



Transmutation – Grundlagen, Methoden, Perspektiven

A. R. Junghans
Institut für Strahlenphysik
Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf

Hochradioaktive Abfälle oder CO₂ Emissionen
Energieforschungskonzepte für Deutschland
Hochradioaktiver Abfall und seine Entsorgung
Schnelle Neutronen zur Transmutation

Messung transmutationsrelevanter Reaktionen am HZDR

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



CO₂ Emissionen aus Kraftwerken: Deutschland

Germany (country)

Location [Europe](#)

Total Power Plants [4,679](#)

Red Alerts  [356 Power Plants](#)

429,000,000 Tons CO₂
636,000,000 MWh energy
1,351 Intensity

Power Trends

For more about the terms or data used here, search the [Glossary](#), learn [All About Icons](#), or check out our [FAQs](#). Information on plant specifics can be found [here](#). If you use the data, please see our [citation policy](#).

	Tons CO ₂	MWh Energy	Intensity	% Fossil	% Hydro	% Nuclear	% Other Renewable
2000:	403,000,000	577,000,000	1,397	62.95	3.73	27.9	3.15
Present:	429,000,000	636,000,000	1,351	62.11	3.05	24.36	7.46
Future:	611,000,000	862,000,000	1,418	68.38	2.32	17.96	8.47

Top Power Producing Plants in Germany



Stromproduktion:
636,000,000 MWh






CO₂ Emissionen:
429,000,000 tons CO₂

Quelle: www.carma.org

CO₂ Emissionen aus Kraftwerken: Deutschland

Highest CO₂ Emitting Plants in Germany See More

Show Past & Future

		Tons CO ₂	MWh Energy	Intensity
	<u>NIEDERAUSSEM</u> Europe Germany Nordrhein-Westfalen	Present: 30,400,000 30,400,000 tons CO₂	29,600,000	2,056
	<u>JANSCHWALDE</u> Europe Germany Brandenburg	Present: 27,400,000 27,400,000 tons CO₂	25,800,000	2,124
	<u>FRIMMERSDORF</u> Europe Germany Nordrhein-Westfalen	Present: 24,100,000	21,200,000	2,272
	<u>NEURATH</u> Europe Germany Nordrhein-Westfalen	Present: 22,200,000	19,500,000	2,274
	<u>WEISWEILER</u> Europe Germany Nordrhein-Westfalen	Present: 22,000,000	19,600,000	2,251

In den Top Ten der weltgrößten CO₂ emittierenden Kraftwerke

Stand: 2008



HZDR

Quelle: www.carma.org

CO₂ Emissionen aus Kraftwerken: Frankreich

Quelle: www.carma.org



France (country)

Location [Europe](#)

Total Power Plants [1,930](#)

Red Alerts ● [69 Power Plants](#)

53,300,000 Tons CO₂

551,000,000 MWh energy

193 Intensity

Power Trends

For more about the terms or data used here, search the [Glossary](#), learn [All About Icons](#), or check out our [FAQs](#). Information on plant specifics can be found [here](#). If you use the data, please see our [citation policy](#).

	Tons CO ₂	MWh Energy	Intensity	% Fossil	% Hydro	% Nuclear	% Other Renewable
2000:	48,600,000	511,000,000	190	8.52	13.11	77.15	0.23
Present:	53,300,000	551,000,000	193	8.94	9.4	77.89	2.34
Future:	68,600,000	605,000,000	227	12.14	8.66	72.8	4.88

551,000,000 MWh Energie
53,300,000 tons CO₂

Top Power Producing Plants in France



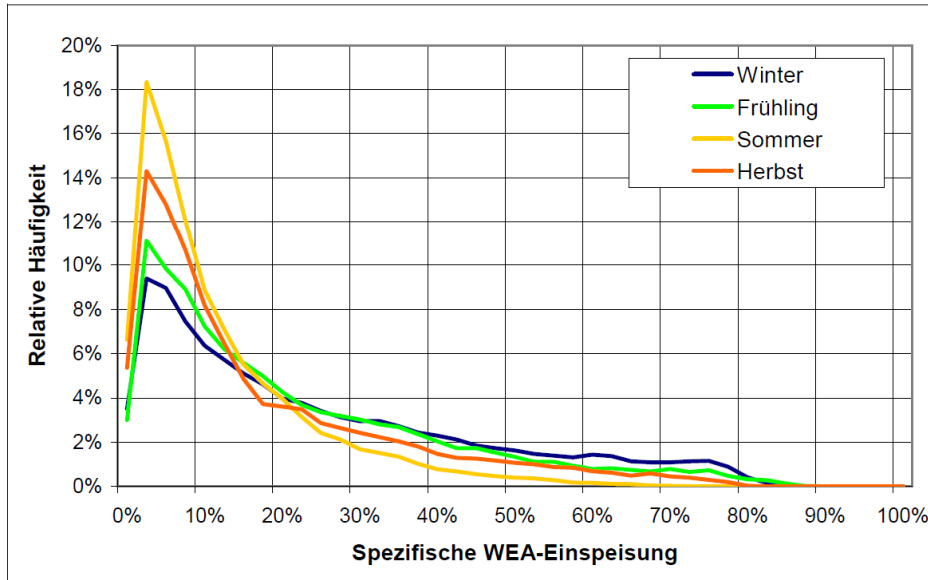
Kraftwerke in Deutschland
emittieren über 8 mal so viel
CO₂ wie in Kraftwerke in
Frankreich



Gesicherte Leistung durch Windenergieanlagen ?

Abbildung 12-5: Durchschnittlicher Zugewinn an gesicherter Leistung der WEA in % der installierten WEA-Leistung zum Zeitpunkt der Jahreshöchstlast

Abbildung 11-6: Wahrscheinlichkeitsverteilung der WEA-Einspeisung nach Jahreszeiten (Anlagenbestand 2003)

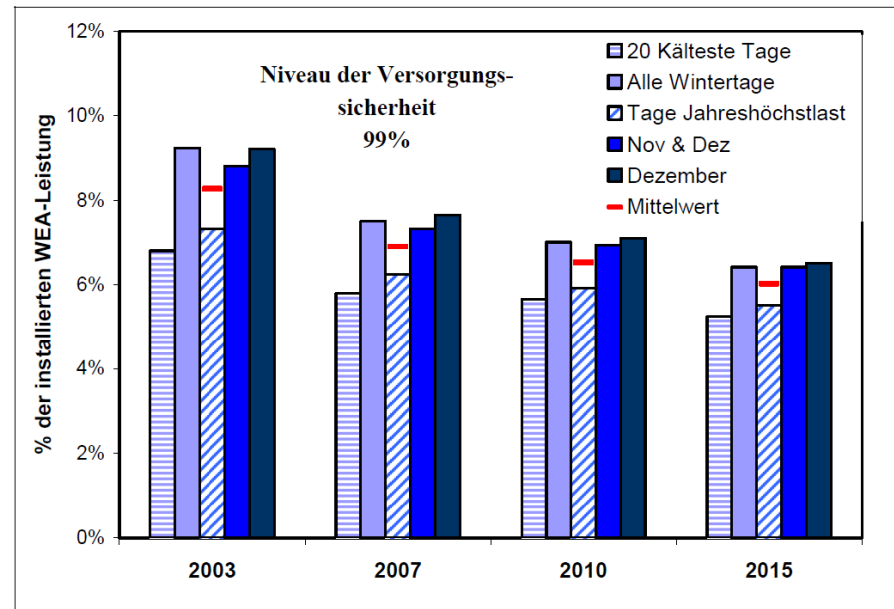


Quelle: ISET (2005)

Häufigste WEA-Auslastung liegt im Einstelligen Prozentbereich. >30% kommt nur selten vor.

⌘ ca. 94% der installierten WEA Leistung müssen durch backup-Kraftwerke oder Speichertechnologien bereit gestellt werden

Quelle: DENA Netzstudie I



Die *gesicherte Leistung* der konventionellen Kraftwerke bei einem Niveau der Versorgungssicherheit von 99 % beträgt etwa 93 % der planmäßig verfügbaren Leistung, d.h. je 1000 MW konventioneller Kraftwerksleistung können etwa 930 MW als gesicherte Leistung angesetzt werden. Da davon ausgegangen wird, dass in der Regel zum Zeitpunkt der Jahreshöchstlast

German energy research strategy



> Den Ausstieg aus der Kernkraft sicher gestalten

Warum Deutschland kerntechnische Kompetenz für Rückbau, Reaktorsicherheit, Endlagerung und Strahlenschutz braucht

acatech (Hrsg.)

acatech POSITION
September 2011

Why Germany needs competence in nuclear technology for deconstruction, reactor safety, final storage, and radiation protection

 acatech
DEUTSCHE AKADEMIE DER
TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN

Recommendations for waste management:
...
Partitioning and Transmutation as a strategy to reduce long term radiotoxicity of highly radioactive waste.

5. Reduzierung der Radiotoxizität („Partitioning“ und „Transmutation“)

Eine Strategie, das Langzeitrisiko endzulagernder hochradioaktiver Abfälle wesentlich zu verringern, stellt die Technologie des Partitioning und Transmutation (P&T) dar.

Langlebige Radionuklide wie die Actiniden Neptunium, Plutonium, Americium und Curium sollen abgetrennt (Partitioning) und dann in speziellen Anlagen durch Neutronenreaktionen in stabile oder kurzlebige Isotope umgewandelt werden (Transmutation).

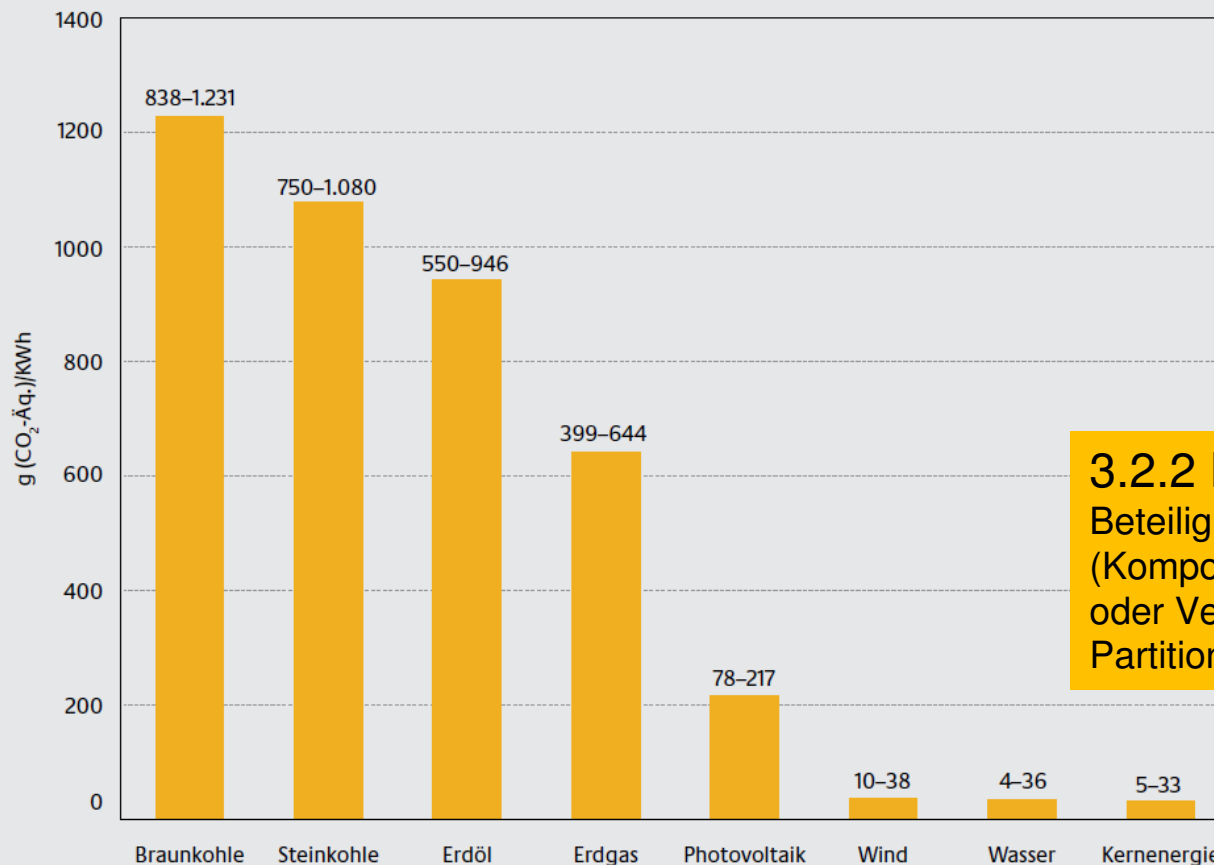
....

Die effektive Umwandlung oder Transmutation der Radionuklide in kurzlebige (oder sogar stabile) Isotope erfordert ein hochenergetisches Neutronenspektrum. Hierfür sind schnelle Transmutationsanlagen geeignet, welche neutronenphysikalisch kritische oder aber Beschleuniger-betriebene unterkritische ADS-Systeme (ADS = Accelerator-Driven System) sein können. Zur Entwicklung dieser Systeme sind unterstützende theoretische und experimentelle Forschungsarbeiten in den Bereichen der Neutronenphysik, Thermohydraulik, Werkstoffe und Materialien, Reaktorphysik und Sicherheit, Messtechnik, Kühlmitteltechnologien, Validierungsmethoden und **Beschleunigerentwicklung (für ADS)** erforderlich.

6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung

Das **erste und wichtigste Ziel** der Energieforschungspolitik ist es, einen Beitrag zur Erfüllung der zahlreichen energiewirtschaftlichen und klimapolitischen Vorgaben der Bundesregierung zu leisten.

Abb. 3.19: Spezifische CO₂-Freisetzungen verschiedener Energiequellen bei der Stromerzeugung. Die Ziffern geben die Bandbreiten der von den genannten Institutionen ermittelten Werte wieder.



<http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/energie.did=427698.html>

Quelle: PSI (2004; 2007), ILK (2004), IER (1997; 2000), EU (2007), Öko-Institut (2006)



Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung

Das 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung

3.2.2 Endlagerforschung
Beteiligung an internationalen Aktivitäten (Komponentenentwicklung) zur Verminderung oder Vermeidung radioaktiver Abfälle mittels Partitionierung und Transmutation (P&T),

Abgebrannter Kernbrennstoff aus Kernkraftwerken weltweit

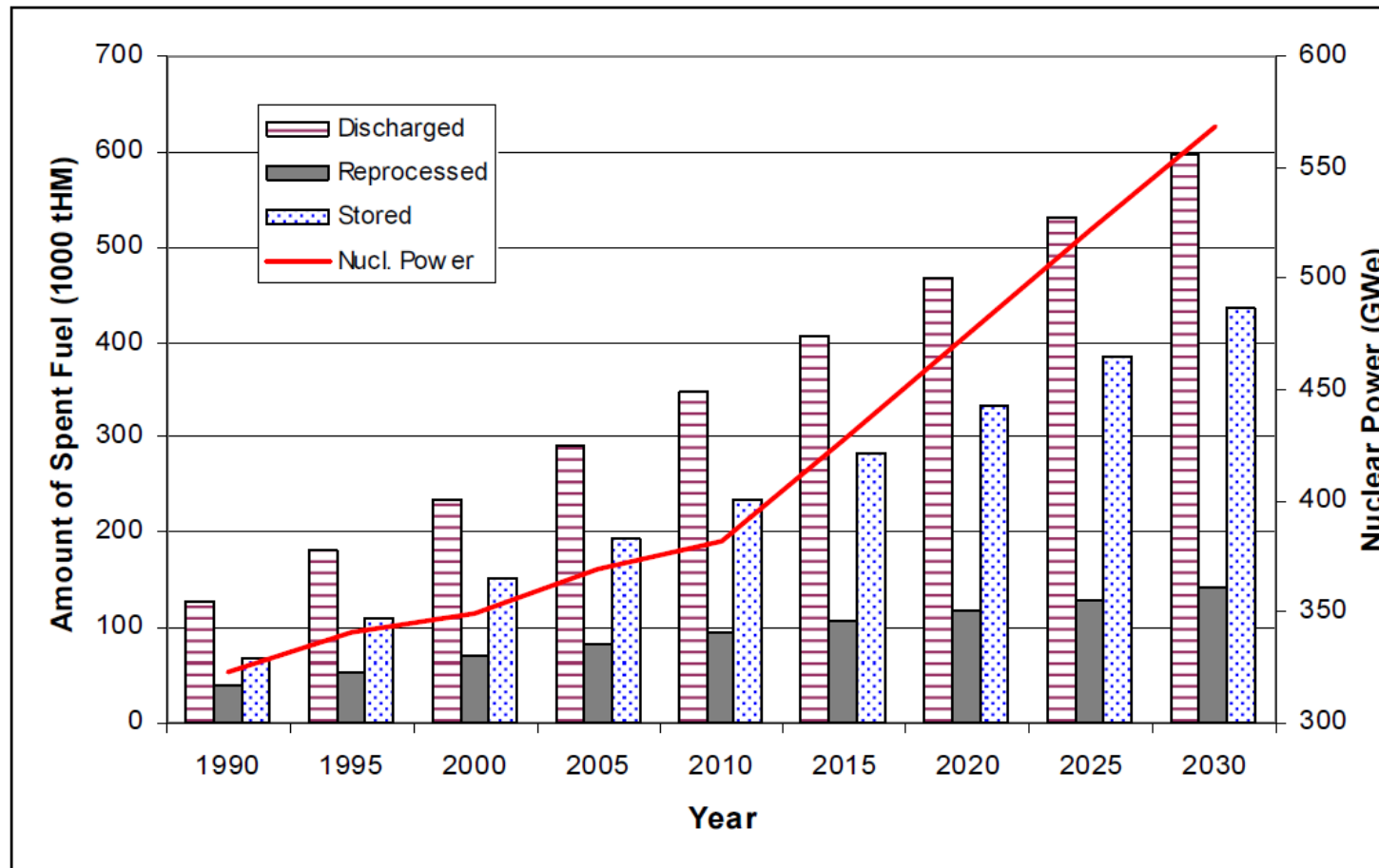


Fig. 14. Cumulative spent fuel discharged, stored and reprocessed from 1990 to 2030.

Quelle: IAEA-TECDOC-1613, April 2009

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

Abgebrannter Kernbrennstoff aus Kernkraftwerken weltweit

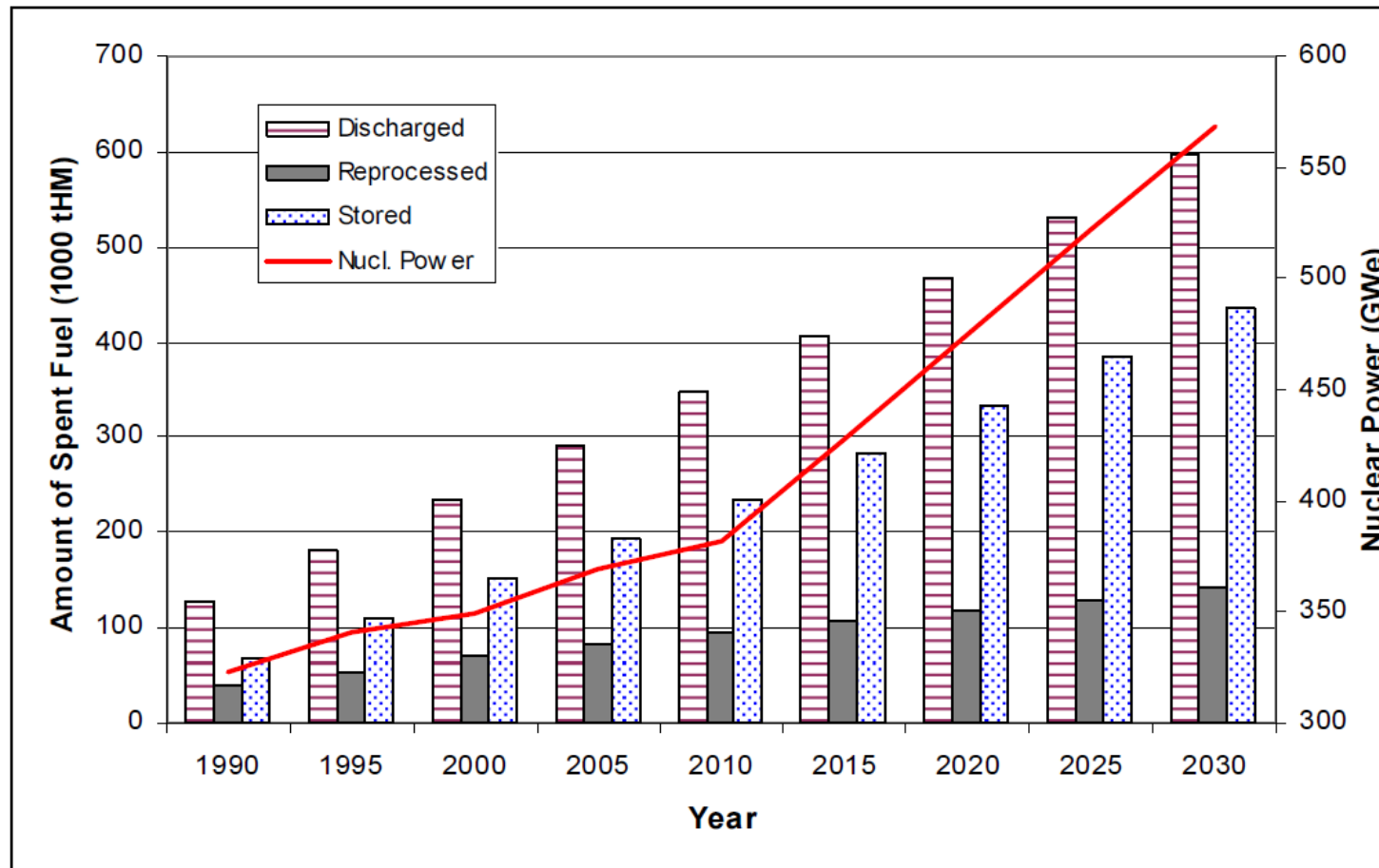


Fig. 14. Cumulative spent fuel discharged, stored and reprocessed from 1990 to 2030.

Quelle: IAEA-TECDOC-1613, April 2009

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

Abgebrannter Kernbrennstoff aus Kernkraftwerken weltweit

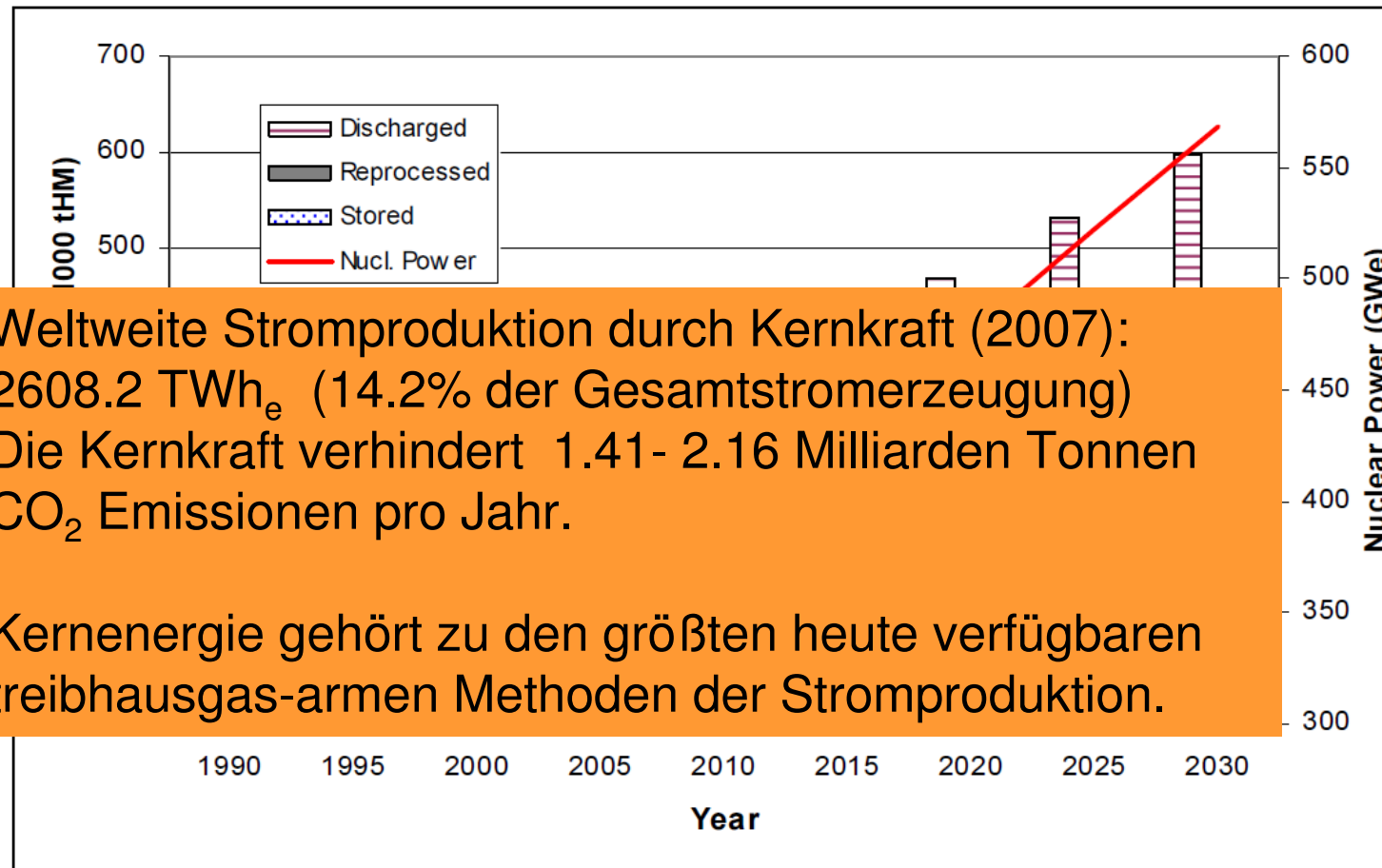


Fig. 14. Cumulative spent fuel discharged, stored and reprocessed from 1990 to 2030.

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:

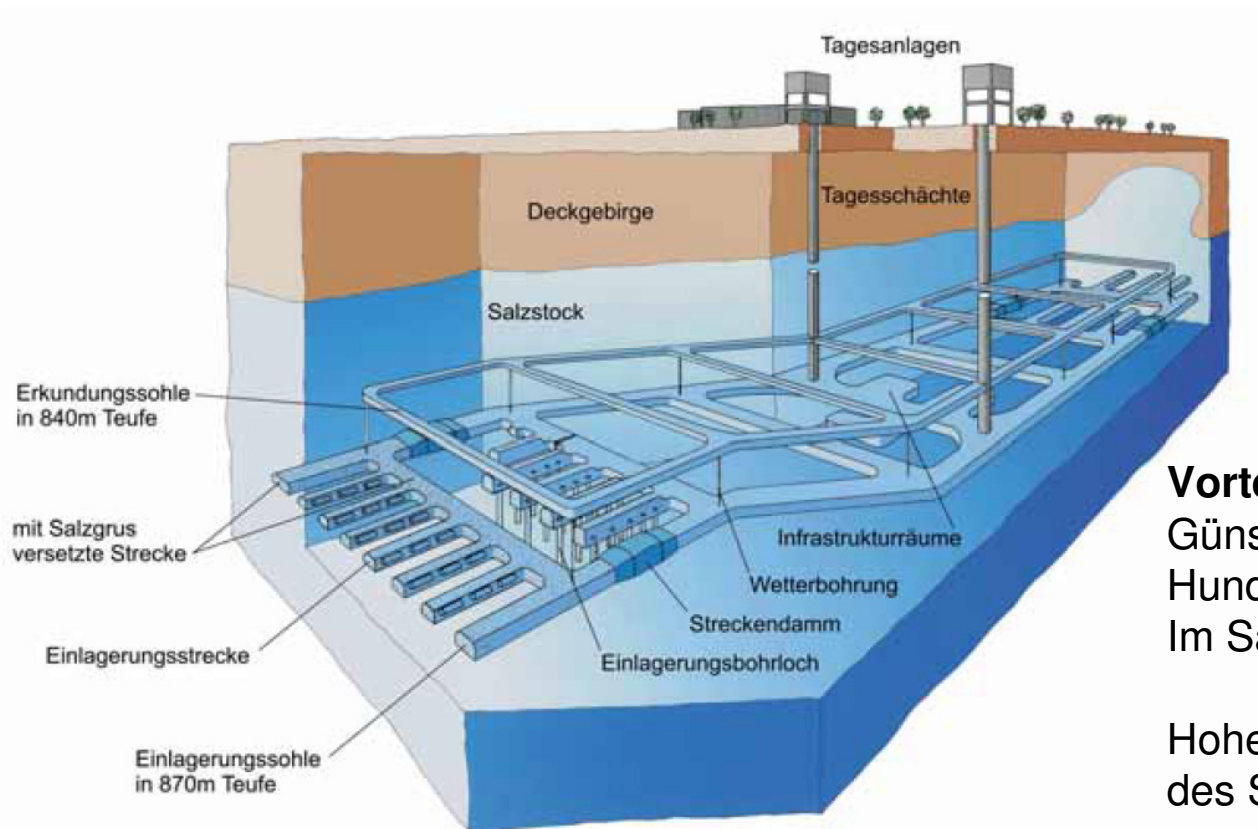
Abtrennung von Uran und Plutonium
Endlagerung von verglastem
hochradioaktivem Abfall
(Spaltprodukte, minore Aktiniden)
MOX Brennelemente ca. 25-45 %
Reduktion von Pu möglich*

Direkte Endlagerung:

Zwischen- und Endlagerung der
abgebrannten Brennelemente.
Endlager sind noch nicht in Betrieb,
nur in Planung.
EU Endlager Richtlinie
Nationale Konzepte bis 2015

*B. Merk, C. Broeders atw 53 (2008) 6 404

Endlagerprojekt: Salzstock Gorleben



Vorteile:

Günstige Gebirgsmechanik
Hundertjährige Erfahrung
Im Salzbergbau

Hohe Wärmeleitfähigkeit
des Steinsalzes

Direkte Endlagerung von abgebrannten Brennelementen
In Pollux-Behältern (Beladung 5.4 tSM, Gesamtgew. 65 t)
± 2061 Pollux-Behälter im Endlager

Undurchlässigkeit gegen
Wassereintrich von außen
Salzstockalter >200 Millionen Jahre

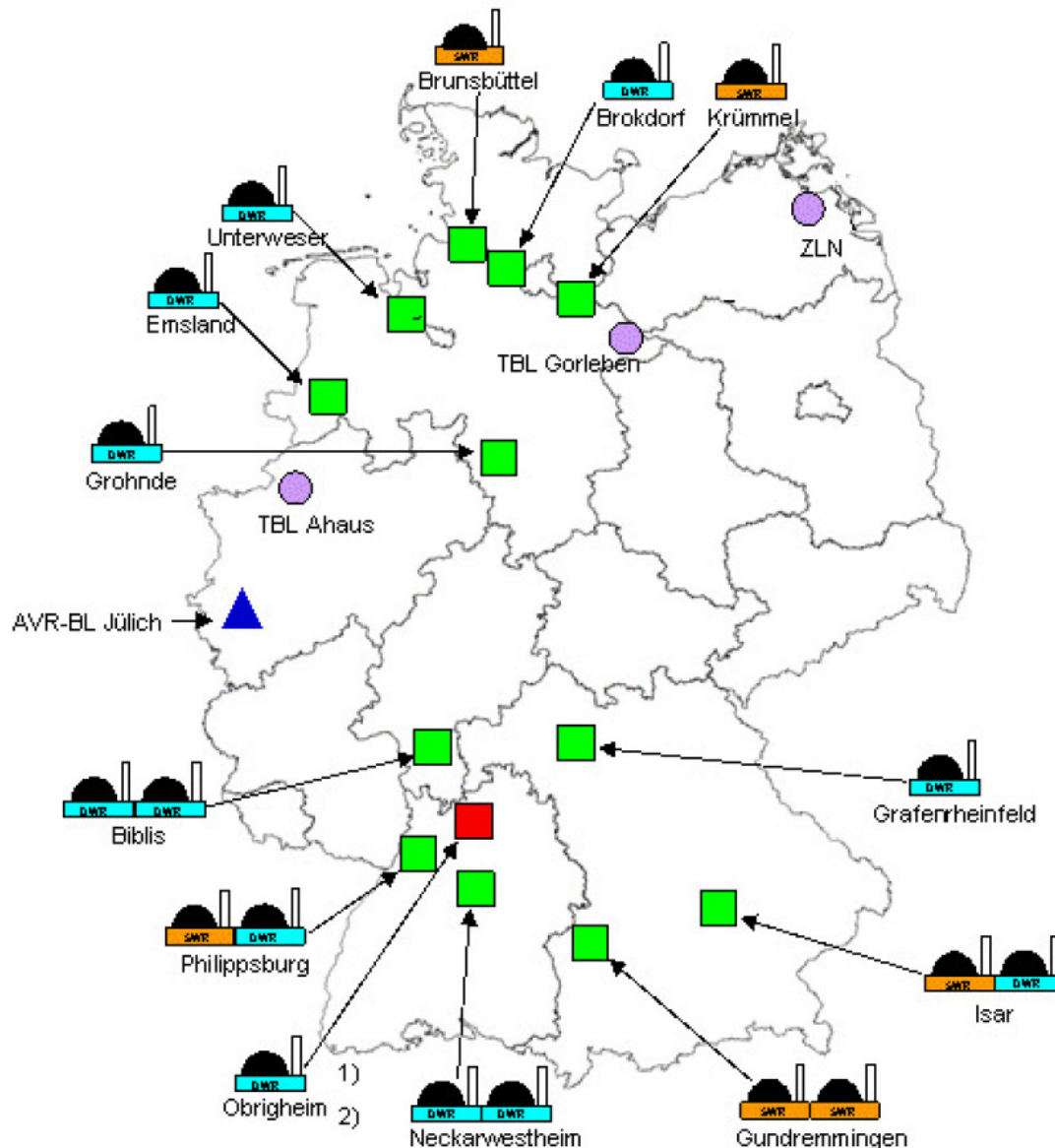
Quelle:

<http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Service/publikationen.did=275476.html>

DRESDEN
concept

HZDR

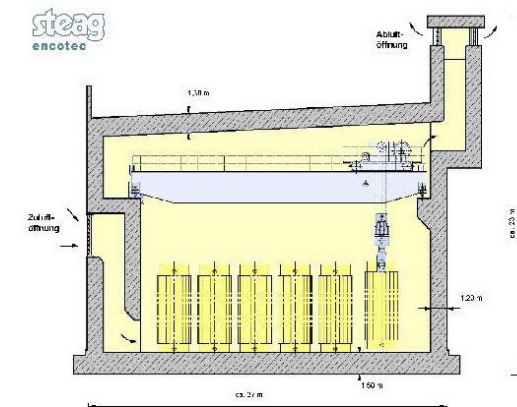
Zwischenlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und bestrahlte Brennelemente in Deutschland



Standortzwischenlager an allen 12 Standorten der Kernkraftwerke

Weitere Zwischenlager in:
Ahaus, Gorleben, Jülich, Greifswald

Genehmigung für 40 Jahre
Trockenlagerung CASTOR Behälter
Stahlbetonhallen Wandstärke ≈ 1.2 m

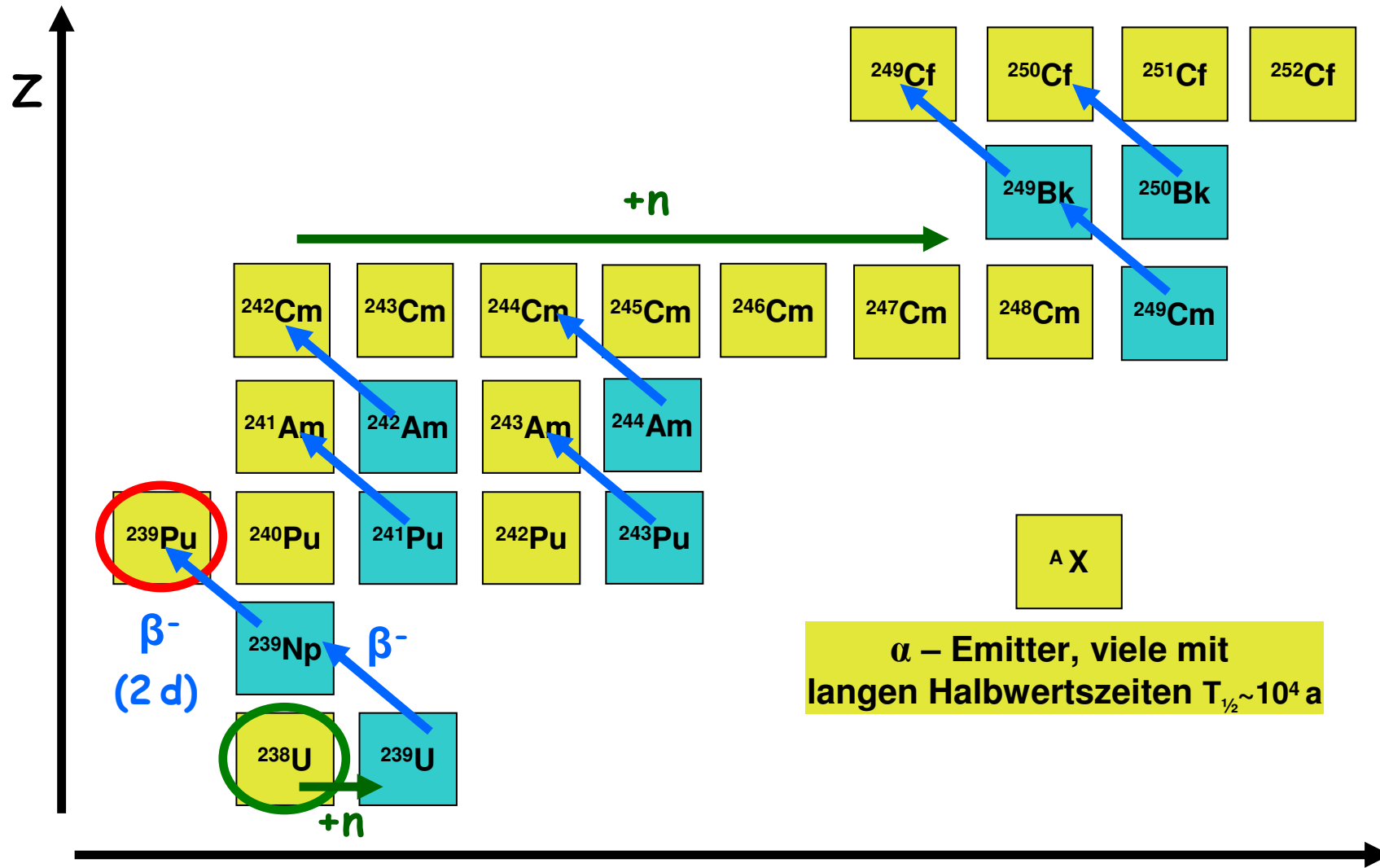


STEAG-Designed Building



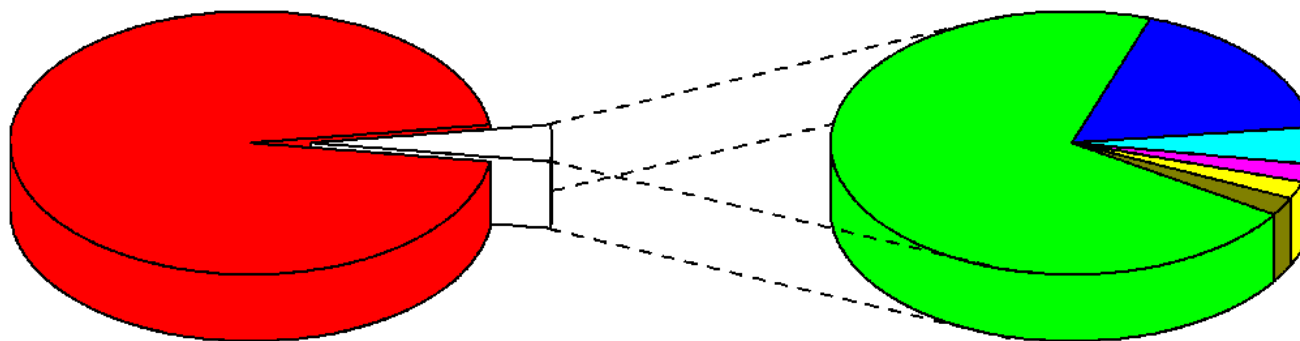
<http://www.bfs.de/de/transport/publika/flab18062003>

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 %)
- kurzlebigen Cs und Sr (0,2 %)
- minore Actinide (0,1 %)
- langlebigen I und Tc (0,1 %)
- andere langlebige Spaltprodukte (0,1 %)

Häufigster Bestandteil: ^{238}U
Spaltprodukte und Minore Aktiniden \approx 1-10 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)**
- 31.12.2010 13.471 tSM in Form **abgebrannter Brennelemente (BE)**
Davon bereits 6.670 tSM zur **Wiederaufarbeitung**
- **Prognose BfS:** weitere 6801 tSM bis zur Abschaltung aller Kernkraftwerke
- 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)

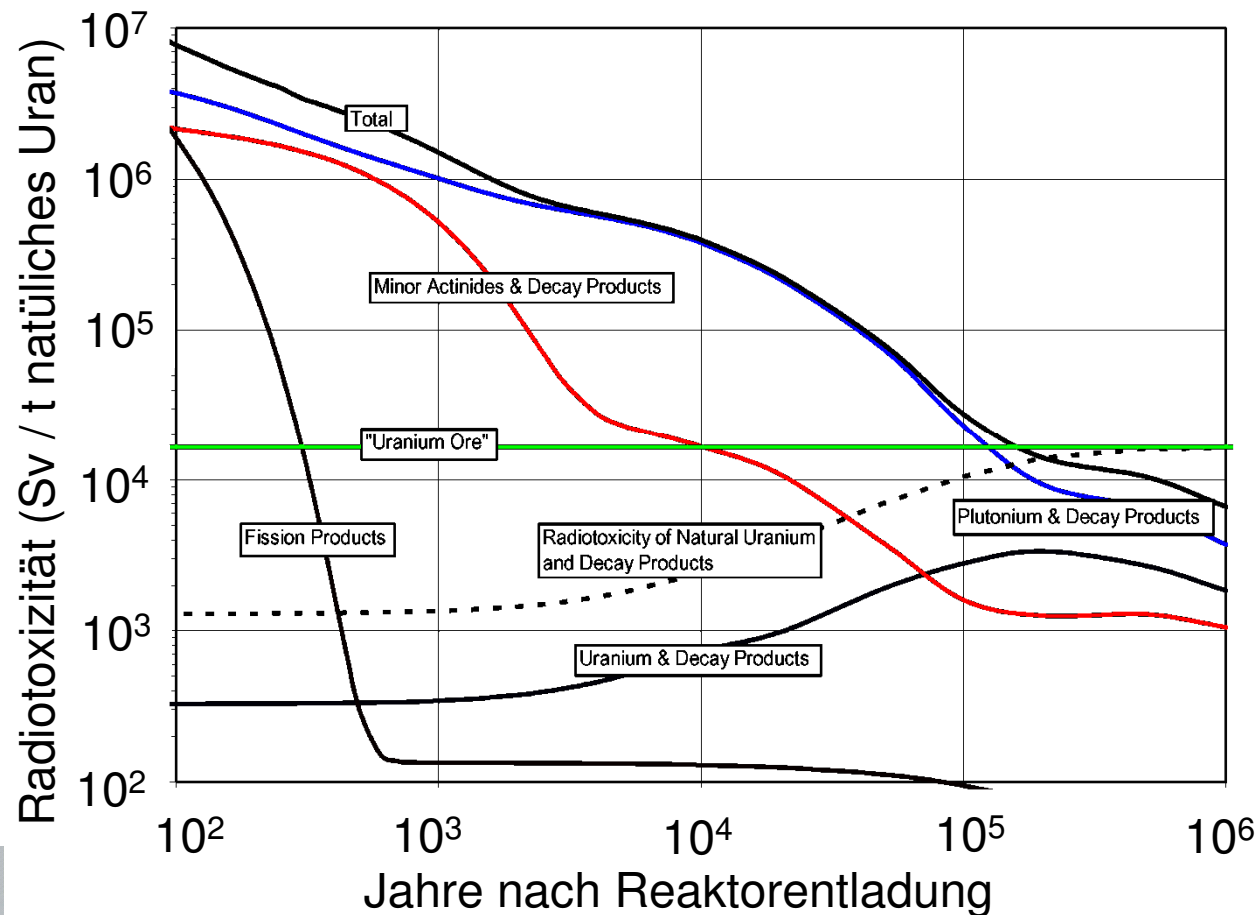
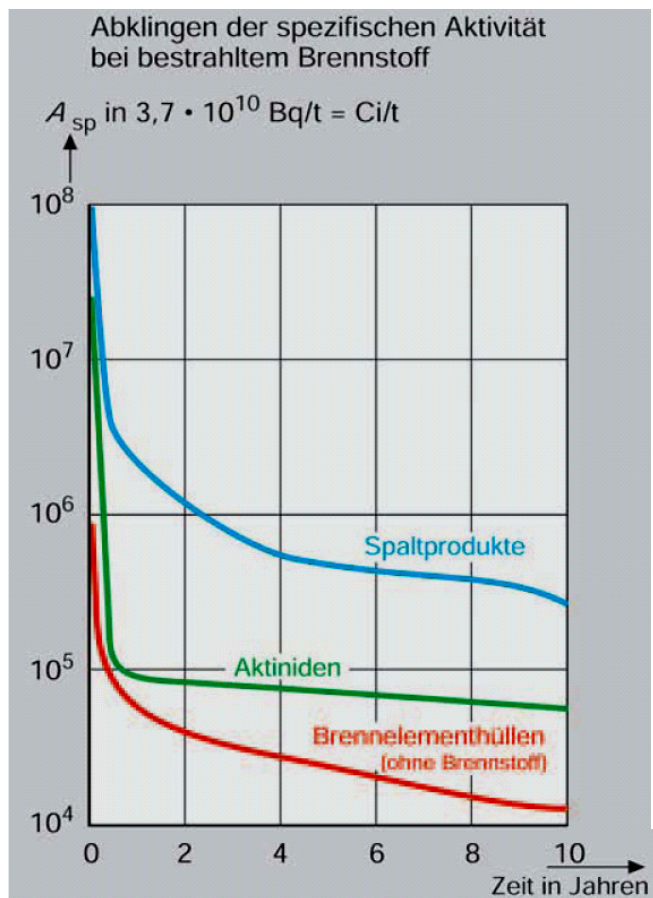
HLW = Hochradioaktiver Abfall (Spaltprodukte,...) (high level waste)

Quelle: Bundesamt für Strahlenschutz Stand 23.09.2011

<http://www.bfs.de/de/endlager/abfaelle/prognose.html/printversion>



Radiotoxizität abgebrannten Kernbrennstoffs

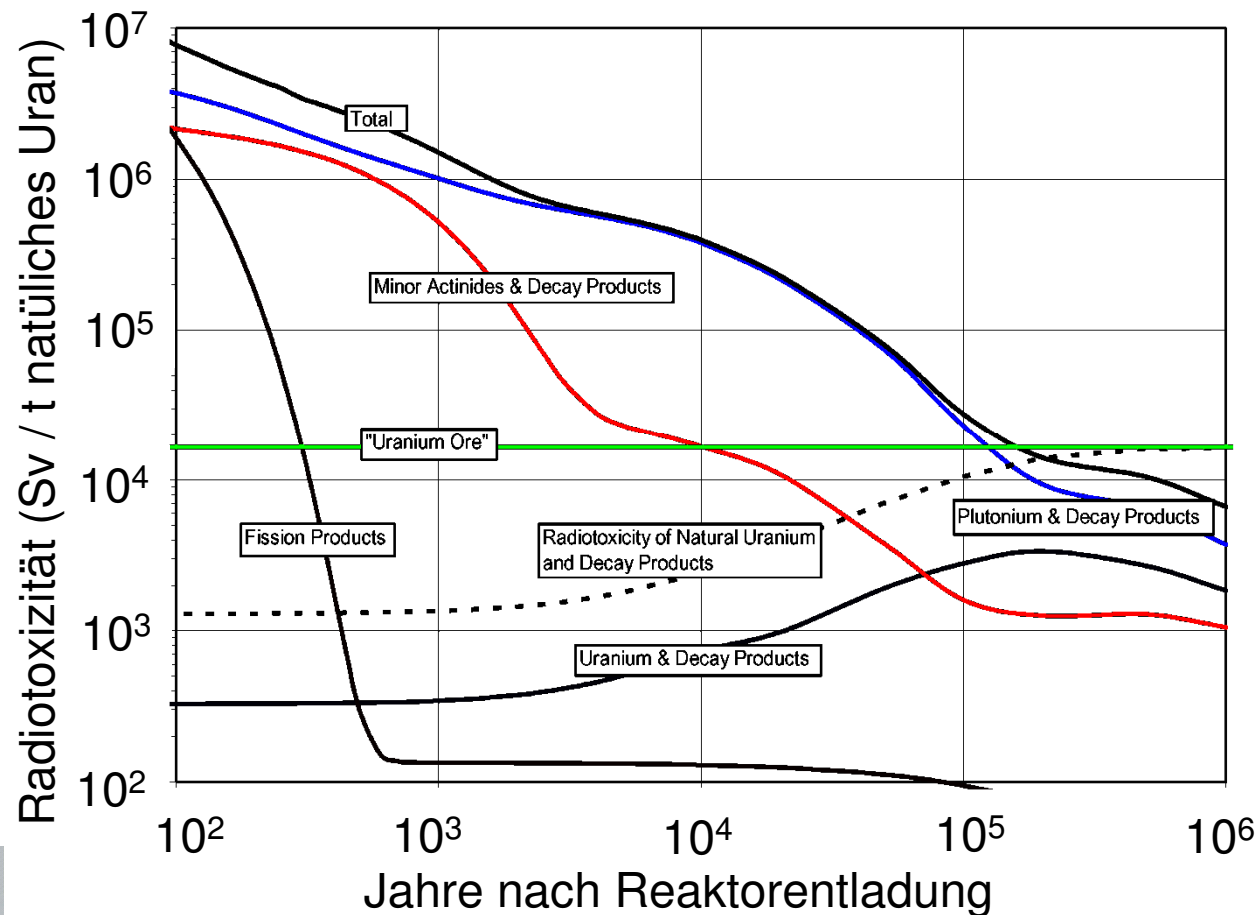
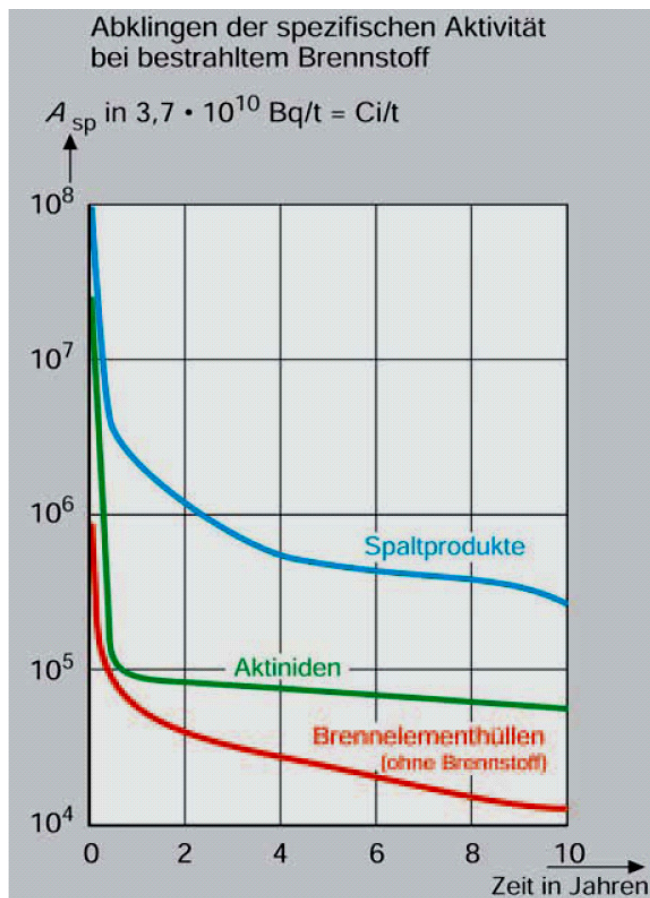


Salvatores, NEA report No. 6090, 2006

http://www.kernenergie.de/r2/documentpool/de/Gut_zu_wissen/Materialen/Downloads/018basiswissen2007.pdf

Bezugspunkt: Radiotoxizität des natürlichen Urans, das zur Herstellung von 1 t angereicherter 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



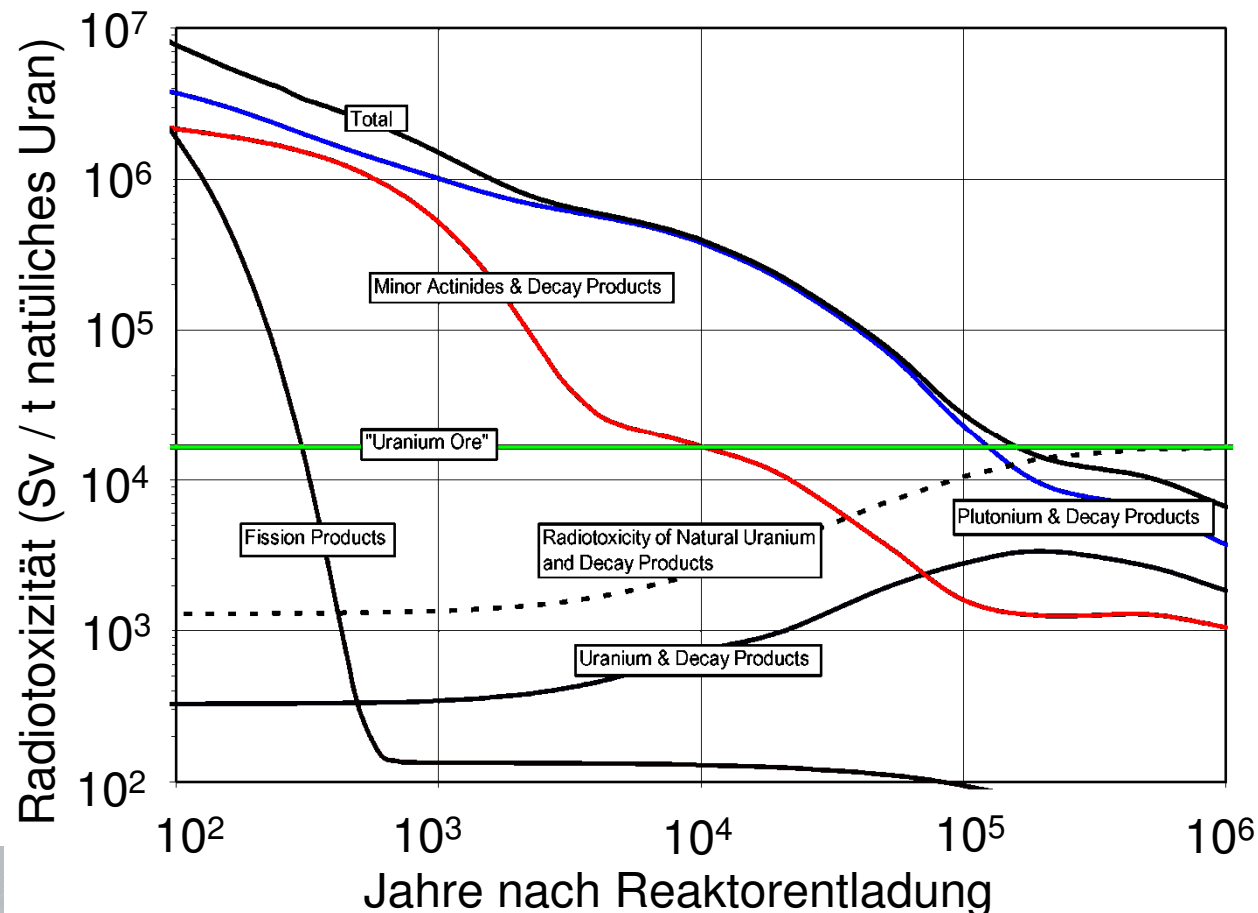
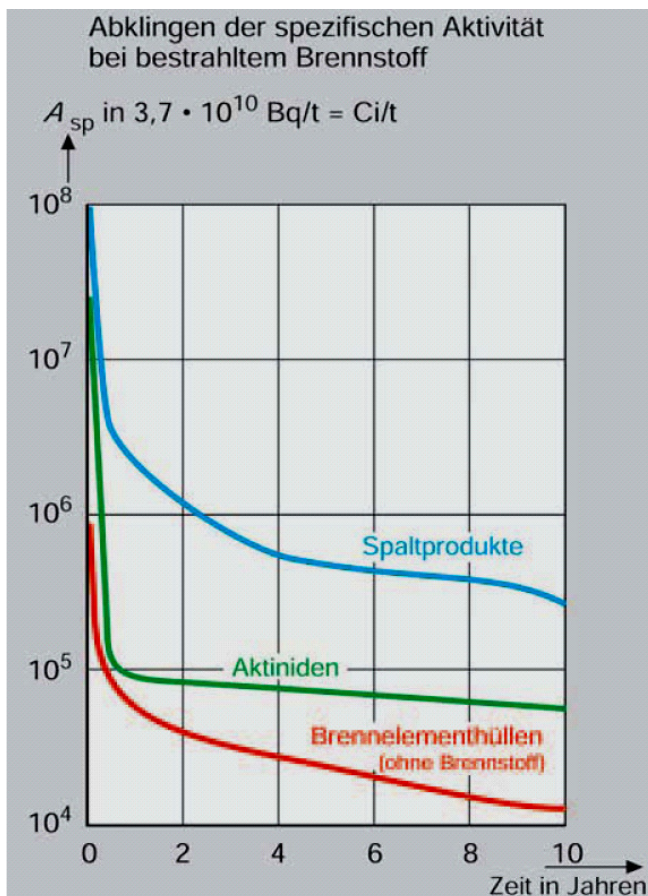
Salvatores, NEA report No. 6090, 2006

http://www.kernenergie.de/r2/documentpool/de/Gut_zu_wissen/Materialen/Downloads/018basiswissen2007.pdf

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 GG mit seinen Zerfallsprodukten $1.47 \cdot 10^5$ Sv



Radiotoxizität abgebrannten Kernbrennstoffs



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

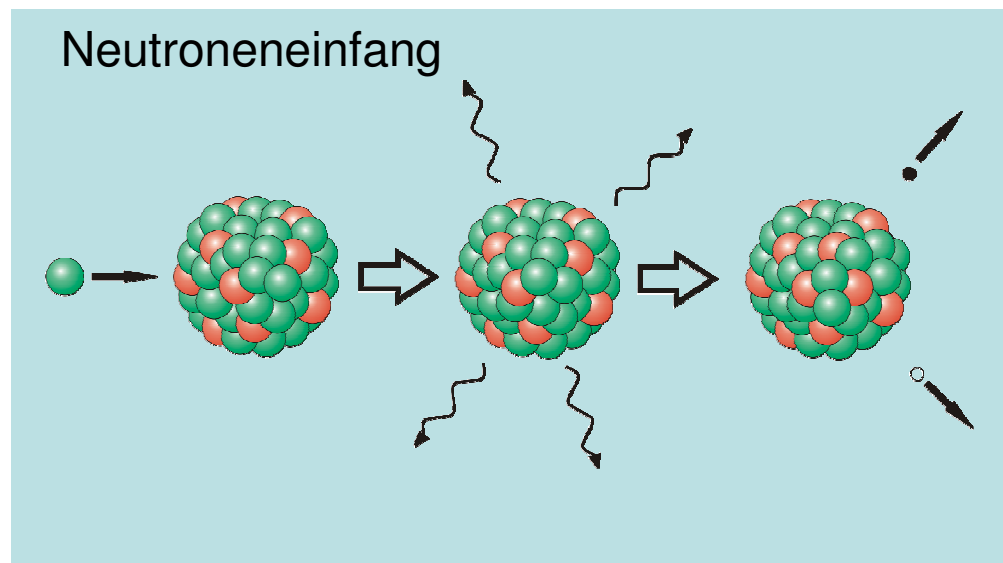
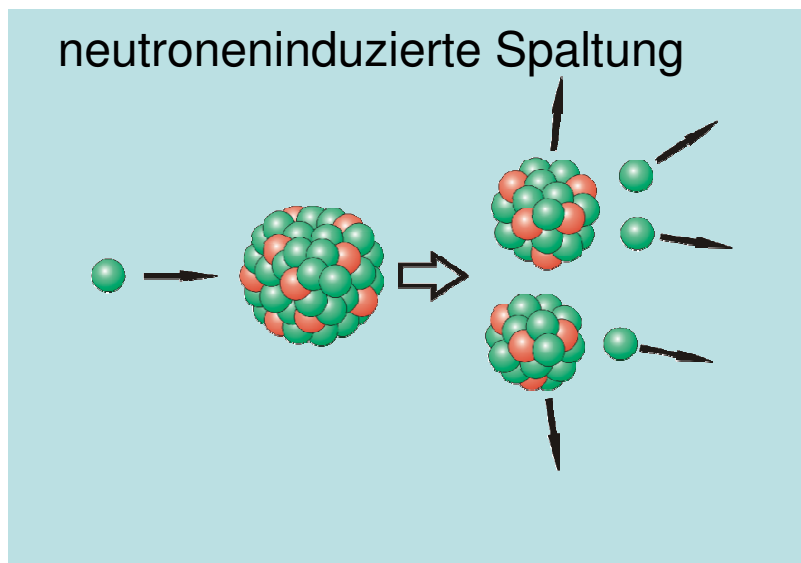
Fragestellung:

Sichere Endlagerung der hochradioaktiven Abfälle für mehr als 100 000 Jahre

Ziel:

- ⌘ Minimierung der langlebigen radioaktiven Abfälle (Plutonium und minore Aktiniden, langlebige Spaltfragmente)
- ⌘ Alternative zur direkten Endlagerung: Transmutation in kurzlebigere Nuklide
- ⌘ Direkte Endlagerung > 200.000 Jahre
- ⌘ Transmutation von Pu ca. 10.000 Jahre
- ⌘ Transmutation von Minoren Aktiniden < 1000 Jahre

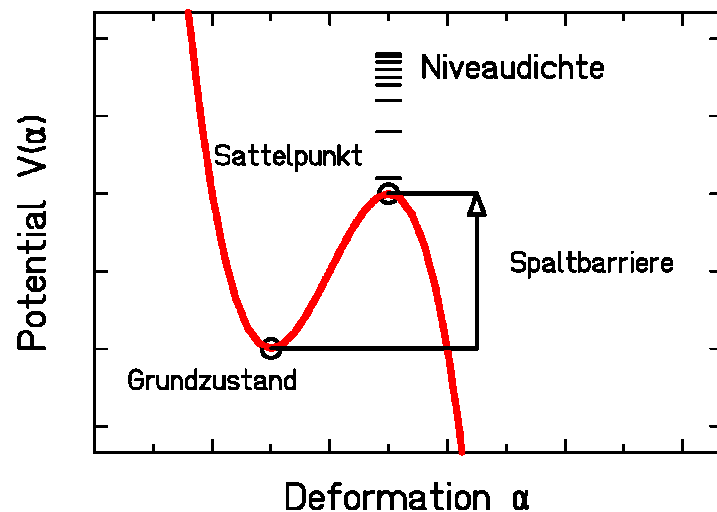
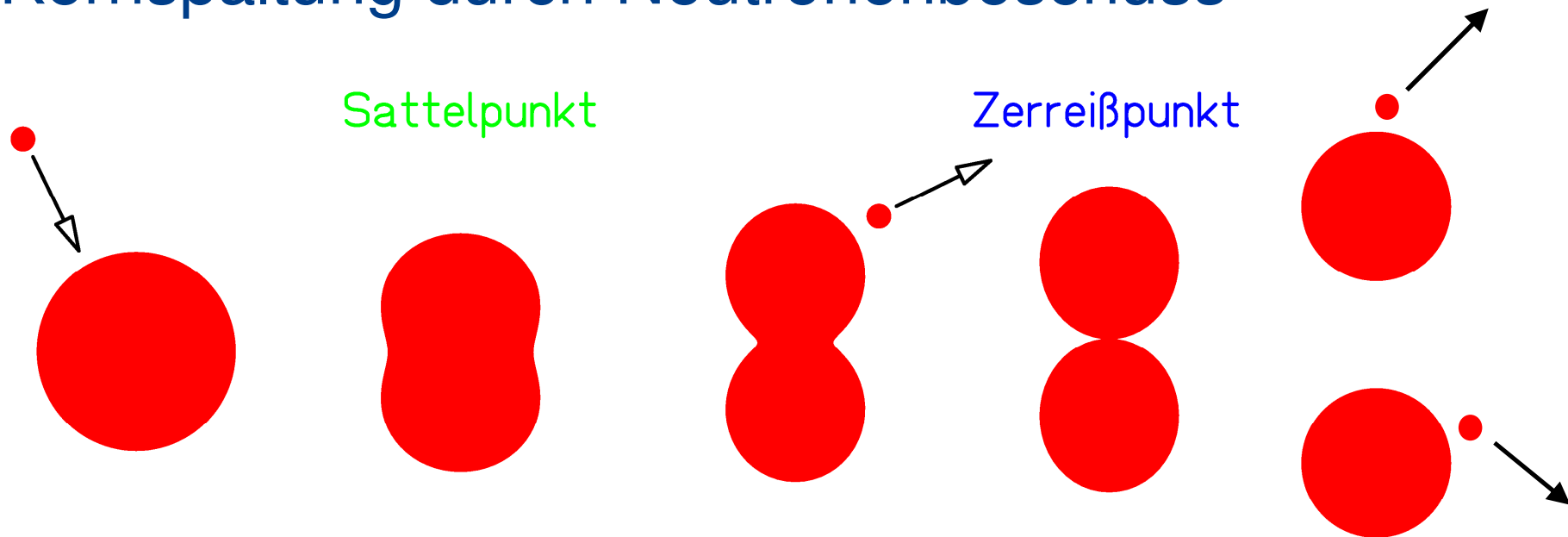
Transmutation von schweren Atomkernen



Neutronenbeschuss \rightarrow Spaltung schwerer Atomkerne \rightarrow Spaltprodukte meist kurzlebig

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

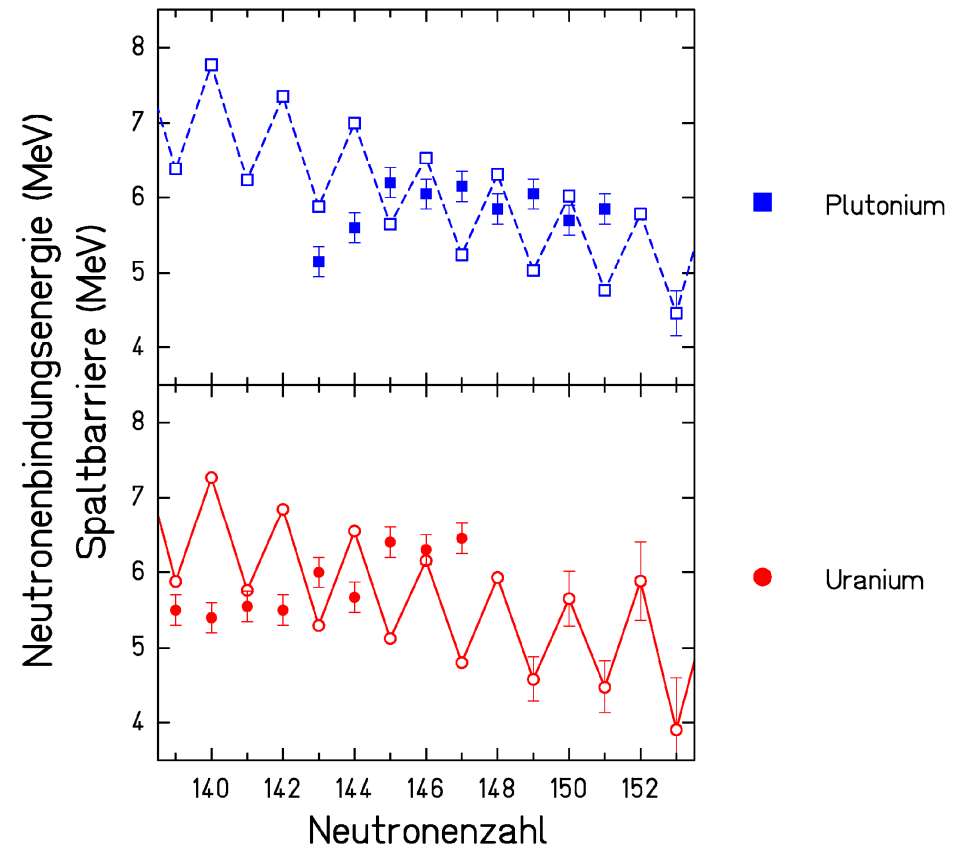
Kernspaltung durch Neutronenbeschuss



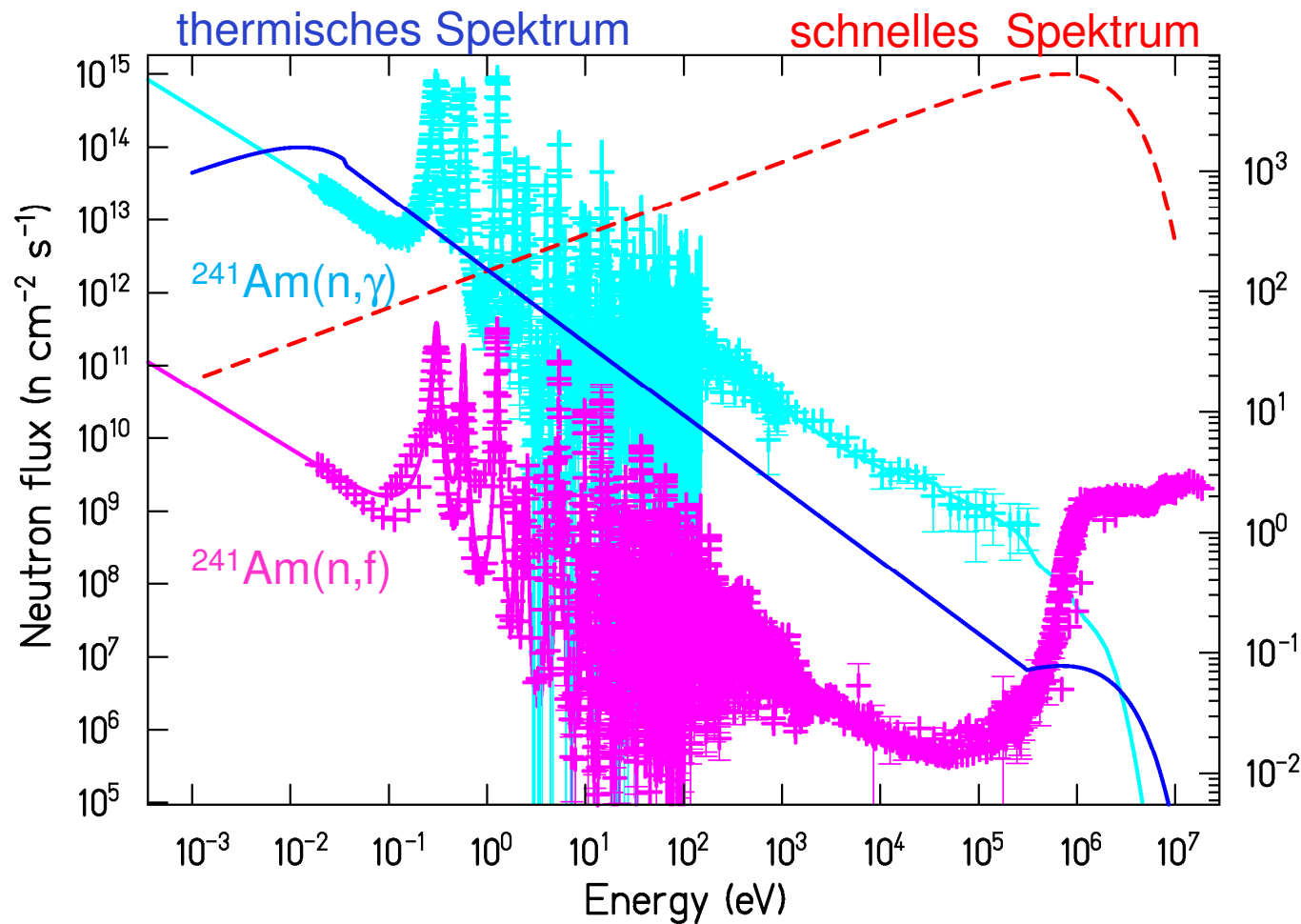
- Neutronenbeschuss \rightarrow angeregter Atomkern
- Atomkern deformiert sich (Schwingungen)
Grundzustand \rightarrow Sattelpunkt (N. Bohr, 1939)
- Deformation verbraucht Energie bis bis zum Sattelpunkt: Spaltbarriere
- Weitere Deformation führt zur Kernspaltung
 \rightarrow Spaltfragmente plus Neutronen

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



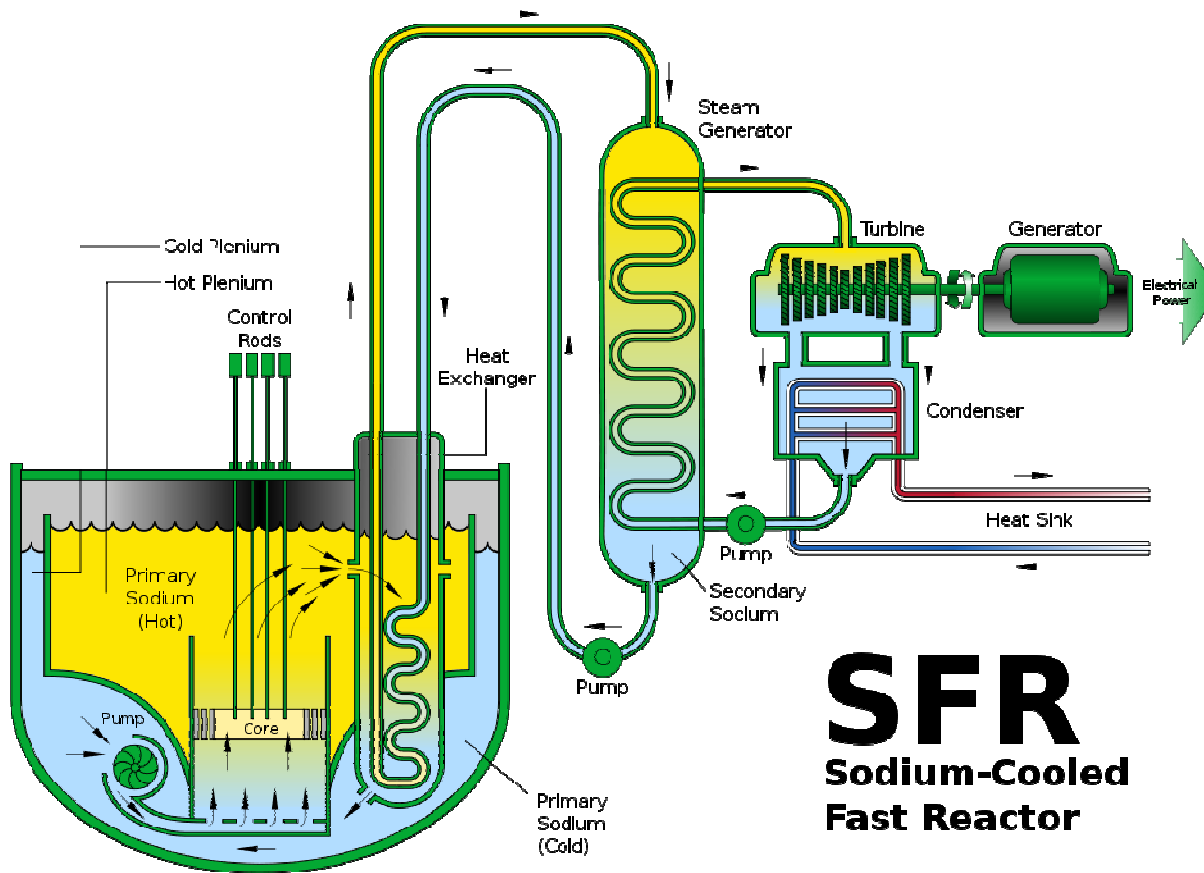
Im thermischen Spektrum ist der Neutroneneinfang gegenüber der Spaltung bevorzugt.

Im schnellen Spektrum ist die Spaltung gegenüber dem Neutroneneinfang bevorzugt.

$^{241}\text{Am}(n, \gamma)$ JEFF-3.1 Evaluation; Exp.(EXFOR): M. Jandel (2008), G.. Vanpraet (1985), N. Shinohara (1997),...

$^{241}\text{Am}(n, f)$ JEFF-3.1 Evaluation, Exp.(EXFOR): B. Jurado (2007), J.W.T. Dabbs (1983), H.H. Knitter (1979), P.E. Vorotnikov (1986), ...

Natrium-gekühlter schneller Reaktor



SFR Sodium-Cooled Fast Reactor

Verschiedene
Brennstoffzyklen:
U/Pu-Oxid-Brennstoff

Zur Transmutation (GenIV):
Brennstoffzyklus mit
Pu-M.A.-Zr in
Metallischer Matrix

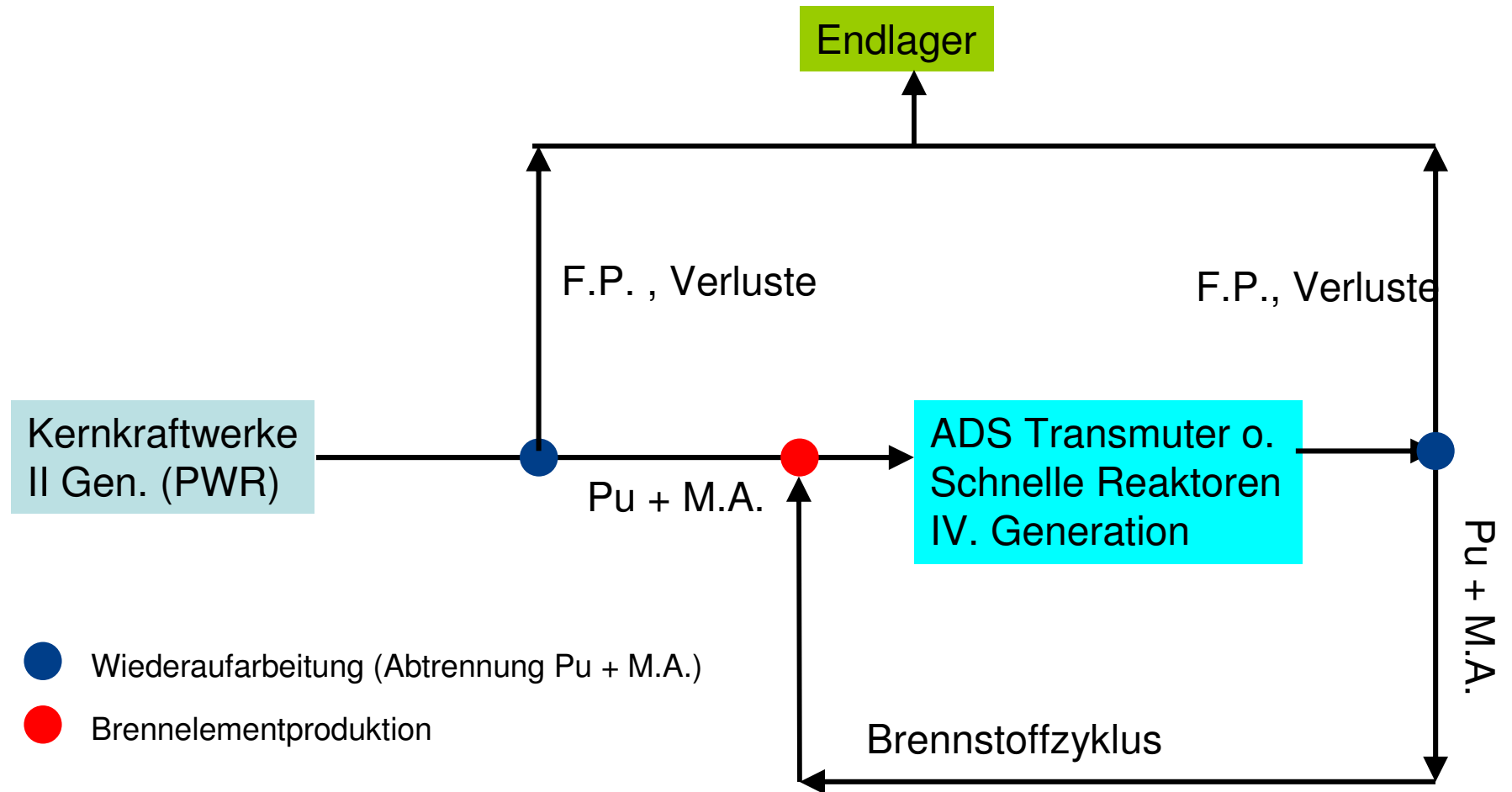
Homogenes Recycling von
Pu und M.A.

Pyrometallurgische
Wiederaufarbeitung
(on site)

Frankreich: Festlegung der „preliminary design parameter“ (bis 2012)
Industrieller Prototyp in Betrieb bis 31.12. 2020

Zeitplan gemäss: THE 2006 PROGRAMME ACT ON THE SUSTAINABLE MANAGEMENT OF RADIOACTIVE MATERIALS AND WASTES

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

Nachhaltige Nutzung der Kernenergie

- Geschlossener nuklearer Brennstoffkreislauf
- Wiederaufarbeitung: Plutonium + Minore Aktiniden werden abgetrennt (Partitionierung)
- Brennelementherstellung mit Plutonium + Minoren Aktiniden
- Transmutation z.B. in einem ADS System
- Erleichterte Endlagerung von kurzlebigen Spaltprodukten in historischen Zeiträumen(< 1000 Jahre)

⌘ Nahezu vollständige Nutzung der Kernenergie
(Bisher Nur 0.7% (^{235}U) des Urans zur Spaltung gebracht)

Partitionierung von hochradioaktiven Abfällen

- Chemische Abtrennung von Uran und Plutonium
PUREX = Plutonium Uranium Recovery by EXtraction

Partitioning –Zusammenfassung Stand der Actinidenabtrennung

	Standard Purex Industrie	Extended Purex + MA Labor
U	99.9%	99.9%
Pu	99.0 – 99.9%	99.9%
Np	60 – 95 %	99.9%
Am	-	99.9%
Cm	-	99.9%

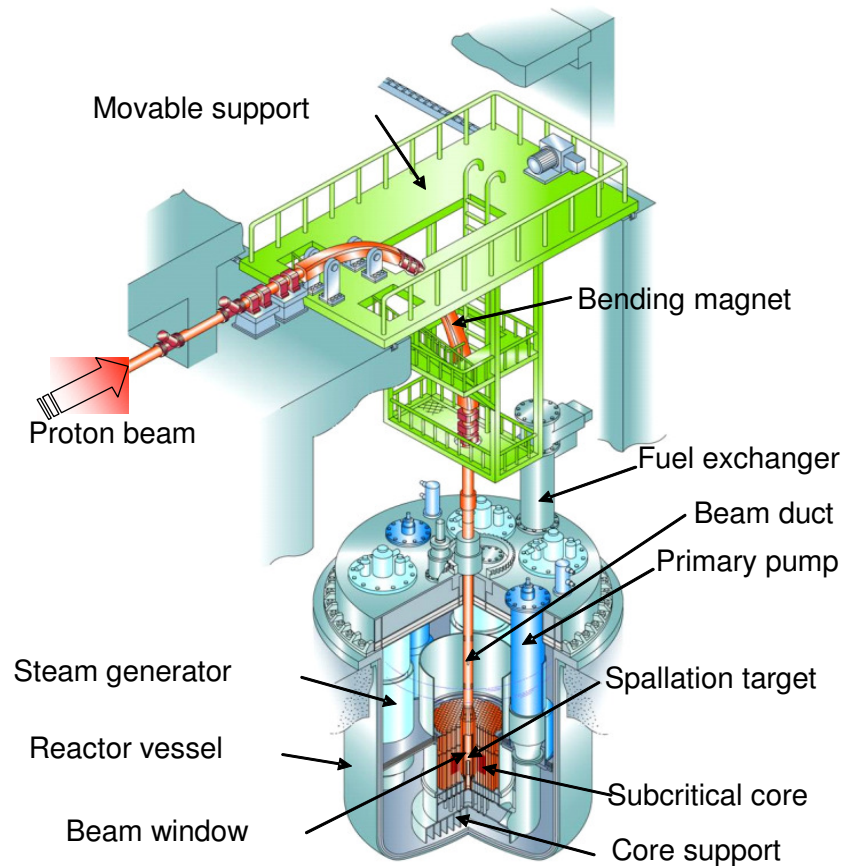
Abtrennprozesse
DIAMEX/SANEX
± Separation
Minoren Actiniden

Pyrochemisch: 99.9% (Labor)

Quelle: K. Gompper, Institut für Nukleare Entsorgung, KIT Karlsruhe

http://www.vdi.de/fileadmin/vdi_de/redakteur_dateien/get_dateien/Beitrag-Tromm-2005-KT.pdf

Beschleunigergestützte unterkritische Systeme (ADS)



- Accelerator driven intense thermal neutron source, C.D. Bowman 1992, Energy Amplifier, C. Rubbia, 1995
- Unterkritischer Reaktorkern $k \approx 0.95 - 0.97$
Thermische Leistung: 400 MWt
- Höchstleistungs-Protonenbeschleuniger 800 MeV
ca. 10 mA Strahlstrom **8 MW- Strahlleistung**
- Kühlung durch Pb, Pb/Bi oder Na
- Spaltrate (Energieproduktion) durch Strahlstrom steuerbar ca. 15-30 n / Proton

Herausforderungen:

Zuverlässigkeit des Beschleunigers
(bisher Cyclotron, in Zukunft: LINACs)

Spallationstarget (Megapie Experiment PSI)

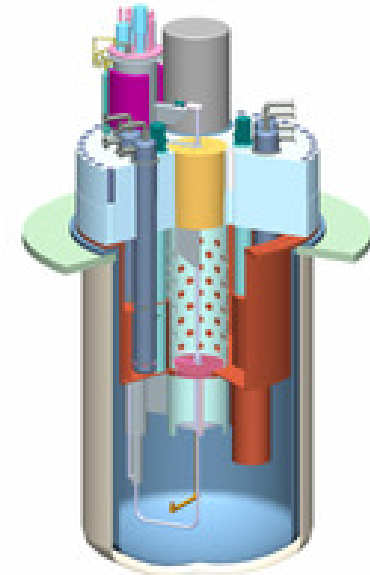
Abb. Hiroyuki OIGAWA
Euratom PARTRA Cluster Meeting Karlsruhe
Feb. 2008

EUROTRANS Projekt KIT (J. Knebel) \pm XT-ADS

[Myrrha Projekt](#), SCK.CEN, Mol Belgien, [HZDR](#)
Nucl. Phys. News 20 No 1 24-29

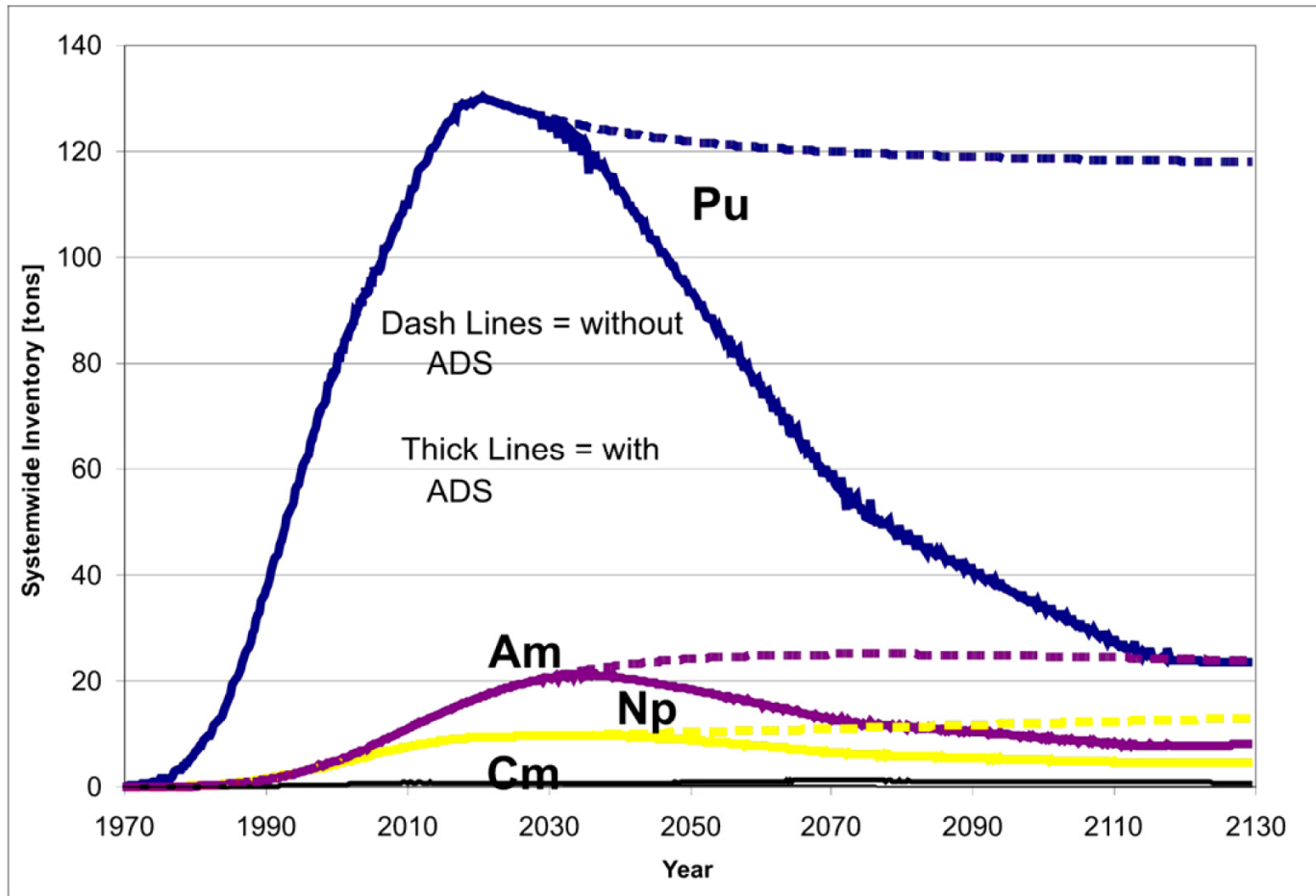
Myrrha: **M**ulti-purpose **h**Ybrid **R**esearch **R**eactor for **H**igh-tech **A**pplications

- XT-ADS Experimentelles beschleunigergestütztes System
Leistung 50-100 MW_{th}
 $k_{\text{eff}} = 0,95$
- Protonenstrahl
600 MeV, 2,5 mA
- Kühlmittel + fensterloses Target
Pb+Bi
- Mischoxidbrennstoff U + Pu
- 04.03.2010 Belgische Regierung verspricht 40% der Kosten zu tragen (insgesamt 400 M€; 60 M€ von 2010-2014)
- Experimentierbetrieb ab 2023



A.C. Mueller, H. A. Abderrahim, Transmutation von radioaktivem Abfall, Physik Journal 9 (2010) Nr. 11 33

ADS Studie zur Transmutation in Deutschland



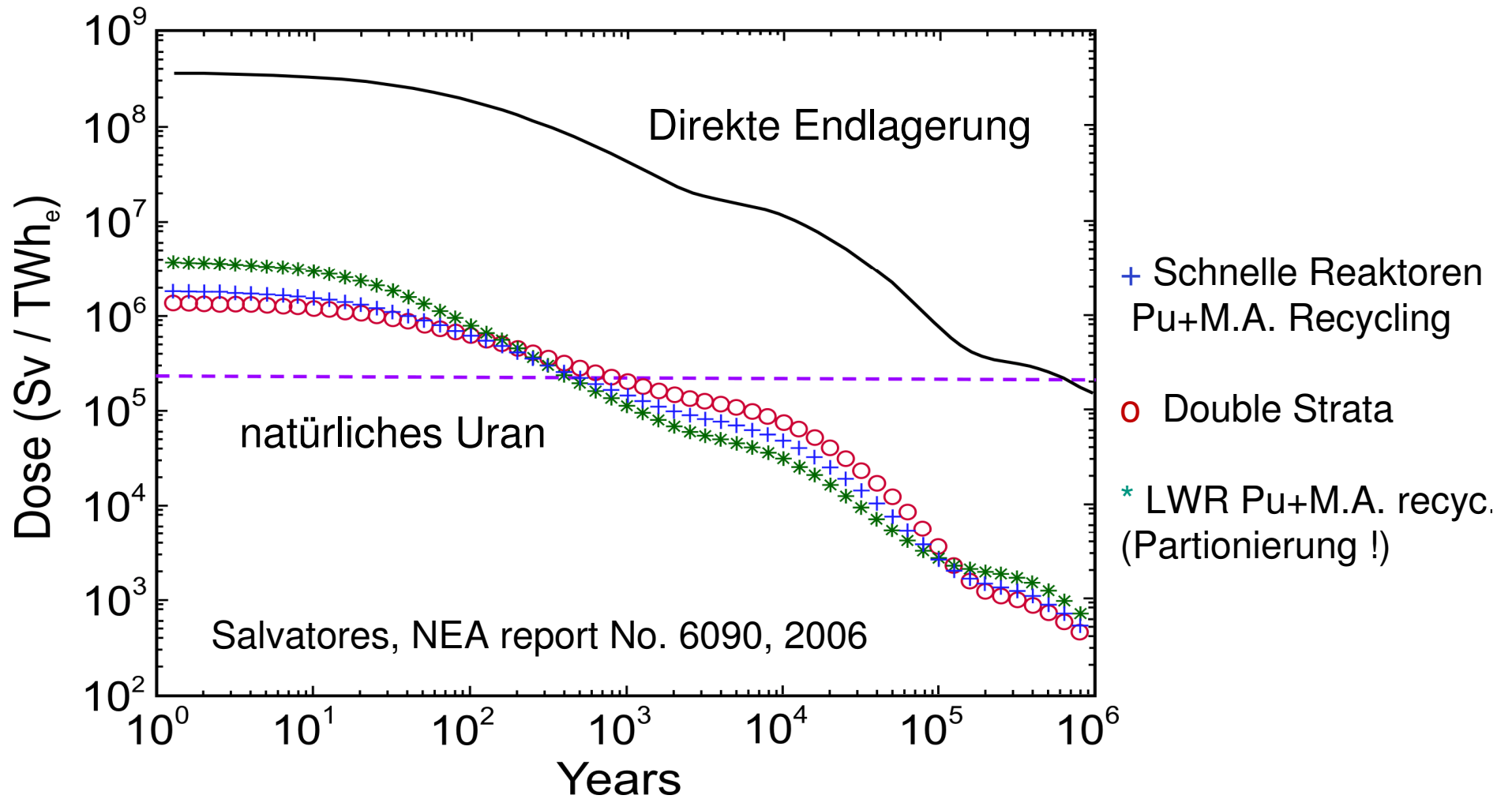
Beginn: 2030
8 ADS Transmuter
(840 MWth)
3 ADS Transmuter

Transmutation
von 100 t Pu
und Minoren
Aktiniden
In 100 Jahren

Gleichzeitige
Stromerzeugung
ist möglich.

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

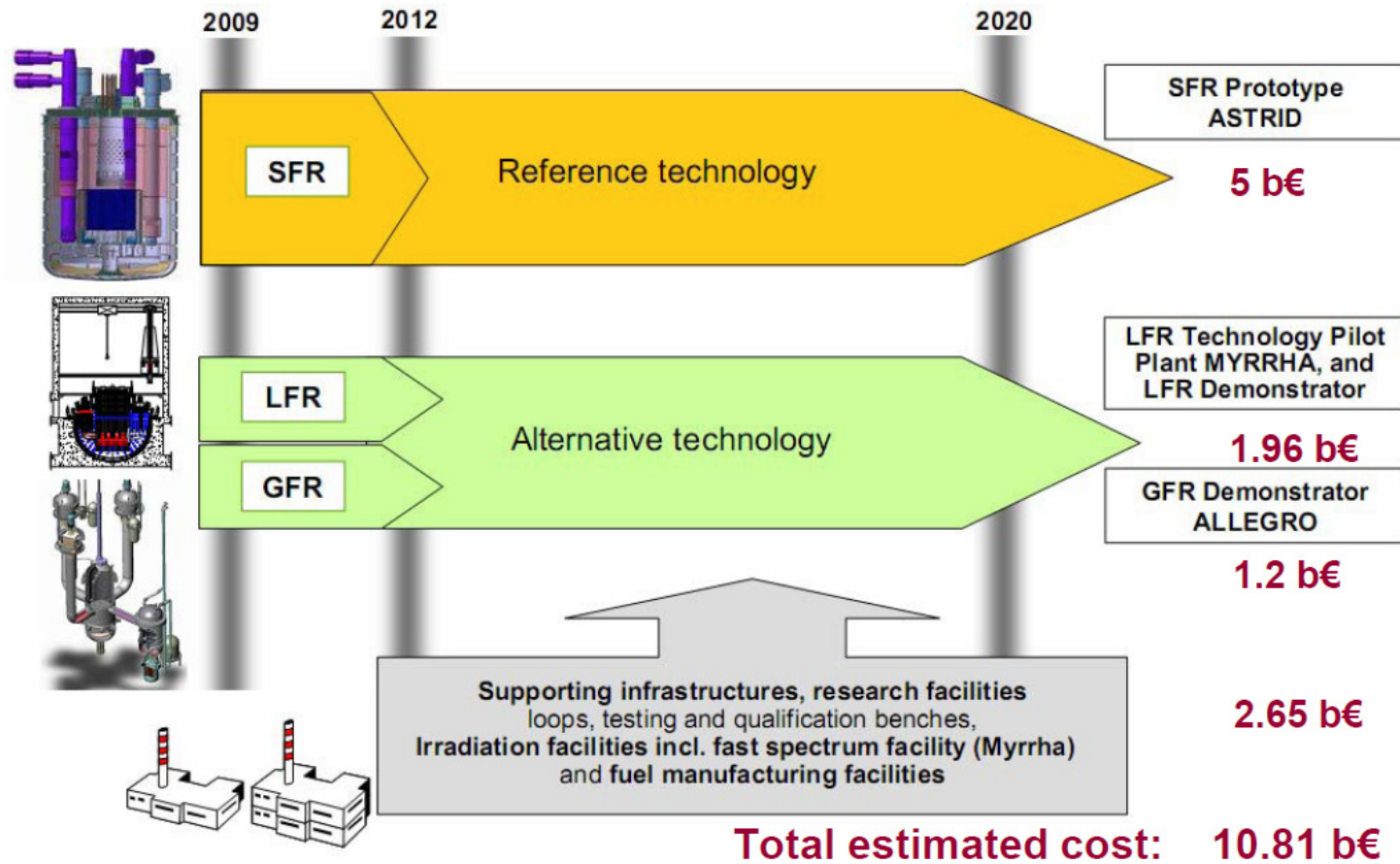


EUROPEAN COMMISSION

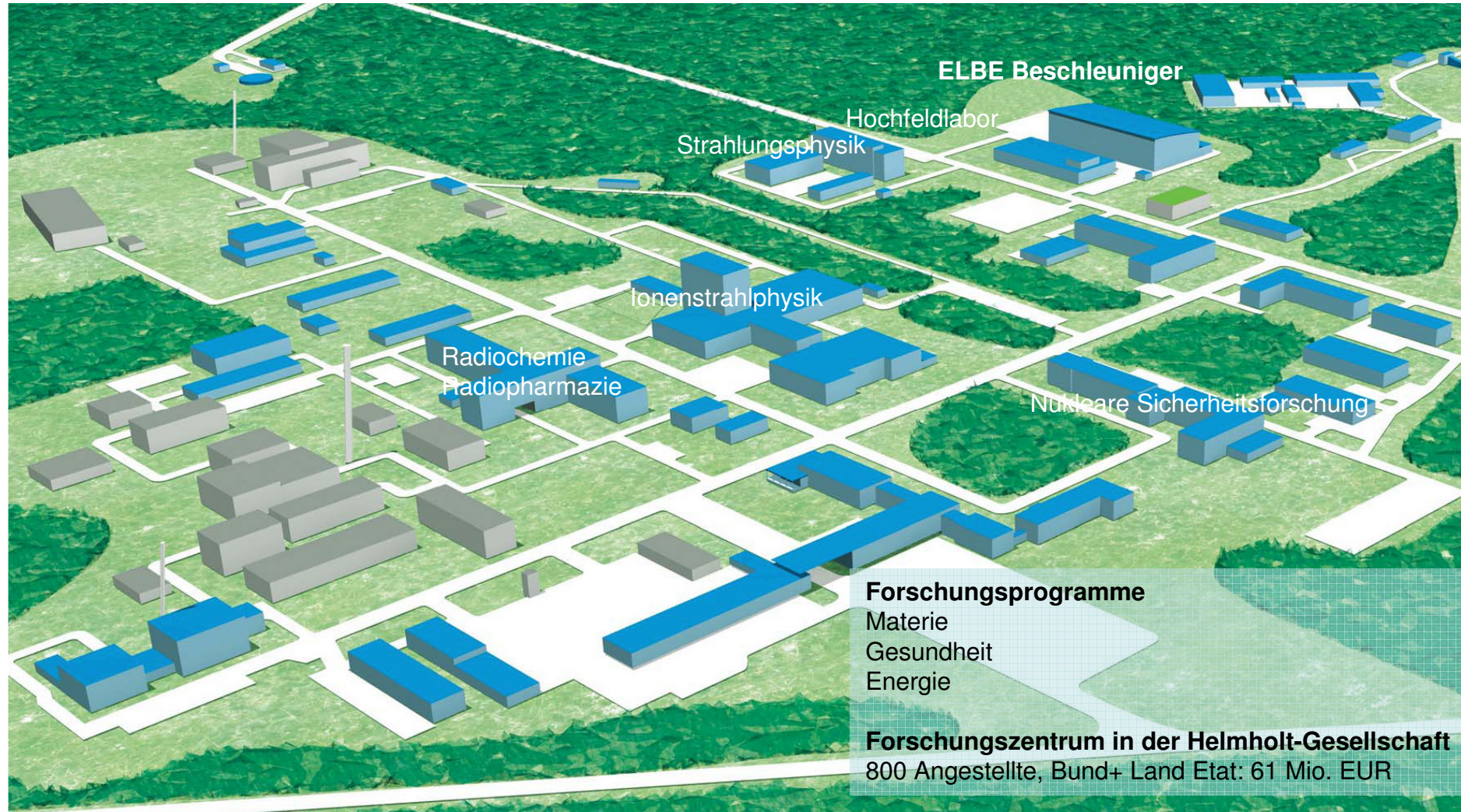
Community research

The European Sustainable Nuclear Industrial Initiative

2040: Target for the deployment of Gen-IV Fast Neutron Reactors with Closed Fuel Cycle



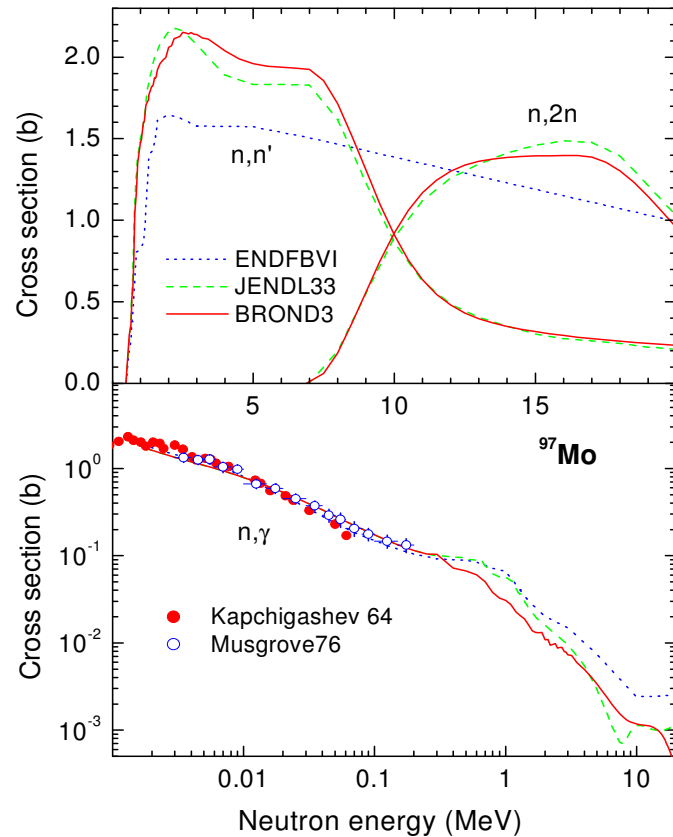
Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf



Transmutationsforschung am HZDR

- Simulation von Transmutationsanlagen zur Evaluation der Sicherheit und Effizienz und Weiterentwicklung der Simulationsprogramme. z.B. Abschirmungsrechnungen für MYRRHA
- Messung von transmutationsrelevanten Kerndaten insbesondere im Bereich schneller Neutronen von Relevanz für die Transmutation.
 - ⌘ Genauigkeit der Simulationsrechnungen hängt entscheidend von den zur Verfügung stehenden Kerndatenbanken ab.

nELBE Forschungsprogramm:



- Untersuchung von Reaktionen schneller Neutronen mit Relevanz für nukleare Transmutation und zur Simulation von Transmutationsanlagen
- 1. **Inelastische Neutronenstreuung ($n,n'\gamma$)**
 ^{56}Fe , Mo , Pb , ^{23}Na und totale Neutronenquerschnitte σ_{tot} (Ta , Au)
- 2. **Untersuchung von Aktiniden** (radioaktive Targets)
 ^{239}Pu , ^{242}Pu , ^{235}U , ^{238}U BMBF-Projekt
 „Transmutationsrelevante kernphysikalische Untersuchungen...“, 02NUK13
 Minore Aktiniden Targets von CERN n-TOF

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

A. V. Ignatyuk, priv.com. 2008





The ERINDA project aims for a coordination of European efforts to exploit up-to-date neutron beam technology for novel research on advanced concepts for nuclear fission reactors and the transmutation of radioactive waste.

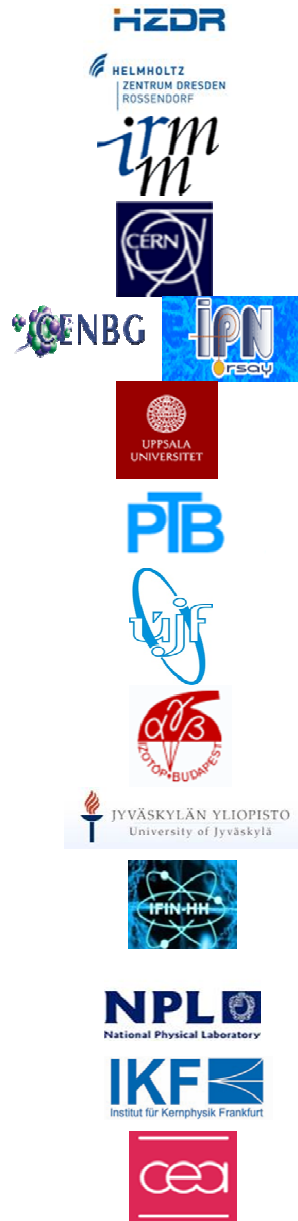
- Transnational access (2500 hours of beam time) including technical and travel support for the user groups (~ 25 experiments)
- Supporting Scientific Visits:
10 short term visits (~ 8 weeks each) of scientists to the consortium institutes
- Scientific workshops (4): Kick-off meeting at HZDR Dresden January 27-28, 2011
- **Deadline for the next proposal evaluation: March 15, 2012**

Project coordinator: A.R.J.

www.erinda.org

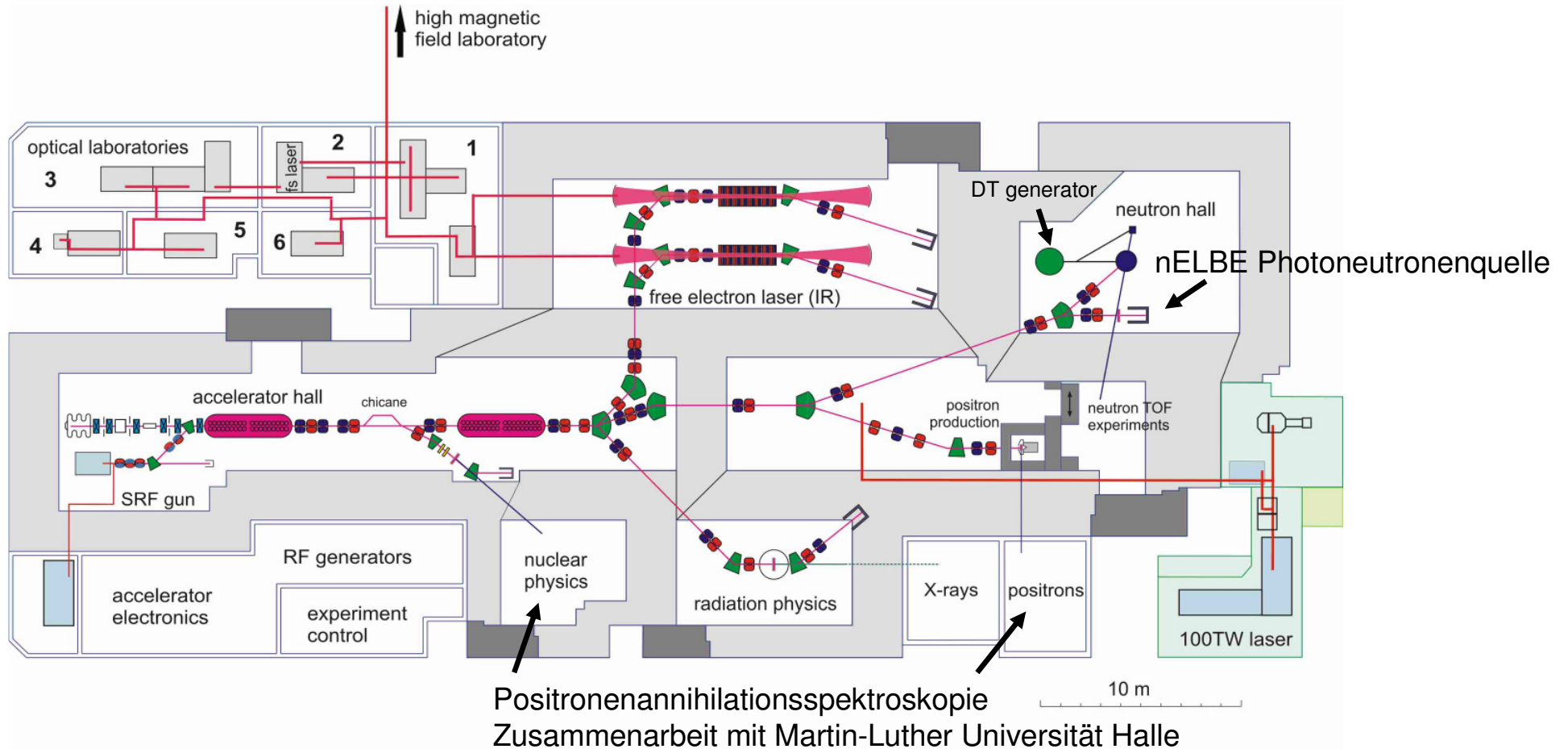


ERINDA Partners:



Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Germany	HZDR	40 MeV superconducting linac
Institute for Reference Materials and Measurements, Geel, Belgium	JRC-IRMM	GELINA time-of-flight facility, 7 MV Van de Graaff
CERN, Genève, Switzerland	CERN n_TOF	n_TOF time-of-flight facility
Centre National de la Recherche Scientifique/ Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules, France	CNRS/ IN2P3	Tandem-ALTO facility (IPN Orsay) 3.5 MV Van de Graaff (CEN Bordeaux-Gradignan)
Uppsala University, Sweden	UU-TSL	180 MeV cyclotron
Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, Germany	PTB	3.75 MV Van de Graaff and CV28 cyclotron
Nuclear Physics Institute ASCR, Řež, Czech Republic	NPI	Cyclotron (20 MeV p, d, α)
Institute of Isotopes, Hungarian Academy of Sciences, Budapest, Hungary	II HAS	10 MW research reactor
Department of Physics, University of Jyväskylä, Finland	JYU	cyclotron (30 MeV)
Horia Hulubei National Institute of Physics and Nuclear Engineering, Bucharest, Romania	IFIN-HH	9 MV Tandem accelerator
National Physical Laboratory Teddington, United Kingdom	NPL	3.5 MV Van de Graaff
Goethe University, Frankfurt, Germany	FRANZ	High intensity Proton LINAC and neutron source in preparation (2013)
Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, France	CEA	4 MV VdG, 7 MV Tandem Van de Graaff

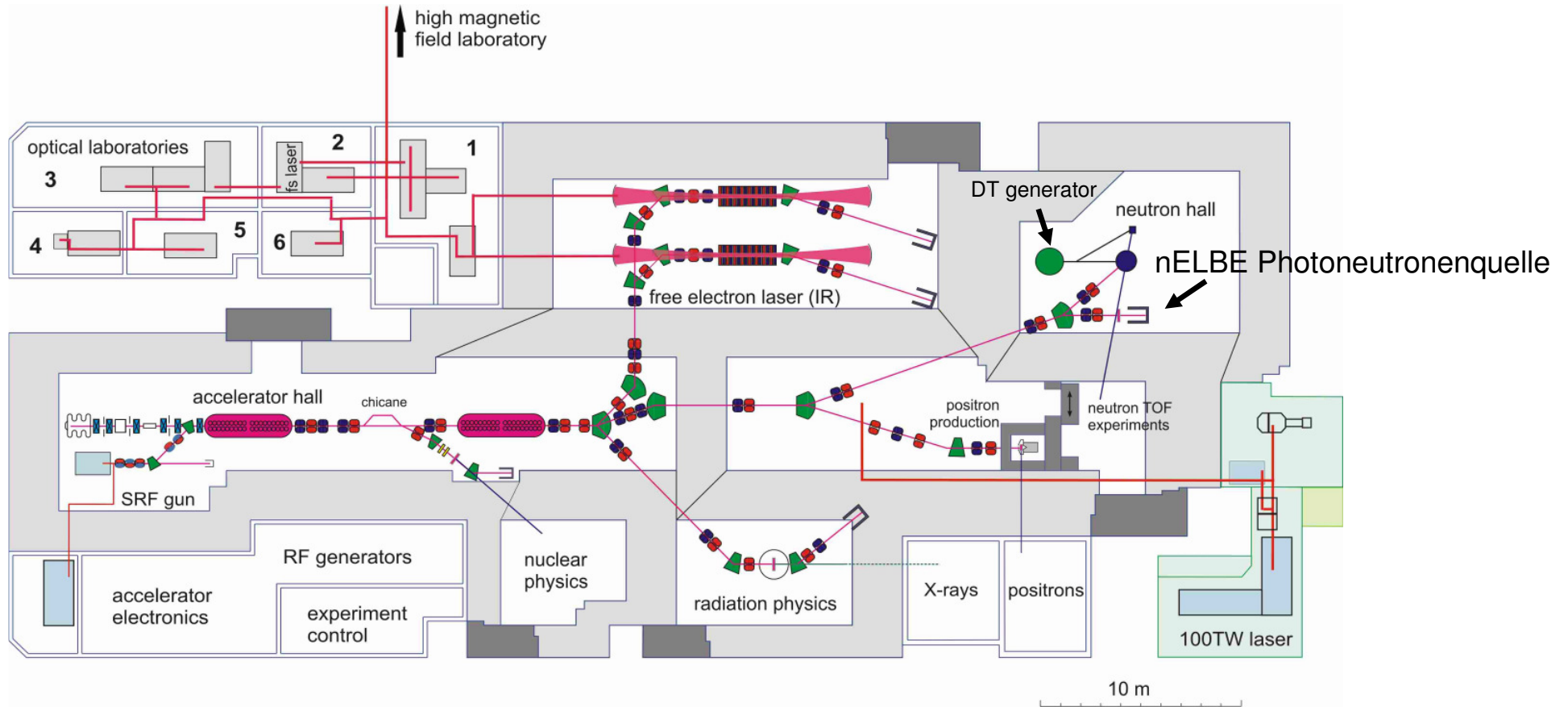
ELBE: Electron Linear accelerator with high Brilliance and low Emittance



- 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

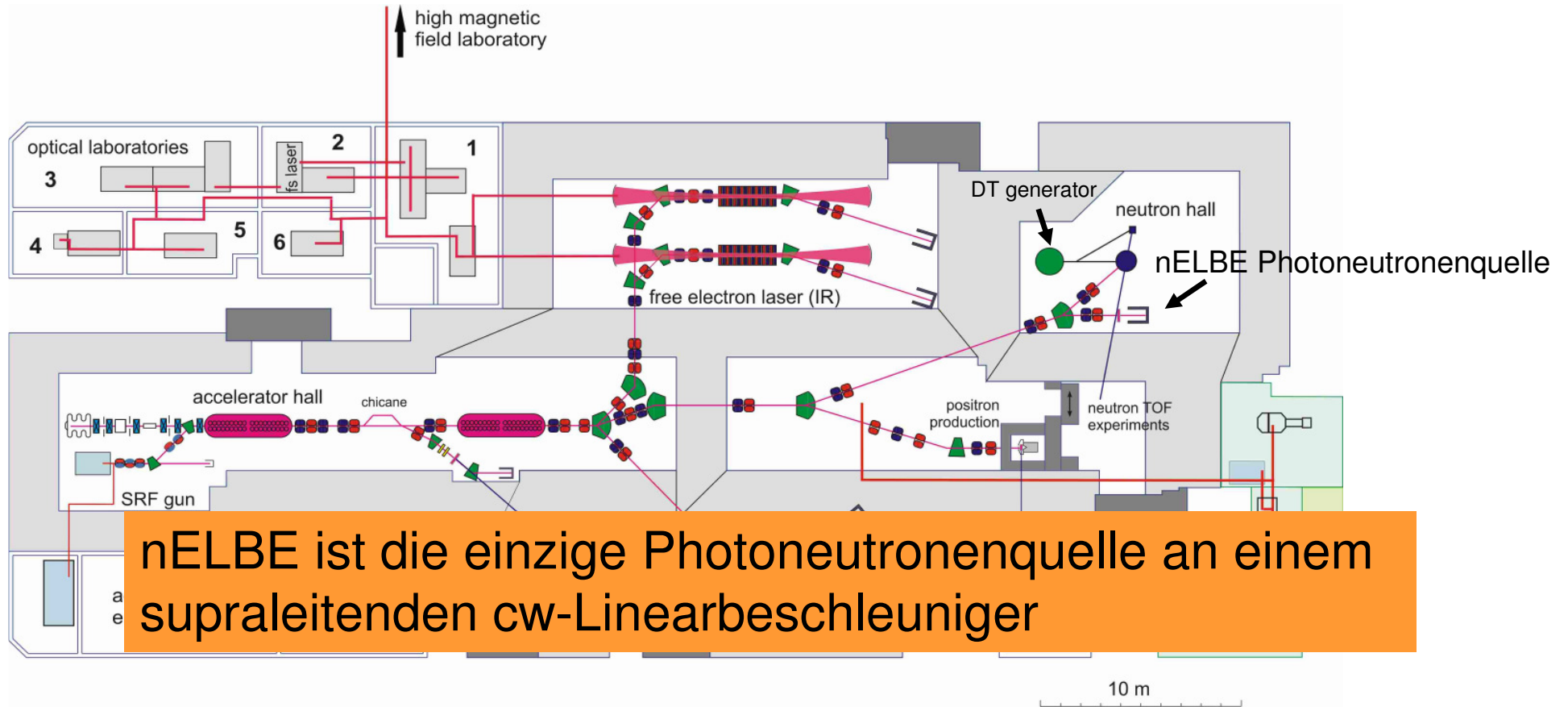
ELBE: Electron Linear accelerator with high Brilliance and low Emittance



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

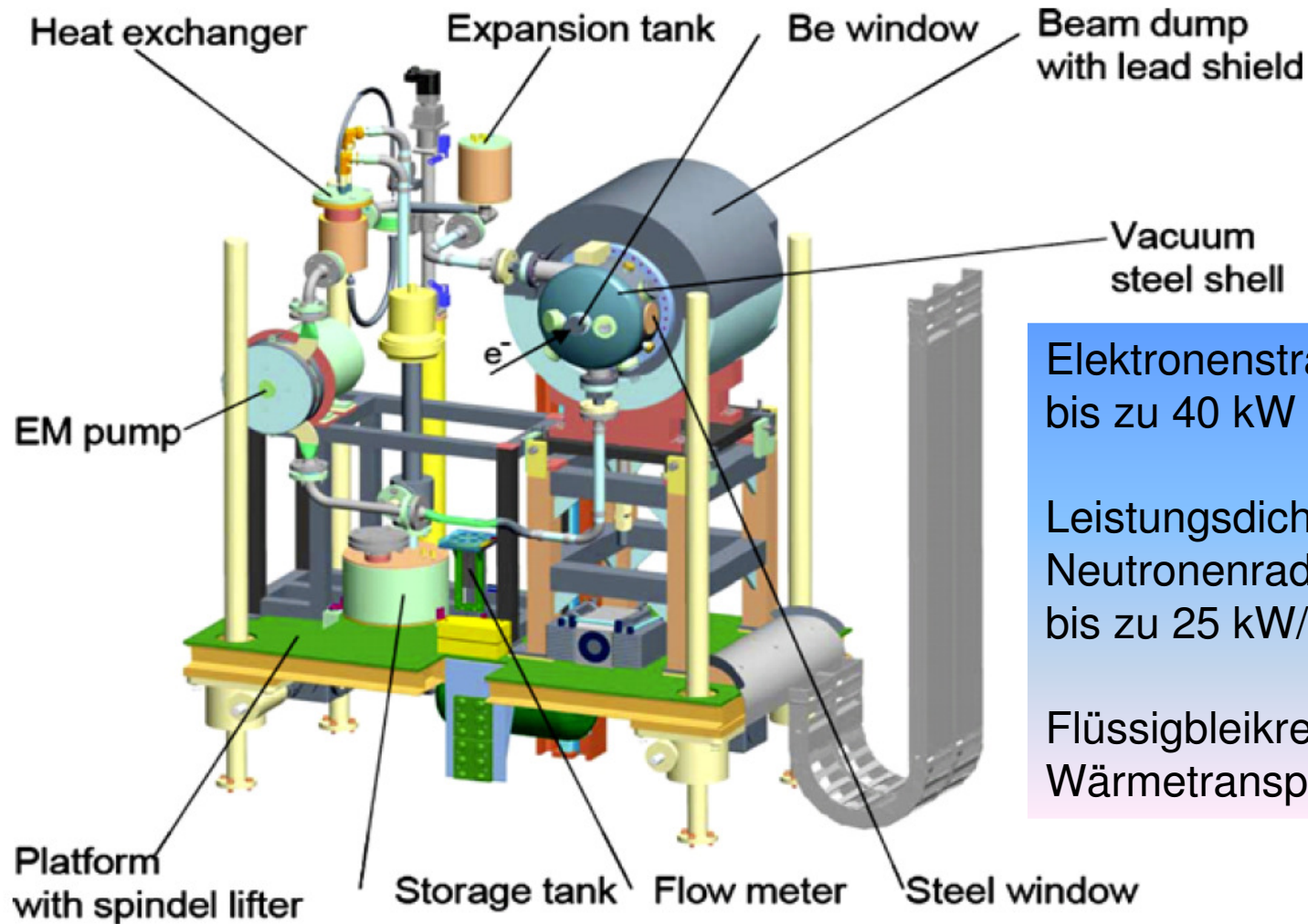
- 1: Diagnostic station, IR-imaging and biological IR experiment
- 2: Femtosecond laser, THz-spectroscopy, IR pump-probe experiment
- 3: Time-resolved semiconductor spectroscopy, THz-spectroscopy

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

nELBE at ELBE : something special

- superconducting electron accelerator cw operation with variable micropulse repetition rate
 - micropulse charge 80 pC (thermionic Injector)
 - micropulse length $\Delta t < 10$ ps \pm precise definition of time of flight
- For time of flight measurements the repetition rate is adjustable
13 MHz / 2^n , $n = 0, \dots, 10$
- Very high repetition rate (200 kHz), low instantaneous neutron-flux
 \pm background of photon flash from bremsstrahlung is reduced
- since Januar 2010 : SRF Laser-Injector development
bunch charge up to 1 nC (not yet reached)
- fligh path 4.0 - 8.0 m
- neutron flux on target sample $7 \cdot 10^5$ cm⁻² s⁻¹
- neutron energy range 100 keV < E_n < 10 MeV
(Liquid lead target, without moderator)
- energy resolution $\Delta E/E < 1$ %
with 6.0 m flight path

nELBE Photoneutronentarget



Elektronenstrahlleistung
bis zu 40 kW

Leistungsdichte im
Neutronenradiator
bis zu 25 kW/cm³

Flüssigbleikreislauf zum
Wärmetransport

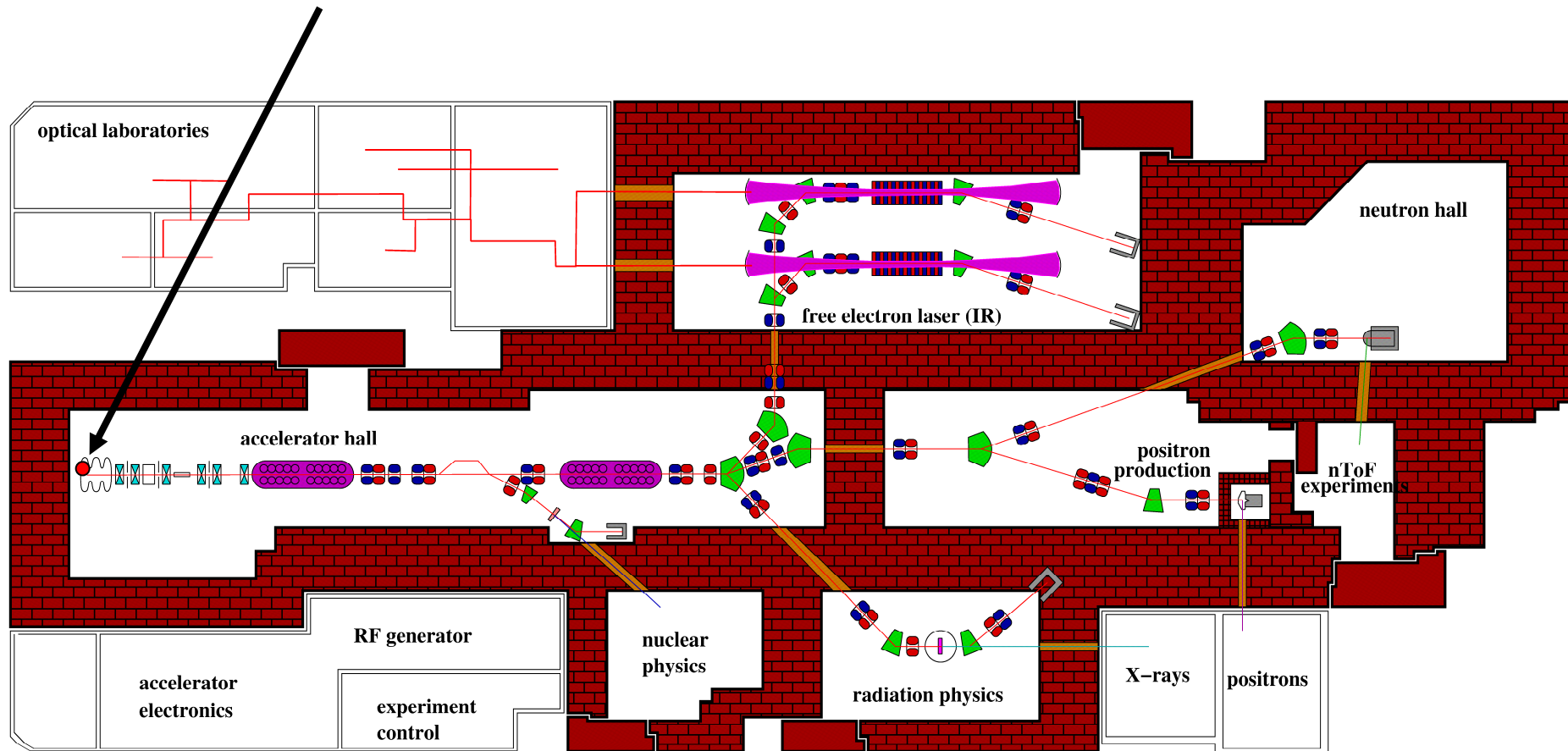
nELBE – photoneutron source



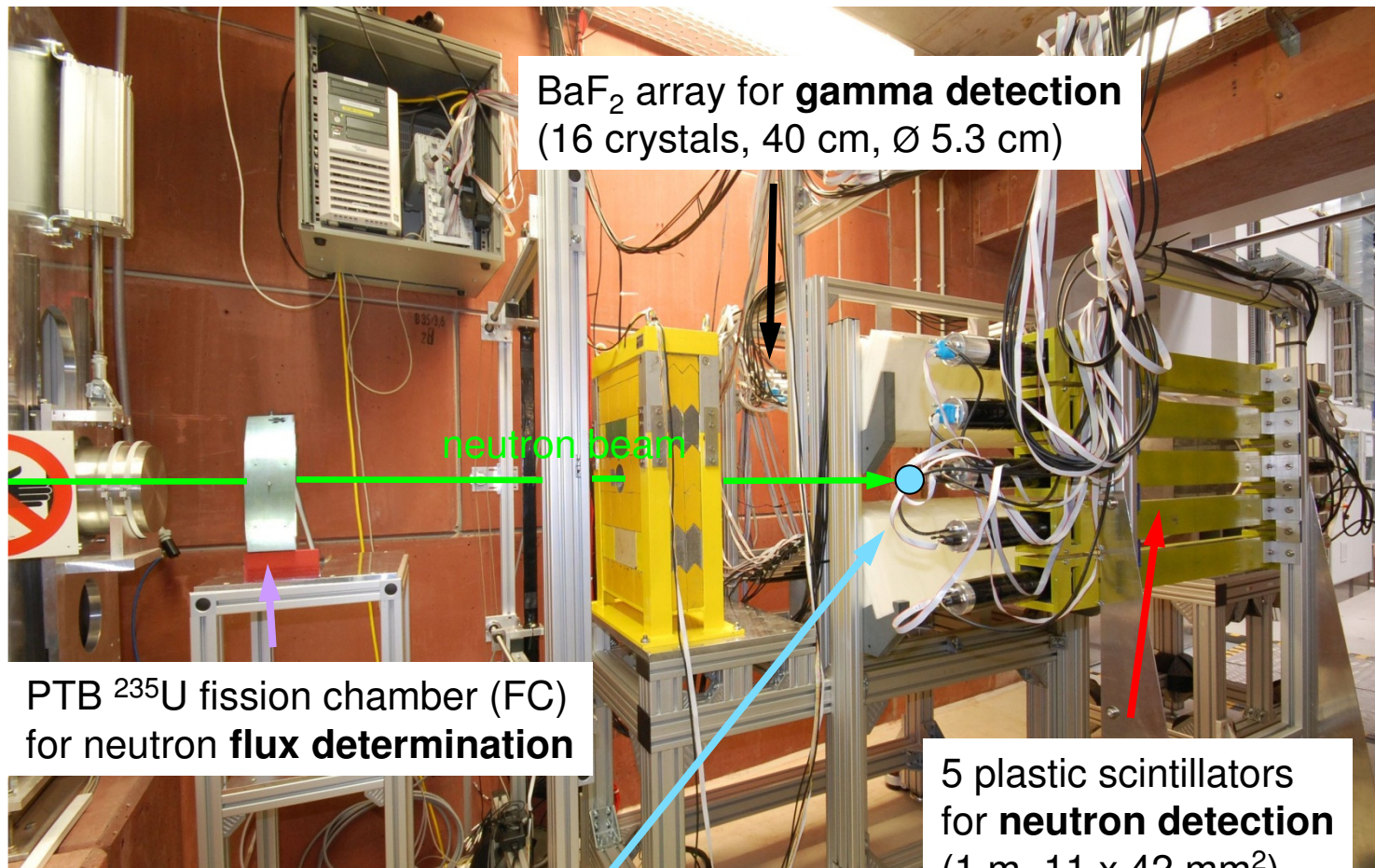


Messung inelastischer Neutronen- Streuung an nELBE von Dipl. Phys. Roland Beyer

Ein Elektron wird beschleunigt ...



nELBE – double ToF (n,n' γ) experiment



BaF₂ array for **gamma detection**
(16 crystals, 40 cm, \varnothing 5.3 cm)

flight paths:

source - FC:

400 cm

source - sample:

600 cm

sample - BaF₂:

30 cm

sample - plastics:

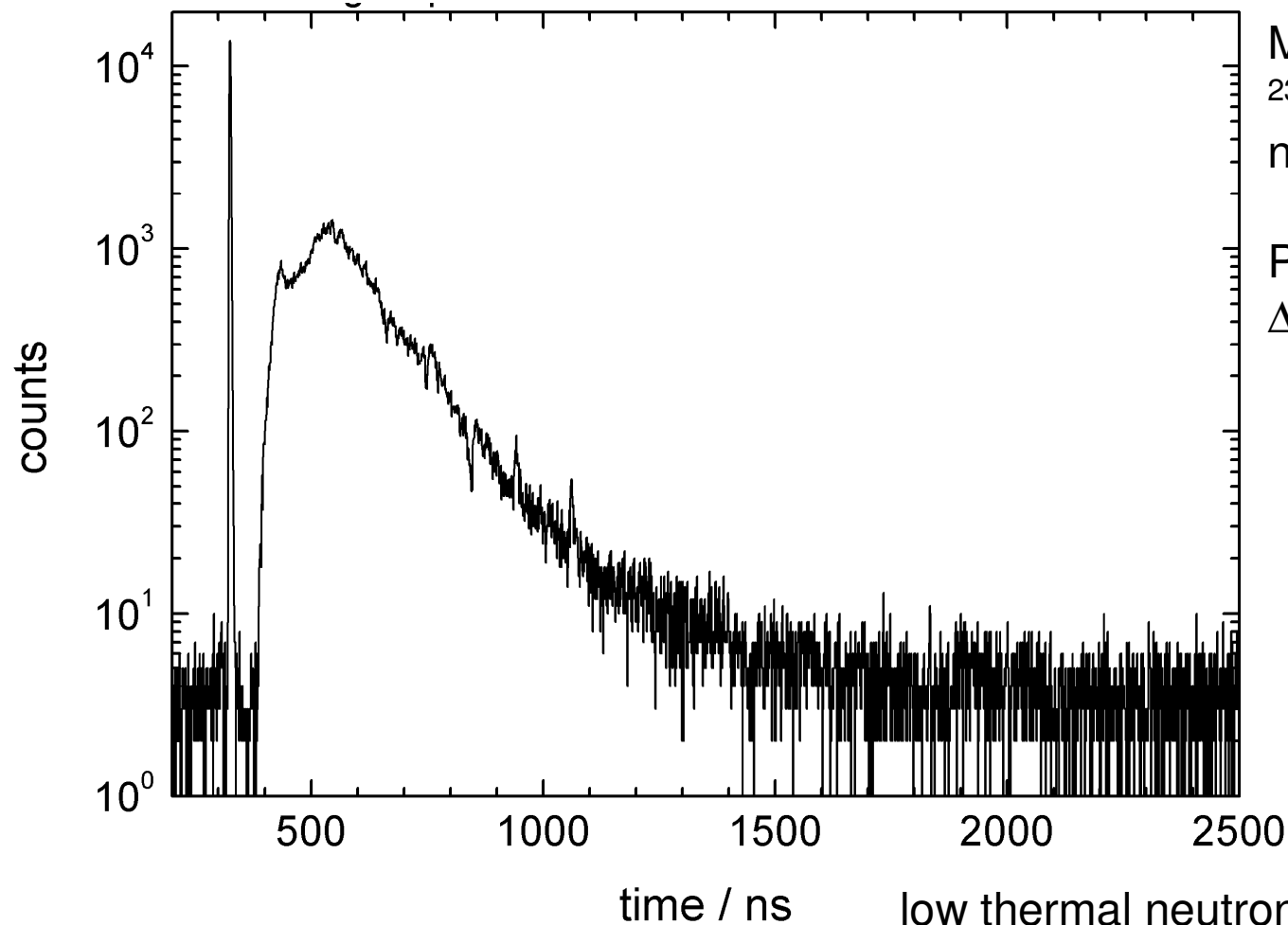
100 cm

PTB ^{235}U fission chamber (FC)
for neutron **flux determination**

5 plastic scintillators
for **neutron detection**
(1 m, 11 x 42 mm²)

sample: $^{\text{nat}}\text{Fe}$ (99.8%) 91.754% ^{56}Fe
mass: 19.82 g 18.15 g ^{56}Fe

Neutron time of flight spectrum with fission chamber



Measured with PTB
 ^{235}U fission chamber
 $n_t = 5 \text{ mg/cm}^2$

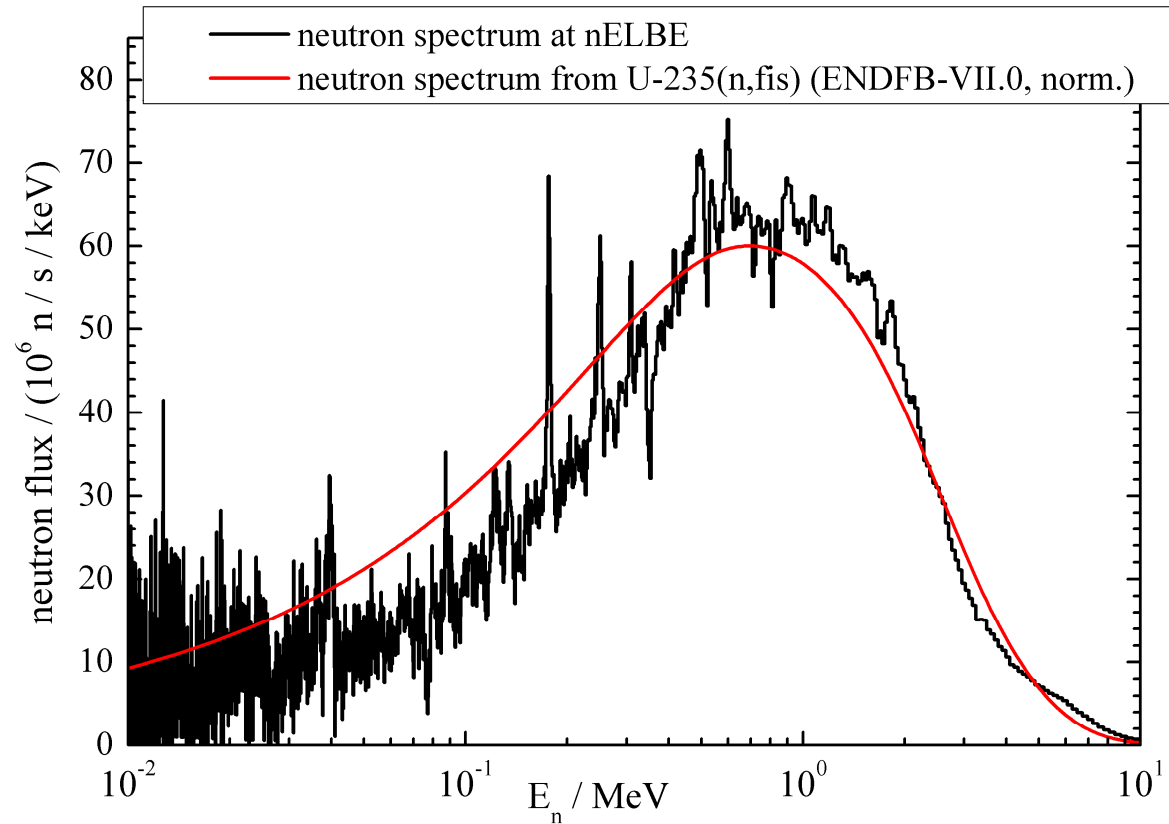
Photofission:
 $\Delta t(\text{FWHM}) = 4 \text{ ns}$

low thermal neutron background

$$J_{\text{Cd}}/J < 8 \cdot 10^{-5}$$

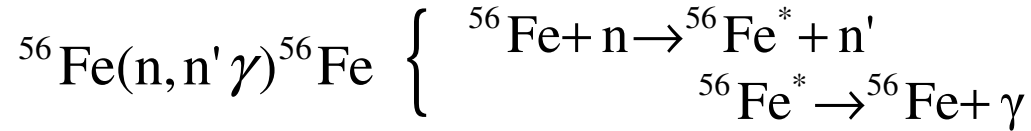
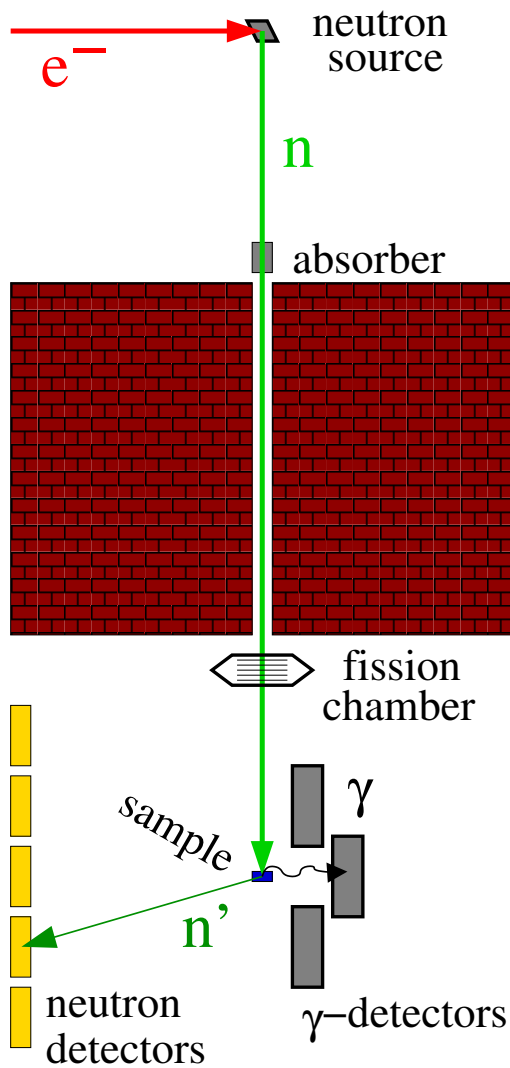
from comparison with/without Cd absorber

Neutron flux measured by fission chamber

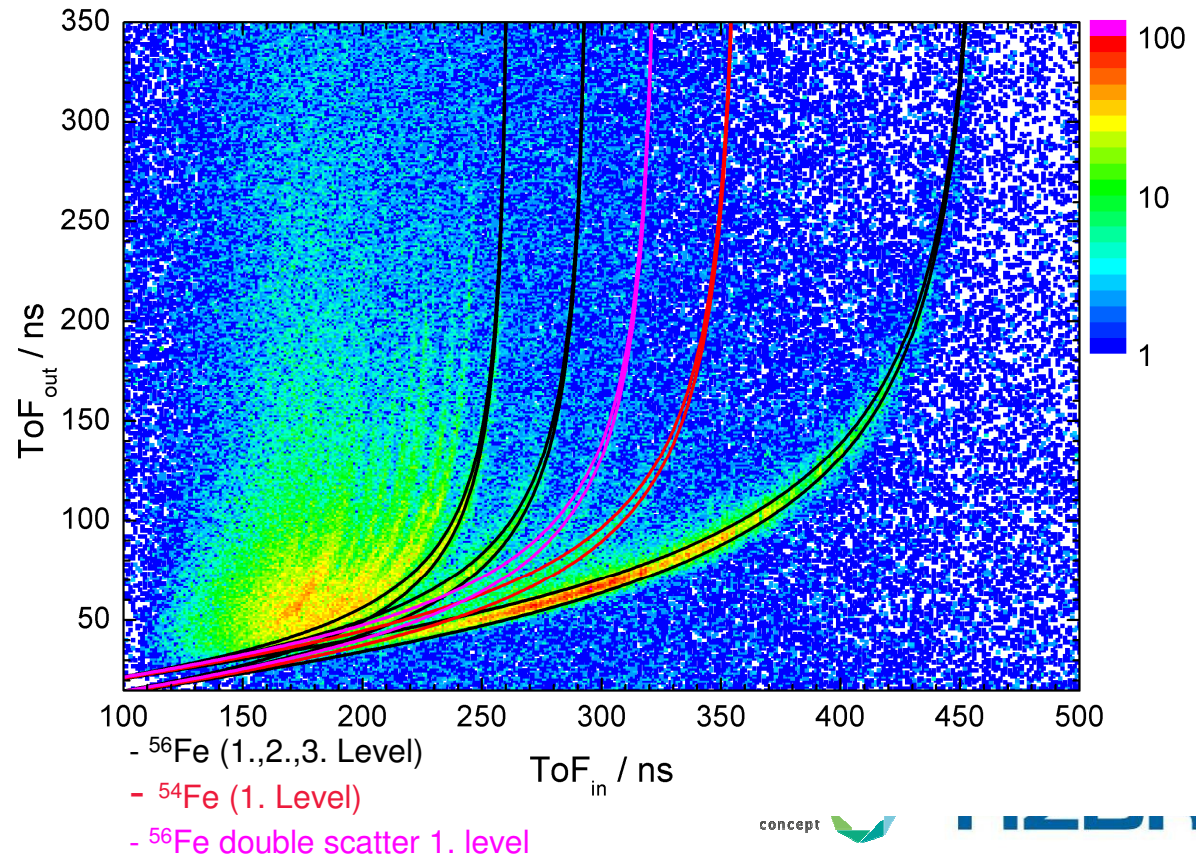


Integral at target: 2×10^4 n/s/cm²

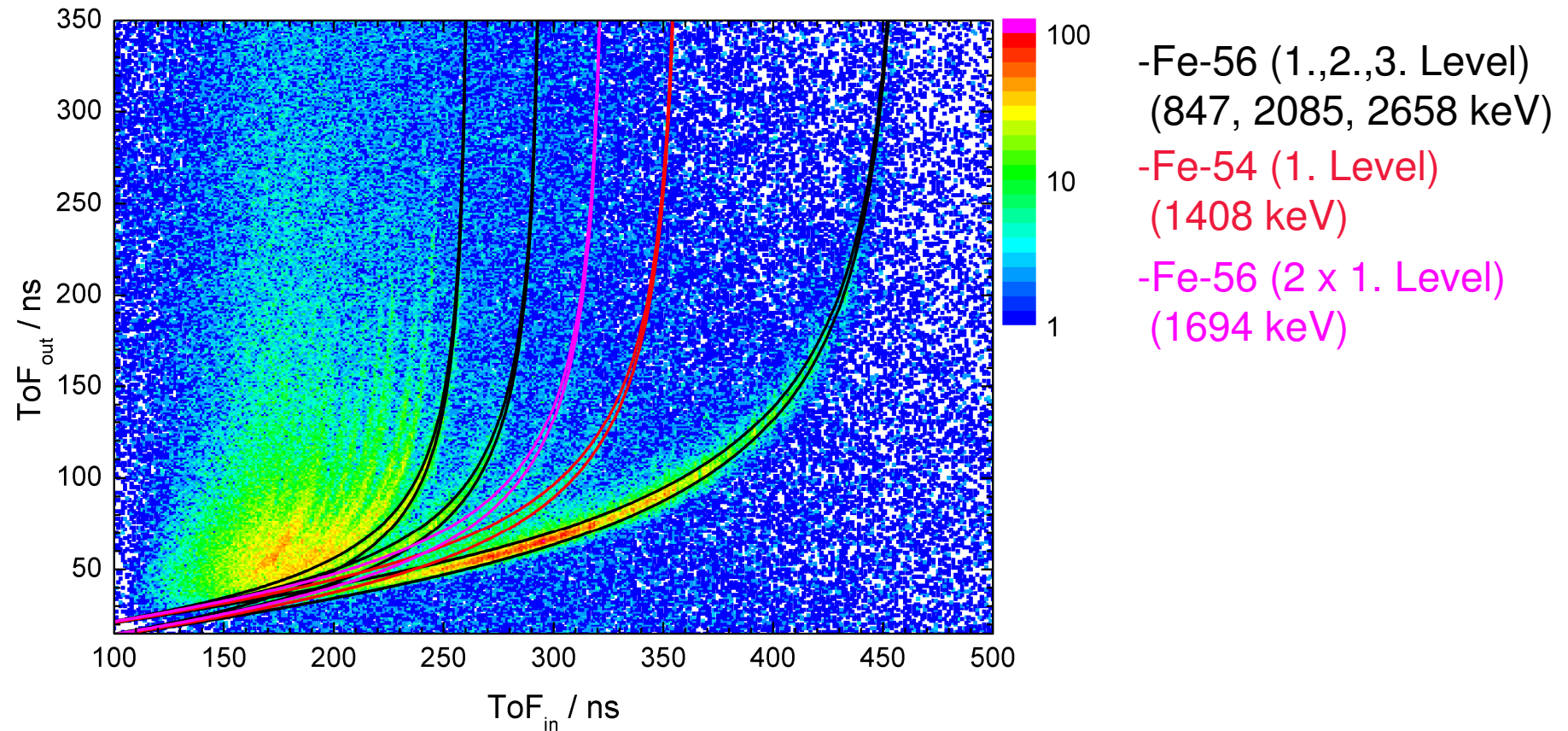
Experimental methods and results – Inelastic scattering



with sample (78 h live time)

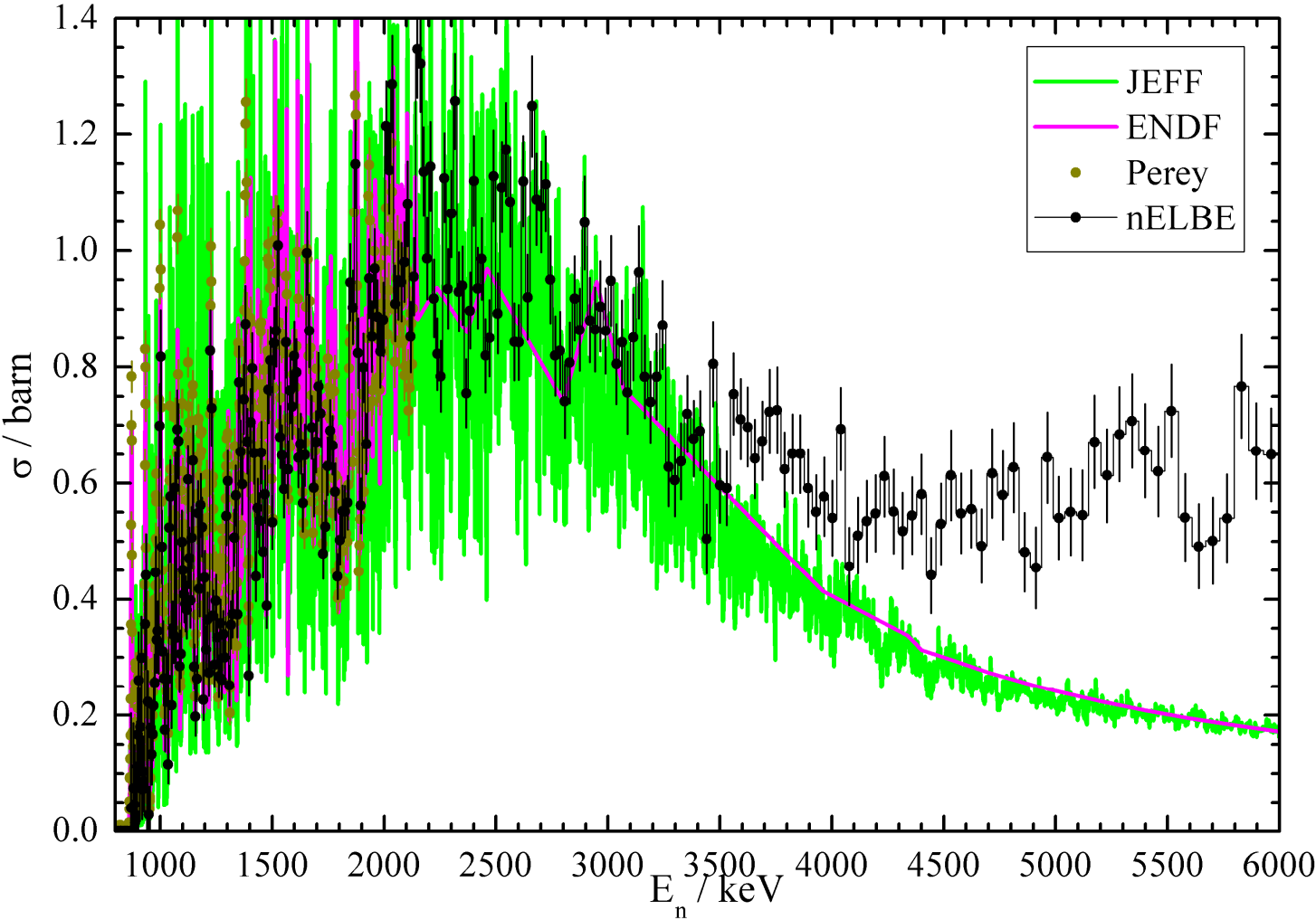


Kinematic calculations





The $^{56}\text{Fe}(n,n'\gamma)$ cross section for the 1st excited state

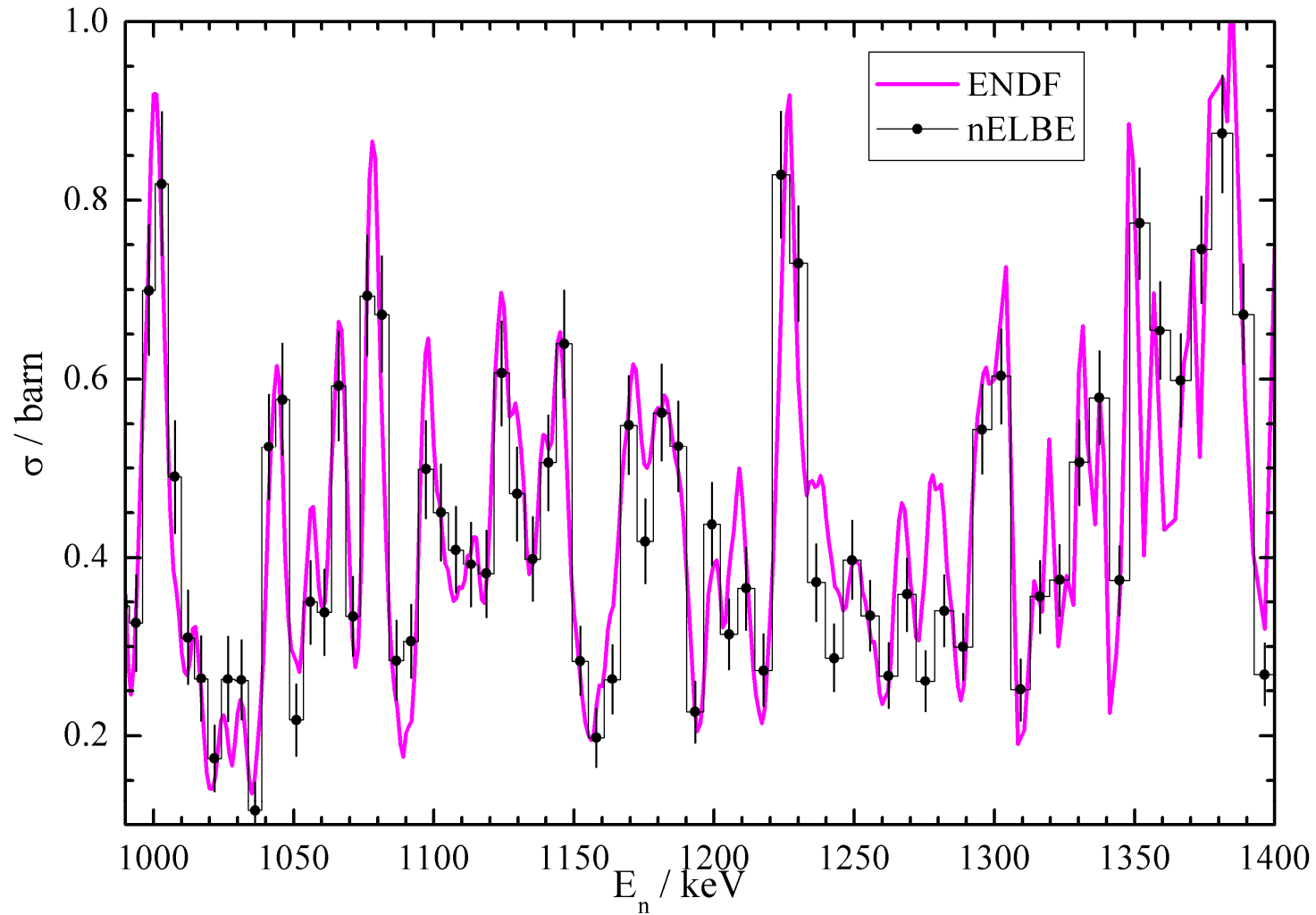


Preliminary data: (exp. Background above 4000 keV)

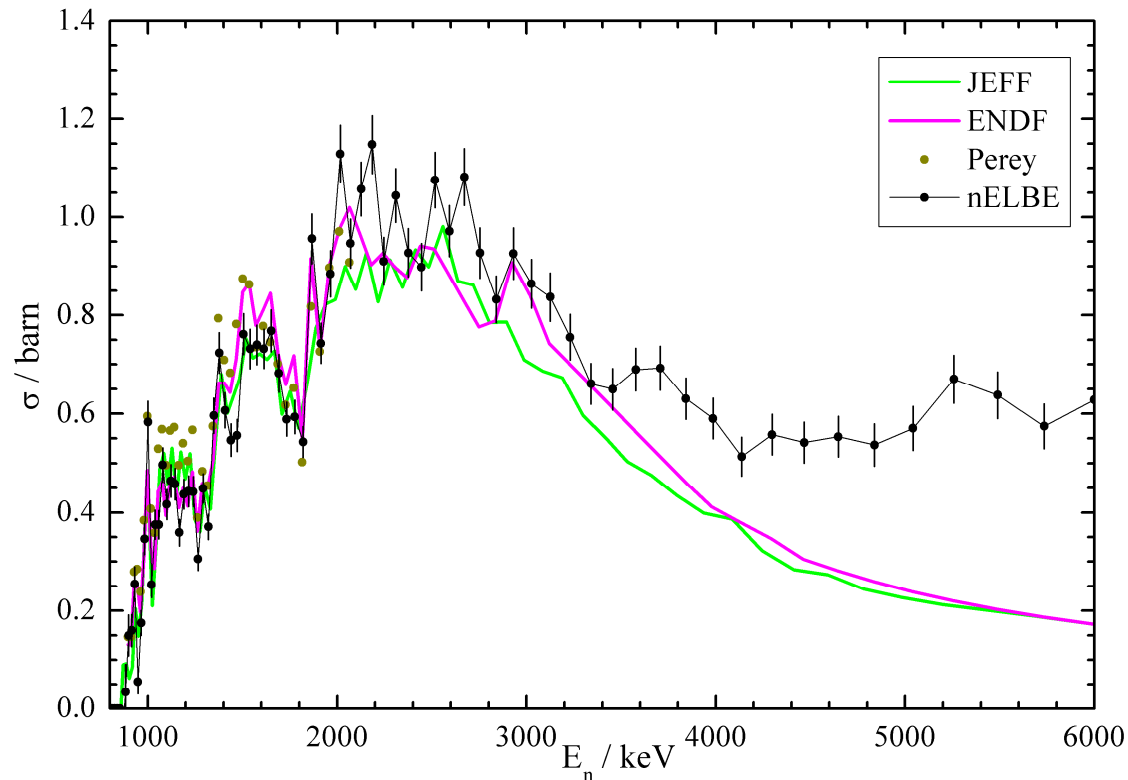




The $^{56}\text{Fe}(n,n'\gamma)$ cross section for the 1st excited state



The $^{56}\text{Fe}(n,n'\gamma)$ cross section for the 1st excited state



Corrections included

- § Fission chamber efficiency
- § Fission chamber random background
- § Loss due to ADC range
- § Flux attenuation in fission chamber
- § Flux attenuation in air
- § Flux attenuation in target
- § Beam diameter at target position
- § Target diameter
- § Gamma absorption in target

- § 2D-ToF background
- § BaF2 efficiency
- § plastic efficiency



Transmutationsrelevante kernphysikalische Untersuchungen
Einsatz moderner technologischer langlebiger Aktinide
und numerischer Methoden



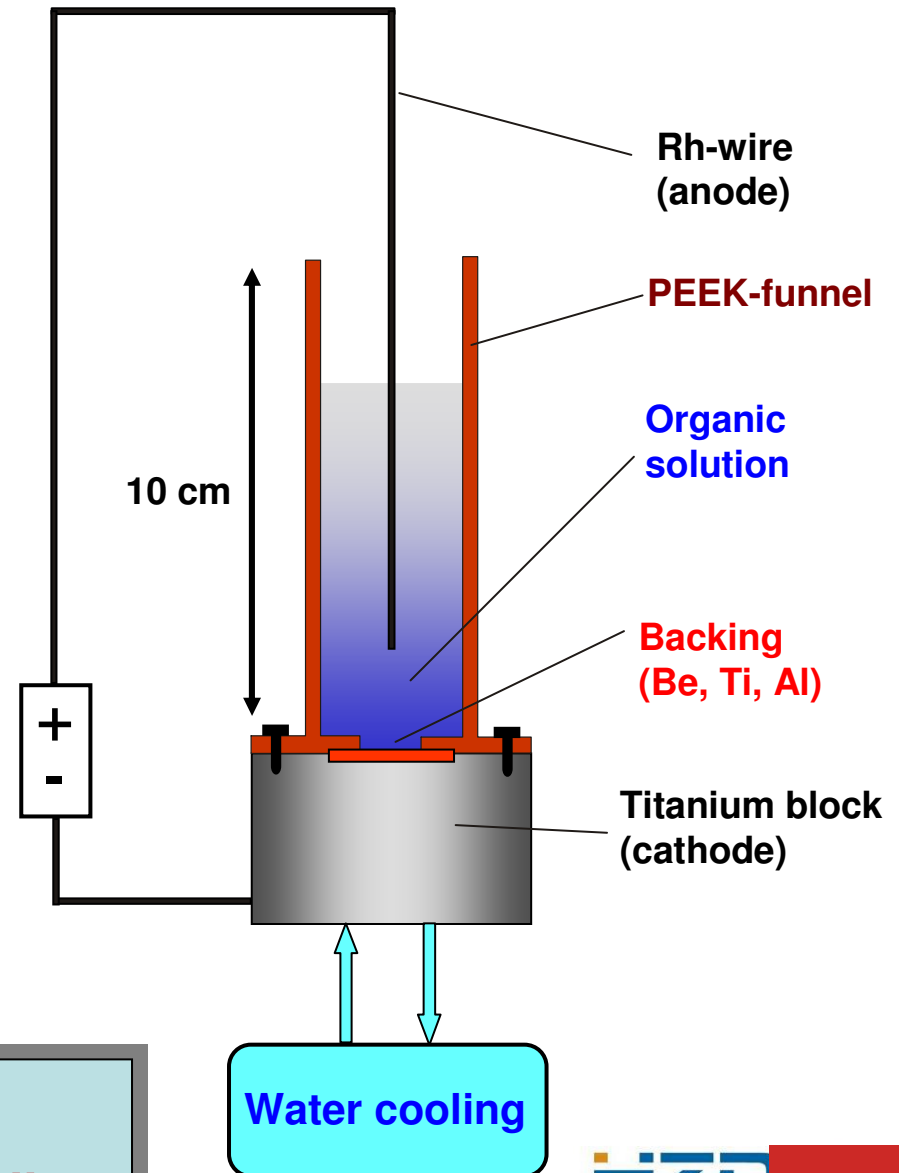
Verbundprojekt zum Kompetenzerhalt in der nuklearen Sicherheits- und Strahlenforschung:

- Produktion und Nutzung schneller Neutronen zur Untersuchung inelastischer Neutronenstreuung und Spaltung minorer Aktinide
- MeV Gamma-Spektroskopie und Entwicklung hochauflösender Detektoren (Compton-Kamera)
- Herstellung und Nutzung dünner Aktiniden Targets
- Veranstaltung von Graduierten-Seminaren:
Universität zu Köln:
"Radiochemie der Aktiniden" 21-24. Mai 2012



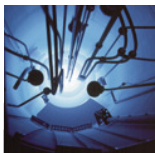
Electrochemical deposition - Molecular Plating (MP)

- Deposition from organic media as a molecule (nitrate \Rightarrow oxide)
- Solvent: isopropanol or isobutanol
- Deposition time: 0.5 h – 14 h
- Current density: mA/cm²
- Voltage: 100 V - 1200 V
- Chemical purification prior to deposition possible
- Recovery and chemical purification of used target material (²⁴⁸Cm: >150.000 \$/mg)
- Small and simple set-up
- Components easy to replace in order to avoid cross-contamination



Deposition yield: up to 90%

Target thickness: mg/cm² possible



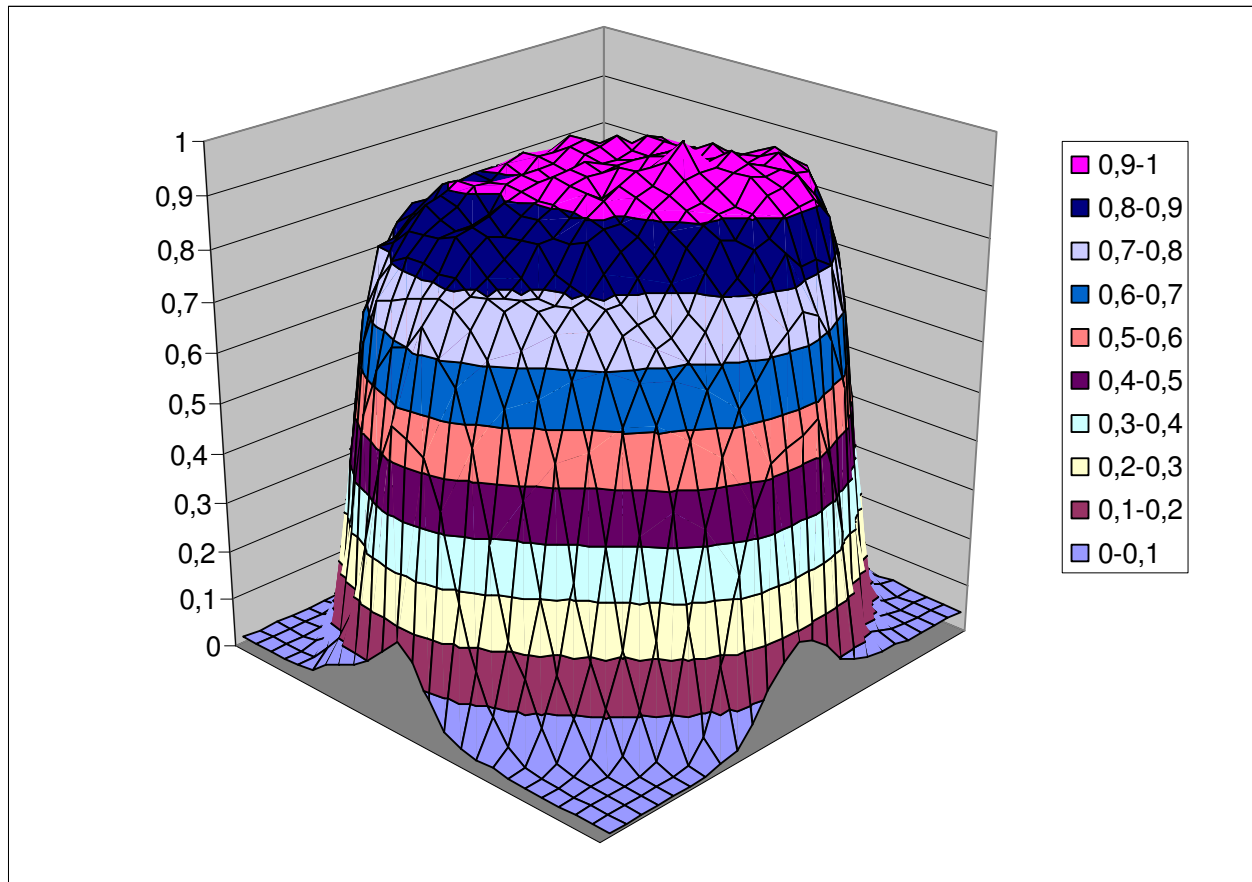
concept

HZD

Mitglied der Helmholtz-Ge

JG|U

Radiographic Image of a ^{nat}U sample



Backing:
polished Ti 250 μm

Surface area:
43 cm^2

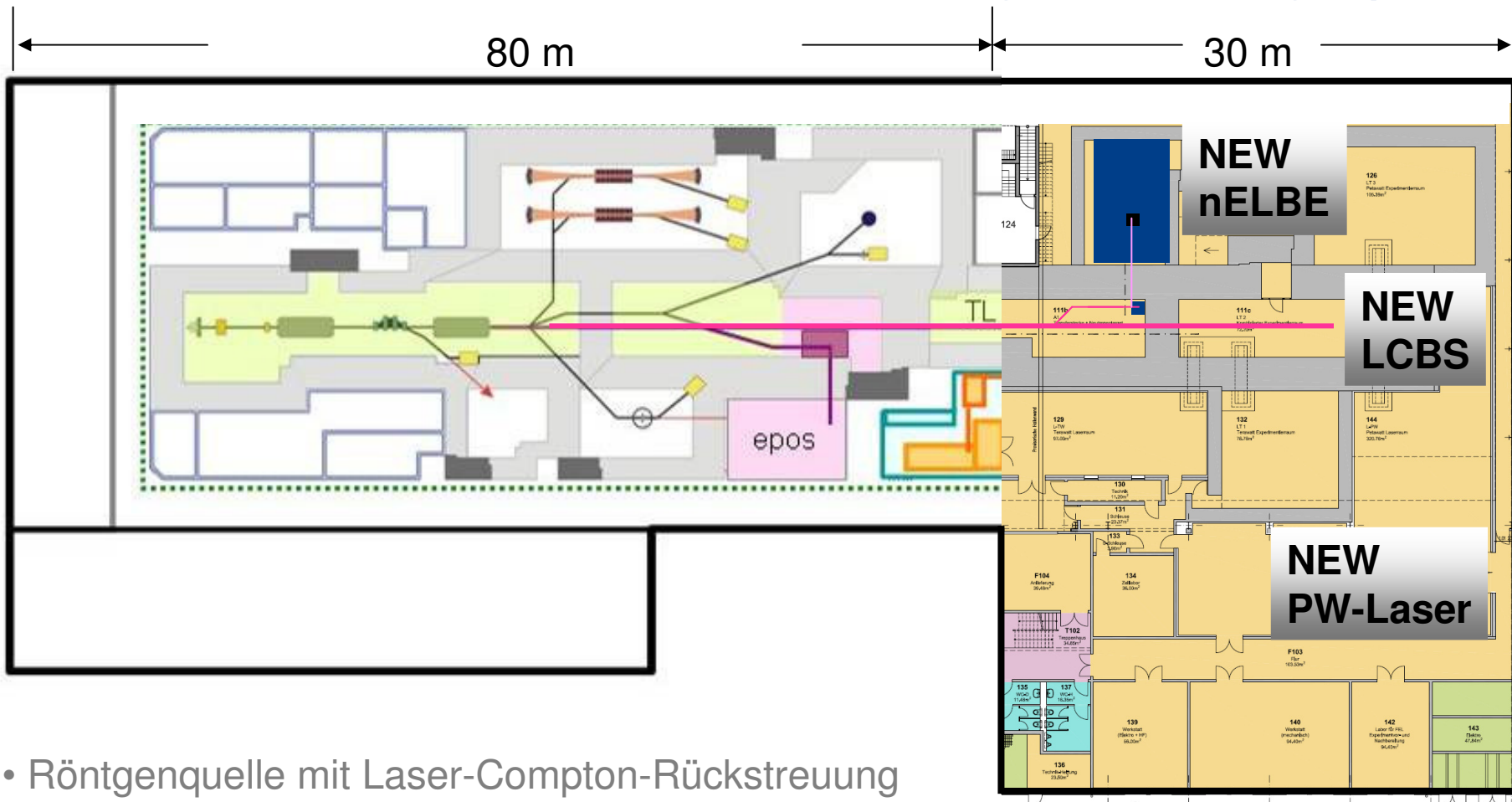
Areal density
132 \pm 13 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$

from Neutron activation
analysis $^{238}\text{U}(n,\gamma)^{239}\text{U}$
before and after deposition

Also usage of Ti coated Si-wafers to reduce surface roughness: Nd deposits

Courtesy: A. Vascon, K. Eberhardt, Johannes-Gutenberg Universität Mainz

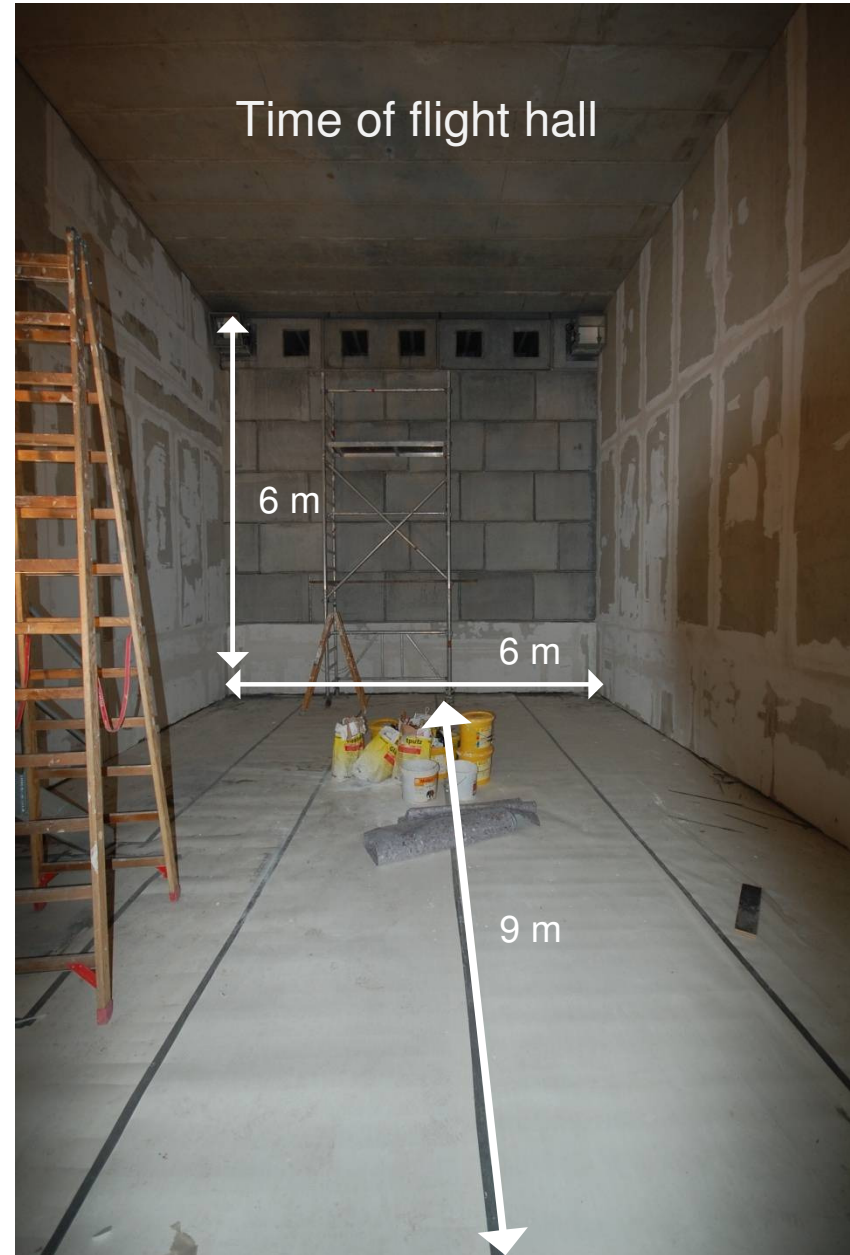
Nationales Zentrum für Hochleistungsstrahlungsquellen



- Röntgenquelle mit Laser-Compton-Rückstreuung
- Peta-Watt Hochleistungslaser zur Ionenbeschleunigung
- Neue Neutronenflugzeitanlage zur Transmutation

Baubeginn: April 2010

The new nELBE neutron time of flight facility



A. Schavan, Federal Minister for Education and Research
Neue Osnabrücker Zeitung 18.06.2011

Bund stockt bei Atomforschung auf

Schavan: 45 Millionen Euro im Jahr 2012

ten **OSNABRÜCK.** Die Bundesregierung wird die Mittel für Atomforschung trotz des Ausstiegs aus der Kernkraft noch steigern. In einem Interview mit unserer Zeitung erklärte Forschungsministerin Annette Schavan (CDU), derzeit würden Forschungseinrichtungen pro Jahr mit 32 Millionen Euro gefördert. Diese Summe steige im nächsten Jahr auf 35 Millionen Euro. Dazu kämen 10 Millionen Euro, die direkt in Forschungsprojekte fließen. „Atomforschung bleibt wich-

tig“, betonte die Ministerin. „Hochinteressant“ nannte sie das Verfahren der Transmutation, das radioaktive Stoffe wie Plutonium oder andere Langzeitstrahler entschärfe. Dies sei ein zentraler Ansatz, die Entsorgungsfrage zu lösen. „Ich warne aber vor vorschnellen Prognosen, wonach Atommüll in 20 Jahren nicht mehr strahlen wird“, sagte Schavan. Seite 4

„Transmutation is highly interesting, ... a central Ansatz for solving the question of final storage“

Ergebnisse und Ausblick

- Schnelle Neutronen sind der entscheidende Faktor für die Transmutation langlebiger minorer Aktinide in kurzlebige Spaltprodukte.
- Die Endlagerproblematik wird durch Partitionierung und Transmutation auf historische Zeiträume reduziert (< 1000 Jahre)
- Mit der Anlage MYRRHA in Belgien soll ein experimentelles ADS System aufgebaut werden.
- 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



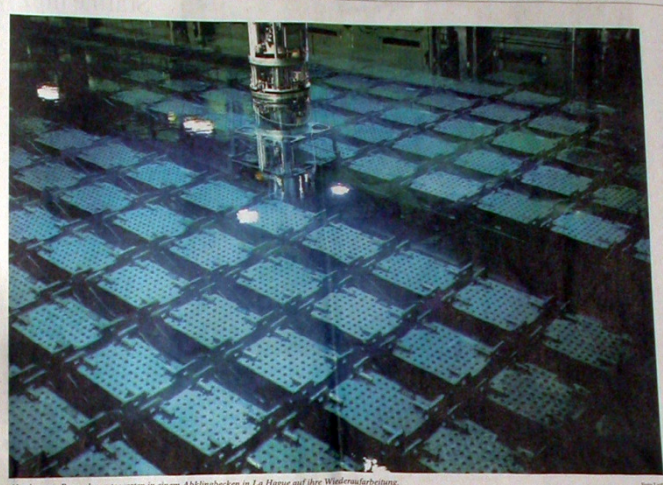
Projekt Nukleare Transmutation

- 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



Abgebrannte Brennstoffe warten in einem Abblühbecken in La Hague auf ihre Weiterverarbeitung.

Die zauberhafte Entschärfung des Atommülls

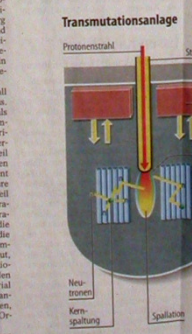
Es klingt wie Alchemie für die Kerntechnik: Der Zerfall von Plutonium und anderem hochradioaktivem Abfall wird mittels Neutronen radikal beschleunigt. Die Kernumwandlung ist reif für den großen Test.

Von Monika Etspüler

Wenn der Ausstieg aus der Kernenergie auch beschlossene Sache ist, werden die Kerntechnik und die damit verbundene Forschung über das Jahr 2022 fortbestehen. Das hat zumindest Bundesforschungsministerin Annette Schavan signalisiert. Sie plant ein Netzwerk mit Experten aus Wissenschaft und Politik, die unter anderem nach Lösungen für den Rückbau der Kernkraftwerke und für die Endlagerung radioaktiver Abfälle suchen. Denn eines ist klar: die Rückbau-Atomaktivitäten werden weiterstrahlen, und auf die Frage, wohin damit, gibt es bis heute keine befriedigende Antwort. Weitest wächst der Berg abgebrannter Brennstäbe um rund 260.000 Tonnen pro Jahr – Tendenz steigend. Knapp sechszehntausend Tonnen liegen hierzulande in Abblühbecken und in Zwischenlagern und halten eine ungewisse Zukunft.

Die Hauptgefahr beim abgebrannten Abfall geht von den langlebigen Aktiniden aus. Dazu gehören Elemente, die schwerer als Uran sind. Bei der Kernspaltung in Atomkraftwerken entstehen Plutonium, Americium, Curium und Neptunium als unerwünschte Nebenprodukte. Deren Anteil beträgt in den abgebrannten Brennstäben zwar nur ein Prozent, wovon 90 Prozent Plutonium sind. Die Aktinide und ihre Zerfallsprodukte senden aber zum Teil über mehrere 100.000 Jahre ihre hochradioaktive Strahlung aus. Werden die radioaktiven Stoffe freigesetzt und über die Atmosphäre, das Grundwasser oder die Nahrungskette von Lebewesen aufgenommen und in den Organismus eingeatmet, ist das umliegende Gewebe einem radioaktiven Dauerbeschuss ausgesetzt. Zellen werden zerstört und genetisches Material verändert. Dabei können Krebskrankungen entstehen, von denen Knochen, Nieren, Leber und die blutbildenden Organe besonders betroffen sind.

Die Idee, die Langzeitrisiko auf einen zeitlich überschaubaren Rahmen zurückzuführen, ist verlockend und klingt wie ein Lehrsatz moderner Alchemie. Damit aus langlebigen Radionukliden kurzlebige oder sogar stabile Isotope werden können, müssen die Aktinide zunächst durch Neutronen aus den abgebrannten Kernresten (Partitionierung) getrennt und dann durch sogenannte Transmutation in weniger gefährliche Atomkerne umgewandelt werden. Wenn das großtechnisch gelänge, könnte sich der Raumbedarf für die Endlager um den Faktor Drei bis Sechs verringern und der Zeitraum



tionen zerfällt. Schlussendlich bilden sich neue Produkte mit kürzerer Halbwertszeit und unter Umständen sogar stabile Elemente. Nimmt beispielsweise das Isotop Plutonium-239, das eine Halbwertszeit von rund 24.000 Jahren besitzt, ein Neutron auf, entstehen als Spaltprodukte Curium-244 mit einer Halbwertszeit von nur noch zwei Jahren und das stabile Isotop Neptunium-104.

Dem italienischen Nobelpreisträger Carlo Rubbia war es bereits in den achtziger Jahren gelungen, in einem Reaktor eine geringe Menge an Plutonium umzuwandeln. Doch technisch betrachtet, gestaltet sich dieser Prozess bis heute äußerst komplex. Zunächst werden Protonen in einem Teilchenbeschleuniger auf hohe Energien gebracht und auf ein flüssiges Gemisch aus Blei und Wismut geschossen. Wenn die energiereichen Teilchen in das Metall eindringen, setzen sie schnelle Neutronen frei. deren Zahl je abhängig von der Leistung. Damit werden die Aktinide, die man zuvor zu Pellets verarbeitet und in sogenannte Transmutationselemente eingeatmet hat, bombardiert und zu Kernreaktionen angeht.

Anderer als bei einem Kernreaktor arbeitet eine Transmutationanlage im unterkritischen Bereich. Das bedeutet auch, dass die Kernreaktion endet, sobald der Prozess

Bewegte Betten

Hochladen ist eine Wissenschaft für sich, und das weiß eine weitläufige Schicht, schließt ein. Gerners, sehen Markt – erneuerte Lärk eines Worts, des Schriftstellers Adam Mansbach, der auf der Bettseite übertrug, bis die kleine Tochter endlich einschläft. Schon die Vorherstellungen in den das Bilderbuch, in die Top Ten der bei Amazon meistverkauften Bücher erschienen. Das deutet darauf hin, dass eine nicht unbedeutende Teil der Generation beim Einschlafen macht wie terrenum im Internet sind jedenfalls mit den Applikationen über Kleinkinder, die nur auf dem Arm einschlafen, nur in einer Wiege, nur im fahrenden Kinderwagen oder sogar nur auf der Autobahn. Laut immer geht es in den Bereichen darum, das Kind in Bewegung zu halten – ein Kind für die Eltern, für zwischen schlafen viele auf an der Größe auf der Größe schlafen, auf der Gerderhagenmatratzen und Tragelichter, die teilweise Babywägen ist wieder ein wenig. Ein Kunde der User-orientiert Geiz zeigt jetzt erstmals, dass die „bewegte Bett“ den muschelbunten Gehörn tatsächlich hilft, in dem Schlaf loszukommen und was man machen Männer eine Dreiviertelstunde lang Mühseligkeiten haben in einer Experiment-Hilfsmatte, die in unregelmäßigen Schwingungen verztzt werden oder aber in einem Standard verlore konnte. Leichtes Schmelzen habe das geführt, dass stützliche Proben schneller vom Schlaf übermannt wo den die im Standard, schliefen die Forscher in „Current Biology“. Auf dem ließ sich die erste, Dache Sedo phas durch die Bewegung verlieren so dass die zweite, tiefere Phase läng dauerte. Während des Versuchs wie die Gehirnaktivität der Proben gemessen. Das Schmelzen veränderte die nach langsam Schwingungen im El trowingschlagern und erzeugt Dordem eine als „Schlafwechsel“ kammer Wellenmuster. Beide zuzum kennzeichnen eine neuartige Vitalität, die charakteristisch ist für ein Schlaf. Die Proben gaben sie wogend an, dass ihnen der Schlaf modus angenehm war als der modus. Die Gender-Schlichter jetzt im Oligothermestimmung. Sie ten klären, die Schlaf- und speizieren für die Therapie von störungen bei. Proben wies byzische haben das Potential für Bewusstseinsänderungen bieten inzwischen nicht nur den fährungen der traditionellen wachen liegt auch eine ein Schläferfunktion.

Ärztin unterliefen 1821 fatale Fehler

Insgesamt 755 Anträge zu ungeliebtem haben die Österrischen in Wien und in den Arztkammern im Jahr 2008 beantragt. Die meisten ungeliebter Statistik der Arztkammer hervor. Die meisten ungeliebter Statistik der Arztkammer hervor.

Heute

Spinne mit Taucherg
Das Revier der Silberspinne Wasser. Eine Lauffläche, ein Gespinnst aus Seide angelegt hat, verortet die mit Saurestoff. Dieser wird dem Wasser entzogen.

Geheimer Chiffren 5
Die Briefe, die Doll Stier Ernst Jäger Anfang der Jahre zwischen Frankfurt wechselten, sind voller die Zeitlage, und Stalin die Modell des „Oberster

Es gibt doch Tische
Der Reichtumsbericht 2011 zeigt, dass die mit den Tischen aufwärts, war ein Präzision und der Inger jetzt wird in historisch bekommt eine Ausstellung

Transmutation in the media

Frankfurter Allgemeine Zeitung
June 22, 2011

<http://www.faz.net/aktuell/wissen/physik-chemie/transmutation-die-zauberhafte-entschaerfung-des-atommülls-1655406.html>

Im Forschungszentrum Dresden-Rossendorf experimentieren Arnd Junghans und seine Mitarbeiter mit schnellen Neutronen, die beim Beschuss von Blei mit energiereicheren Elektronen entstehen. Man ermittelt die Flugzeit der Neutronen und errechnet daraus die Geschwindigkeit und die Energie der Teilchen. Beide Größen bestimmen, wie hoch der Wirkungsgrad bei der Transmutation von Atomkernen ist.



Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft