

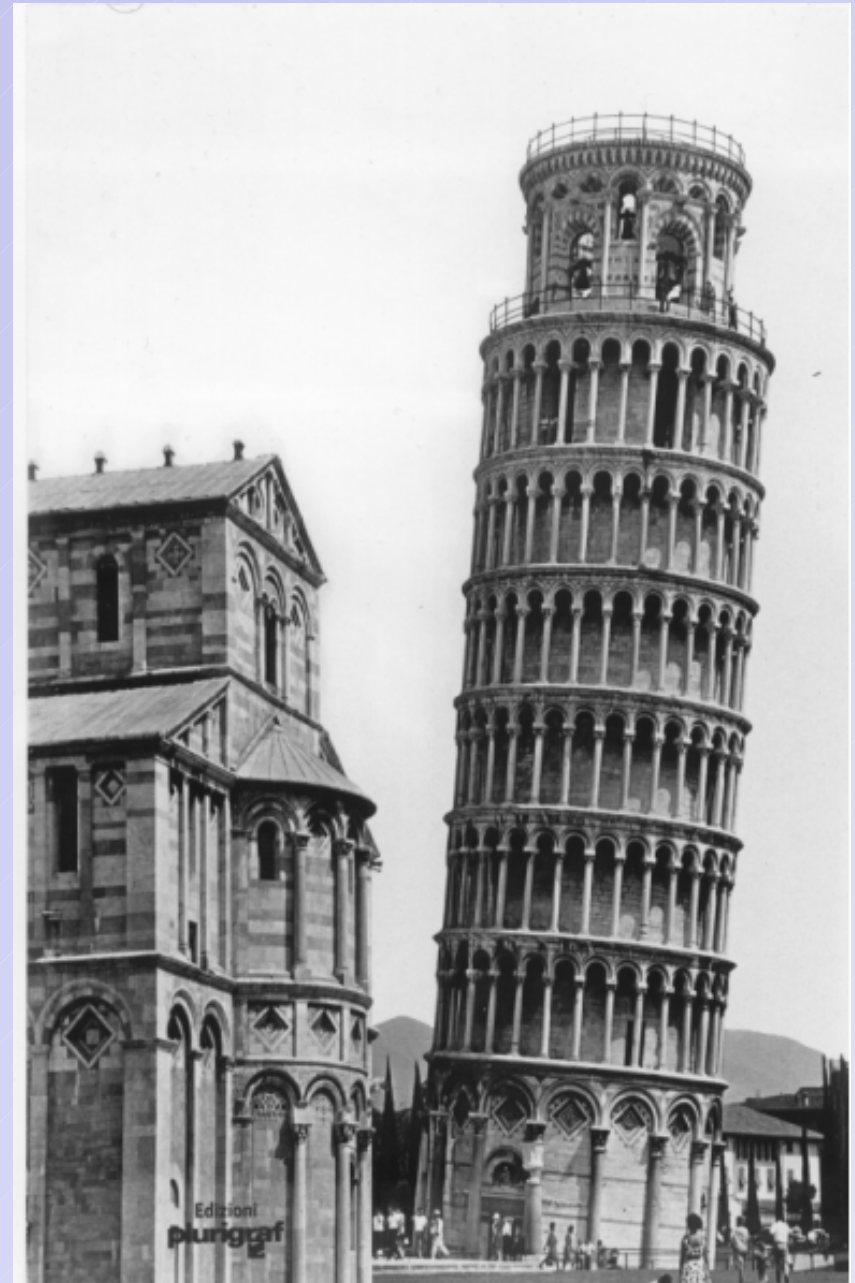
Quantenzustände von ultrakalten Neutronen im Gravitationsfeld der Erde

Claude Krantz
Universität Heidelberg

Motivation

- 3 der fundamentalen Wechselwirkungen:
Quanteneffekte auf Elementarteilchenskala.

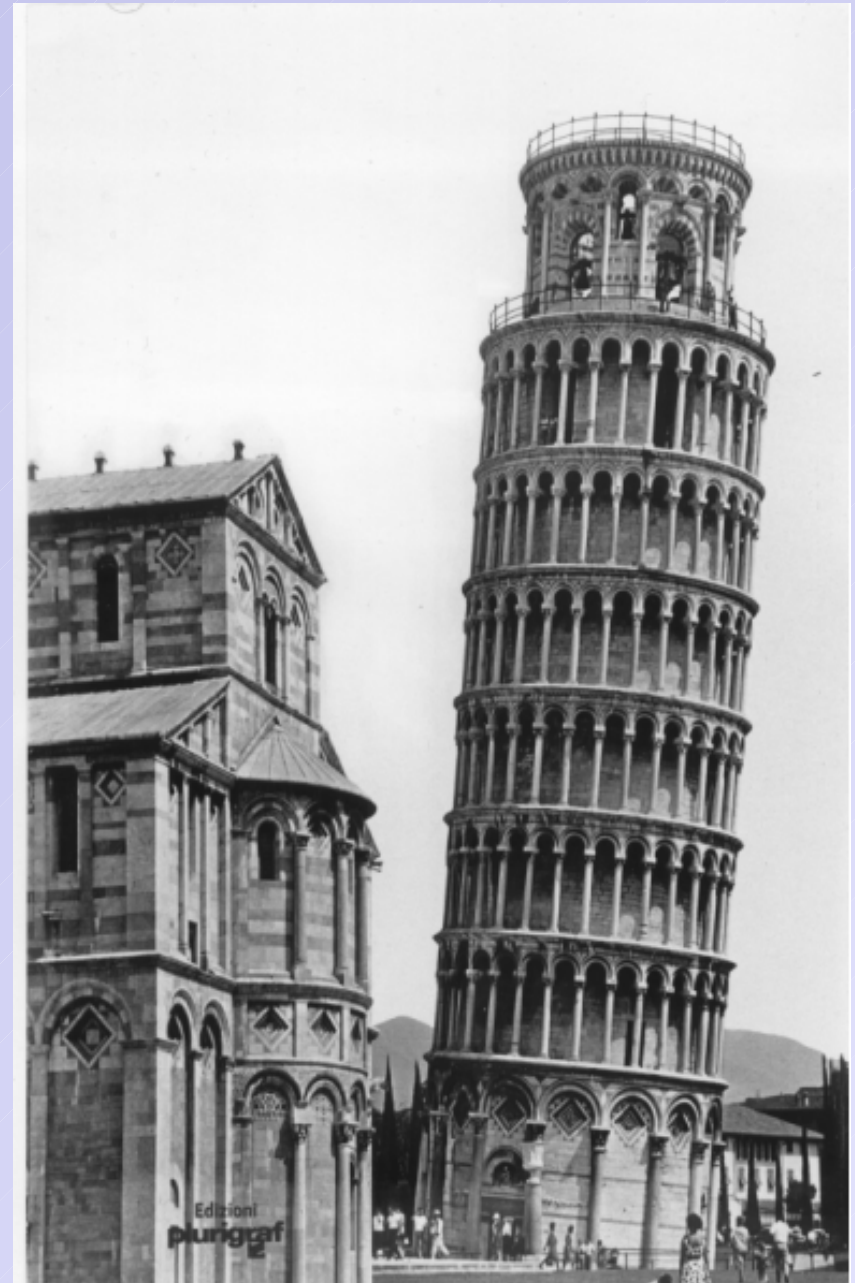
und die Gravitation?



Motivation

- 3 der fundamentalen Wechselwirkungen:
Quanteneffekte auf Elementarteilchenskala.

und die Gravitation?
- Idee:
Galileisches Fallexperiment mit „elementarer“ Probemasse, dem **Neutron**



Ultrakalte Neutronen

- Neutronenquelle:
Forschungsreaktor des ILL

⇒ kin. Energie ~ 1 MeV
(*‘schnelle Neutronen’*)



www.ill.fr

Ultrakalte Neutronen

- Neutronenquelle:
Forschungsreaktor des ILL

⇒ kin. Energie ~ 1 MeV
(*‘schnelle Neutronen’*)

ultrakalt (~ 100 neV)

sehr kalt (~ 1 μ eV)

kalt (~ 2 meV)

thermisch (~ 25 meV)

schnell (~ 1 MeV)



Ultrakalte Neutronen

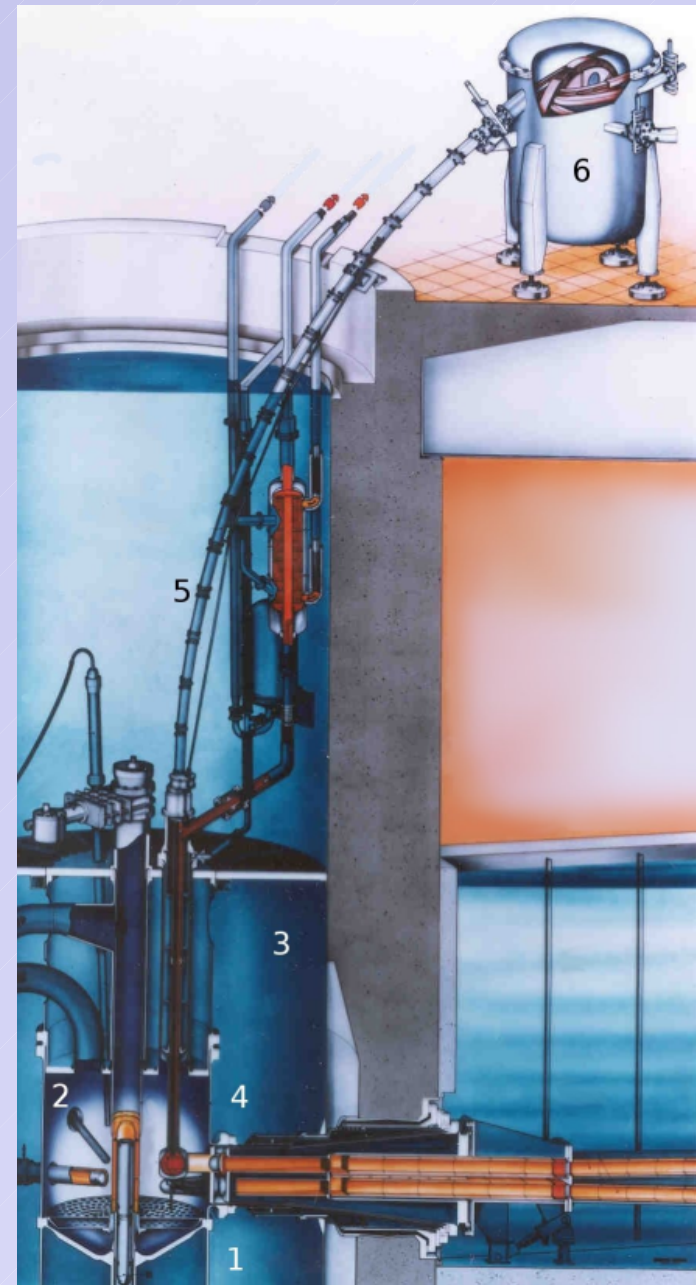
- Neutronenquelle:
Forschungsreaktor des ILL

⇒ kin. Energie ~ 1 MeV
(*‘schnelle Neutronen’*)

- Durch Moderation und
 ν -Selektion:

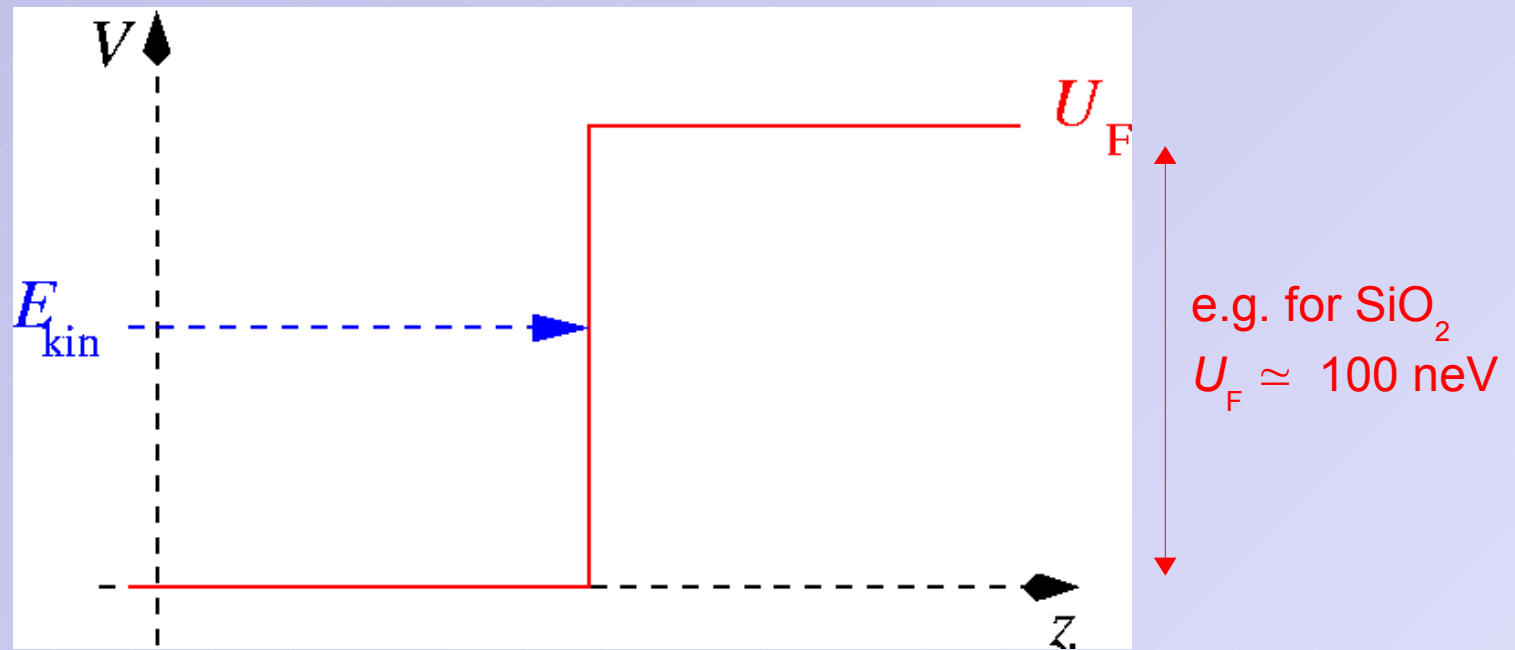
⇒ kin. Energie ~ 100 neV
(*‘ultrakalte Neutronen’*)

$v \sim$ wenige m/s



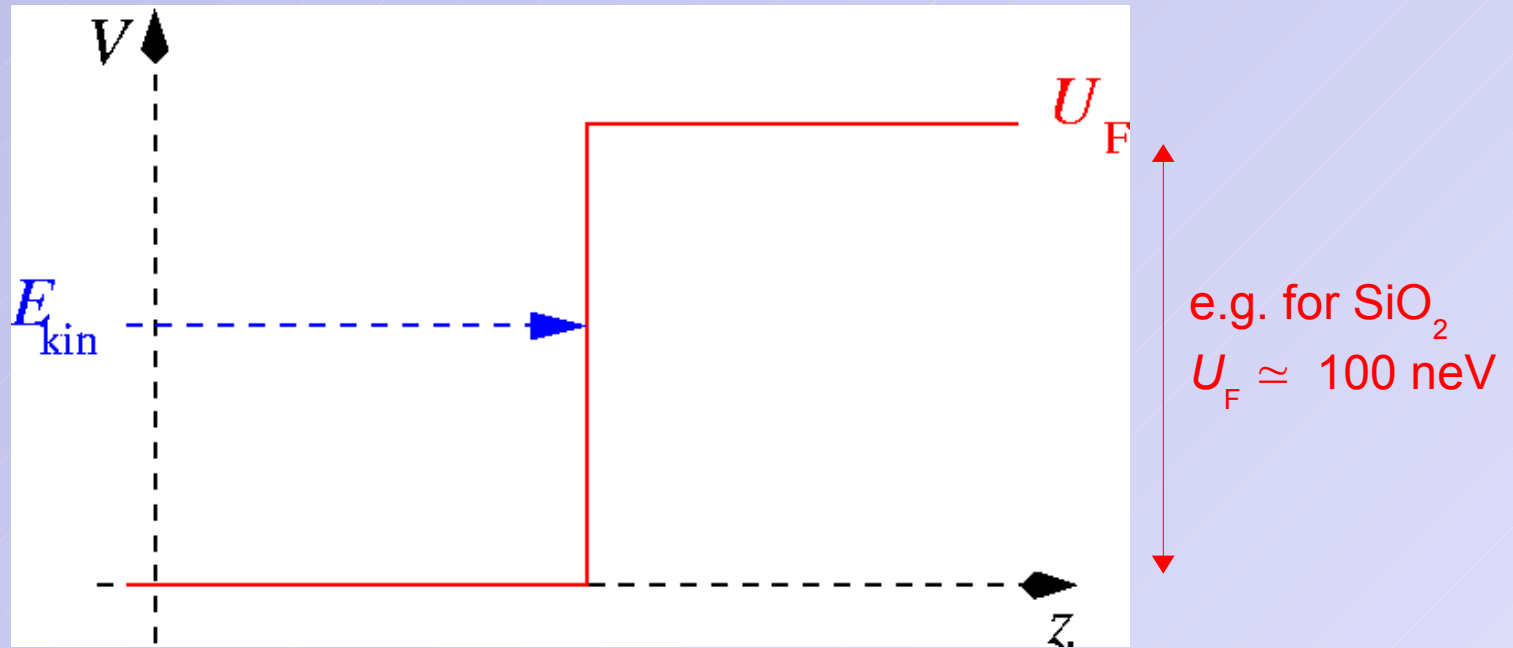
Ultrakalte Neutronen

- W.w. von langsamen Neutronen mit Oberflächen
~ q.m. Streuung an Potentialstufe (U_F)



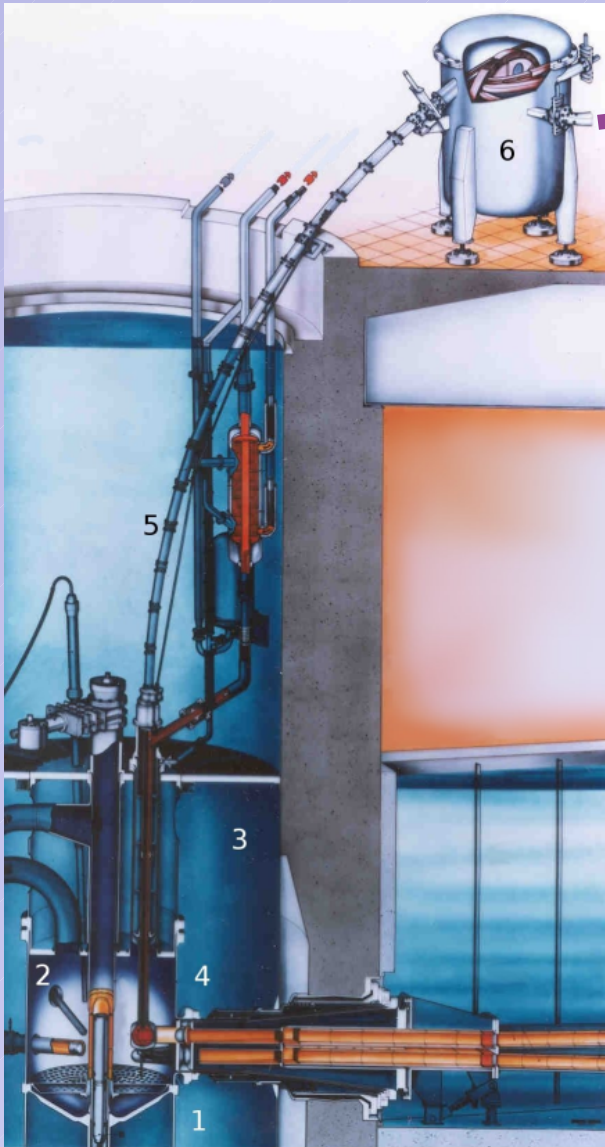
Ultrakalte Neutronen

- W.w. von langsamen Neutronen mit Oberflächen
~ q.m. Streuung an Potentialstufe (U_F)

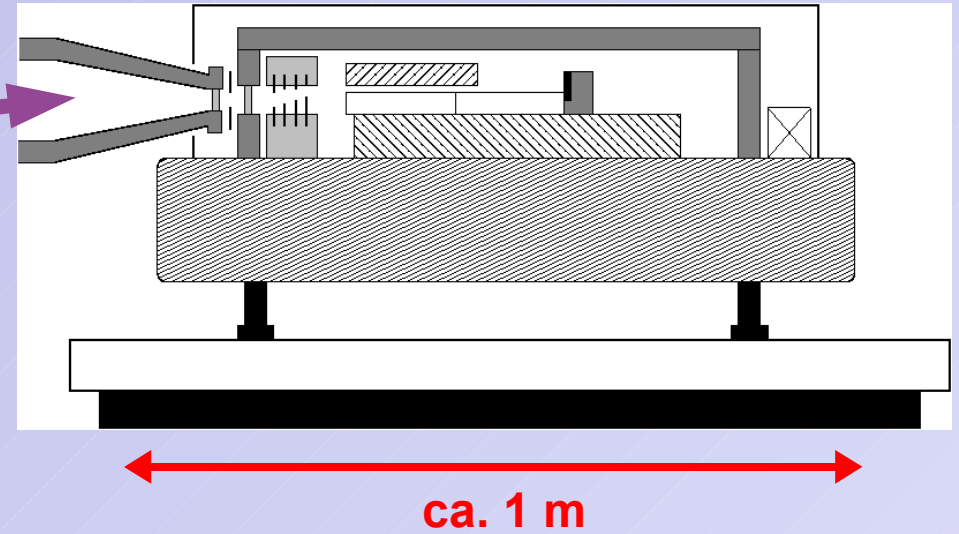


- für UCN: $E_{\text{kin}} < U_F$
 $\Rightarrow$ UCN werden an vielen Oberflächen totalreflektiert
(*'Neutronenspiegel'*)

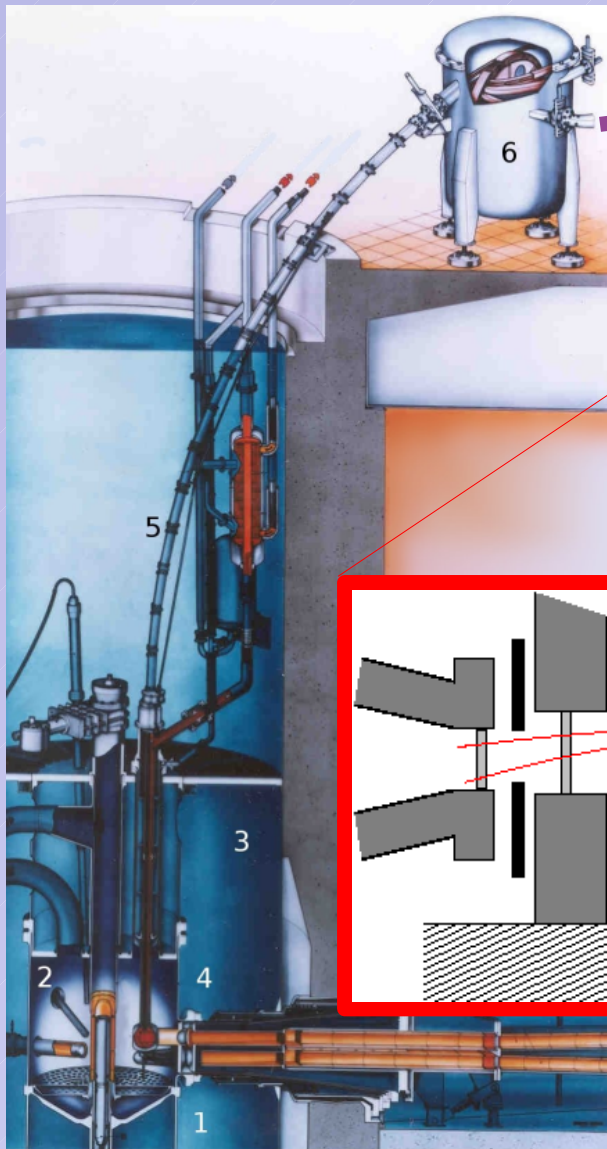
Das Experiment



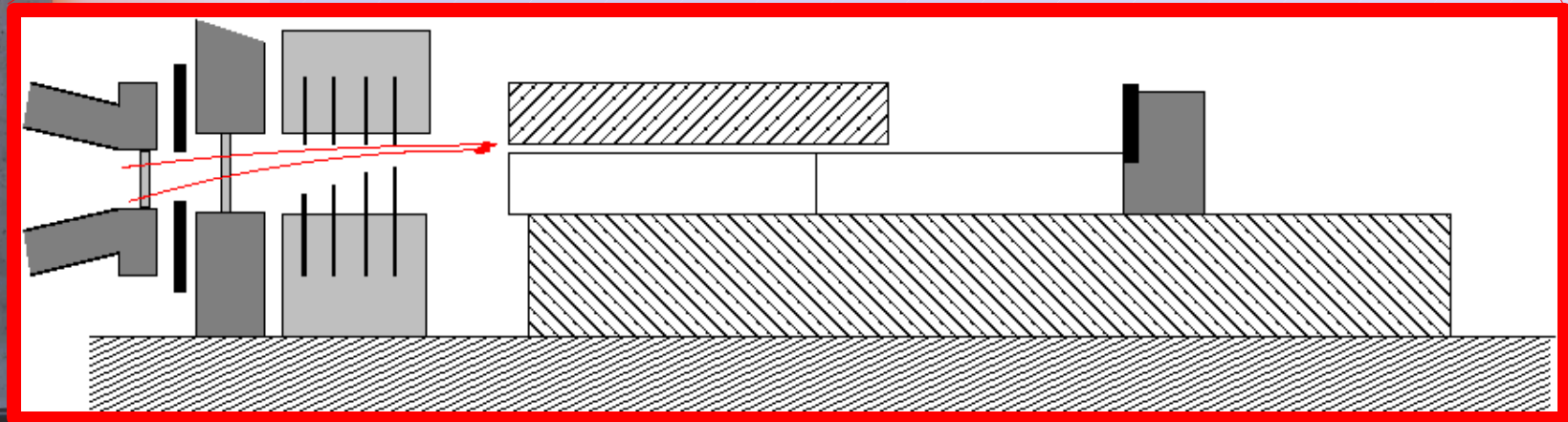
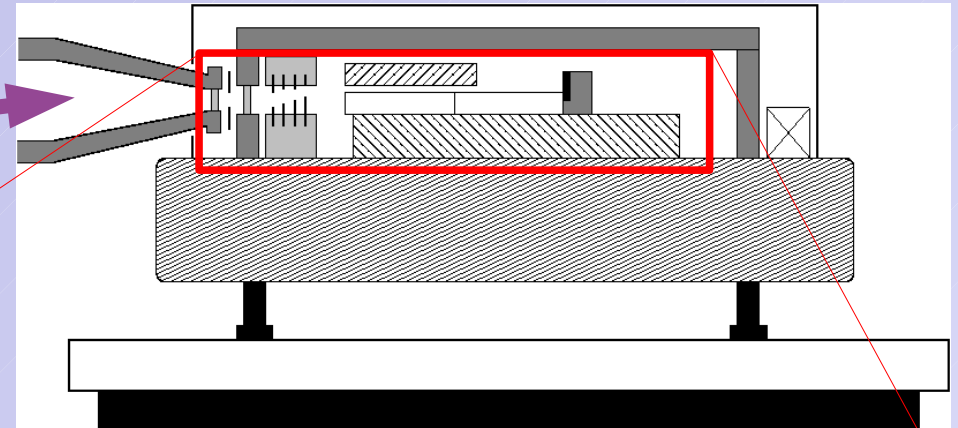
UCN
Strahl



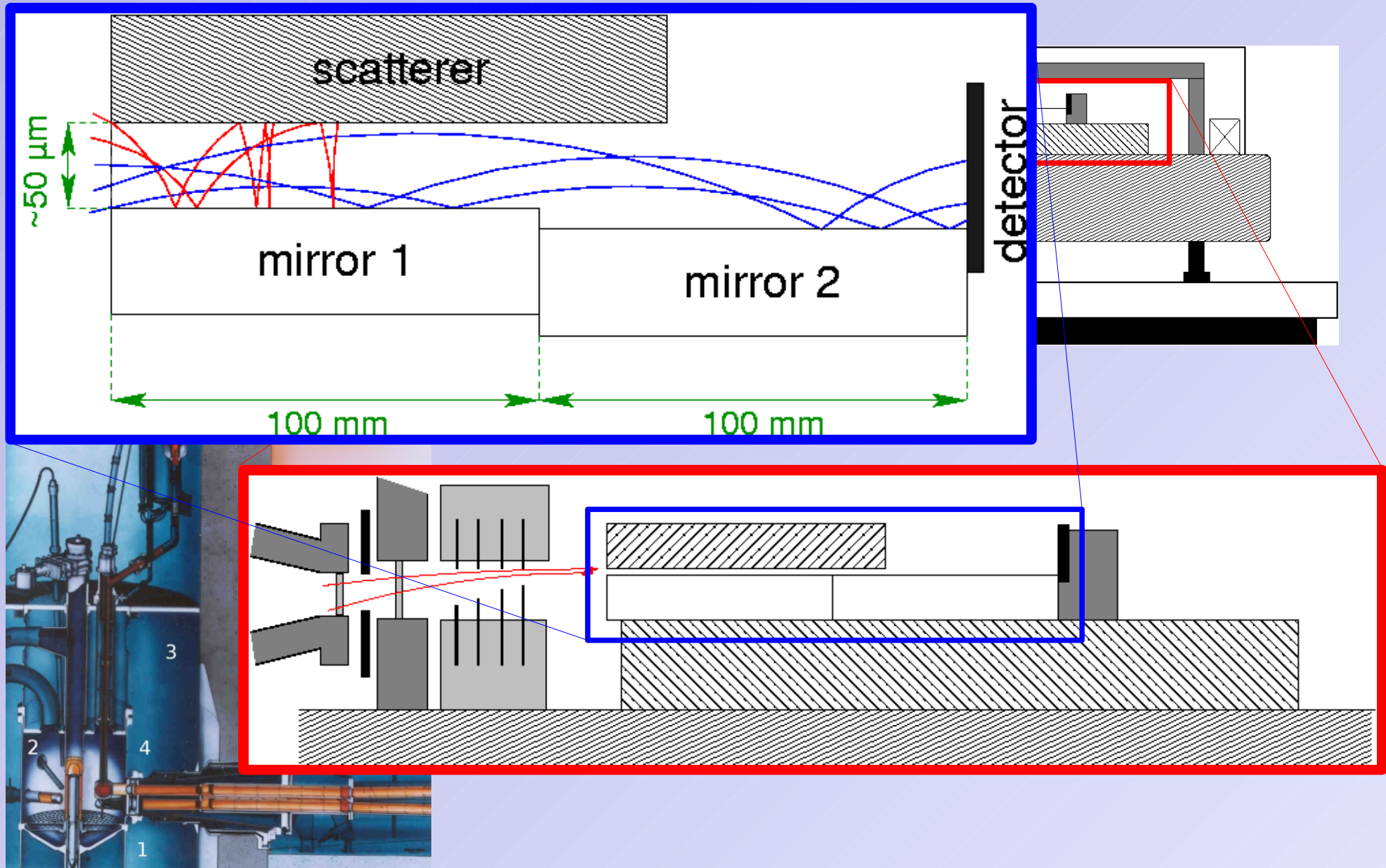
Das Experiment



UCN
Strahl



Das Experiment

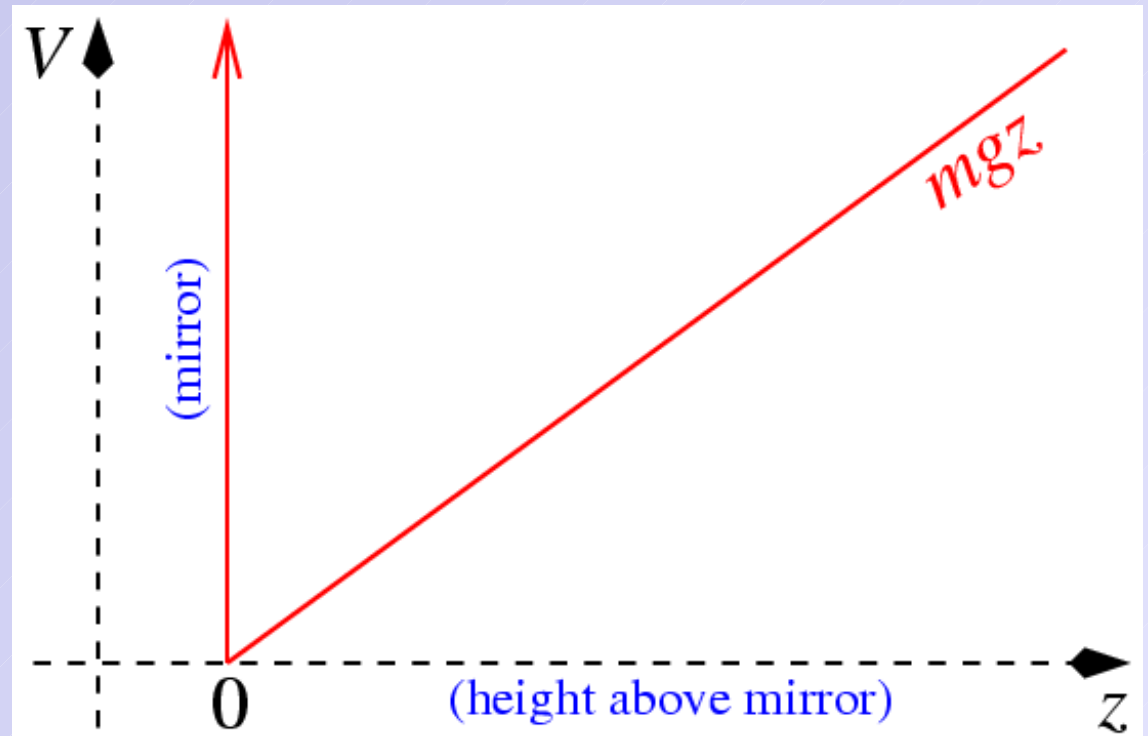
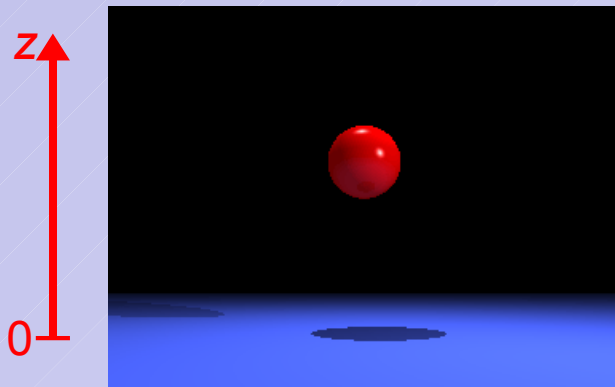


Quantenmechanisches Hüpfen

- **Das Problem:**

Löse Schrödingergleichung für über dem Spiegel hüpfendes Neutron.

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(z) \right) \psi(z) = E \psi(z)$$



Quantenmechanisches Hüpfen

- **Lösungen der Schrödingergleichung:** Airy-Funktionen

$$\psi_n(z) \sim \text{Ai}\left(\frac{z}{R} - \frac{E_n}{mgR}\right) \quad (z \geq 0)$$

R = charakt. Länge
= 5,9 μm

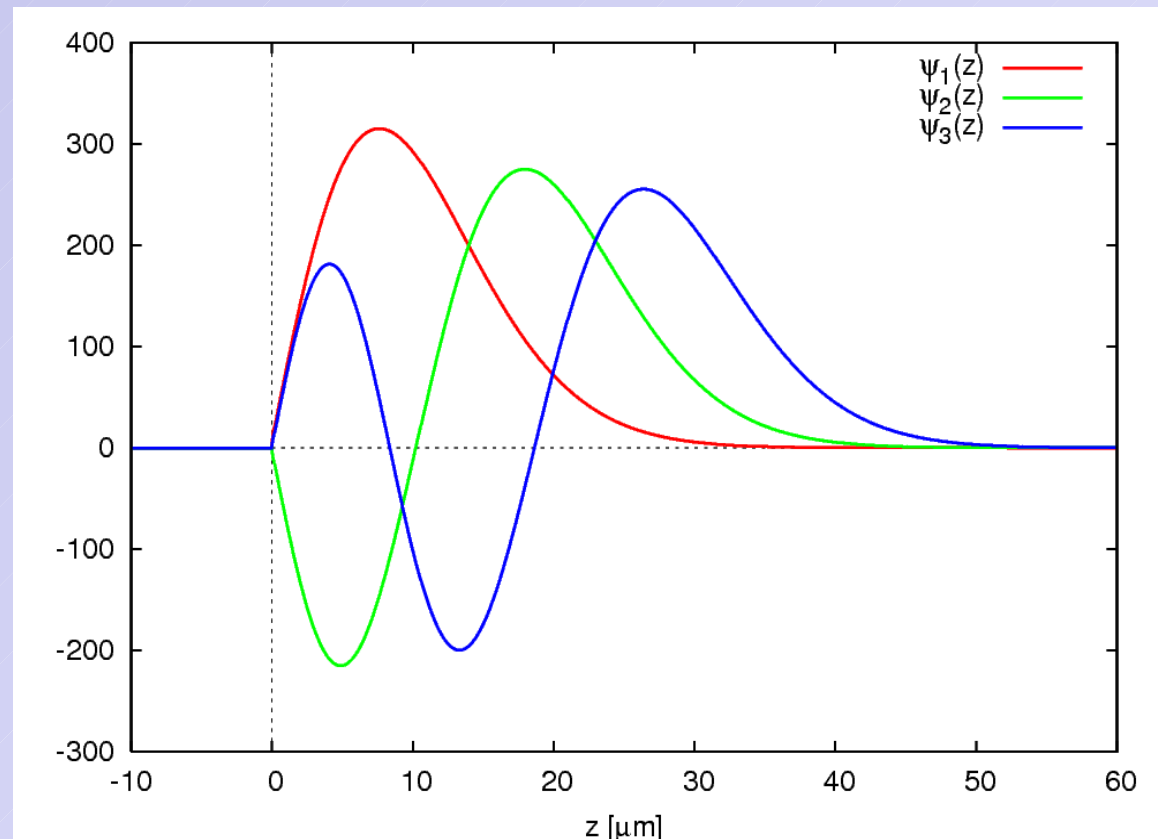
E_n = Energieniveaux

$$E_1 = 1,40 \text{ peV}$$

$$E_2 = 2,46 \text{ peV}$$

$$E_3 = 3,32 \text{ peV}$$

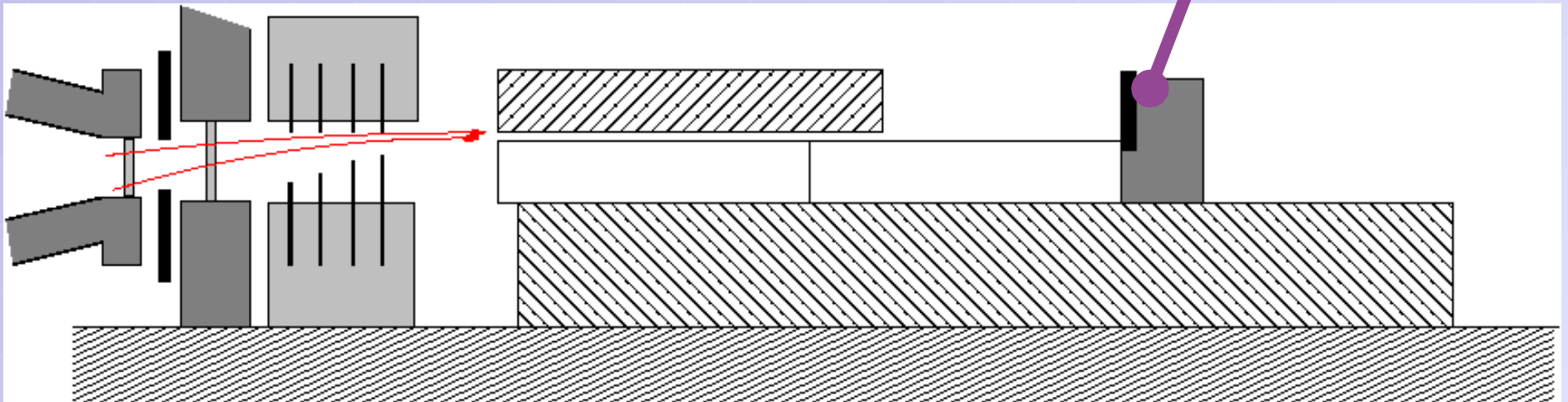
...



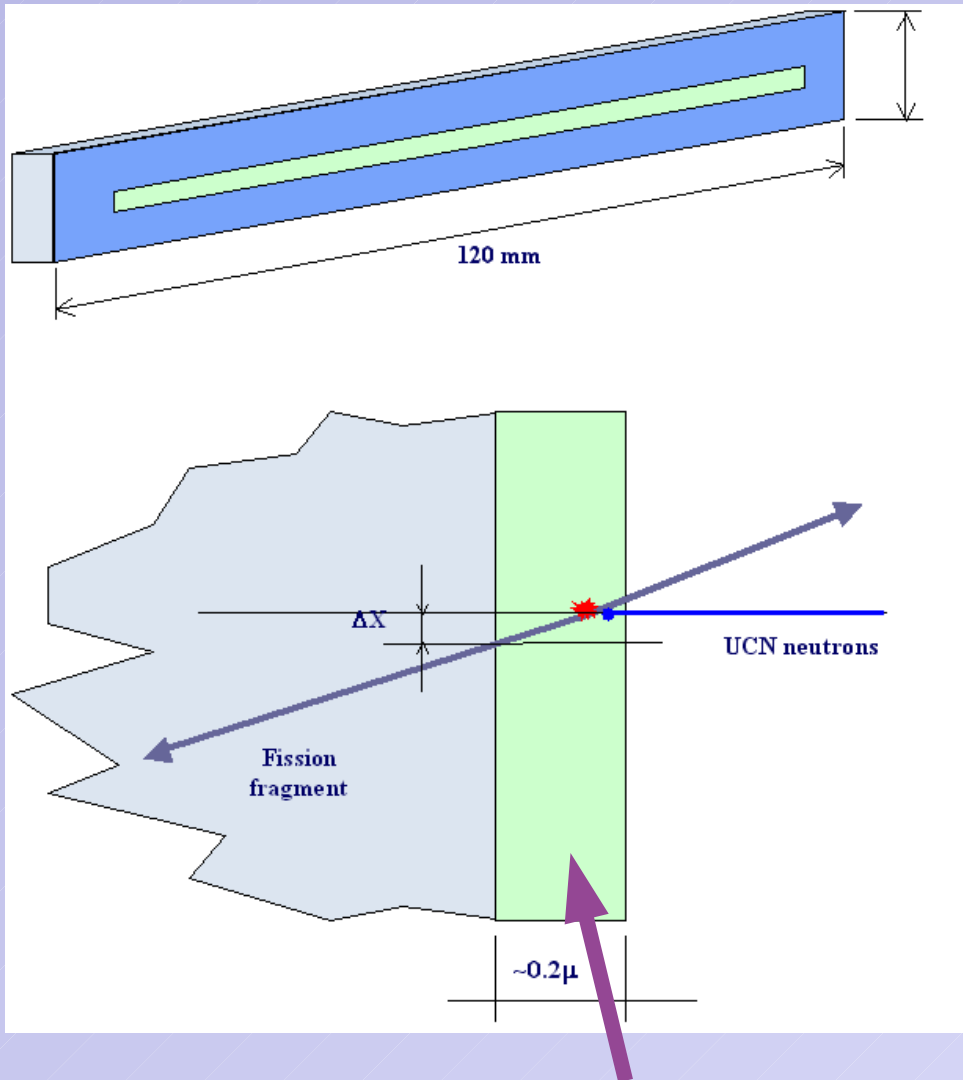
Die Messung

- Messe **Höhenverteilung** über dem Spiegel mit **ortsauflösendem** Detektor
 $= |\psi(z)|^2$

Spurdetektor



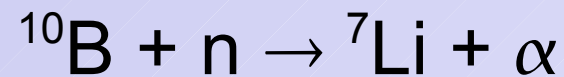
Die Messung



Konverterschicht

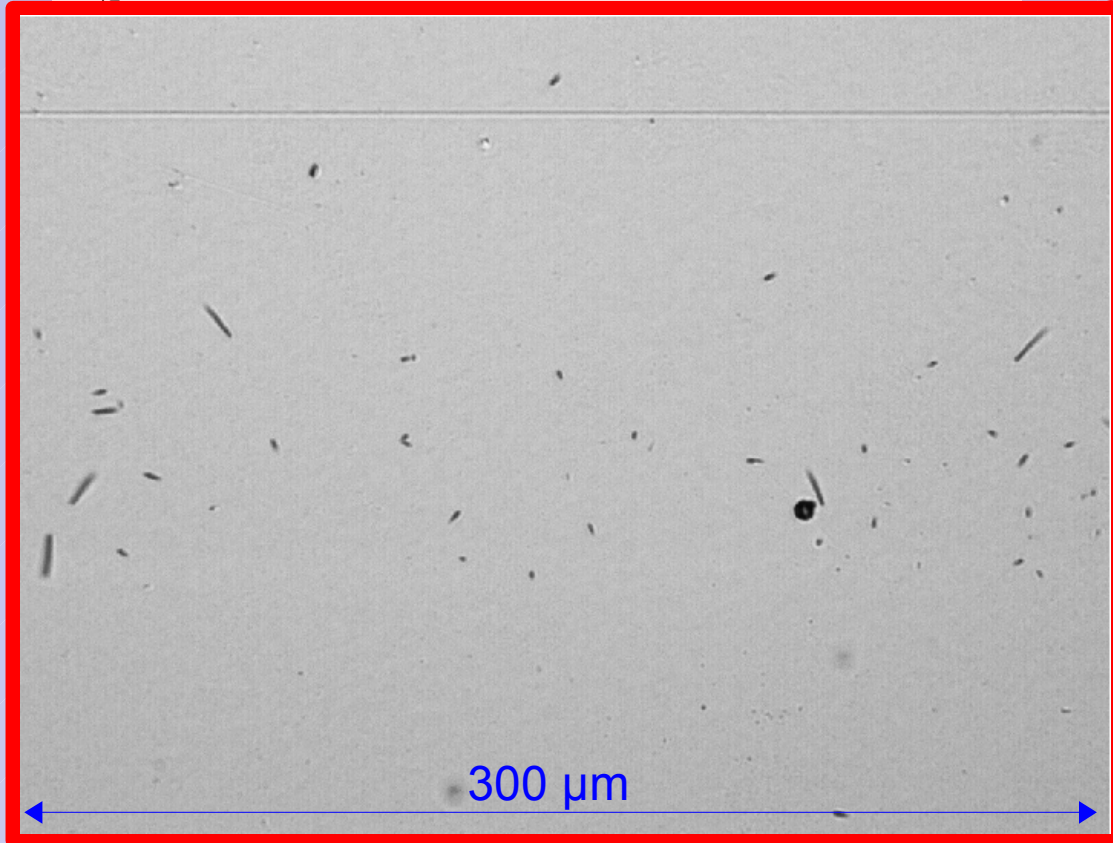
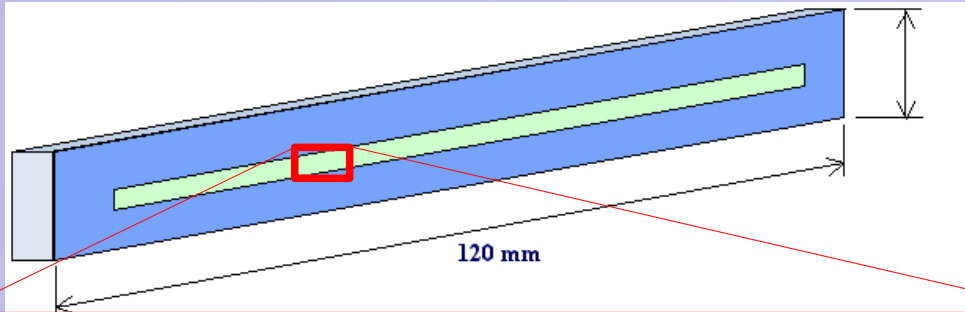
- **Detektor** = transparentes Polymer (**CR39**), empfindlich auf hochenergetische Kernfragmente

- **Konverterschicht** für UCNs:



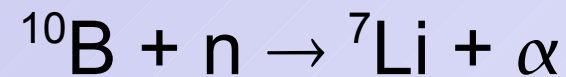
- **Ätzen** mit NaOH
⇒ mikroskopische Spuren

Die Messung



- **Detektor** = transparentes Polymer (**CR39**), empfindlich auf hochenergetische Kernfragmente

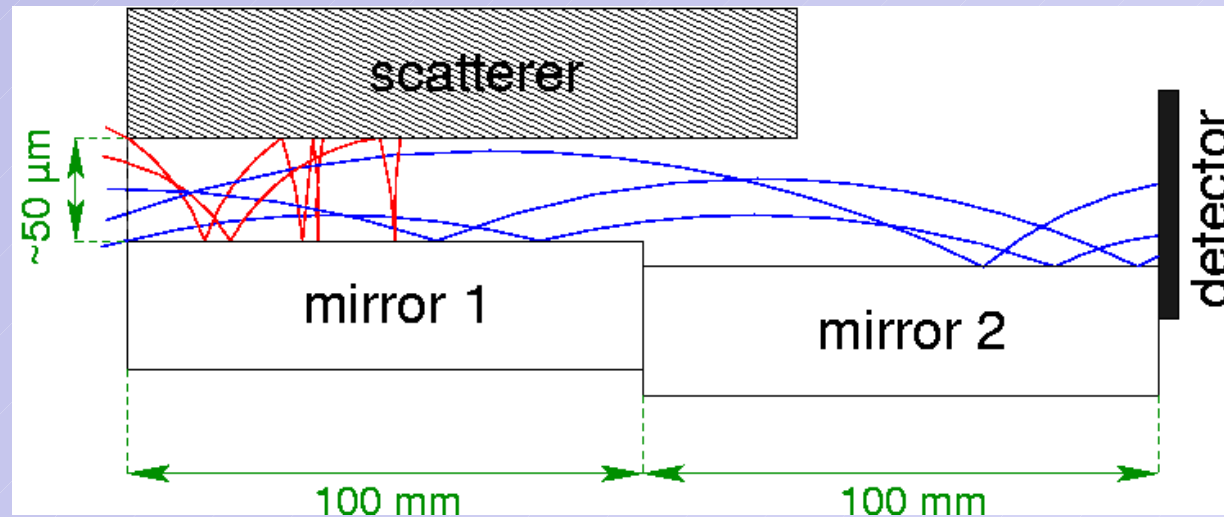
Konverterschicht für UCNs:



Ätzen mit NaOH
⇒ mikroskopische Spuren

Die Messung

- Detektor wird ca. 1 Woche mit UCNs **bestrahlt**.
⇒ ca. **14000 Spuren** (bei Schlitzweite 50 μm)

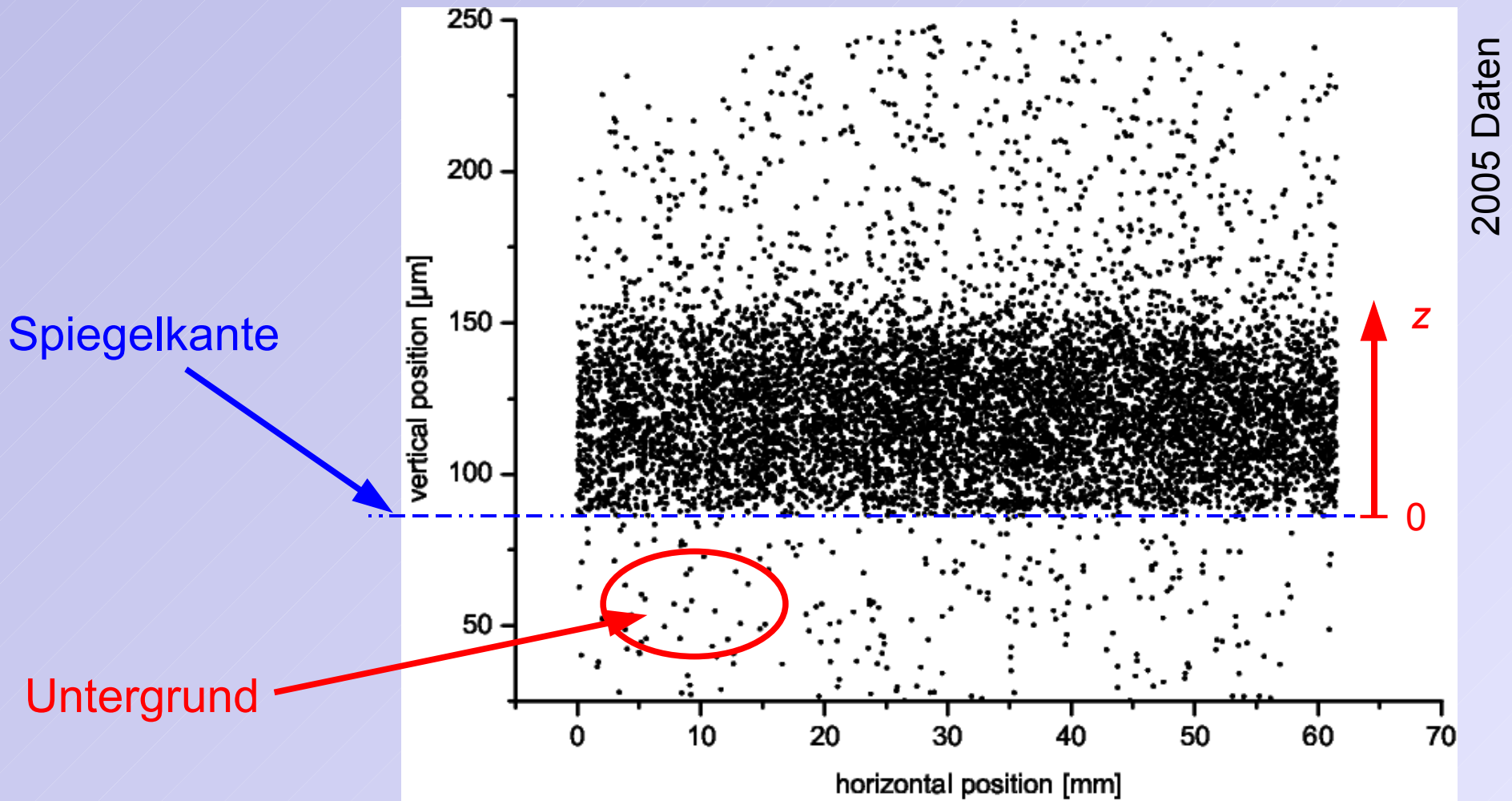


- **Räumliche Verteilung** der Spuren wird mit optischem Mikroskop aufgezeichnet.



Die Messung

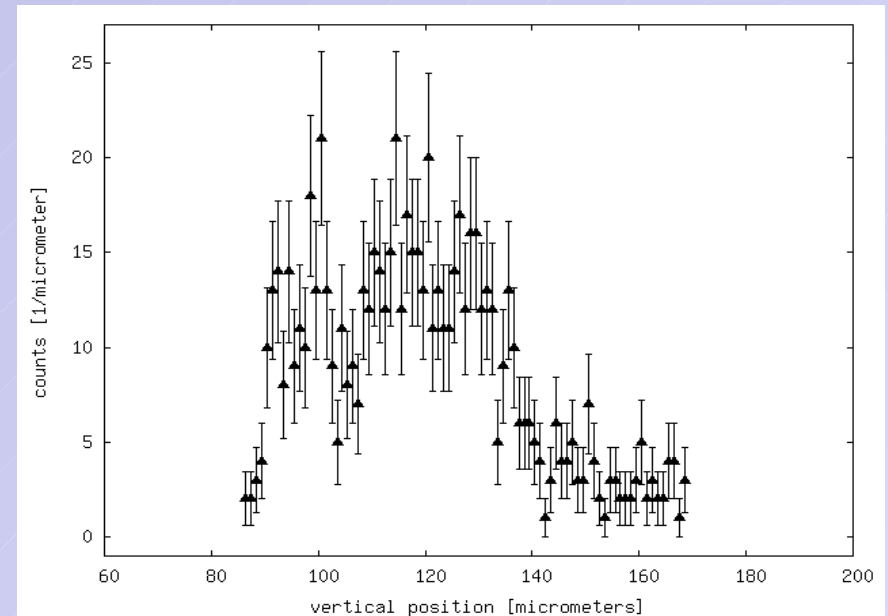
- Nach Datenkorrektur:
Vertikale Auflösung
 $\sim 2 \mu\text{m}$



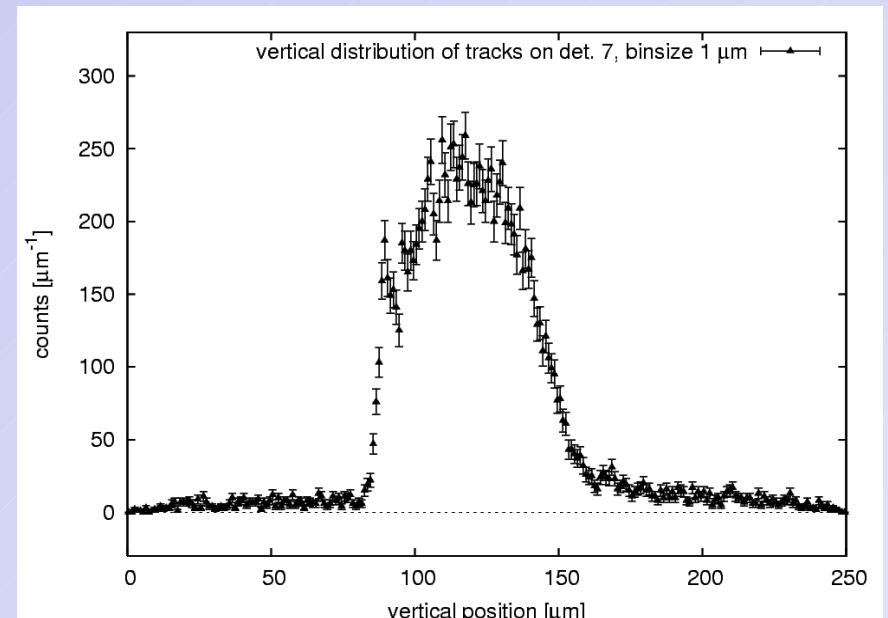
Die Messung

- **Vertikale Verteilung** der Spuren
~ **Betragsquadrat** der Wellenfunktion

$$|\psi(z)|^2 = \left| \sum_n c_n \psi_n(z) \right|^2$$



2004 Daten, S. Nahrwold

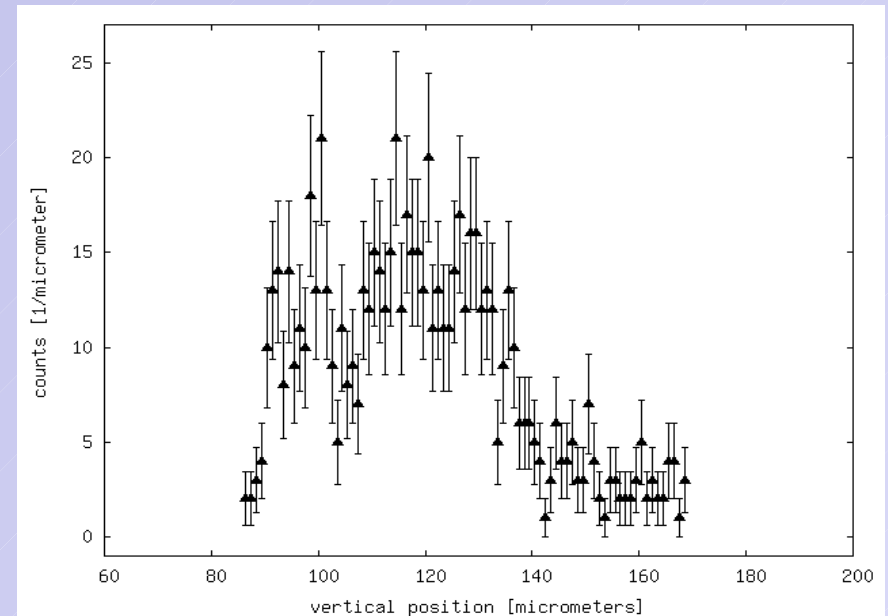
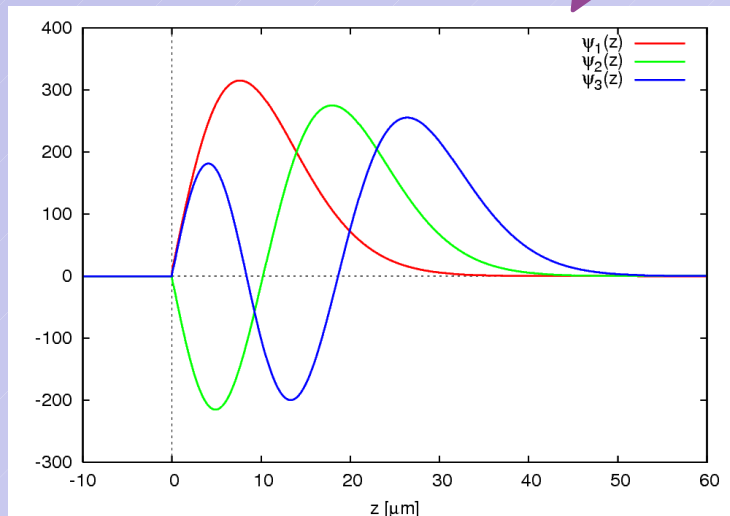


2005 Daten

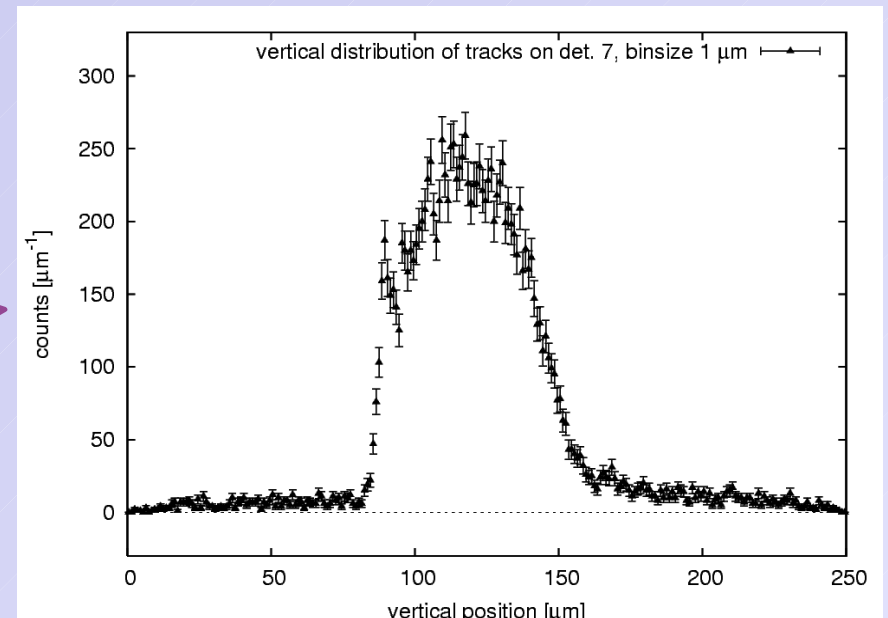
Die Messung

- **Vertikale Verteilung** der Spuren
~ **Betragsquadrat** der Wellenfunktion

$$|\psi(z)|^2 = \left| \sum_n c_n \psi_n(z) \right|^2$$



2004 Daten, S. Nahrwold



2005 Daten

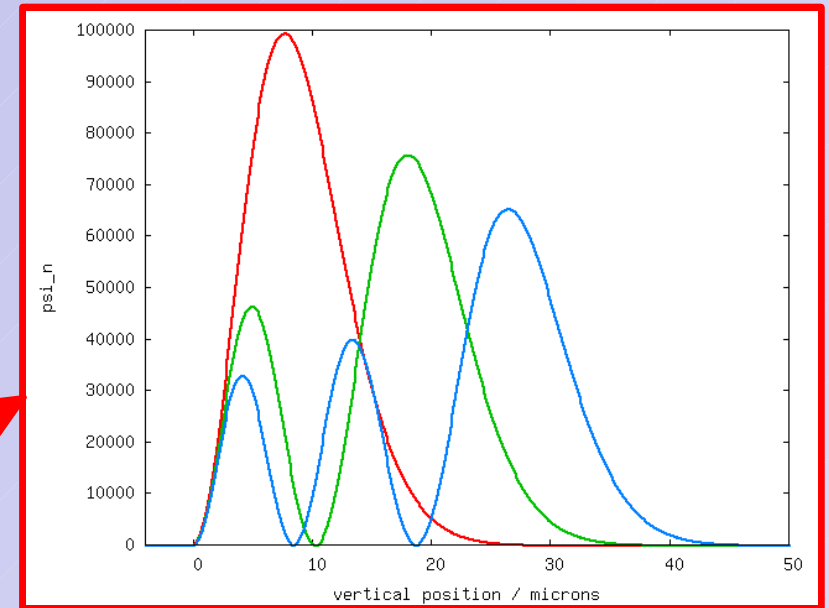
- **Inkohärenter Strahl:**
Wellenfunktion = inkoh.
Überlagerung der ψ_n

$$|\psi(z)|^2 = \sum_n |c_n|^2 |\psi_n(z)|^2$$

Die Messung

- **Inkohärenter Strahl:**
Wellenfunktion = inkoh.
Überlagerung der ψ_n

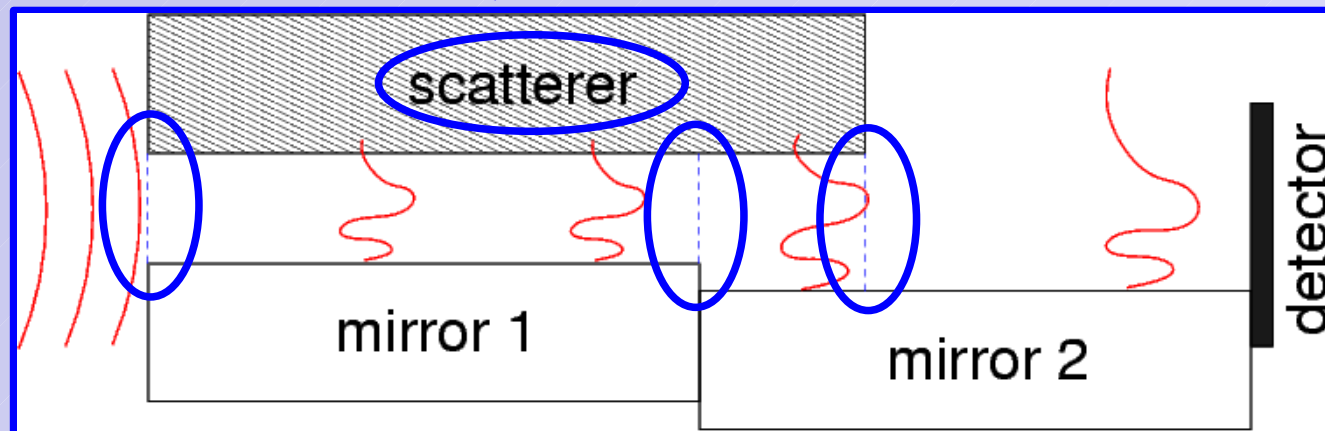
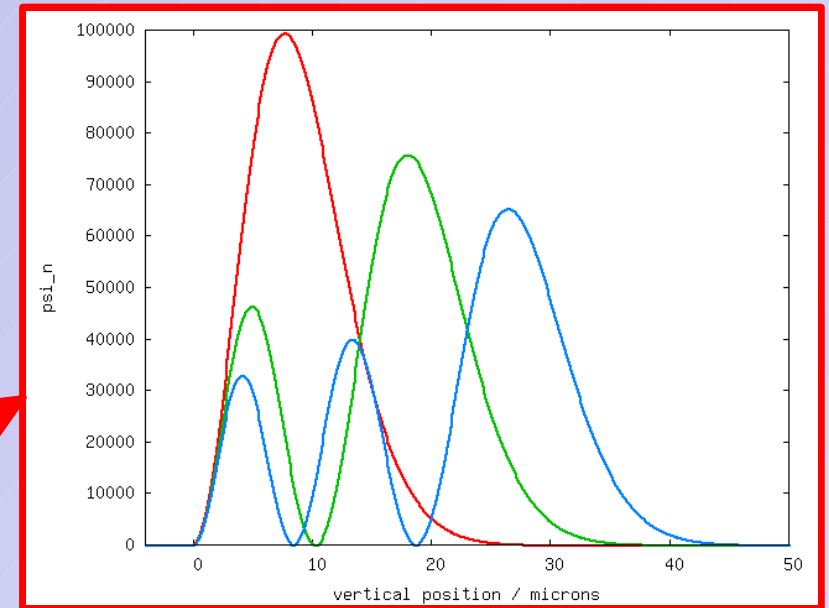
$$|\psi(z)|^2 = \sum_n |c_n|^2 |\psi_n(z)|^2$$



Die Messung

- **Inkohärenter Strahl:**
Wellenfunktion = inkoh.
Überlagerung der ψ_n

$$|\psi(z)|^2 = \sum_n |c_n|^2 |\psi_n(z)|^2$$



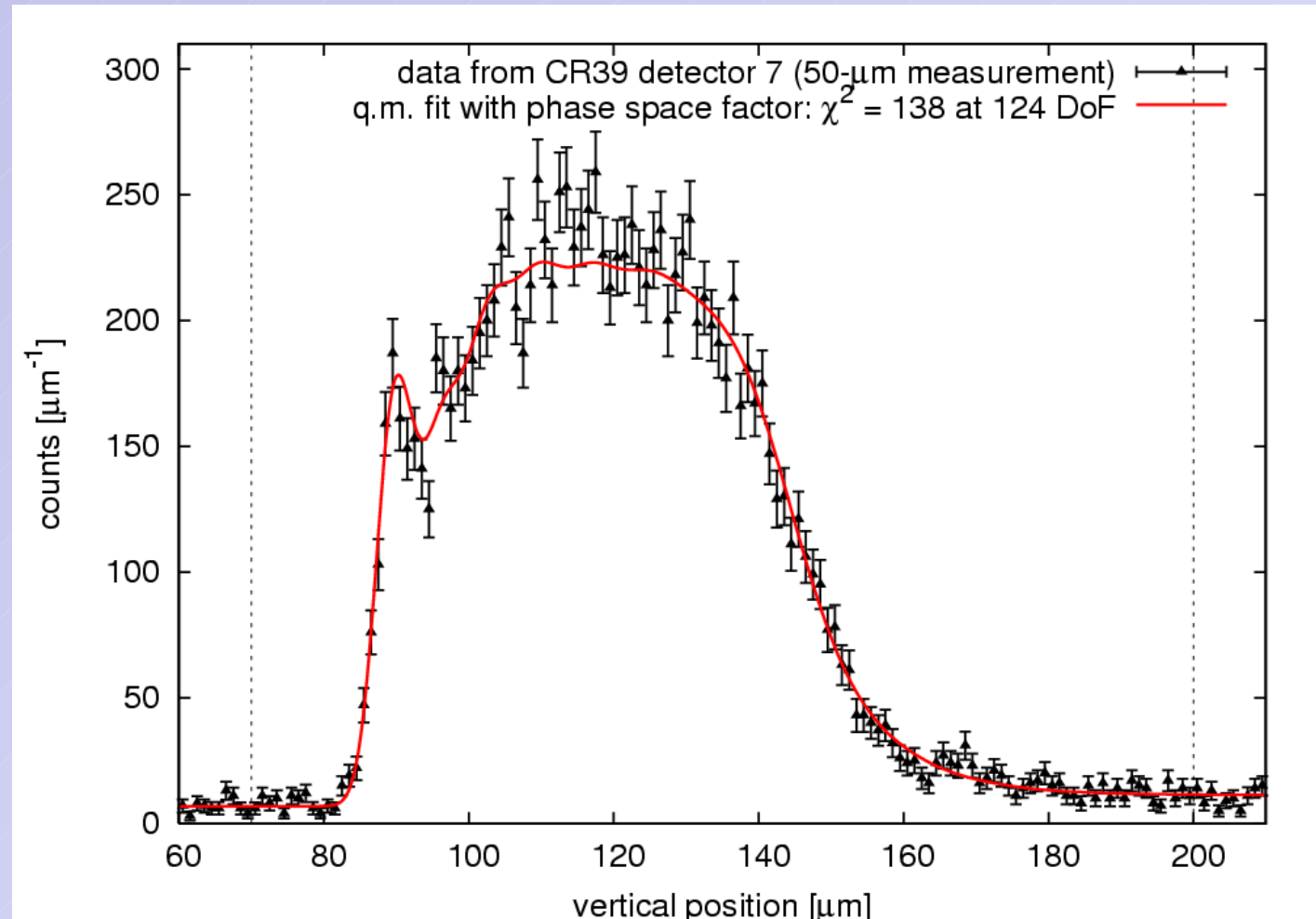
Ergebnis

- Quantenmechanische Modellierung der Neutronentransmission ergibt:
 $\{|c_n|^2\} \approx \{1\%, 9\%, 11\%, 13\%, 16\%, 18\%, 16\%, 7\%, 3\%, \dots\}$

- 7 freie Parameter:

1. Streuerhöhe
2. Streueffizienz
3. Strahldivergenz
4. Det.auflösung
5. Untergrund
6. Offset
7. Norm

$$P(\chi^2) \simeq 19\%$$



Ergebnis

- Vergleich mit **klassischer Modellierung**
(mit äquivalentem Satz an freien Parametern)

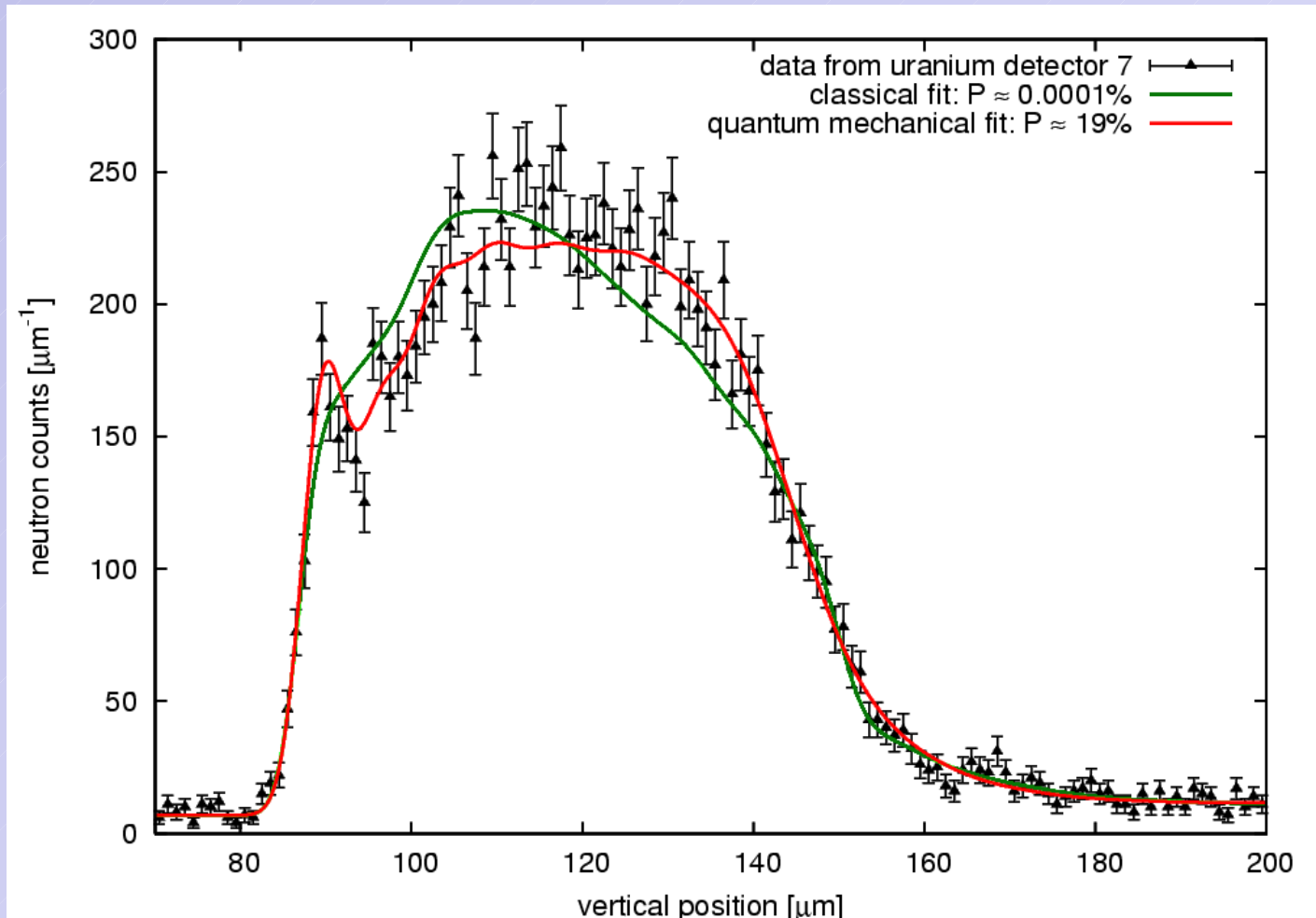
bester q.m. Fit:

$$P(\chi^2) = 19\%$$

vs.

bester klass. Fit:

$$P(\chi^2) = 0.0001\%$$



Das Team

- **Univ. Heidelberg**
H. Abele, G. Divkovic, N. Haverkamp, C. Krantz, D. Mund, S. Nahrwold, F. Rueß, T. Stöferle
- **ILL + Univ. Grenoble (Frankreich)**
V. Nesvizhevsky, A. Petukhov, H. Boerner, L. Lukovac, S. Roccia
- **LPSC, Grenoble (Frankreich)**
K. Protasov
- **PNPI, Gatchina (Russland)**
A. Gagarsky, G. Petrov, S. Soloviev
- **Univ. Mainz**
S. Baeßler
- **SISSA (Italien)**
A. Westphal
- **JINR, Dubna (Russland)**
A. Strelkov
- **LPI, Moscow (Russland)**
A. Voronin
- **Univ. Gent (Belgien)**
J. Schrauwen