

# **Zur Lösung des Problems radioaktiver Abfälle mit kernphysikalischen Methoden**

*Karl-Heinz Schmidt, GSI*

- 1. Prinzipien der Kernenergienutzung**
- 2. Das Abfallproblem**
- 3. Ein technischer Vorschlag zur Transmutation**
- 4. Die Grundlagenforschung bei der GSI**

# **1. Prinzipien der Kernenergienutzung**

Energiegewinnung aus der Kern-Bindungsenergie

Spaltbare und brütbare Kerne, Anreicherung

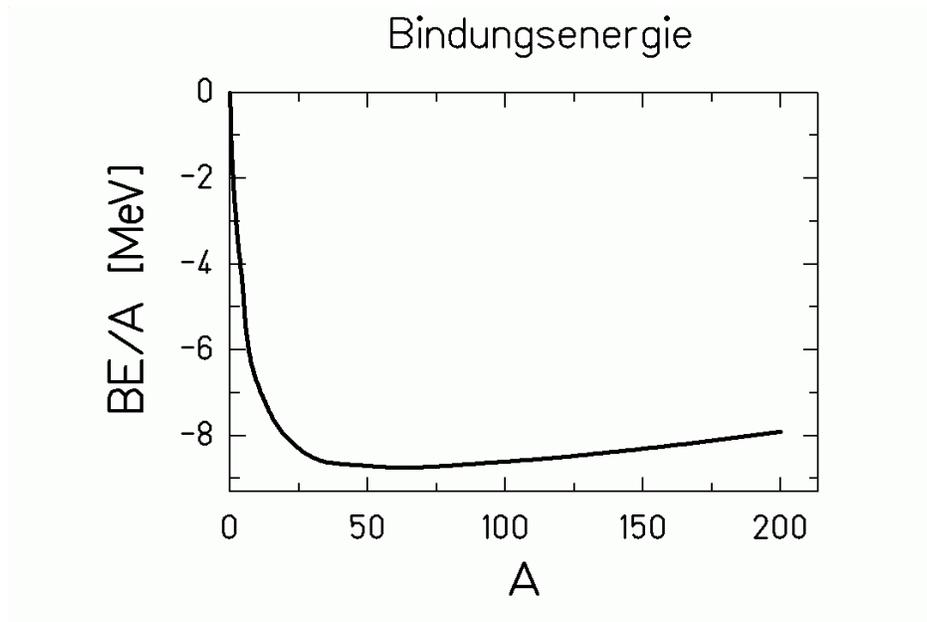
Kritikalität

Verzögerte Neutronen, Steuerung, Vergiftung

Der Brennstoff-"Kreislauf", Wiederaufbereitung

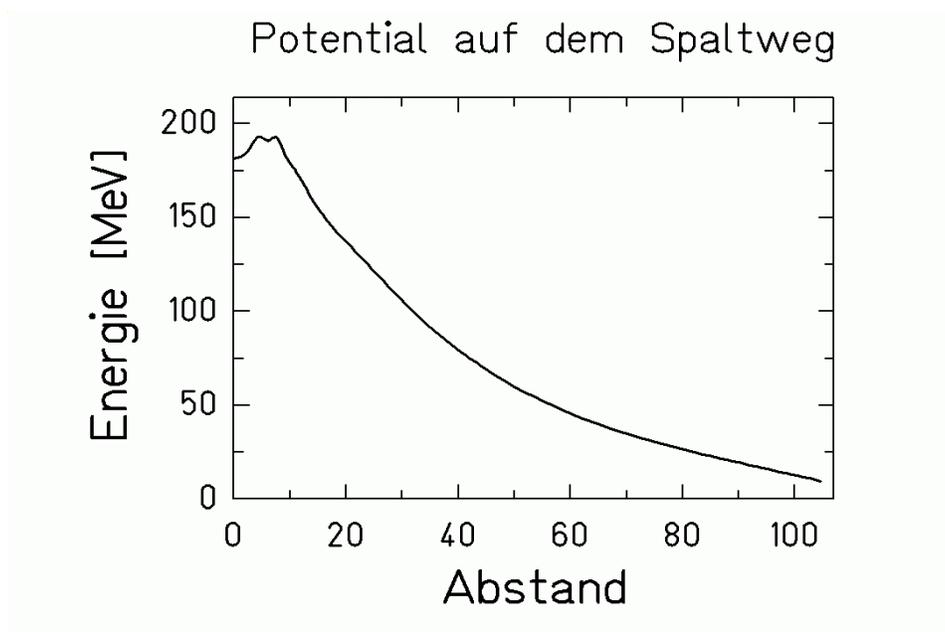
Die Brennstoff-Vorräte

## Energiegewinn bei der Spaltung



Bei der Spaltung schwerer Kerne gewinnt man  $\approx 200$  MeV.

## Die Spaltbarriere hält den Kern zusammen



Anregung über die Spaltbarriere führt zur Spaltung

## Natürlich vorkommende schwere Kerne

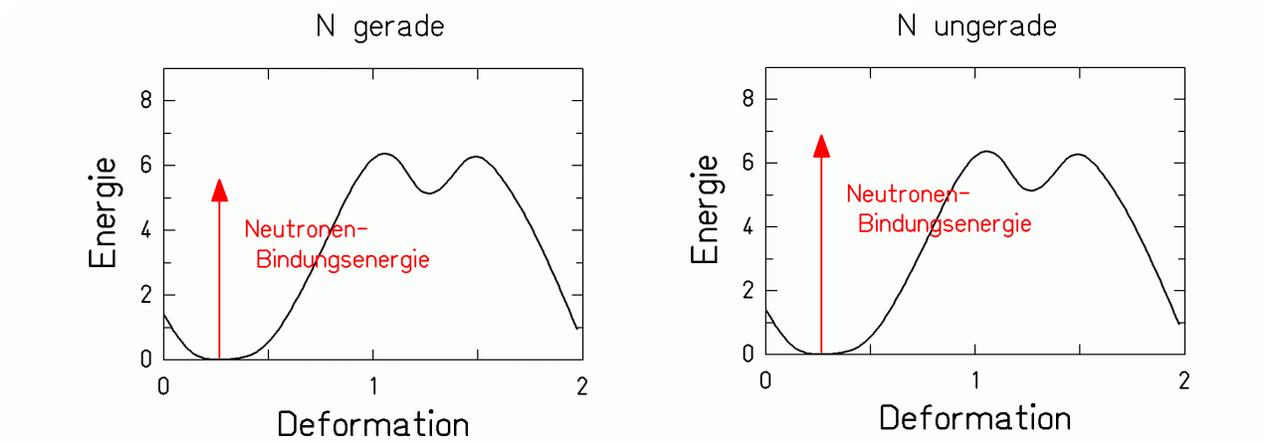
$^{232}\text{Th}$ :  $Z = 90$ ,  $N = 142$

$^{234}\text{U}$ :  $Z = 92$ ,  $N = 142$ , (0,0055%)

$^{235}\text{U}$ :  $Z = 92$ ,  $N = 143$ , (0,72%)

$^{238}\text{U}$ :  $Z = 92$ ,  $N = 146$ , (99,2745%)

## Spaltbarkeit durch thermische Neutronen

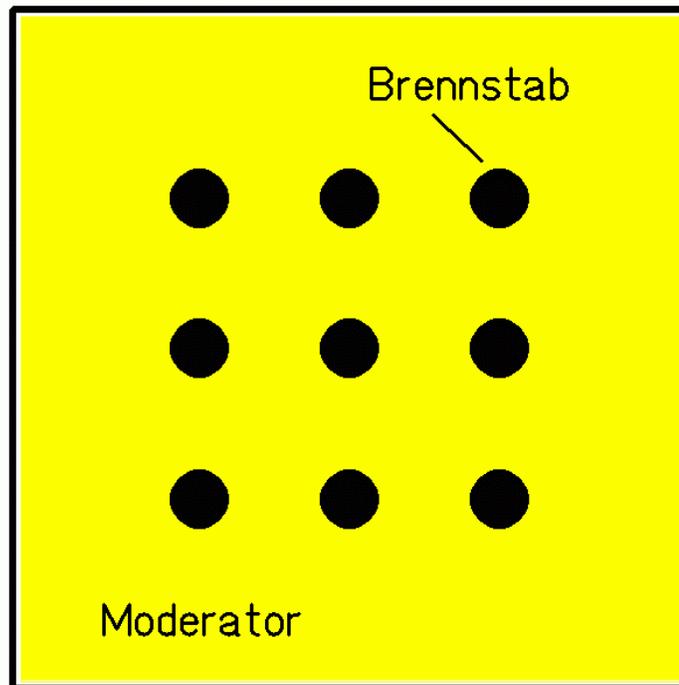


**Kerne mit ungerader Neutronenzahl sind durch thermische Neutronen spaltbar.**

**Kerne mit gerader Neutronenzahl sind durch thermische Neutronen brütbar. (Durch Neutroneneinfang bildet sich ein Kern mit ungerader Neutronenzahl.)**

**Einzigster natürlicher Kernbrennstoff für konventionelle Reaktoren ist  $^{235}\text{U}$ .**

# Kernreaktor



## Kontrollierte Kettenreaktion

"Brennstoff"  $^{235}\text{U}$  von 0,72% auf 3,5% angereichert

Spaltung  $\rightarrow$  2,2 bis 3 Neutronen  
davon führt genau 1 wieder zur Spaltung  
(Kritikalität = 1)

Verzögerte Neutronen machen den Reaktor steuerbar.

Steuerung mit Absorptionsstäben.

## **2. Das Abfallproblem**

### **Welche Abfälle?**

Spaltprodukte

Plutonium —  
gefährlicher Abfall oder Brennstoff?

Seltene Aktiniden

### **Der Zeitmaßstab**

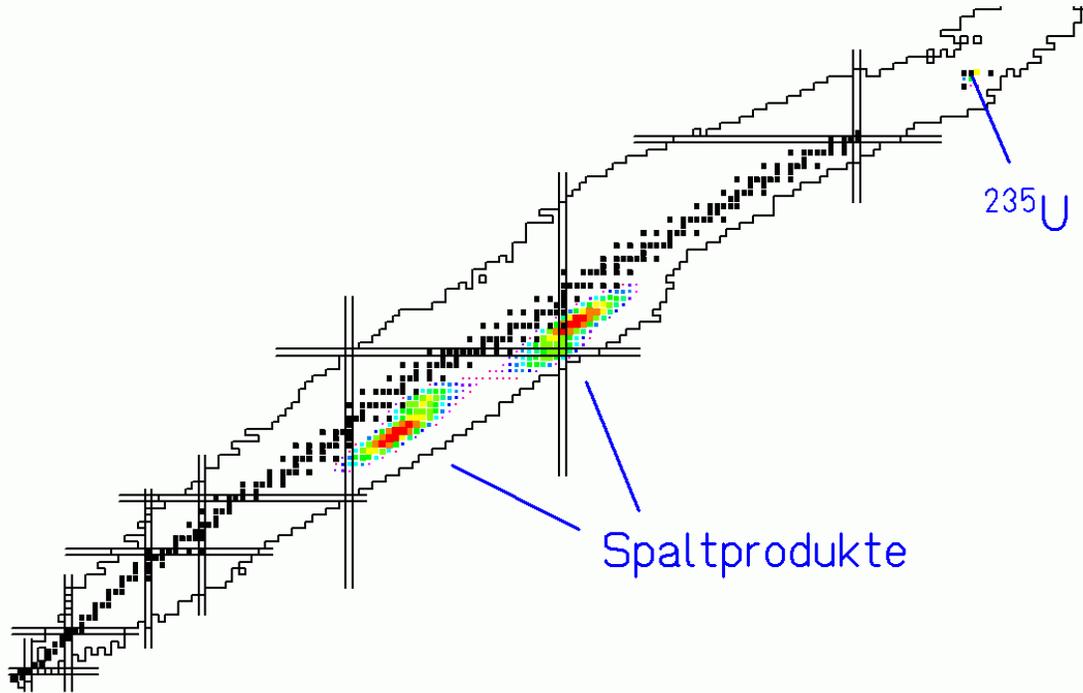
### **Mögliche Lösungsansätze**

Deponien — sicher?, akzeptiert?

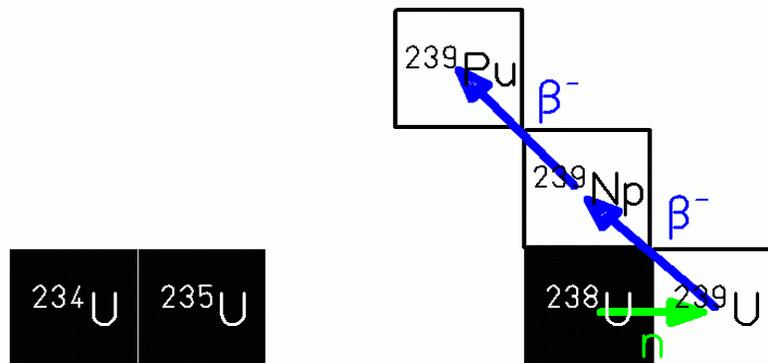
Transmutation durch Kernreaktionen —  
"Aufräumarbeit" in überschaubarer Zeit?

# Kernreaktionen im Reaktor

## Spaltung



## Brüten



## Bilanz der Reaktionsprodukte

- $^{235}\text{U}$ : Brennstoff (Vorräte für  $\approx 200$  Jahre)
- Spaltprodukte:

Isotop	Lebensdauer	900 MW, 1 Jahr
$^{79}\text{Se}$	70000 Jahre	0,1 kg
$^{93}\text{Zr}$	1,5 Millionen Jahre	15,5kg
$^{99}\text{Tc}$	210000 Jahre	17,7 kg
$^{107}\text{Pd}$	6,5 Millionen Jahre	4,4 kg
$^{126}\text{Sn}$	10000 Jahre	0,44 kg
$^{129}\text{I}$	15,7 Millionen Jahre	3,9 kg
$^{135}\text{Cs}$	2 Millionen Jahre	7,7 kg

- $^{239}\text{Pu}$ : Brennstoff oder gefährlicher Abfall?

Isotop	Lebensdauer	900 MW, 1 Jahr
$^{239}\text{Pu}$	24119 Jahre	123,1 kg

- Andere erbrütete Aktiniden:  
Viele nicht spaltbar mit thermischen Neutronen

**Bilanz: Nach etwa 1 Jahr ist der Brennstoff "verbraucht". Problem: erhöhter Neutroneneinfang → Vergiftung**

### **3. Ein technischer Vorschlag zur Transmutation**

Das Energieproblem der Transmutation

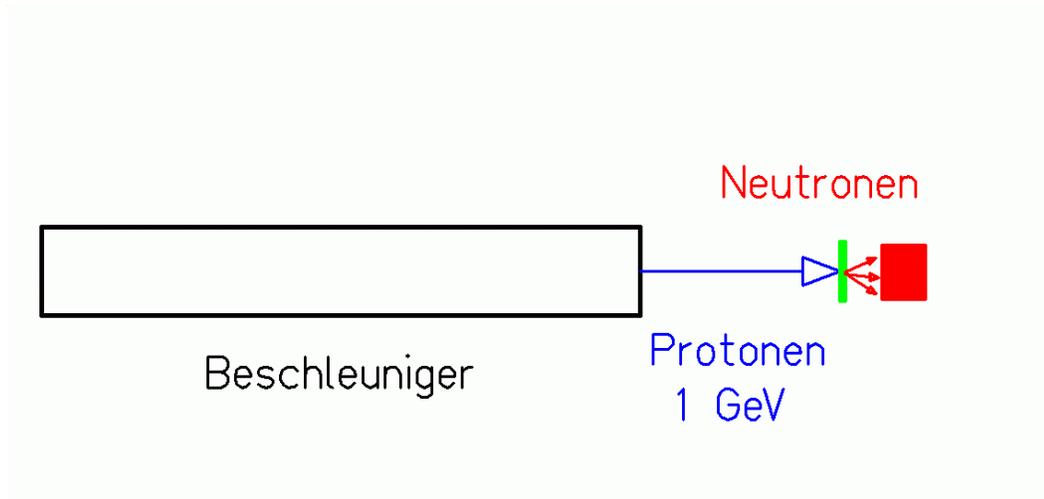
Neutronen aus der Spallation — der Hybridreaktor

Ein "sicherer" Reaktor?

Eine Lösung zur Energieversorgung?

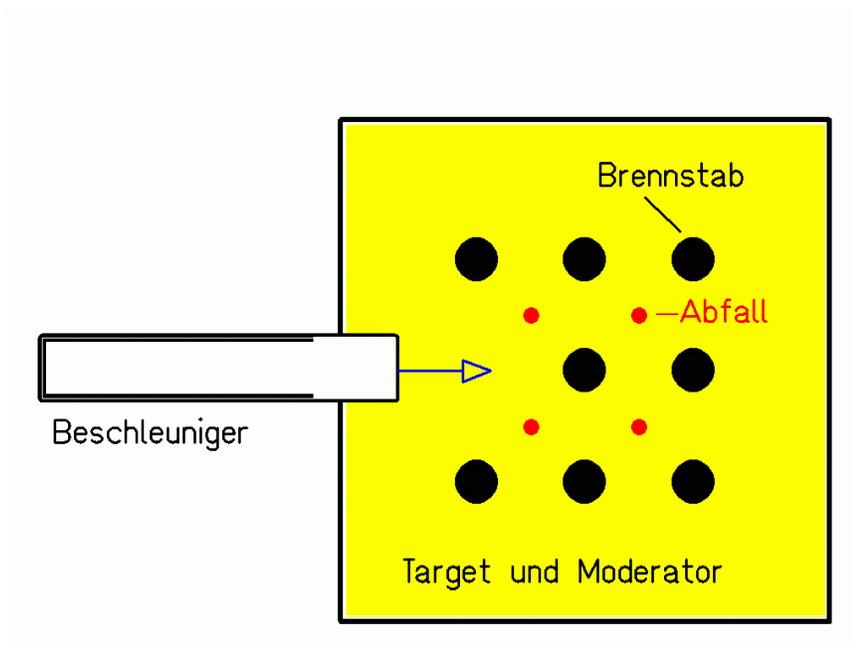
# Transmutation der radioaktiven Abfälle

- **Durch Spallationsneutronen?**



**Zu viel Energieverbrauch!**

- **Durch den Hybridreaktor?**



**Ein unterkritischer Reaktor mit zusätzlichen Neutronen aus einem 1 GeV Protonen-Strahl.**

# Der Hybridreaktor (ADS)

## Prinzip:

Leicht unterkritisch.

Steuerbar durch Spallationsneutronen, erzeugt durch 1 GeV Protonen aus einem Beschleuniger.

## Vorteile:

Kann mit  $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{233}\text{U}$  betrieben werden.

□  $^{232}\text{Th}$  Vorräte reichen 21000 Jahre.

Verträgt leichte "Vergiftung".

□ Kann Abfall "verbrennen".

□ Ist unempfindlich gegen leichte Schwankungen der Kritikalität beim Betrieb.

□ Längere Betriebsdauer der Brennstäbe.

## Problem:

Kernreaktionen bis 1 GeV treten auf.

□ Produktion radioaktiver Kerne durch Spallation.

□ Materialschäden durch Bestrahlung.

## **4. Die Grundlagenforschung bei der GSI**

Produktion neuer Radioaktivität bei der Transmutation

Nutzen der inversen Kinematik

Ergebnisse

Entwicklung von Kernreaktionsmodellen

Weiterer Nutzen: Erzeugung von Sekundärstrahlen

# Das Grundlagen-Forschungs-Programm bei GSI zur Transmutation radioaktiven Abfalls

## Präzisionsmessungen der Isotopen-Ausbeuten

- $^{197}\text{Au}$  ( 800 A MeV) +  $^1\text{H}$
- $^{208}\text{Pb}$  (1 A GeV) +  $^1\text{H}$
- $^{208}\text{Pb}$  (1 A GeV) +  $^2\text{H}$
- $^{208}\text{Pb}$  (500 A MeV) +  $^1\text{H}$
- $^{238}\text{U}$  (1 A GeV) +  $^1\text{H}$
- $^{238}\text{U}$  (1 A GeV) +  $^2\text{H}$
- $^{238}\text{U}$  (1 A GeV) +  $^{208}\text{Pb}$

geplant:

- $^{56}\text{Fe}$  (1 A GeV) +  $^1\text{H}$

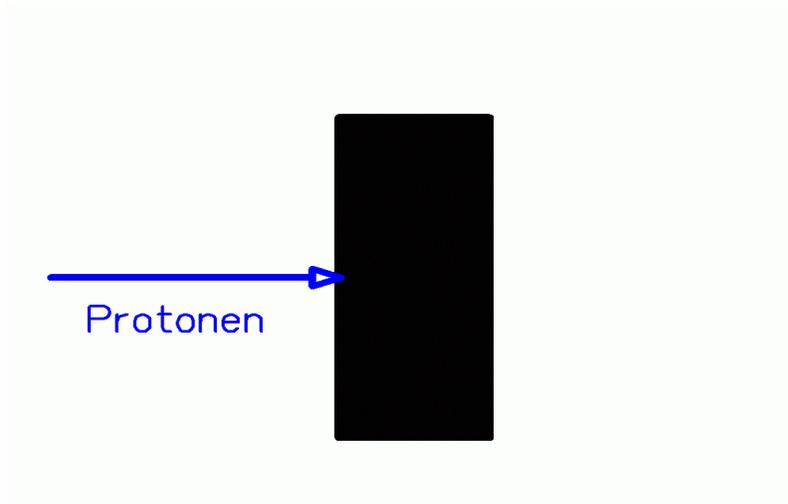
## Entwicklung von Kernreaktions-Modellen

### Zusammenarbeit von

- GSI Darmstadt
- CEA Saclay
- IPN Orsay
- CEN Bordeaux-Gradignan
- Universidad de Santiago de Compostela

## Warum inverse Kinematik?

### Experimente mit Protonenstrahlen:



Die Produkte bleiben im Target stecken.

Untersuchung des radioaktiven Zerfalls

→ **kein Nachweis kurzlebiger Nuklide**

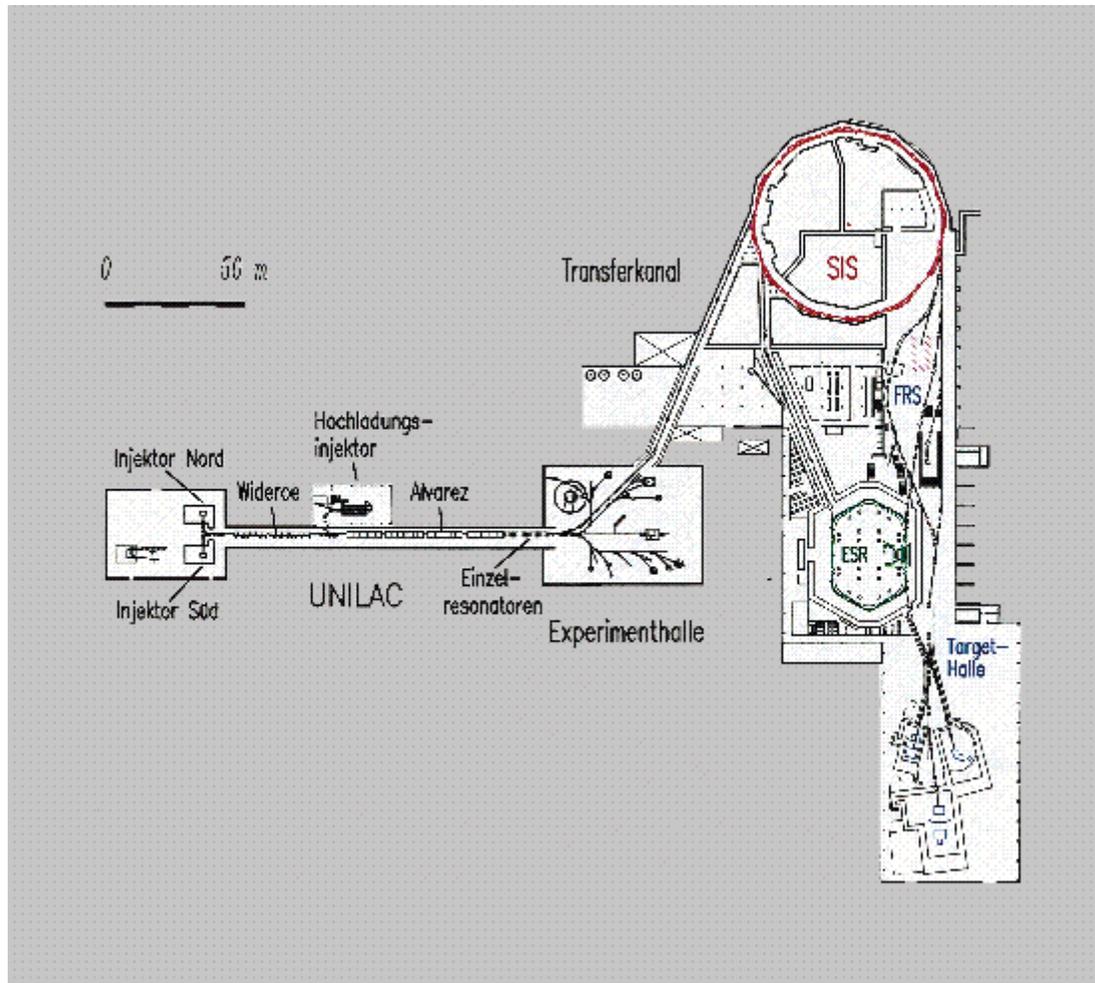
### Experimente mit Schwerionenstrahlen:

Die Produkte verlassen das Target mit hoher Geschwindigkeit

Identifizierung im Fluge

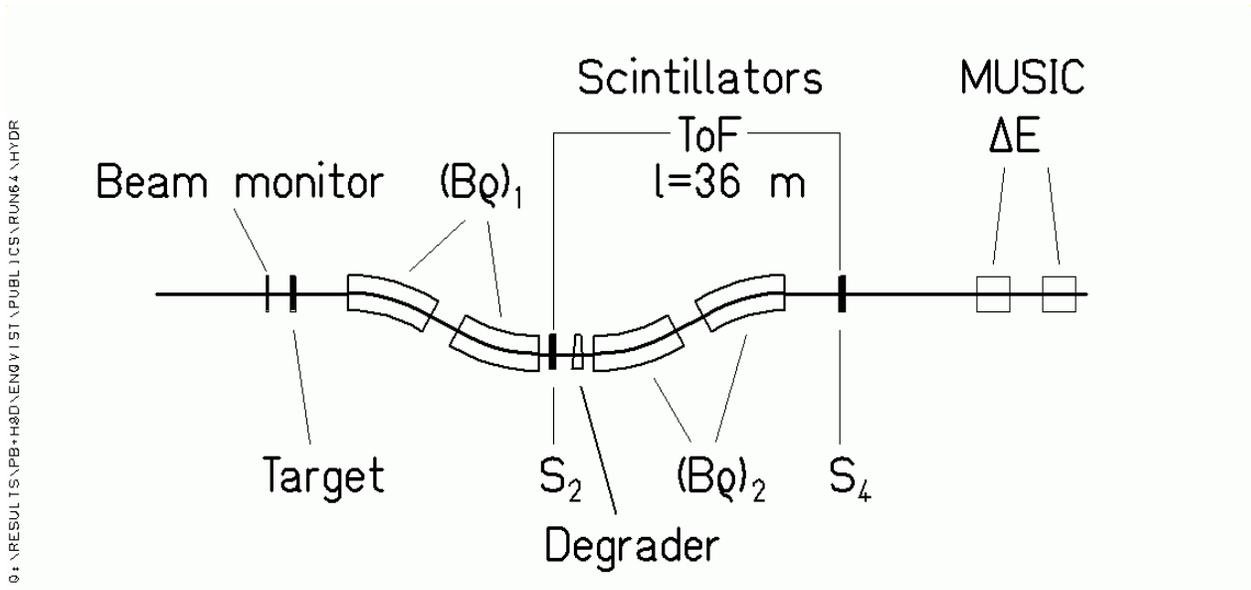
→ **Nachweis aller Nuklide**

# Beschleuniger- und Experimentieranlagen der GSI



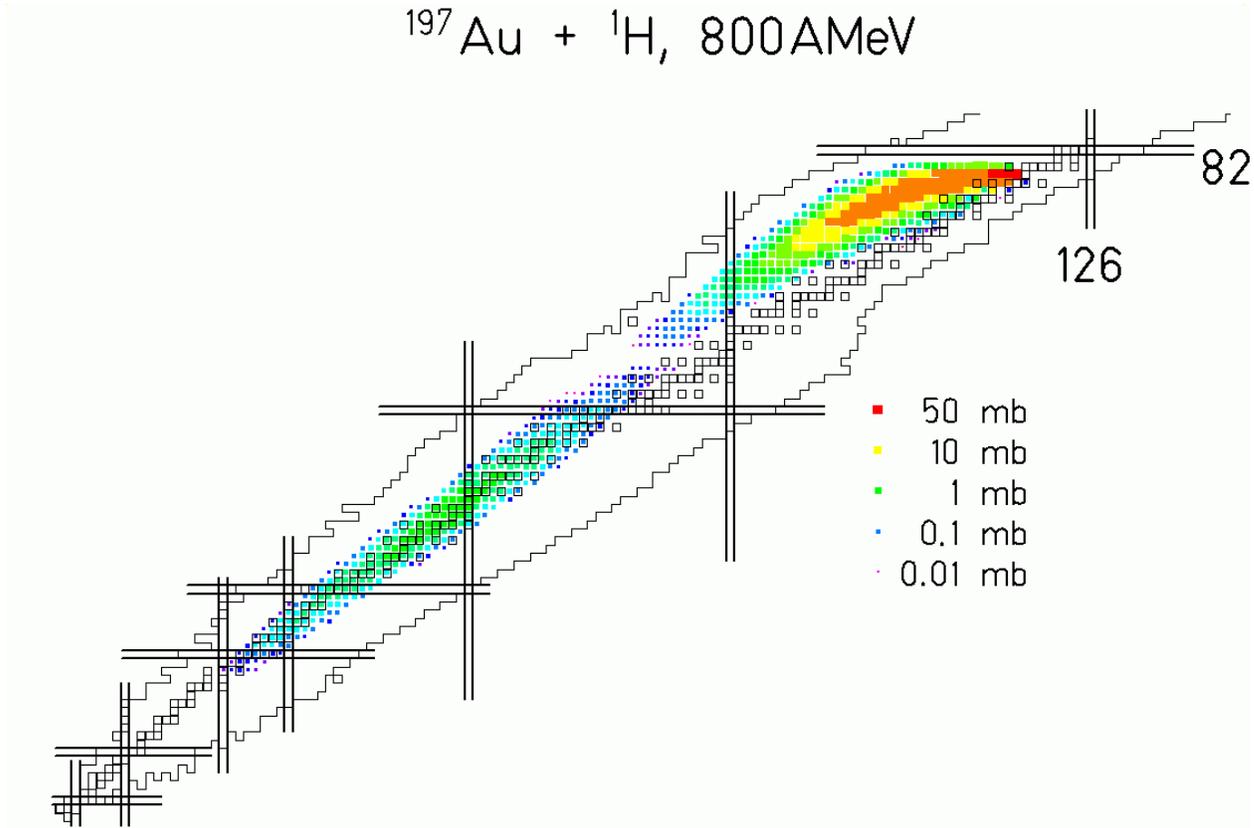
Grundriß der Beschleuniger- und Experimentier-Anlage. Von den Injektoren Nord und Süd (links) mit der anschließenden Wideröe-Struktur oder alternativ vom Hochladungsinjektor werden die Ionen mit etwa 5% der Lichtgeschwindigkeit in die Alvarez-Struktur eingeschossen. Hinter dem UNILAC hat der Ionenstrahl 16% der Lichtgeschwindigkeit erreicht. Ein Teil des Strahls wird nun in der anschließenden Experimentierhalle für Versuche verwendet, während der verbleibende Rest zur weiteren Beschleunigung in das Schwerionen-Synchrotron SIS transferiert wird. Dort erreichen die Ionen maximal 90% der Lichtgeschwindigkeit und werden dann für Experimente am Fragmentseparator FRS, im ESR oder in der Target-Halle ausgelenkt.

# Der Fragmentseparator



Die Projektile aus dem SIS-Beschleuniger treffen das Target. Die dort gebildeten Projekttilfragmente werden mit Hilfe der magnetischen Ablenkung im FRS und mehreren Detektoren in Ordnungszahl und Massenzahl identifiziert.

# Produktionsquerschnitte aller Isotope



Die Wirkungsquerschnitte von 396 Kernen, gebildet durch Spallation (oberer Bereich auf der Nuklidkarte), und die Wirkungsquerschnitte von 353 Kernen, gebildet durch Spaltung (unterer Bereich auf der Nuklidkarte), wurden bei GSI gemessen.

Die Daten wurden von Mustapha Brahim, Fanny Rejmund (beide IPN Orsay, Frankreich) und Jose Benlliure (Universidad de Santiago de Compostela, Spanien) ausgewertet. (F. Rejmund et al., GSI-Preprint 2000-06 und J. Benlliure et al., GSI-Preprint 2000-05)

## Vergleich mit allen früheren Daten

### $^{197}\text{Au} + ^1\text{H}$ (800 A MeV), Spallationsprodukte

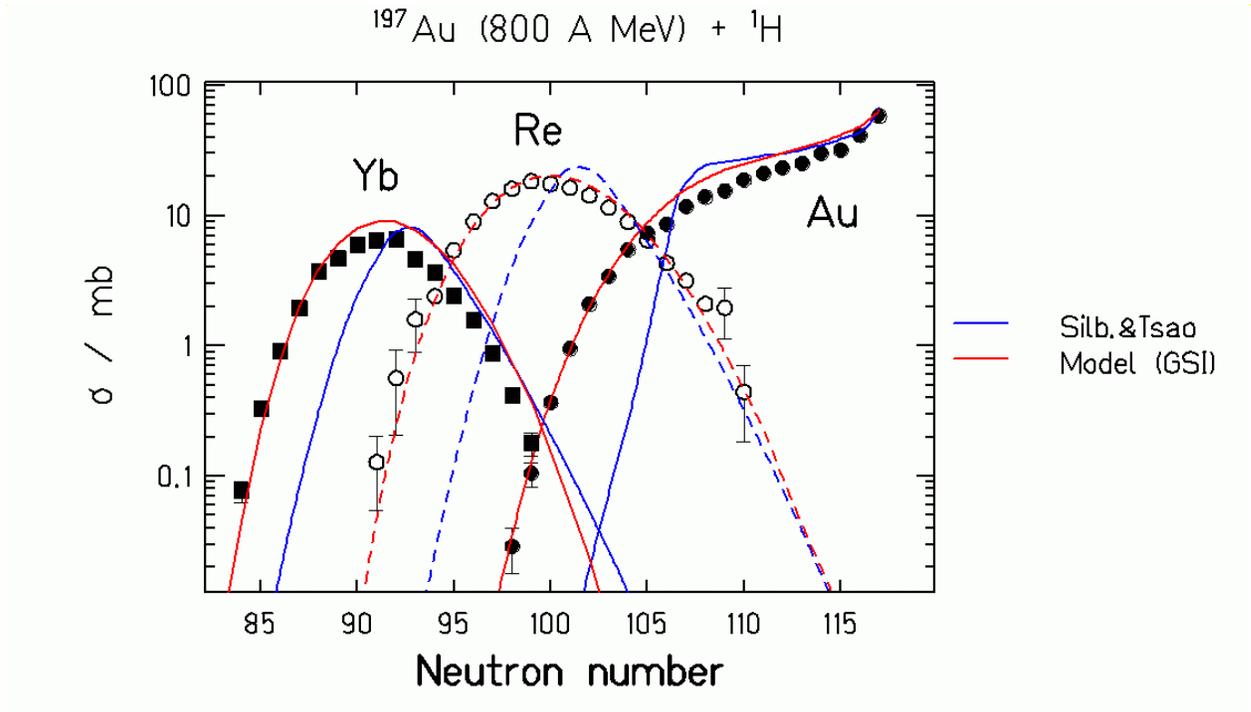
Isotop	$\sigma(\text{Michel et al.})/\text{mb}$	$\sigma(\text{GSI})/\text{mb}$
$^{193}\text{Hg}$	$7.47 \pm 1.2$	$4.38 \pm 0.66$
$^{196}\text{Au}$	$66.0 \pm 7.0$	$58.4 \pm 5.5$
$^{194}\text{Au}$	$29.0 \pm 2.8$	$31.2 \pm 2.9$
$^{192}\text{Ir}$	$2.91 \pm 0.230$	$3.8 \pm 0.6$
$^{190}\text{Ir}$	$4.67 \pm 0.400$	$6.05 \pm 0.9$
$^{168}\text{Tm}$	$0.283 \pm 0.0472$	$0.036 \pm 0.005$
$^{148}\text{Eu}$	$0.149 \pm 0.0141$	$0.08 \pm 0.013$

### $^{197}\text{Au} + ^1\text{H}$ (800 A MeV), Spaltprodukte

Isotop	$\sigma(\text{Michel et al.})/\text{mb}$	$\sigma(\text{Kaufman et al.})/\text{bm}$	$\sigma(\text{GSI})/\text{mb}$
$^{102}\text{Rh}$	$0.80 \pm 0.13$		$0.53 \pm 0.08$
$^{96}\text{Tc}$	$0.78 \pm 0.06$	$0.72 \pm 0.09$	$0.58 \pm 0.08$
$^{88}\text{Y}$	$2.45 \pm 0.19$		$1.36 \pm 0.20$
$^{86}\text{Rb}$	$2.41 \pm 0.37$		$0.96 \pm 0.18$
$^{84}\text{Rb}$	$2.01 \pm 0.16$	$1.44 \pm 0.25$	$1.54 \pm 0.25$
$^{82}\text{Br}$	$0.93 \pm 0.17$		$0.76 \pm 0.21$
$^{74}\text{As}$	$1.37 \pm 0.11$	$1.38 \pm 0.13$	$1.07 \pm 0.10$
$^{60}\text{Co}$	$0.75 \pm 0.09$		$0.51 \pm 0.05$
$^{58}\text{Co}$	$0.96 \pm 0.09$	$0.41 \pm 0.06$	$0.27 \pm 0.03$
$^{54}\text{Mn}$	$0.30 \pm 0.05$	$0.44 \pm 0.04$	$0.31 \pm 0.06$
$^{46}\text{Sc}$	$0.17 \pm 0.02$	$0.38 \pm 0.05$	$0.21 \pm 0.04$

Mit Gamma-Spektroskopie waren nur 18 Einzel-Querschnitte meßbar.

# Der Erkenntniszuwachs



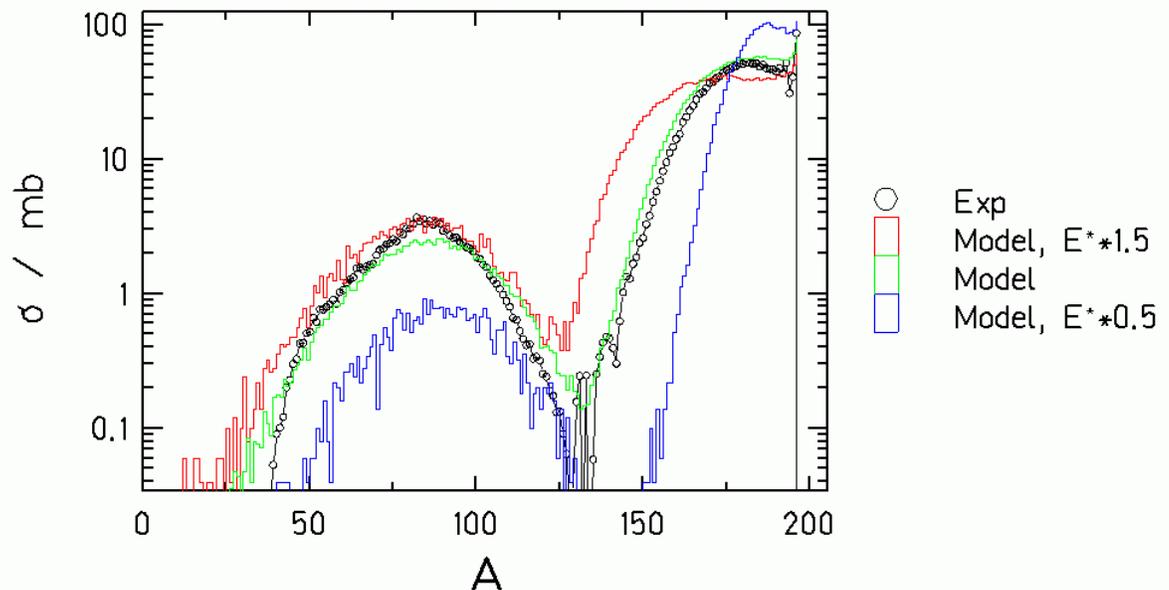
Wirkungsquerschnitte von Gold, Rhenium und Ytterbium-Isotopen.

Silberberg und Tsao (Astrophys.J. 501 (1998) 911) haben den bisherigen Stand der Kenntnis in einer empirischen Systematik zusammengefasst (blaue Kurven). Diese Systematik weicht zum Teil drastisch von den neuen bei GSI gemessenen Wirkungsquerschnitten ab (Datenpunkte). Eine Rechnung mit einem neuen zum Teil bei GSI entwickelten Modell (rote Kurve) gibt die Daten gut wieder.

# Welche Anregungsenergie überträgt das Proton?

## Influence of $E^*$ from INC

Mass distribution ( $^{197}\text{A} + ^1\text{H}$ , 800 A MeV)



Gemessene Massenverteilung (Datensymbole) im Vergleich mit verschiedenen Rechnungen.

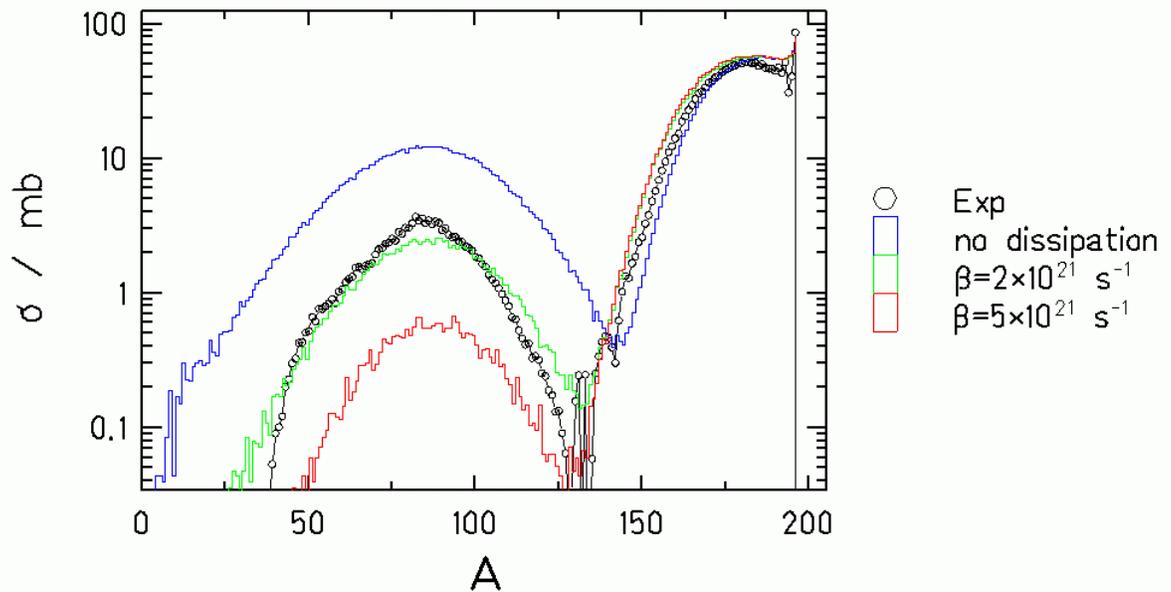
Im Inertialsystem des Projektils wird der Gold-Kern von einem 1 GeV Proton getroffen. Die Berechnung der Anregungsenergie, die das Proton auf den Gold-Kern überträgt, ist unsicher. Der Vergleich mit Rechnungen, bei denen die Anregungsenergieverteilung durch verschiedene Faktoren verändert wurde, zeigt, dass die neuen Daten diese Größe sehr genau festlegen.

# Wie viskos ist Kernmaterie?

-

## Influence of dissipation on fission

Mass distribution ( $^{197}\text{A} + ^1\text{H}$ , 800 A MeV)

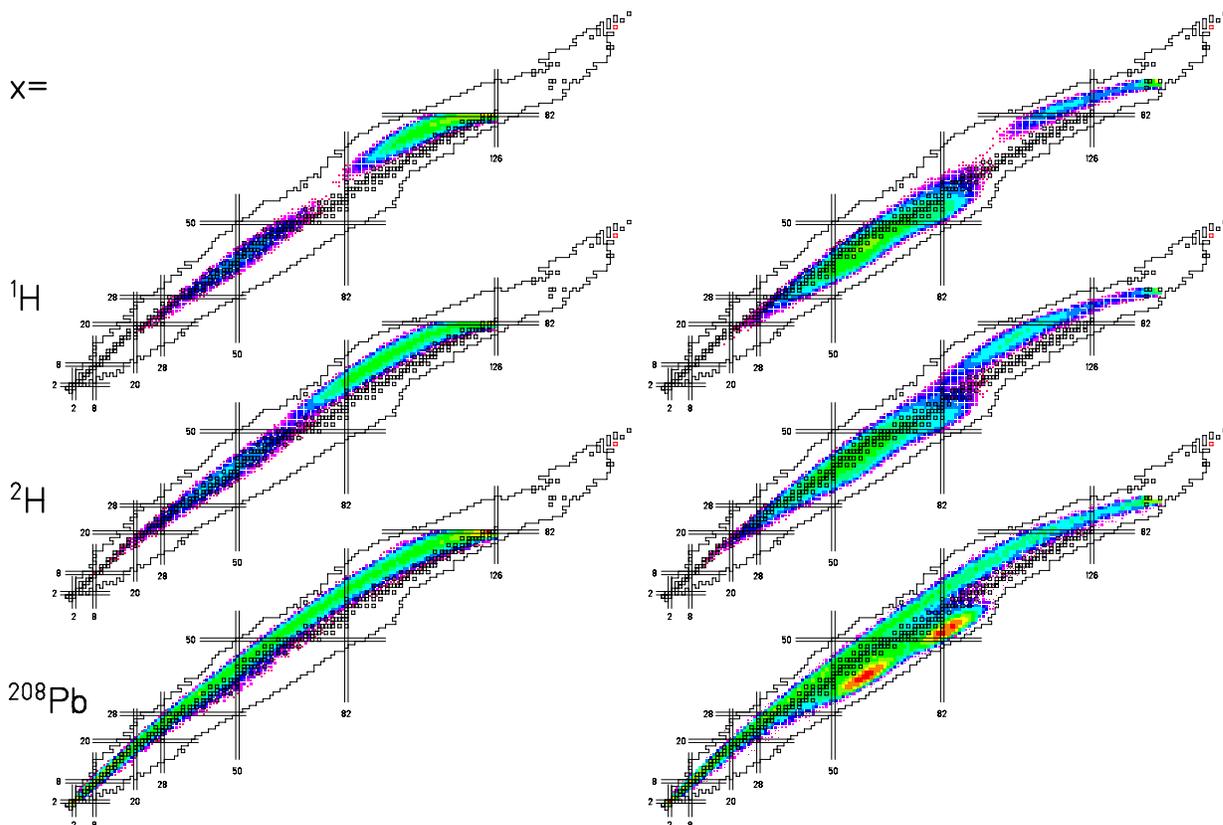


Gemessene Massenverteilung (Datensymbole) im Vergleich mit verschiedenen Rechnungen.

Eine Gruppe von Kernen um Masse  $A = 80$  werden durch Spaltung gebildet. Der Spaltquerschnitt wird stark durch die Viskosität der Kernmaterie beeinflusst. Der Vergleich mit Rechnungen, bei denen die Viskosität verändert wurde, zeigt, dass die neuen Daten diese Größe sehr genau festlegen.

# Berechnete Querschnitte

Residues of  $^{208}\text{Pb}+x$  and  $^{238}\text{U}+x$  at 1 A GeV



**Ein systematischer Überblick über berechnete Produktions-Wirkungsquerschnitte verschiedener Systeme zeigt, wie unterschiedlich die Isotopenverteilungen sind, wenn man verschiedene Projektile und Targets verwendet.**

## **Anwendung verbesserter Kernreaktionsmodelle**

**Die neuen bei GSI gemessenen Daten erlauben, verbesserte Kernreaktions-Modelle zur Berechnung von Wirkungs-Querschnitten für Restkerne zu entwickeln.**

**Die neuen Ergebnisse zusammen mit den verbesserten Modellen erlauben realistische Vorhersagen für verschiedene technische Anwendungen. Dazu gehört neben dem Hybridreaktor auch die Herstellung von Sekundärstrahlen radioaktiver Kerne für Untersuchungen der Kernstruktur exotischer Kerne.**

**Pläne zum Ausbau (z.B. GSI, Darmstadt und RIKEN in Japan) oder Neubau (z.B. EURISOL in Europa und RIA in USA) von Forschungseinrichtungen zur Herstellung und Nutzung von Sekundärstrahlen werden zur Zeit intensiv diskutiert.**

## **Zusammenfassung**

- **Interesse an Beseitigung der radioaktiven Abfälle in überschaubarer Zeit**
- **Die Transmutation — eine technisch-wissenschaftliche Herausforderung**
- **Die Lösung aller Probleme durch den Hybridreaktor?**
- **GSI führt Grundlagenforschung durch zur Isotopenproduktion bei der Spallation**