainable Nuclear Energy Technology Platform

More and better quality data

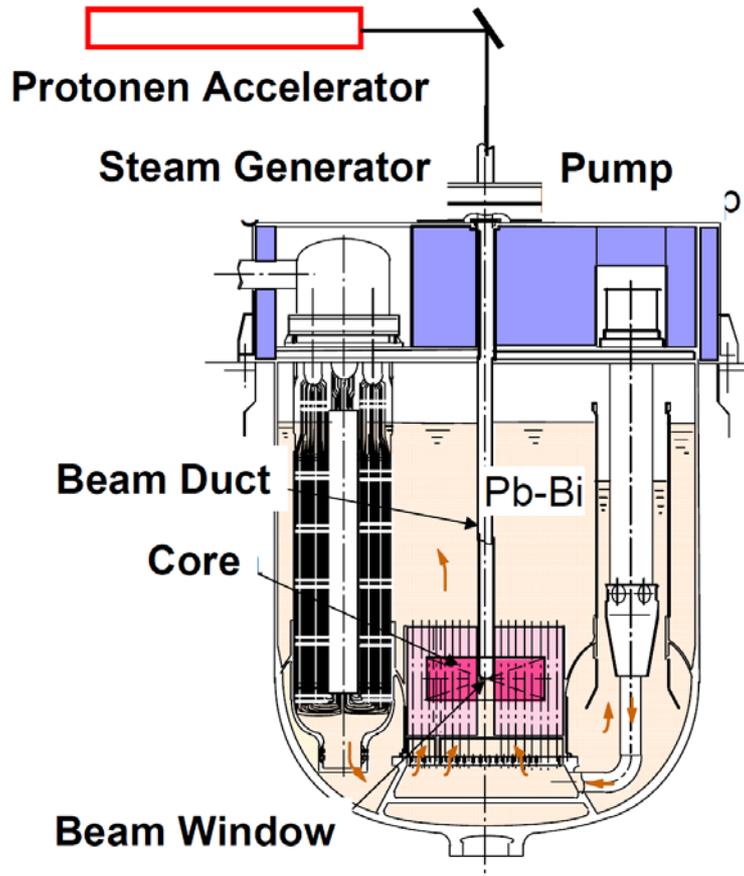
Availability of accurate nuclear data (cross sections, decay constants, branching ratios, etc.) is the basis for precise reactor calculations both for current (applications to higher burn-up, plant life extension) and new generation reactors. *Additional experimental measurements and their detailed analysis and interpretation are required in a broad range of neutron energies and materials. This is particularly true for fuels containing minor actinides for their transmutation in fast spectra*



Strategic Research Agenda

May 2009

Beschleunigergestützte unterkritische Systeme (ADS)



- Accelerator driven intense thermal neutron source, C.D. Bowman 1992, Energy Amplifier, C. Rubbia, 1995
- Unterkritischer Reaktorkern $k \approx 0.97$
Thermische Leistung: 400 MWt
- Höchstleistungs-Protonenbeschleuniger 800 MeV
ca. 10 mA Strahlstrom **8 MW- Strahlleistung**
- Kühlung durch Pb, Pb/Bi oder Na
- Kritikalität durch Spallationsneutronen
ca. 15-30 n / Proton steuerbar

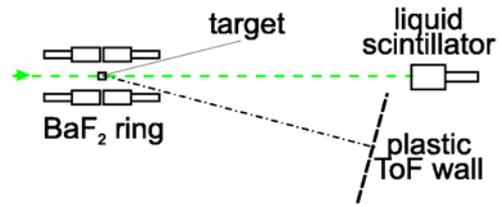
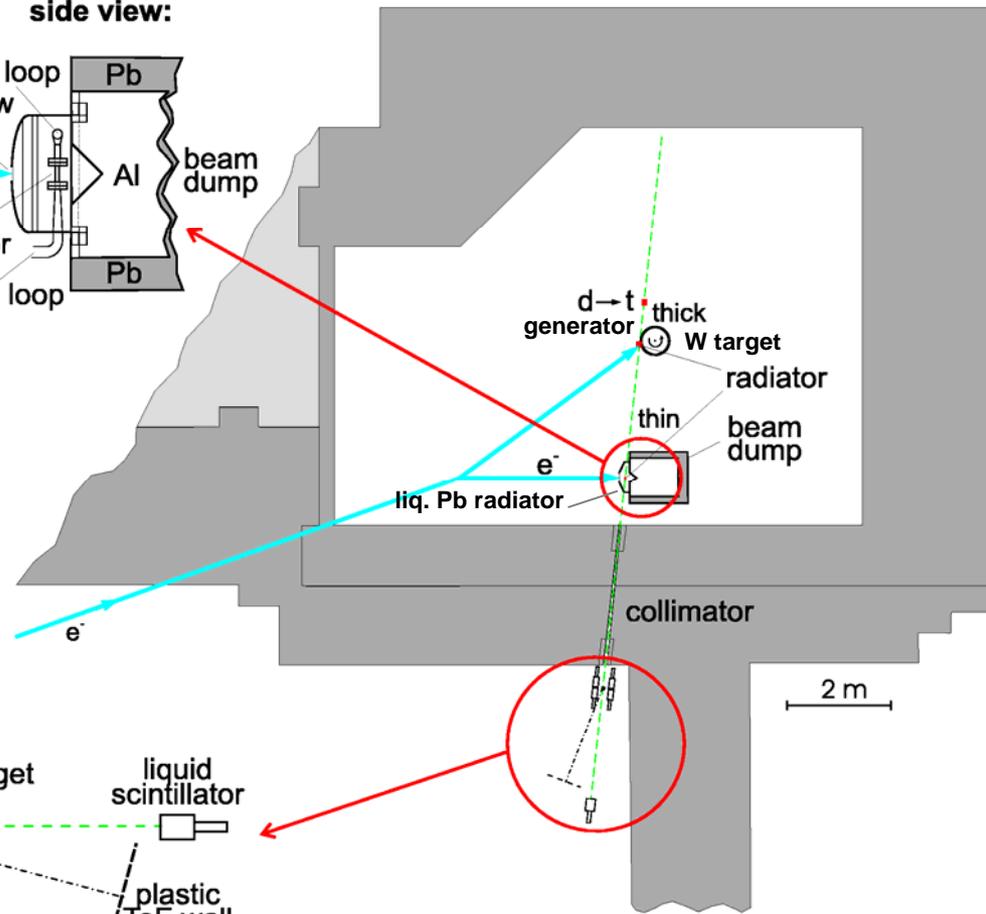
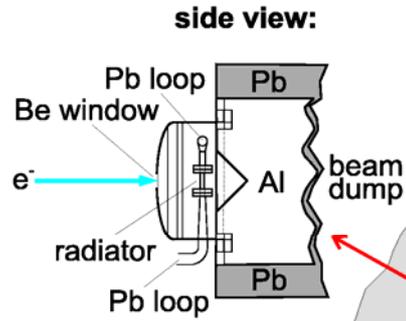
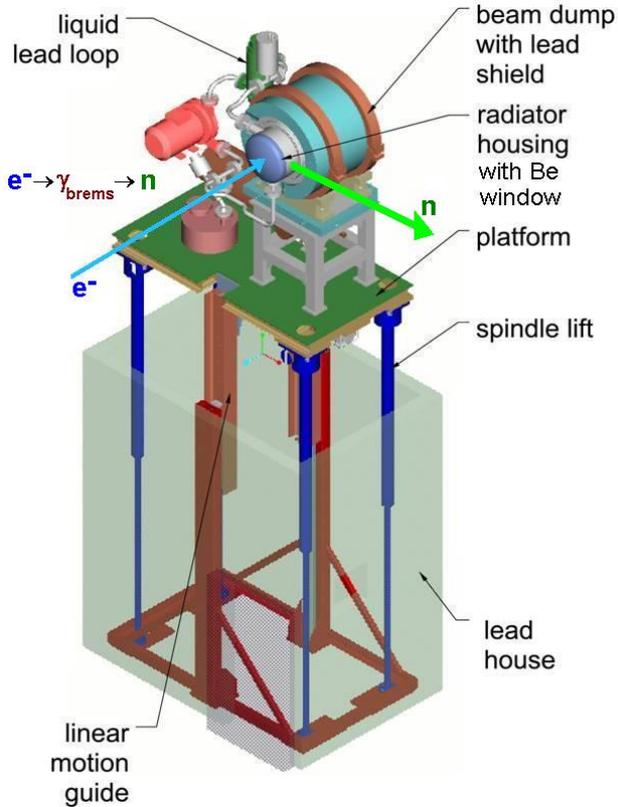
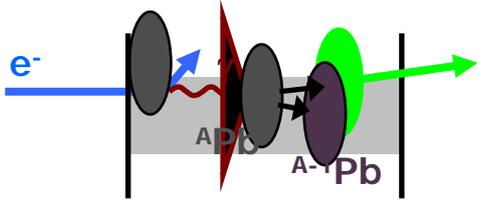
Herausforderungen:

Zuverlässigkeit des Beschleunigers
(Linac, Cyclotron)

Entwicklung des Spallationstargets (Fenster)

Abb. J.U. Knebel, KIT, FISA2009, Prag

nELBE – photoneutron facility at ELBE

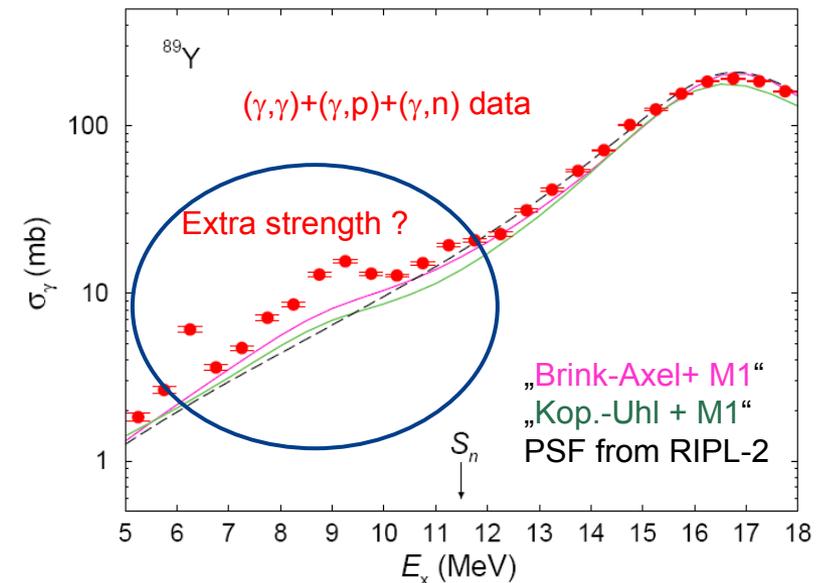


- Reaktionen für Transmutation: (n,γ) , $(n,n'\gamma)$.
- Statistische γ -Abregung von hochenergetischen Zuständen im Quasikontinuum.
- Analyse von Experimenten und Beschreibung in Modellen erfordern genaue Kenntnis von Photonen-Stärkefunktionen (PSF).

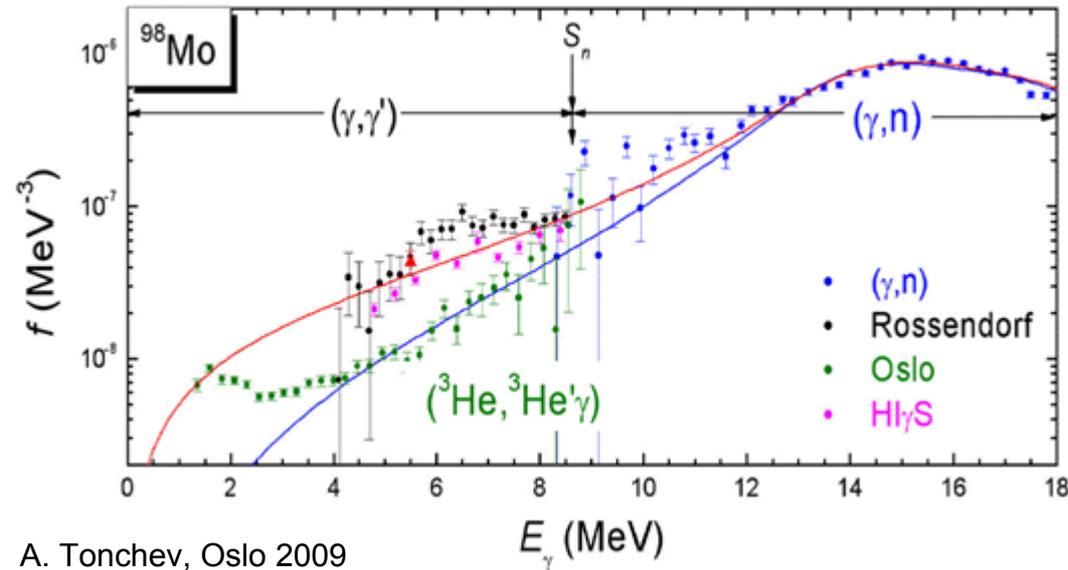
- Neue ELBE-Daten weichen von PSF-Modellen in Kerndatenbanken ab. www-nds.iaea.org/RIPL-2/
- Verbesserung der Beschreibung von (n,γ) -, $(n,n'\gamma)$ -Wirkungsquerschnitten mit genaueren PSF.



Messplatz für Photonenstreuung an ELBE:
 [NIM A 555, 211 (2005)]
 Einmalige Bedingungen für die empfindliche
 Messung von Dipol-Stärkefunktionen bis zur
 Neutronen-Separationsenergie.



Beispiel für PSF Messungen an ELBE
 [Phys. Rev. C 79, 024301 (2009)]
 Daten jetzt in www-nds.iaea.org/exfor/



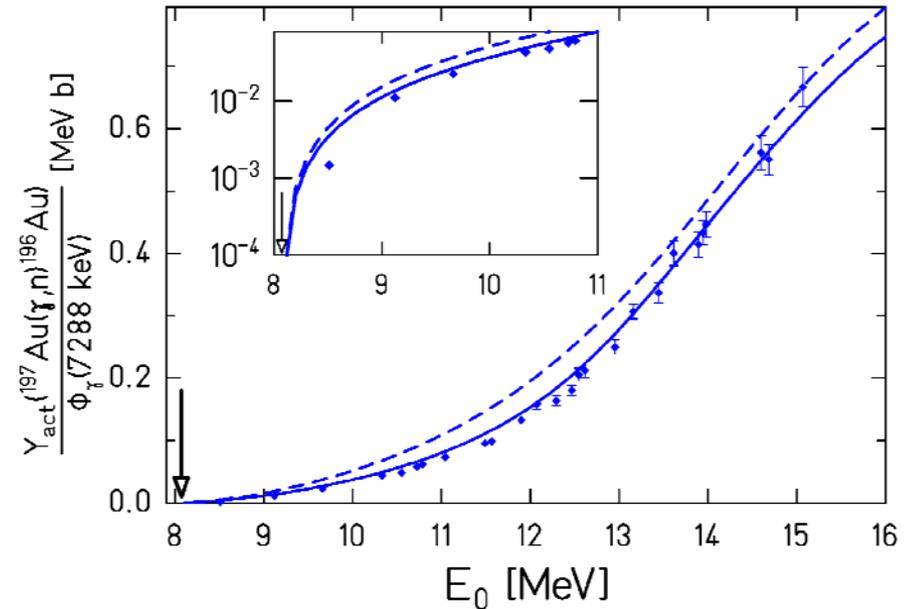
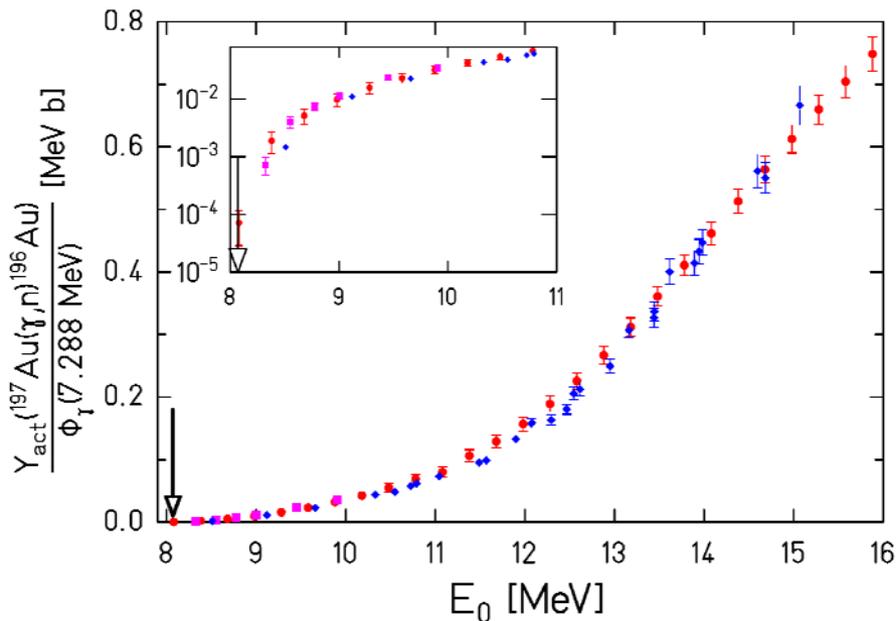
A. Tonchev, Oslo 2009

- Geringe Abweichungen $\text{HI}\gamma\text{S}$ und ELBE.
- Diskrepanz zu Werten aus $(^3\text{He}, ^3\text{He}'\gamma)$ - und älteren (n, γ) -Experimenten. (Oslo misst $\rho \cdot f$)
- ➔ Neue Experimente zur Verbesserung der Kenntnis der Eigenschaften von PSF notwendig.

Projekte:

- Einfluss der an ELBE gefundenen neuen Effekte in den PSF auf Wirkungsquerschnitte von (n, γ) - und $(n, n'\gamma)$ -Reaktionen.
- Messung der PSF in transmutionsrelevanten Nukliden um $A \approx 130$.
- Verbesserung der PSF-Modelle in Kernreaktionsdatenbanken und in Codes auf der Basis statistischer Reaktions-Modelle (Talys).

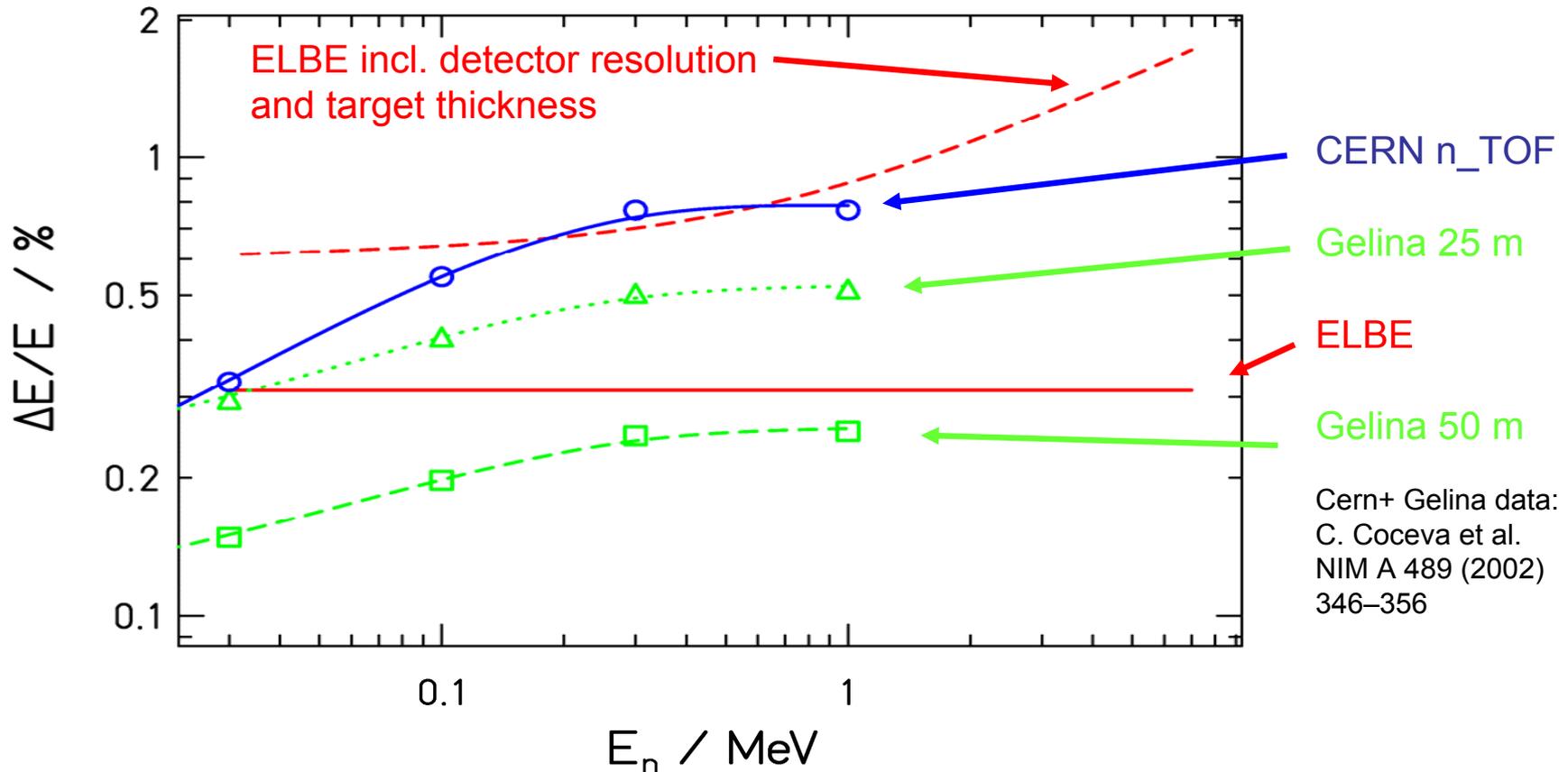
Photon-Stärkefunktion in photonuklearen Reaktionen



- Übereinstimmung der $^{197}\text{Au}(\gamma, n)^{196}\text{Au}$ Photoaktivierungsausbeuten von ELBE und aus Darmstadt ($E_0 < 10$ MeV) mit renormierten Photoneutronendaten von Veyssiere et al. (Saclay)
- Bestätigung der Normierung von Berman et al., Livermore (Faktor 0.93 für Saclay)
- Breite der E1 Dipolriesenresonanz ist unabhängig von der Gammaenergie.

C. Nair et al., Phys. Rev. C 78 (2008) 055802
 A. R. Junghans et al., PLB 670 (2008) 200

Simulierte Energieauflösung von nELBE



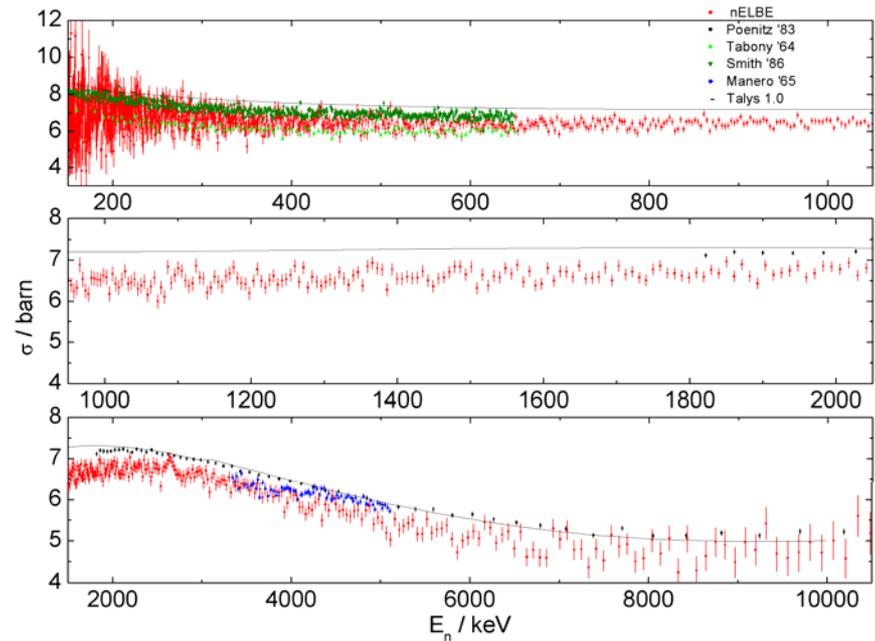
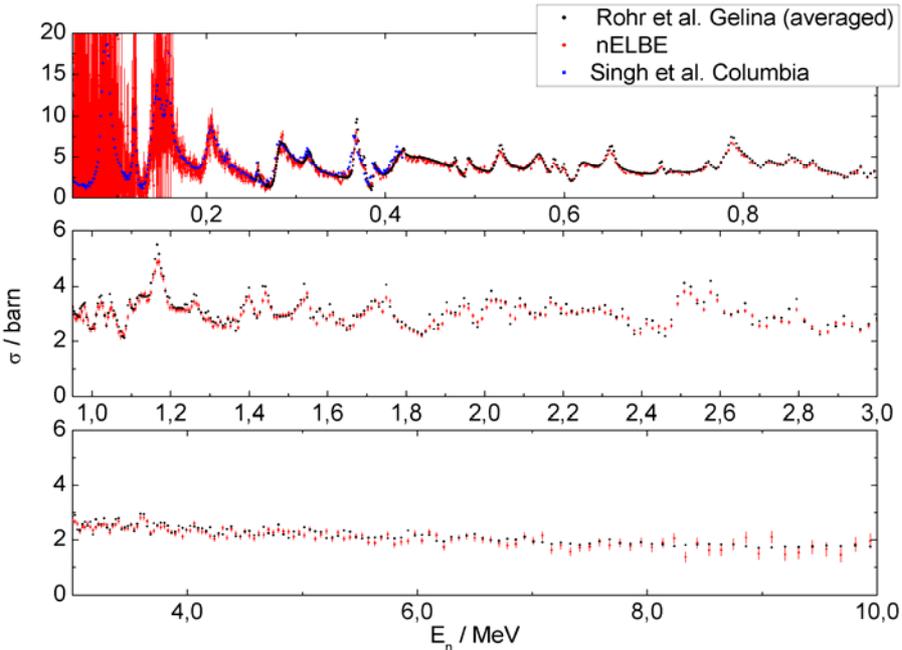
Conclusion

- The nELBE photoneutron source at FZD in Dresden is operational.
- Measurements of inelastic neutron scattering (^{56}Fe , Mo) and total neutron cross sections relevant for nuclear transmutation are ongoing.
- Support for experiments relevant to nuclear transmutation is available through TAA from www.efnudat.eu

Outlook

- Upgrade: SRF injector (1 mA @ 500 kHz repetition rate in 2009)

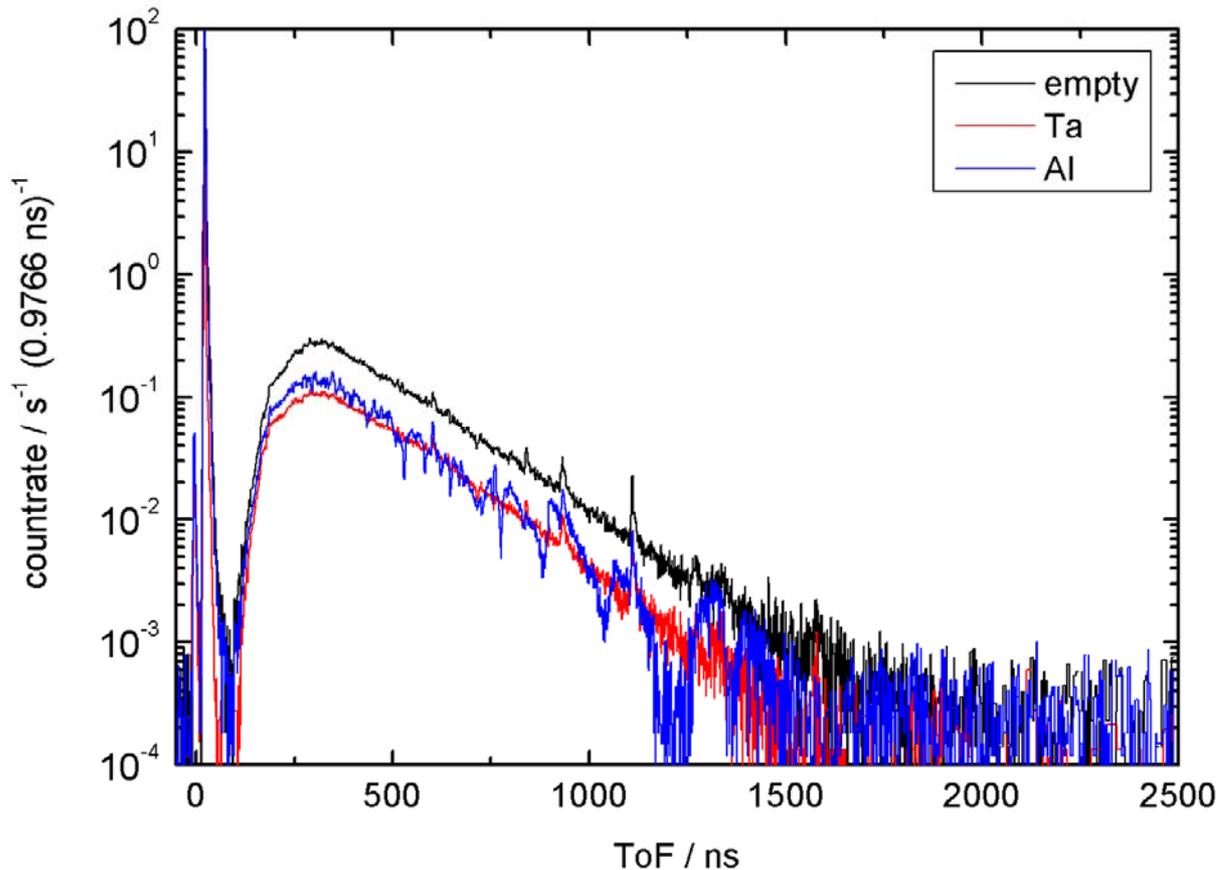
Totale Neutronenquerschnitte



Al target: $n \cdot d = 0.242 \text{ barn}^{-1}$
 measurement time = 33 h
 $\Delta E/E = 0.7\% @ 2 \text{ MeV}$
 $(\Delta\sigma/\sigma)_{stat} = 4.5\% @ 2 \text{ MeV}$

Ta target: $n \cdot d = 0.142 \text{ barn}^{-1}$
 measurement time = 33 h
 $\Delta E/E = 0.7\% @ 2 \text{ MeV}$
 $(\Delta\sigma/\sigma)_{stat} = 1.9\% @ 2 \text{ MeV}$
 New data between
 600 – 1800 keV

Neutron time of flight spectra

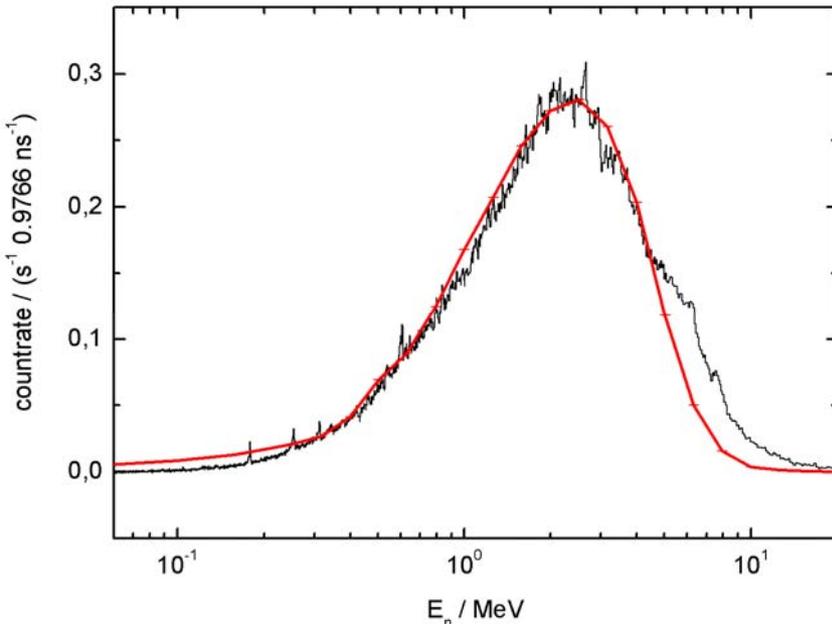


background subtracted
 100 kHz pulse rate,
 $<1 \mu\text{A}$ average beam current
 neutron intensity: 500 n/s

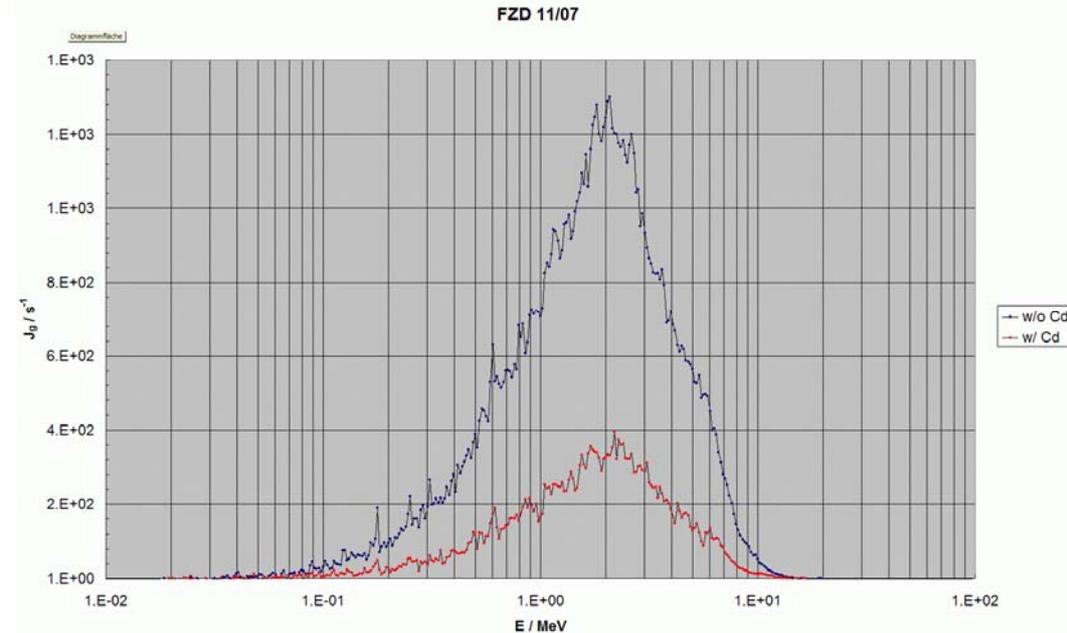
photon peak width: 750ps FWHM
 dominated by time resolution of
 the plastic scintillators

Poster by Roland Beyer
 N02-405

Neutron Spectra: Plastic Scintillator - ^{235}U Fission Chamber

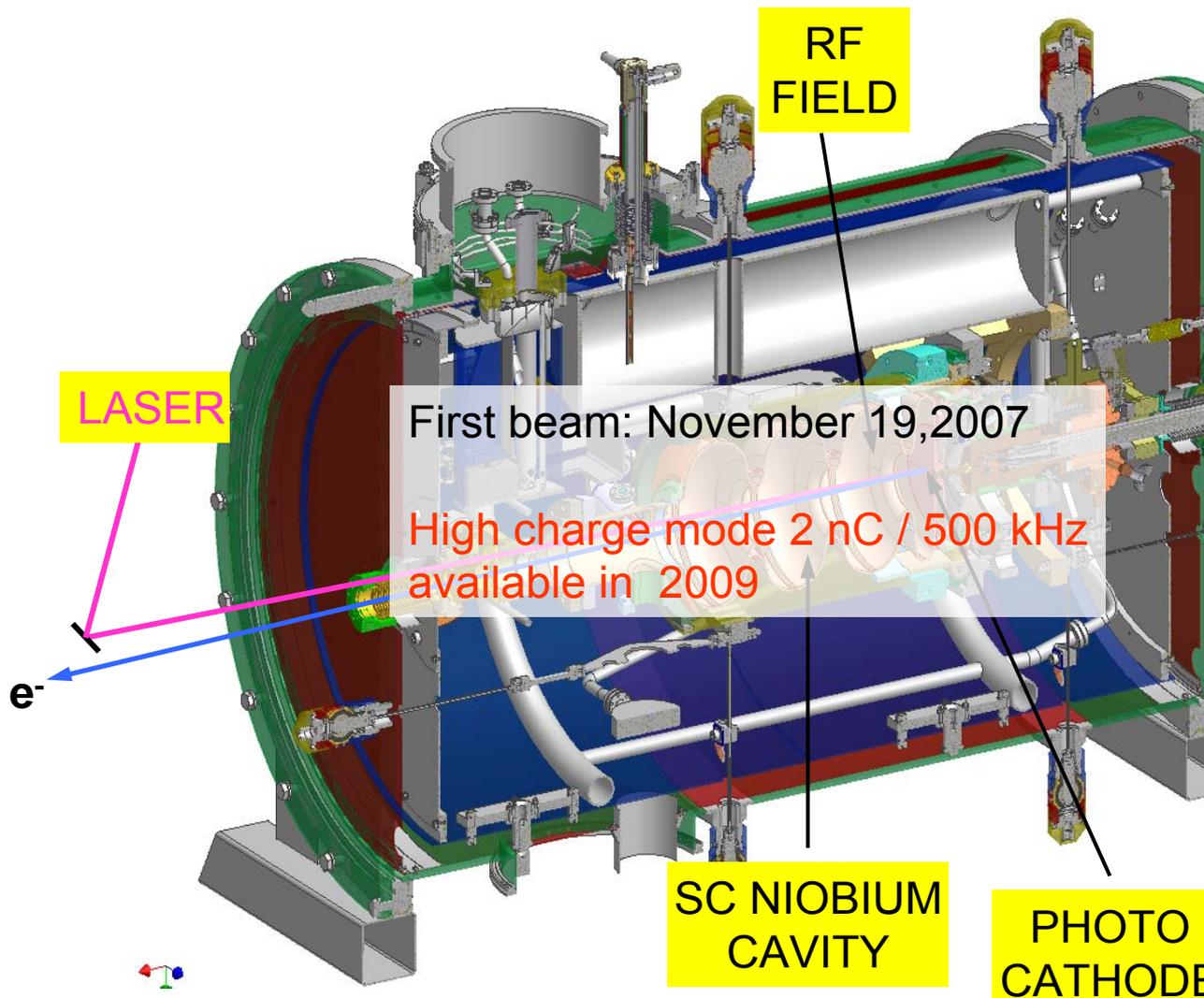


Feb 08 plastic scintillator
 Electron energy 33 MeV
 MCNP simulation underestimates
 high energy part (PTB)
 \Rightarrow preequilibrium component



Nov 07 PTB fission chamber
 neutron intensity $1 \cdot 10^5$ /s
 electron energy 25 MeV
 very low thermal neutron background
 $J_{\text{Cd}}/J < 8 \cdot 10^{-5}$
 from comparison with/without Cd absorber

Generation of high brightness electron beams



1. direct production of short pulses:
laser & photo cathode

2. high acceleration field at cathode:
radio frequency field

3. CW operation for high average current:

superconducting cavity



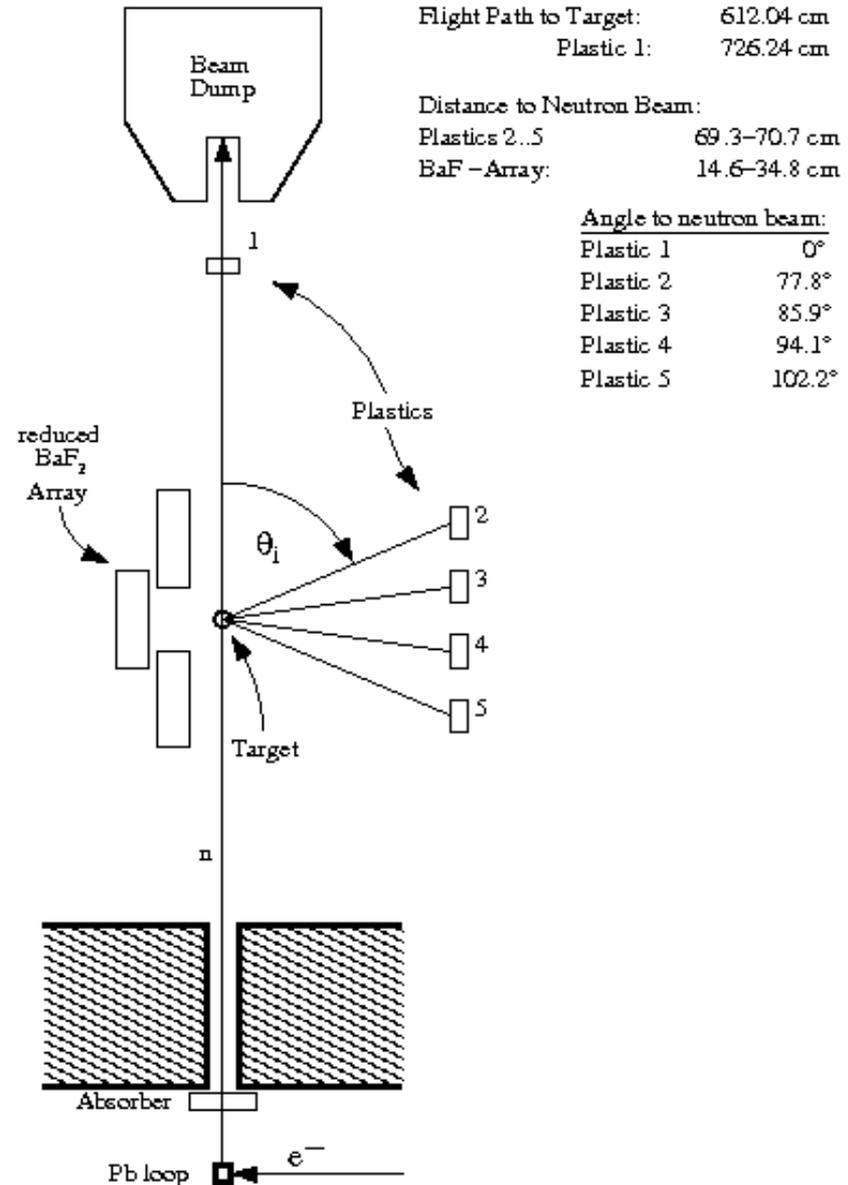
ELBE SRF PHOTO INJECTOR

Experimental setup

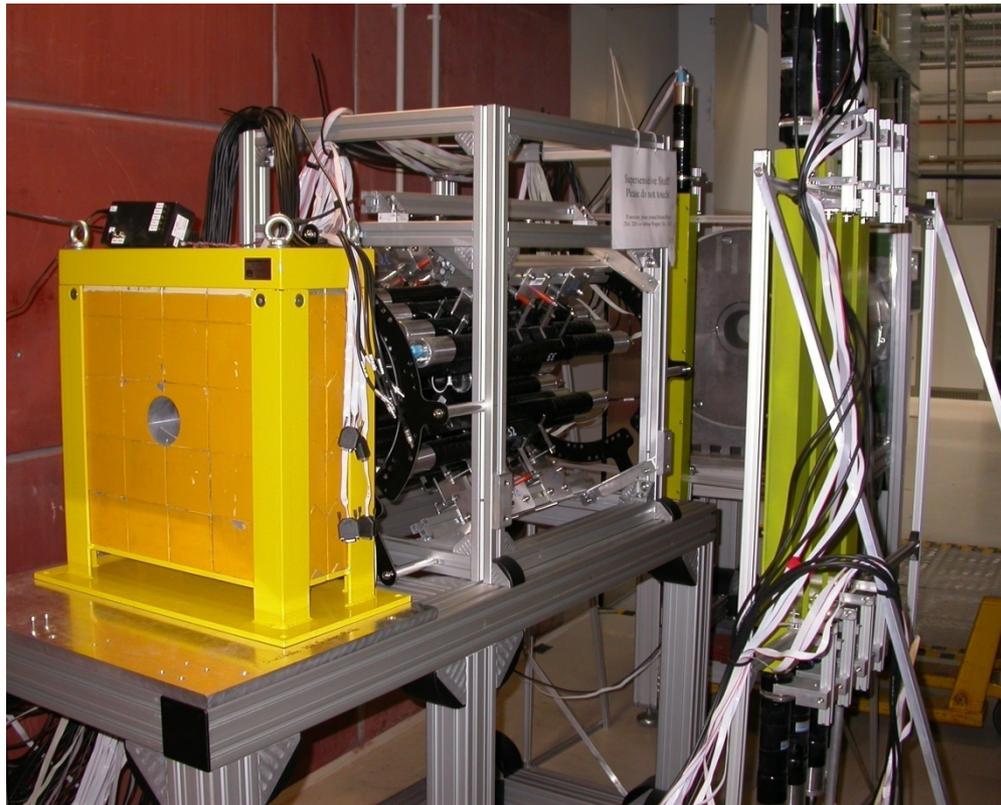
- Target:
 - ^{nat}Fe : 52 mm diam., 41 g \rightarrow 20 g in beam
- Absorber:
 - Al, Ta for transmission measurements
- ELBE beam:
 - 32.8 MeV
 - 1.7 – 2.3 μA
 - 101 kHz

Inelastic scattering detected by double time of flight measurements:

- time of signal from BaF_2
 - \rightarrow energy of incoming neutron ($\Delta E/E$ ca. 1 %)
- time difference between BaF_2 - plastic
 - \rightarrow energy of the outgoing neutron ($\Delta E/E$ ca. 10 %)



The detector setup



Inelastic neutron scattering - kinematics

$$\boxed{(E_{in}, \vec{p}_{in}) + (E_{Fe}, \vec{p}_{Fe}) = (E_{out}, \vec{p}_{out}) + (E_{Fe^*}, \vec{p}_{Fe^*})}$$

$$E_{in} = E_{in,kin} + m_n$$

$$\vec{p}_{Fe} = 0$$

$$m_{Fe^*} = m_{Fe} + E_x$$

$E_{in,kin}$... incoming neutron energy
 m_n ... neutron mass
 m_{Fe} ... target mass
 E_x ... excitation energy
 θ ... neutron scattering angle

$$\boxed{E_{out} = \frac{1}{2A} \left(-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC} \right)}$$

$$E_{out,kin} = E_{out} - m_n$$

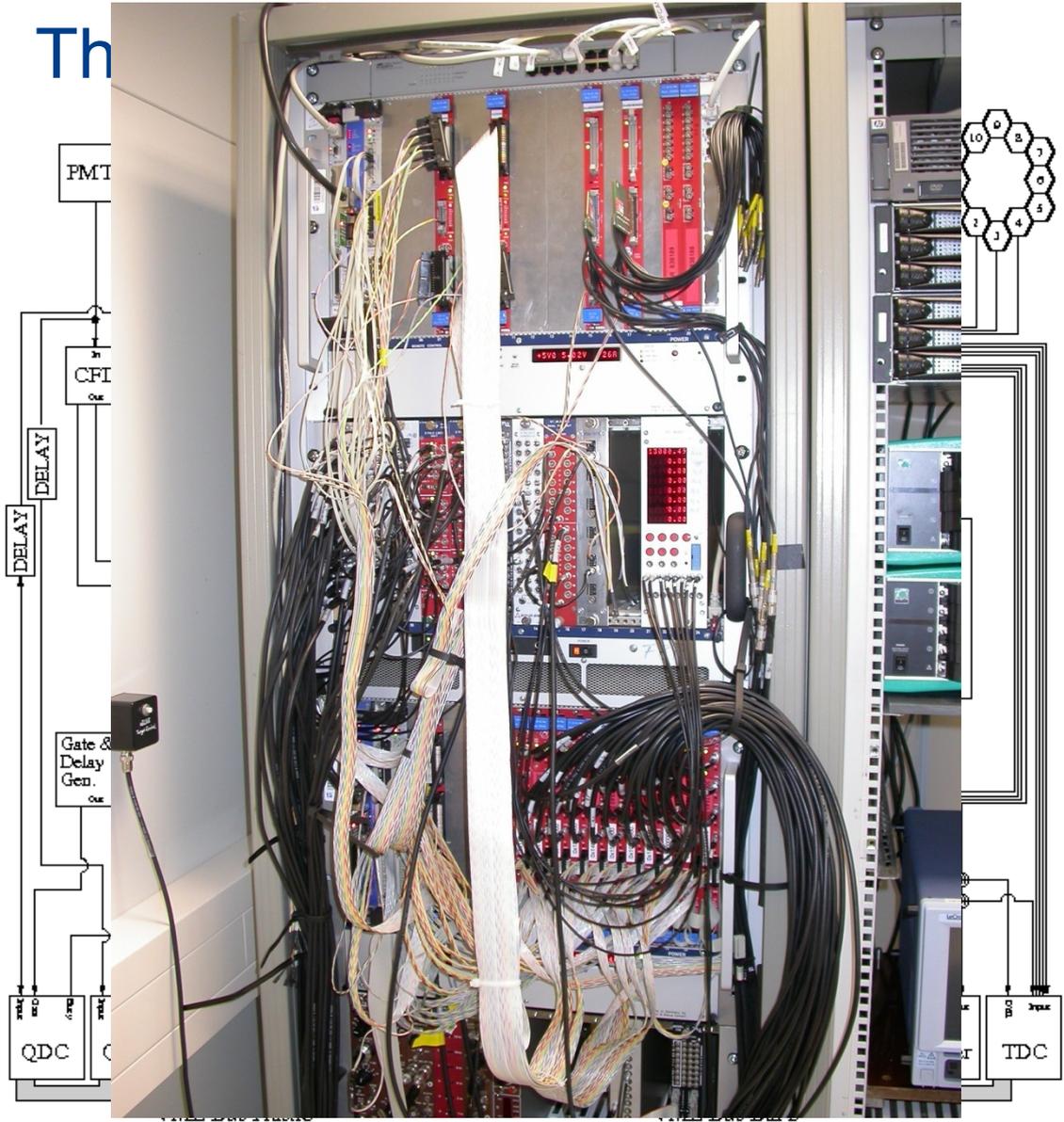
$$A = (m_{Fe} + E_{in})^2 - (E_{in}^2 - m_n^2) \cos^2 \theta$$

$$B = -2(M + E_{in} m_{Fe})(m_{Fe} + E_{in})$$

$$C = (M + E_{in} m_{Fe})^2 + m_n^2 (E_{in}^2 - m_n^2) \cos^2 \theta$$

$$M = \frac{m_{Fe}^2 + 2m_n^2 - m_{Fe^*}^2}{2}$$

Th



For plastic detectors:

- TDC CAEN V1190A
- 2x QDCs CAEN V792

For BaF₂ array:

- 11x TAPS BaF₂ Readout CAEN V874B
- TDC CAEN V1190A

- 3x Power PCs CES RIO3 8064 for readout and list mode acquisition

- Trigger logic with dedicated FPGA CAEN V1495:

- downscaling for 15 plastic inputs
- downscaling and majority for 52 BaF₂ inputs
- 32 veto inputs
- 9 trigger outputs
- 2 downscaled trigger output
- measurement of total dead time

Scheinbare Breite der Dipolriesenresonanz

GDR WIDTH

65

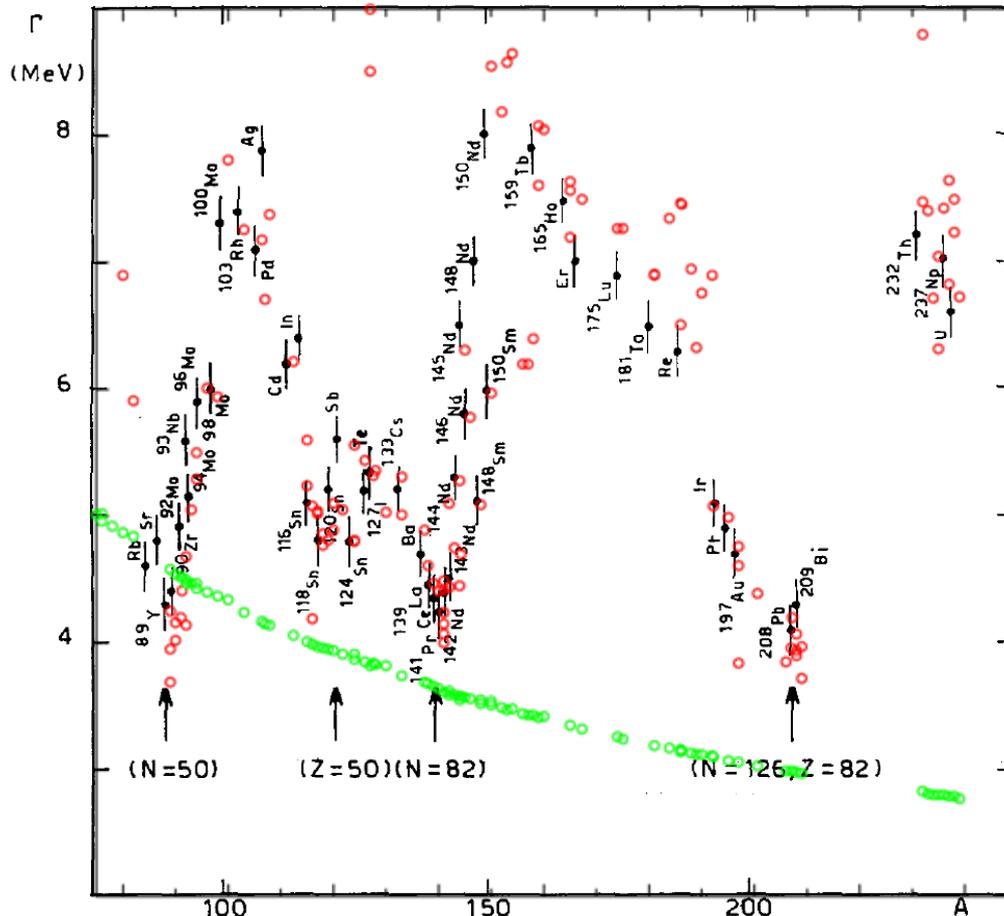


Fig. 5. Experimental FWHM values Γ of the σ/E curves for $90 \leq A \leq 238$ as obtained at Saclay from the experimental total photoneutron cross sections σ .

Carlos et al., Nucl. Phys. A219 (1974) 61

IAEA-TECDOC-1506 IAEA, Vienna, 2006
<http://www-nds.iaea.org/RIPL-2/>

Zeitplan Forschungsprogramm

2008-2009:

- (n,n'γ) Messungen mit thermionischem Injektor an Strukturmaterialien und Transmissionsmessungen
- Optimierung des Untergrunds (Vakuumstrahlrohr, Abschirmung, Transmission der Strahlführung)
- Erhöhung der Strahlintensität bis ca. 20 μA mit thermionischem Injektor
- Spalkammer mit ²³⁵U als Prototyp für Messung mit minoren Aktiniden (Primärstrahlmonitor)
- Messungen zur Photonenstärkefunktion an ELBE und IKI Budapest (Reaktor) (EFNUDAT TAA Mittel für FZD) Mai 2009 / Oktober 2009
- Vollständige Strahldiagnose der Neutronenbeamline an ELBE (Strahl-Position, Strom)
- Testmessung mit monoenergetischen Neutronen aus dem DT- Generator

2010-2012:

- Messung mit SRF Injektor und Minoren Aktiniden-Targets sowie (n,n'γ) Messungen an Strukturmaterialien
- Entwicklung von Aktinidentargets (BMBF Projekt)
- Optimierter Flugzeitaufbau mit Ausbau von ELBE

Spaltquerschnitte von Minoren Aktiniden

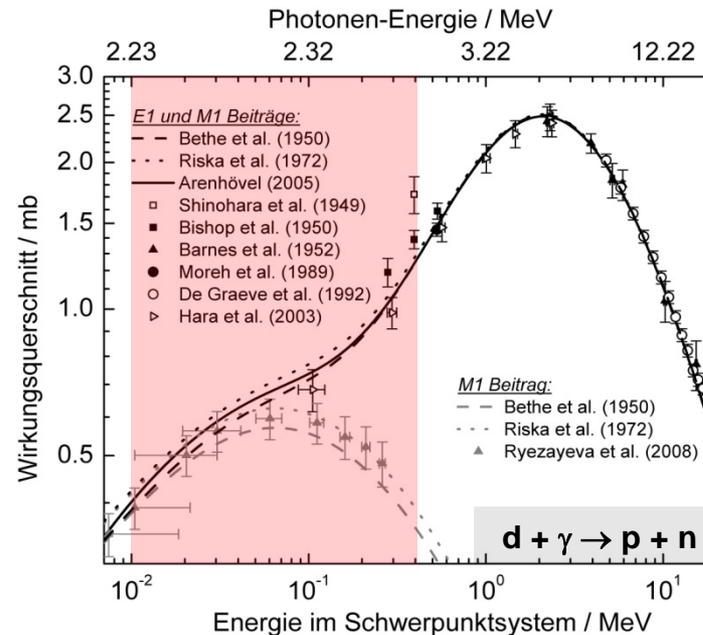
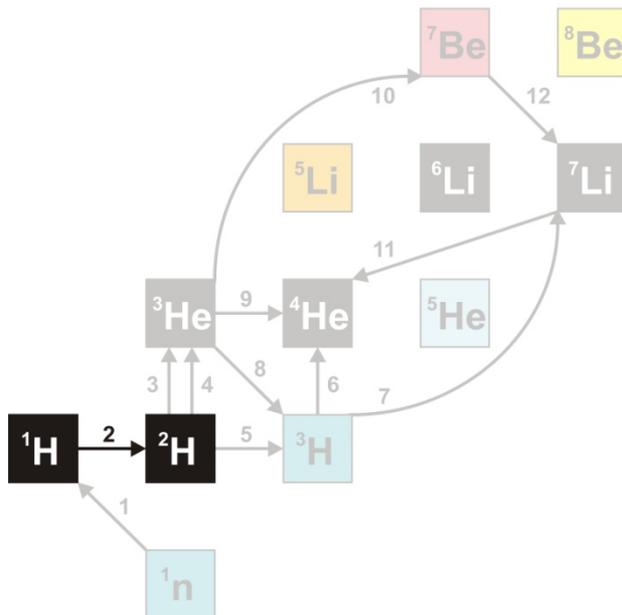
Experimentelle Herausforderungen:

1. Herstellung einer schnellen Spaltkammer MA target von CERN n-TOF(Tabelle)
2. Produktion des MA Targets (Herstellung dünner homogener Schichten aus spaltbarem Material)
3. nELBE Betrieb mit voller Strahlintensität SRF-Injektor mit perfekter Strahltransmission und Strahldiagnose

Nuklid	Spaltratenfaktor	Messzeit (thermion.)/h	Messzeit (SRF)/h
232-Thorium	30	208	62
235-Uran	1.4	10	3
236-Uran	39	273	82
238-Uran	20	141	42
237-Neptunium	13.7	97	29
241-Americium	121	844	253
243-Americium	33	230	69

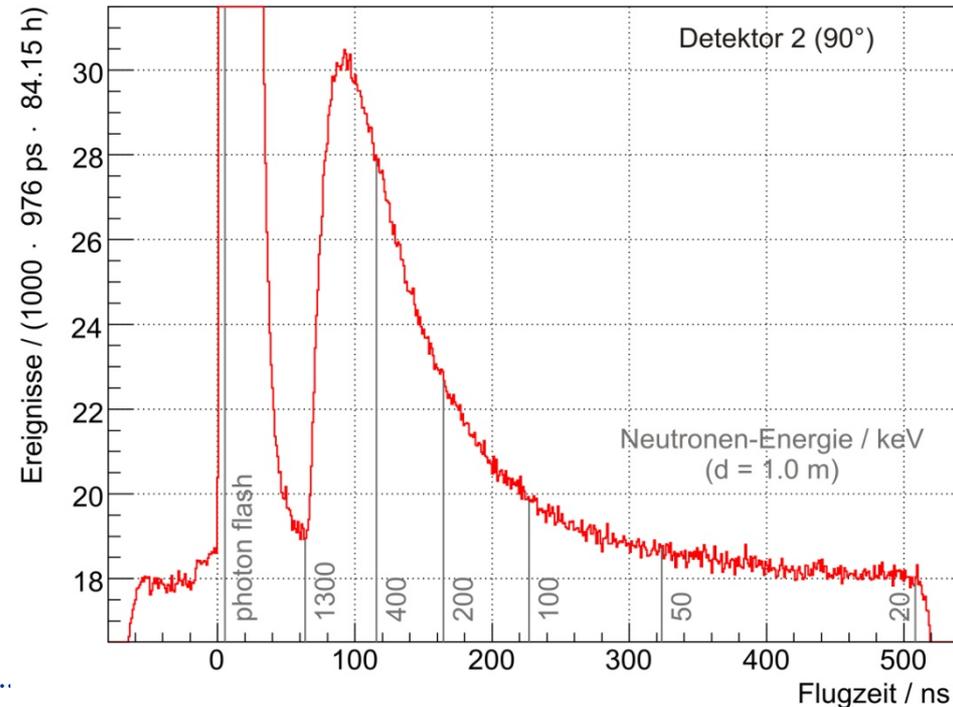
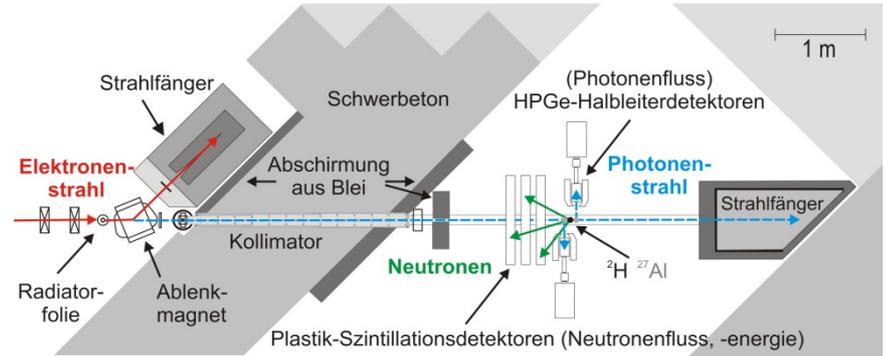
Präzisionsmessung der Photodissoziation des Deuterons und der Umkehrreaktion bei Energien im Bereich der Big-Bang-Nukleosynthese

- Astronomische Beobachtungen zur Bestimmung der Elementhäufigkeiten und zur Messung der kosmischen Hintergrundstrahlung haben in den letzten Jahren sehr genaue Ergebnisse geliefert
- BBN-Netzwerkrechnungen beruhen allerdings zu Teilen nur auf Theoriedaten



Präzisionsmessung der Photodissoziation des Deuterons und der Umkehrreaktion bei Energien im Bereich der Big-Bang-Nukleosynthese

- Photodissoziation des Deuterons durch Bremsstrahlung an ELBE (1.6 MHz Wiederholrate; $p^*c = 5.5$ MeV), Neutronen-Flugzeitmessungen mit Plastik-Szintillationsdetektoren (Nachweis von Neutronen bis 30 keV), Messung des Photonenflusses durch resonante Streuung an ^{27}Al
- Status: 2 x 10 Schichten (Mai/Sep 2009)
Ausblick: weitere Strahlzeit beantragt (Statistik) Dissertation: Roland Hannaske



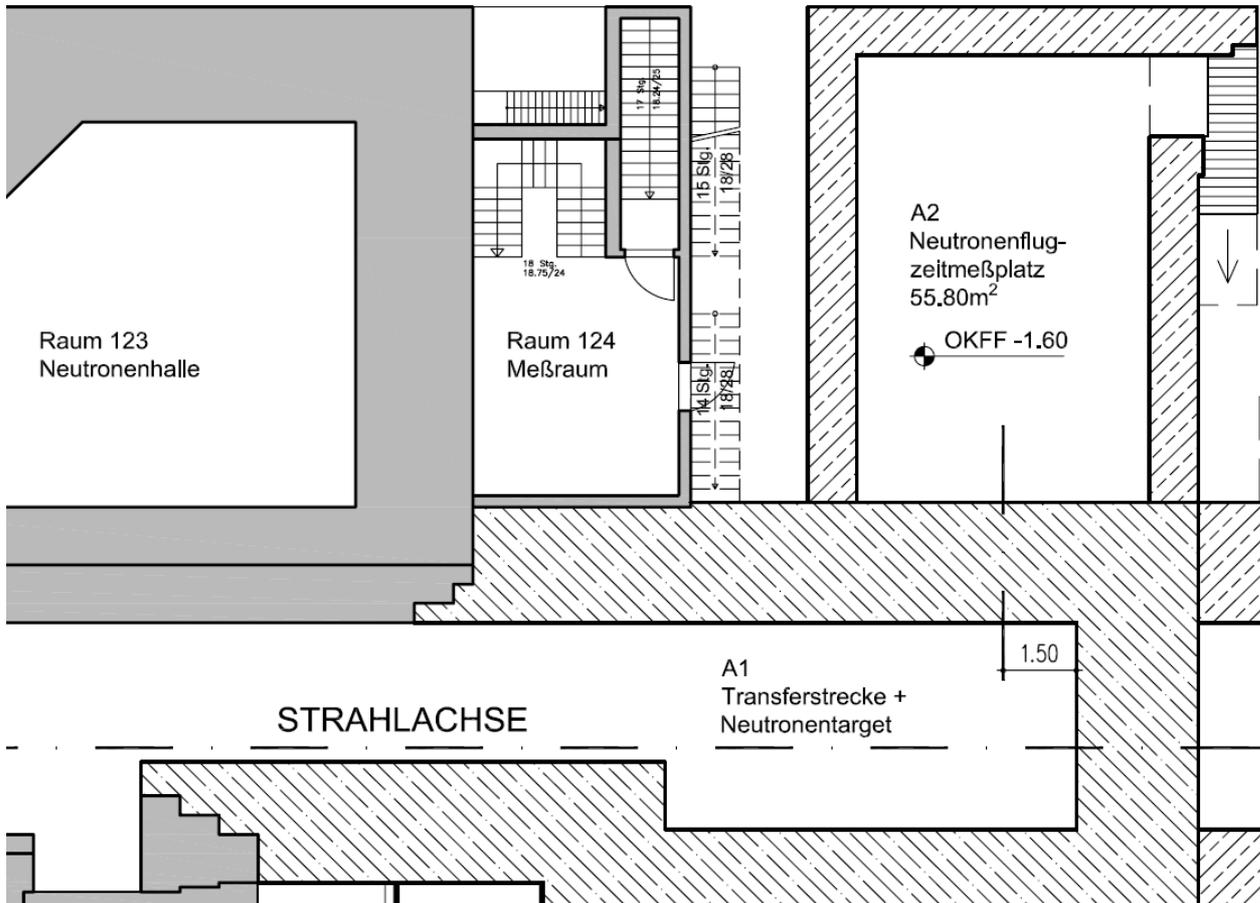
Drittmittelplanung

- EFNUDAT läuft bis 10/2010
Nachfolgeprojekt (Transnational Access Activity) in Vorbereitung
- Koordination BMBF Verbundantrag „Transmutationsrelevante Kernphysik-Experimente mit Einsatz moderner technologischer und numerischer Methoden“ eingereicht zusammen mit TU Dresden, U Mainz, U Köln, TU München, PTB Braunschweig . Endgültige Förderentscheidung soll sehr bald mitgeteilt werden.
- DFG Projekt zur BBN Nukleosynthese bis Oktober 2011

Erweiterung der experimentellen Möglichkeiten

- MA Targetentwicklung der Radiochemie CERN nTOF Targets
Elektrodeposition dünner Schichten Minorer Aktiniden
(BMBF Verbundprojekt) (Neues interdisziplinäres Teilprojekt)
- Aufbau eines LaBr_3 Detektorarray (Energieauflösung 3%) zur Messung der inelastischen Streuung und des Neutroneneinfangs.
Weiterentwicklung der Datenaufnahme mit schnellen Digitizern
- Zusammenarbeit mit Sicherheitsforschung: Teilchentransportrechnungen zur Simulation der Experimente A. Ferrari
- Nutzung von monoenergetischen D-D und D-T Neutronen zusammen mit TU Dresden
- ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ monoenergetische Neutronenerzeugung (komplementäre Neutronenquelle)

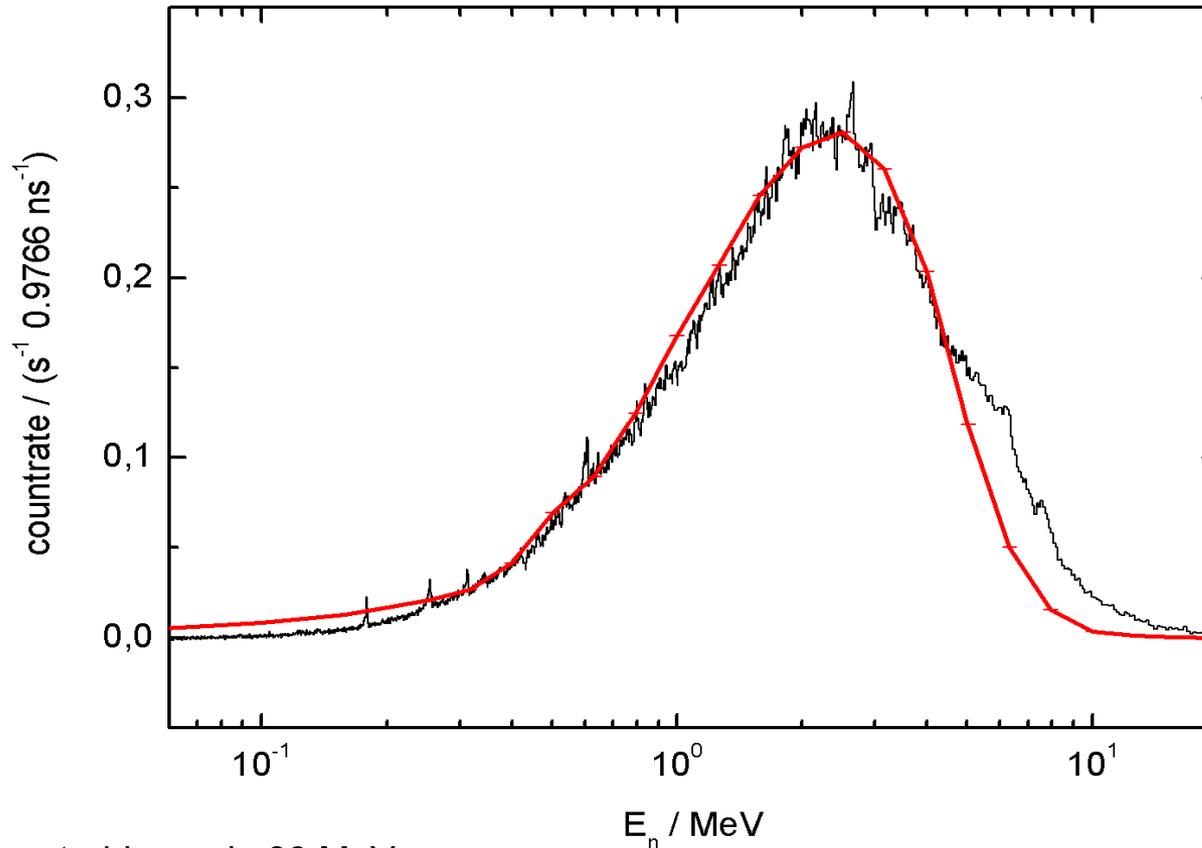
Neutronenflugzeitmessplatz



Größerer Messraum → weniger Streuung, bessere Untergrundbedingung
 Auskopplung des Neutronenstrahls unter Rückwärtswinkel
 → Reduktion Gamma-Flash

Vorbereitung durch MCNP und FLUKA Simulationen A. Ferrari, E. Birgersson

nELBE Neutronenspektrum

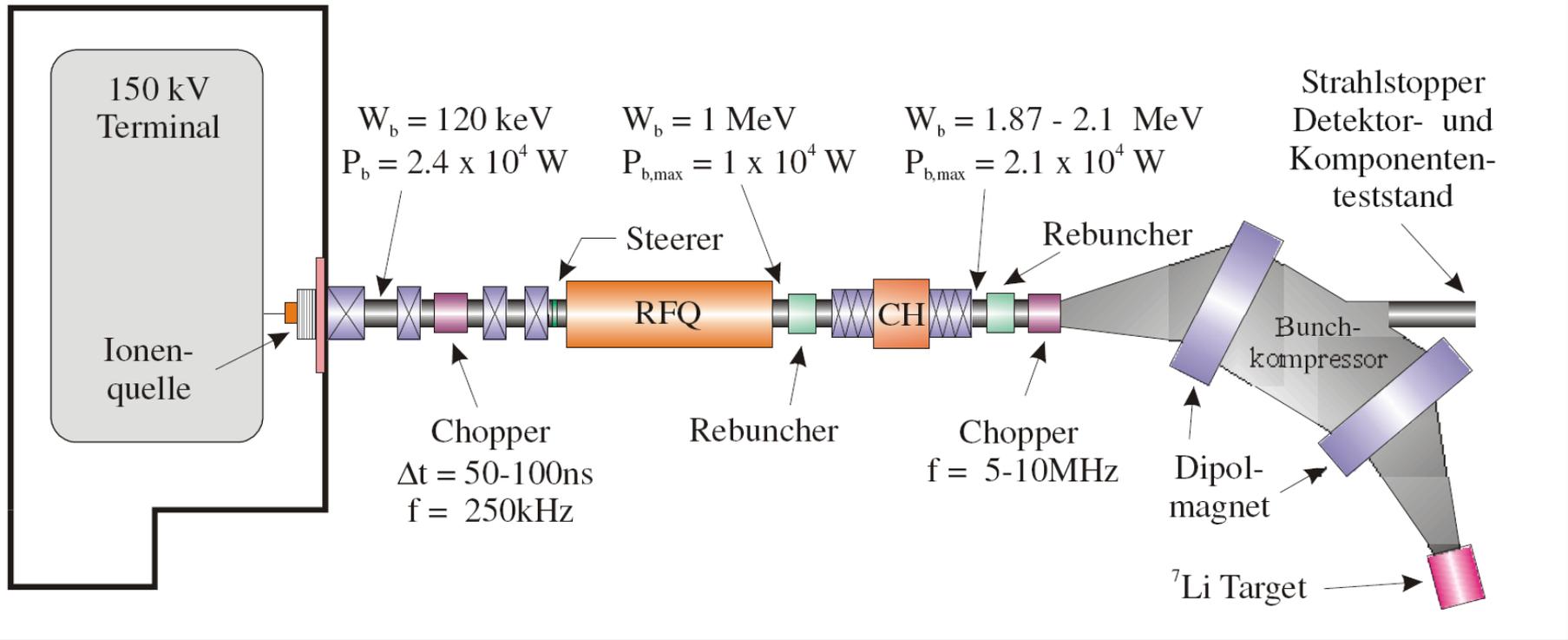


- Elektronenstrahlenergie 33 MeV
- **MCNP Simulationsrechnung stimmt gut mit der Messung überein**
- Neutronenspektrum wie in einem schnellen Reaktor
- PTB Spaltkammer (^{235}U) zeigt sehr niedrigen Untergrund von thermischen Neutronen $J_{\text{Cd}}/J < 8 \cdot 10^{-5}$

Zusammenfassung

- Durch Kernreaktoren kann klimafreundlich Strom produziert werden.
- Neue Reaktorkonzepte der IV. Generation erlauben die Minimierung der langlebigen Abfälle durch Transmutation mit schnellen Neutronen.
- Endlagerungsproblem wird durch Partitionierung und Transmutation entschärft.
- Genaue Daten für Reaktionen mit schnellen Neutronen werden benötigt. $(n,n'\gamma)$ (n,tot) und (n,f) mit radioaktiven Targets.

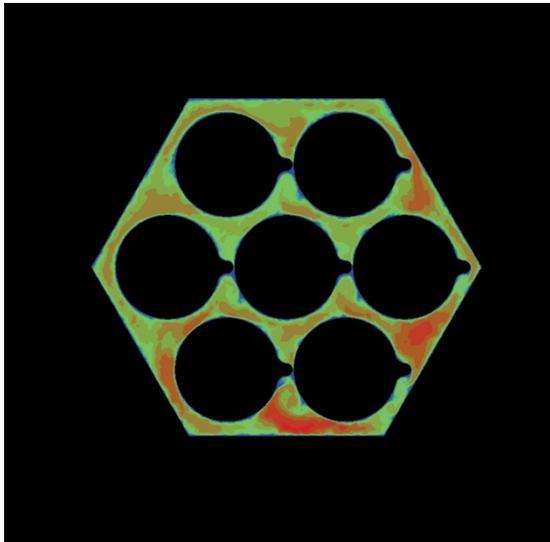
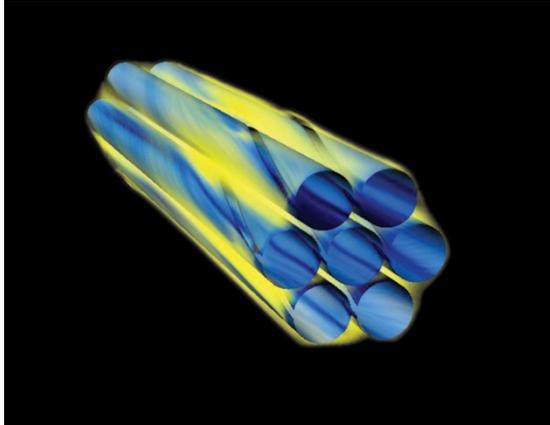
Frankfurter Neutronenquelle am Stern-Gerlach Zentrum (FRANZ) ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$



Protonenbeschleuniger: $E_p = 1.9 - 2.4 \text{ MeV}$, 20 – 250 kHz Wiederholrate,
Pulslänge am Target 1 ns (bunch compression)
Strahlleistung 21 kW (mittlerer Strahlstrom = 10 mA)

Neutronenenergie: 100 – 500 keV ← Komplementär zu nELBE, FZD
Neutronenproduktionsrate: $5 \cdot 10^{10} \text{ n/s}$
am Versuchstarget: $3 \cdot 10^7 \text{ n/s}$

Simulation von virtuellen Kernreaktoren



- Kernreaktordesign mit modernen Hochleistungsrechnern
- Detaillierte fluiddynamische Simulation in realistischer Geometrie
- Fundamentale Simulation der Prozesse auf atomarem Niveau in Teilen des Reaktorkerns
- Grundlage: Genaue Daten für neutroneninduzierte Reaktionen

Quelle: Argonne National Laboratory
IBM BlueGene/P Supercomputer

