



Einführung in die Neutronenstreuung

Seminar Gröbenzell
Marc Janoschek
wired@wired-things.de



Inhalt

- Ziele
- Einführung
- Neutronenquellen
- Instrumente der
Neutronenstreuung



Ziele

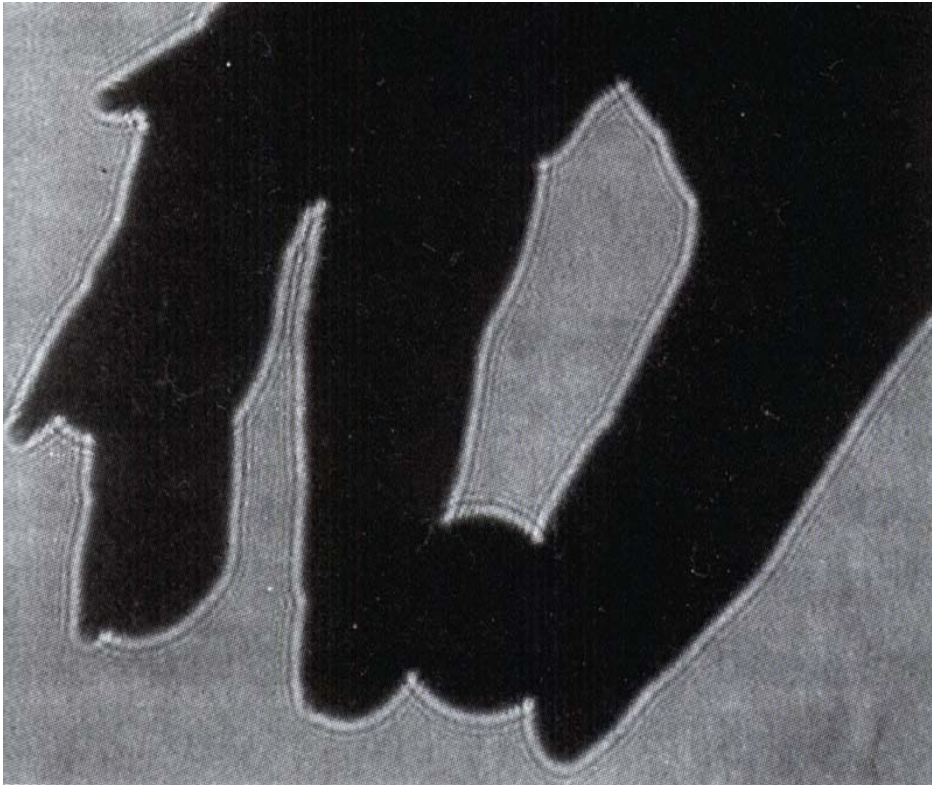
- Wir wollen Materie auf atomaren Größenskalen untersuchen.
- Dazu braucht man eine geeignete Sonde, die in die Materie eindringt und dort mit dieser wechselwirkt.
- Man braucht einen Formalismus, der aus den an der Materie gestreuten Sonden, die Information über die Materie extrahiert.



Einführung

- Lichtbeugung
- Welle-Teilchen-Dualismus
- Neutronstreuung: Parallelen und Unterschiede zur Lichtbeugung

Lichtbeugung

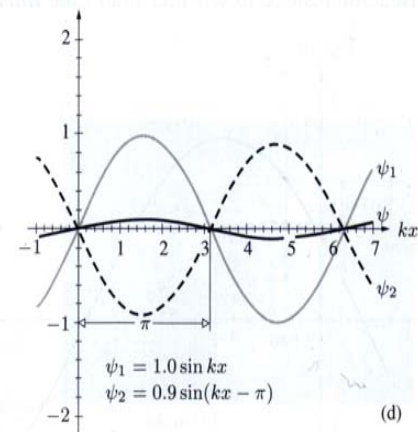
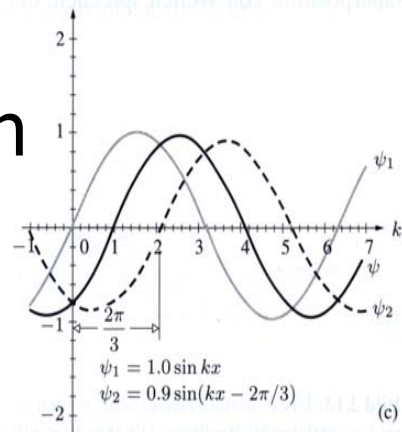
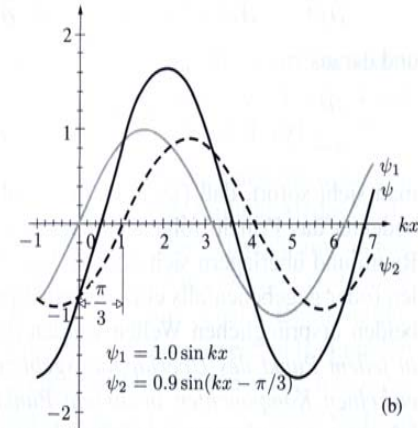
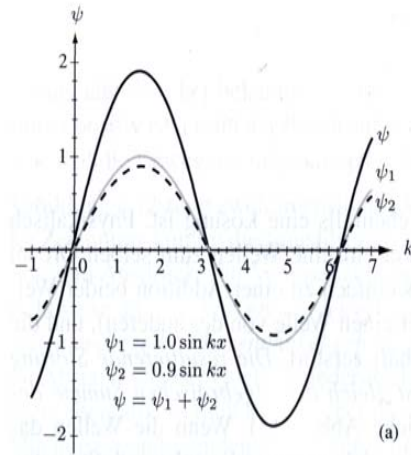


Schatten einer Hand, die ein Geldstück hält, direkt auf einen Polaroid-Film (3000 ASA) geworfen (Quelle: Hecht – Optik)

- Was ist Licht?
- Schattenbild nicht durch „Lichtstrahlen“ erklärbar!
- Schattenbild lässt sich erklären, wenn man Licht Wellencharakter zugesteht
 - > Lichtbeugung
- Licht als Elektromagnetische Welle in bestimmtem Frequenzspektrum

Superpositionsprinzip

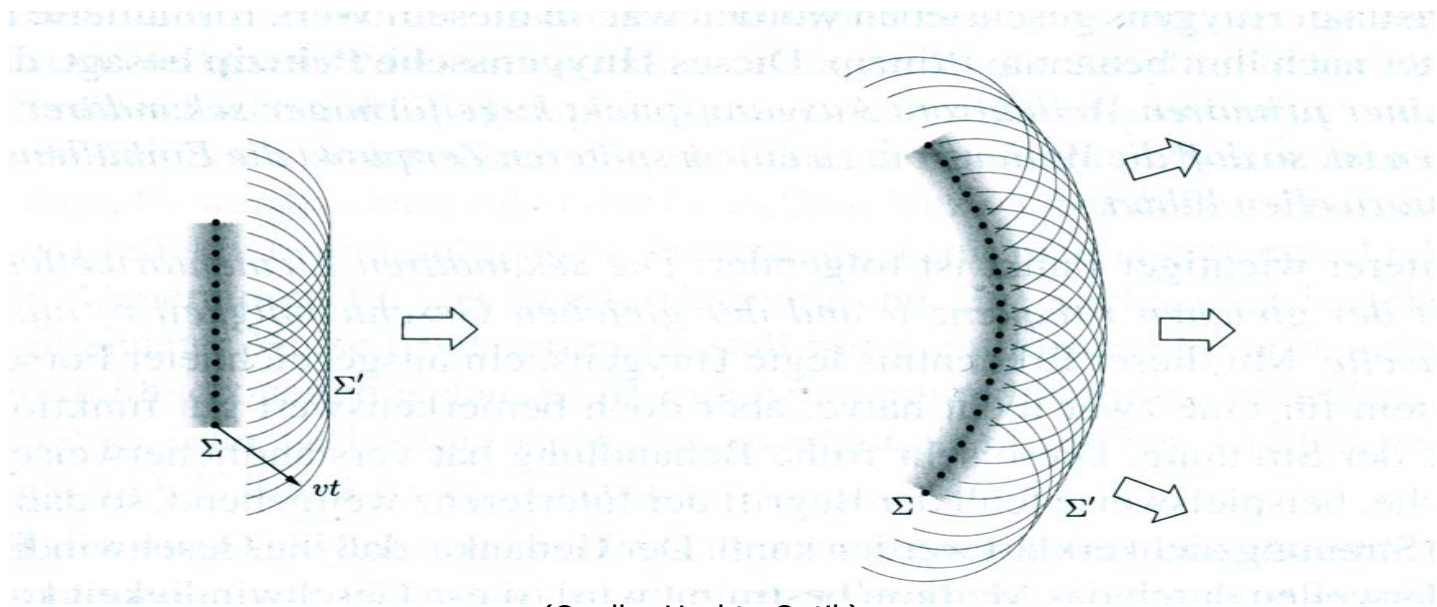
- Zwei verschiedene Lichtwellen, die an einem Punkt übereinander laufen, stören sich nicht!
- Ihre Amplituden an diesem Punkt werden einfach addiert, danach laufen sie ungestört weiter!



Superposition der Wellen ψ_1 (grau) und ψ_2 (gestrichelt) zu ψ
(Quelle: Hecht – Optik)

Huygensches Prinzip

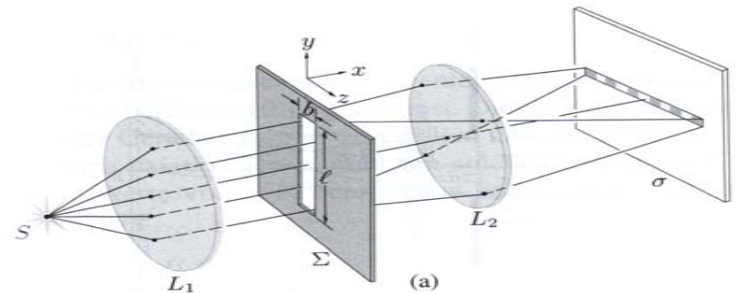
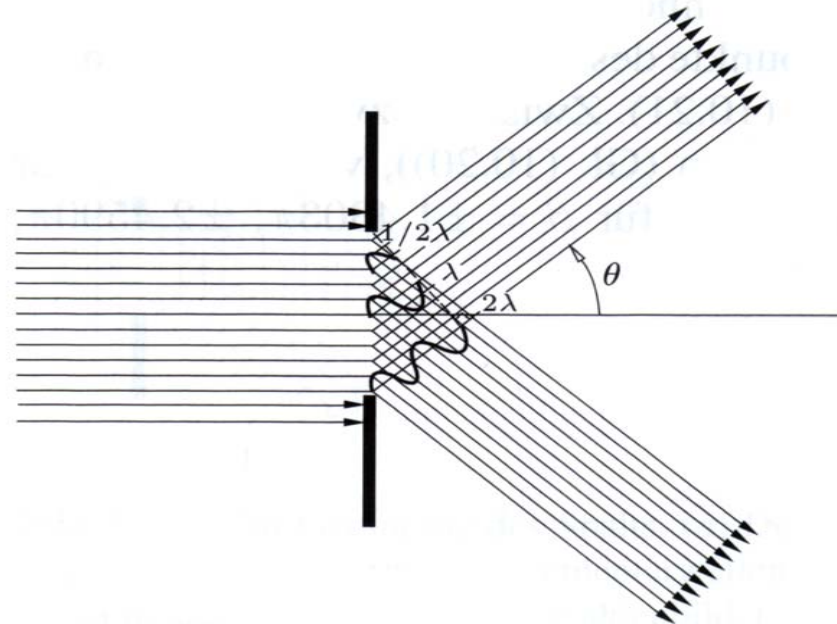
- Nach dem Huygenschen Prinzip pflanzt sich eine Welle so fort, als ob sie aus einer Anordnung von Punktquellen bestünde, deren jede eine Kugelquelle aussendet.



(Quelle: Hecht –Optik)

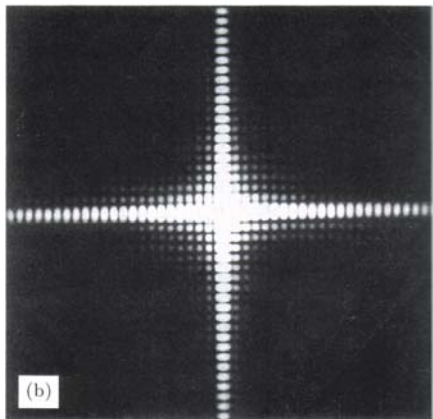
Erklärung der Lichtbeugung

- Auf Grund von Laufwegunterschieden haben Wellen, die von unterschiedlichen Punkten der Blende ausgehen, am Bildpunkt verschiedene Phasen!
- Die Superposition der verschiedenen Wellen am Bildpunkt ergibt damit gegenseitige Auslöschung oder Addition dieser.



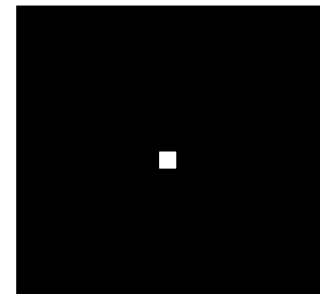
Fouriertransformation

- Behandelt man die Beugungerscheinung mathematisch, so erhält man, dass das beobachtete Beugungsbild die Fouriertransformation der Blendenform ist.
- Aus der Rücktransformation einer gemessenen Beugungsfunktion kann man also das Aussehen der Blende bestimmen.



Beugungsbild

Fouriertrafo
→



Blende



Bemerkungen zur Lichtbeugung

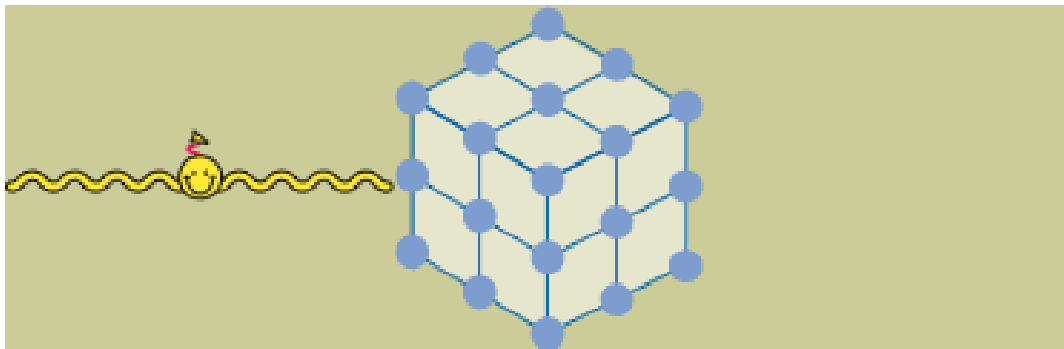
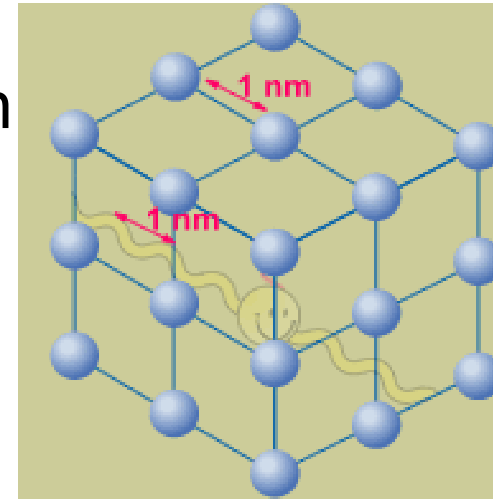
- Beugungserscheinungen treten nur auf, wenn Wellenlänge λ der Wellen in der gleichen Größenordnung ist, wie die Blendenöffnungen.
- Wählt man die Wellenlänge entsprechend, kann man also auch atomare „Blenden“ in Materie auflösen.
- Informationen erhält man in nur ausreichend genau, wenn man monochromatisches Licht verwendet.
- Dies lässt sich auch auf 3D-Blenden (Gitter) erweitern.
- Damit haben wir ein Werkzeug, um Materie auf atomaren Niveau zu untersuchen, und somit sogar einzelne Atome aufzulösen.

Welle-Teilchen-Dualismus

- Jedem Teilchen kann, genauso wie Licht auch als Teilchen betrachtet werden kann (Photonen), eine Wellenlänge zugeordnet werden, die vom Planck'schen Wirkungsquantum h , und dem inversen Impuls des Teilchens abhängt.
- Deswegen werden Materiestrahlen (z.B. aus Neutronen), an Gittern mit entsprechenden Gitterabständen genauso gebeugt, wie Licht.
- Bestätigt durch Versuche von Davisson und Germer, Thomson und Rupp mit Elektronen (1928). Stern machte ähnliche Versuche mit Helium.

Warum Neutronen?

- Thermische Neutronen haben genau die richtige Wellenlänge, um Strukturen in interatomaren Abständen zu untersuchen.
- Neutronen sind elektrisch neutral. Damit dringen sie tief in die zu untersuchende Materie ein, weil sie nicht an elektrischen Ladungen der Elektronen gestreut werden.

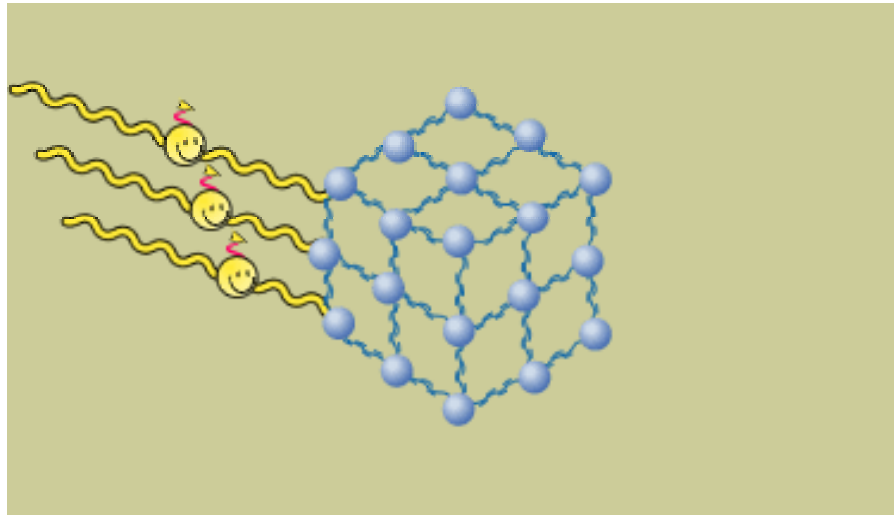


Warum Neutronen?

- Neutronen wechselwirken über die Kernkraft, also direkt mit den Atomkernen. Das ermöglicht die Unterscheidung von Isotopen in der zu untersuchenden Materie.
- Neutronen besitzen ein mit ihrem Spin verknüpft magnetisches Moment. Damit eignen sich auch dazu magnetische Strukturen aufzuklären.

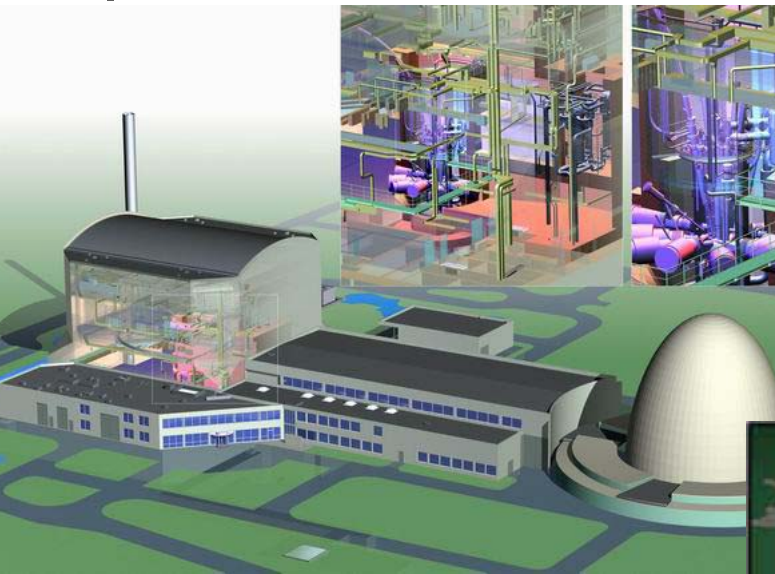
Warum Neutronen?

- Die Energie thermischer Neutronen ist von der gleichen Größenordnung, wie die Energien von Anregungen in Materie, wodurch man zusätzlich Informationen über die Dynamik in dieser gewinnen kann.



(Quelle: <http://www.ill.f>)

Neutronenquellen



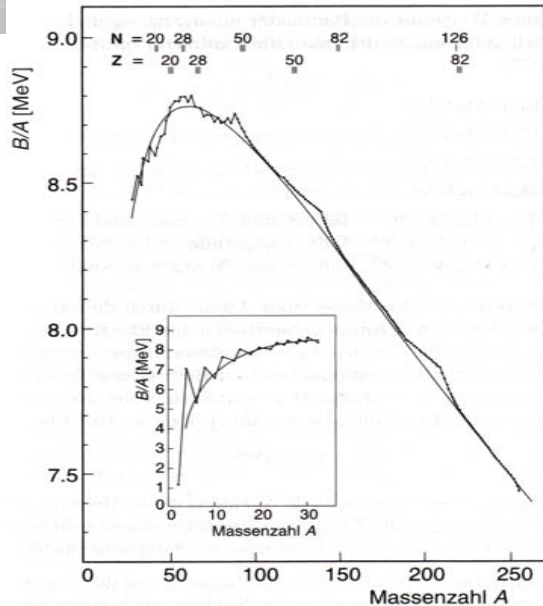
(Quelle: <http://www.frm2.tu-muenchen.de/>)

- Reaktor
- Spallationsquelle
- Unterschiede

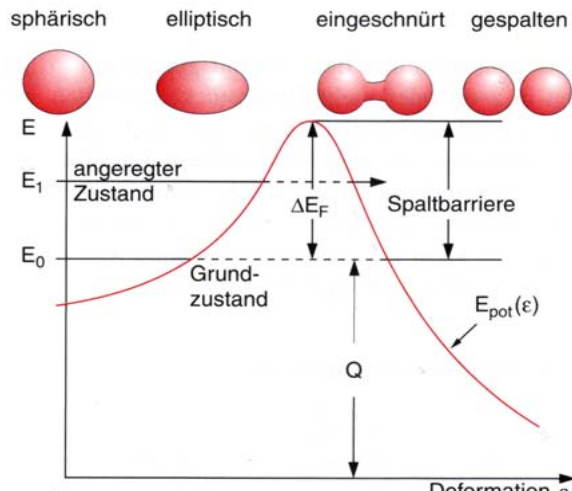


(Quelle: <http://www.sns.gov/>)

Neutronquellen:Reaktor



- Bei der Bindung von Kernbausteinen (Neutronen, Protonen) wird die sogenannte Bindungsenergie frei.
- Energiegewinnung durch Kernspaltung: Die Bindungsenergie für leichtere Kerne (bis zu Eisen) ist größer als für schwere Kerne (z.B. Uran).



- Bei der Spaltung eines schweren Kerns wird genau diese Energiedifferenz frei.
- Dazu muss jedoch erst das Spaltpotential überwunden werden.

(Quelle: Demtröder 4)

Kernspaltung

Tabelle 6.2. Kritische Energie E_c (Höhe der Spaltbarriere), Bindungsenergie E_b des Neutrons im Compoundkern und Spaltschwellenenergie $\Delta E_F = E_c - E_b$ für die kinetische Energie der Spaltneutronen

Target-kern X	Compound-kern X + n	E_c (MeV)	E_b (MeV)	$E_c - E_b$ (MeV)
$^{233}_{92}\text{U}$	$^{234}_{92}\text{U}$	5,8	7,0	-1,2
$^{235}_{92}\text{U}$	$^{236}_{92}\text{U}$	5,3	6,4	-1,1
$^{234}_{92}\text{U}$	$^{235}_{92}\text{U}$	5,8	5,3	+0,5
$^{238}_{92}\text{U}$	$^{239}_{92}\text{U}$	6,1	5,0	+1,1
$^{231}_{91}\text{Pa}$	$^{232}_{91}\text{Pa}$	6,2	5,5	+0,7
$^{232}_{90}\text{Th}$	$^{233}_{90}\text{Th}$	6,8	5,5	+1,3

■ $n + ^{235}\text{U} \rightarrow ^{36}\text{U}^* \rightarrow ^{141}\text{Ba} + ^{92}\text{Kr} + 3n + 200\text{MeV}$
(z.Vgl. Verbrennung 1 C-Atom 13,5 eV)

■ Bei U238 reicht die freiwerdende Bindungsenergie nicht, es muß auch zusätzlich kinetische Energie des Neutrons verwendet werden (schnelle Neutronen).

- Die Energie zum Überwinden der Spaltbarriere kann die Bindungsenergie eines zusätzlich angelagerten Neutrons sein (induzierte Spaltung).

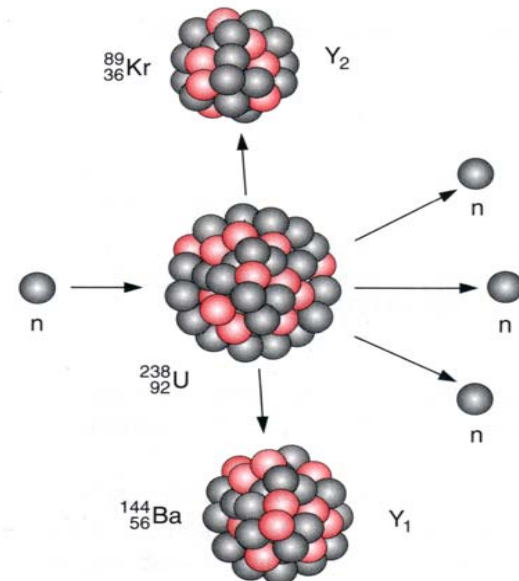


Abb. 6.15. Schematische Darstellung der durch Neutronen induzierten Kernspaltung

Kettenreaktion

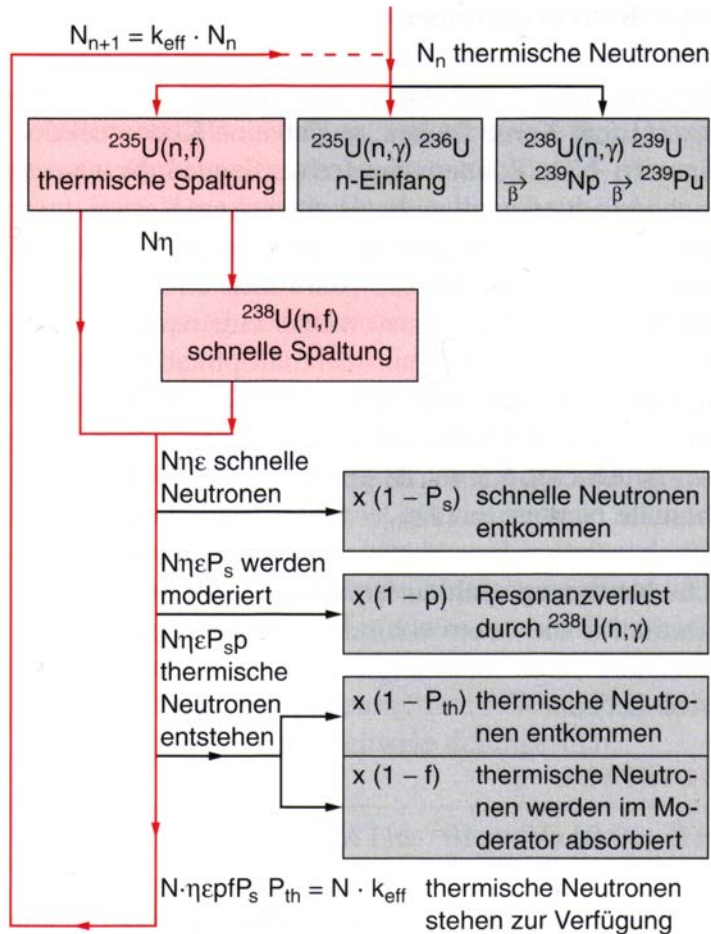
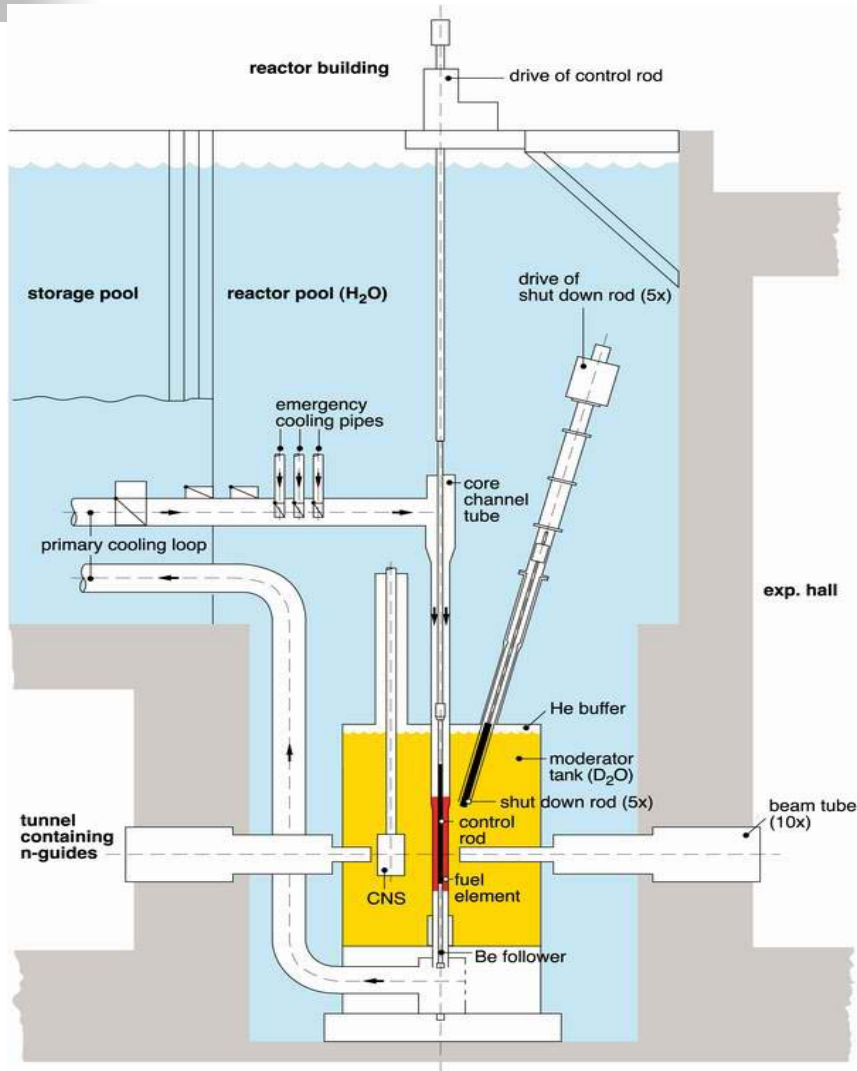


Abb. 8.19. Lebenszyklus von N_n thermischen Neutronen von einer Spaltgeneration zur nächsten. Nach T. Mayer-Kuckuk: *Kernphysik* (Teubner, Stuttgart 1992)

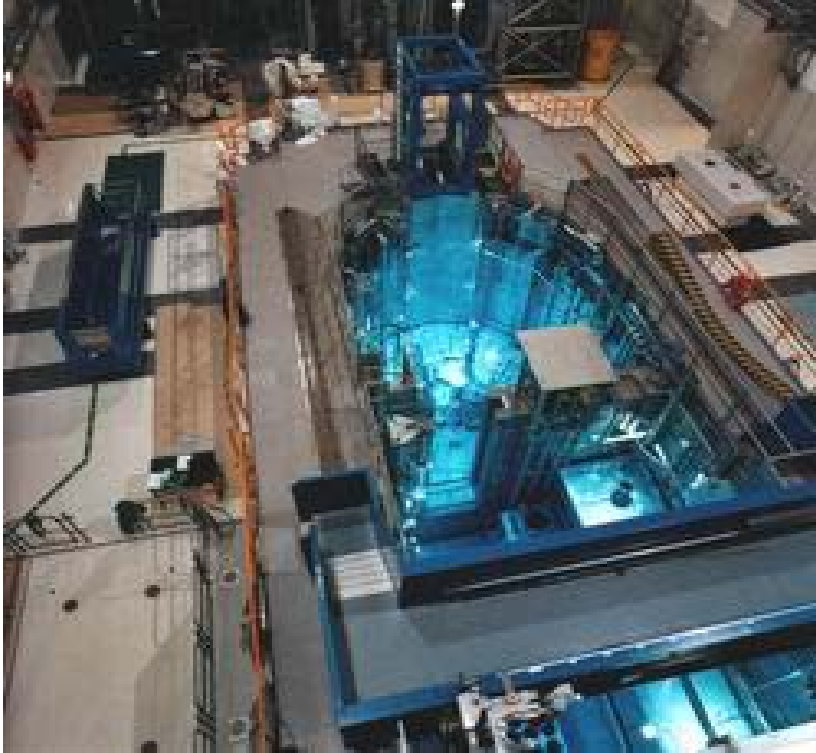
- Zur Energiegewinnung muss die Spaltreaktion als Kettenreaktion immer wieder ablaufen.
- Bei Spaltung entstehende Neutronen müssen nächste Spaltung induzieren.
- Langsame (thermische) lösen mehr Reaktionen in ^{235}U als schnelle: Moderation.
- Genügend Neutronen um Kettenreaktion am laufen zu halten: kritische Masse

Unterschiede zum AKW



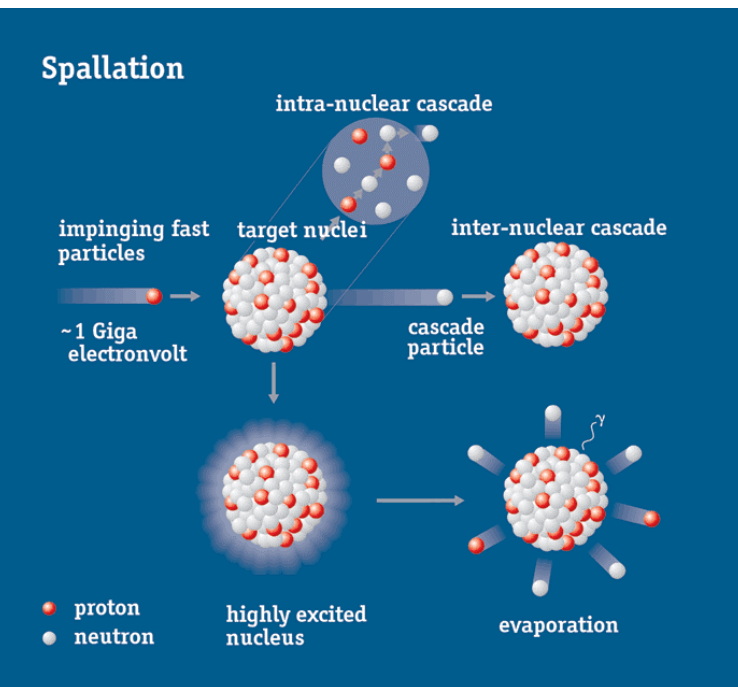
- Kein Interesse an Energiegewinnung: Sehr geringe Leistung! (FRM-II: 20MW, AKW 1GW)
- Möglichst hoher thermischer Neutronenfluss: Brennelement so klein wie möglich! (deswegen hochangereichert)

Beispiel: FRM-II



- Neutronenflussdichte: $8 \times 10^{14} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
- Thermische Leistung: 20MW
- Kernvolumen: 17.6 Liter
- Brennelement: 93% ^{235}U (HEU)
- Flugzeugabsturzsicher, Außenwände 1,8m Stahlbeton (Boing 747!)
- Selbst bei Kernschmelze würde es nicht zum Gau kommen!
- Baukosten: 435 Mio. €
- Betriebskosten: 45 Mio. €/a

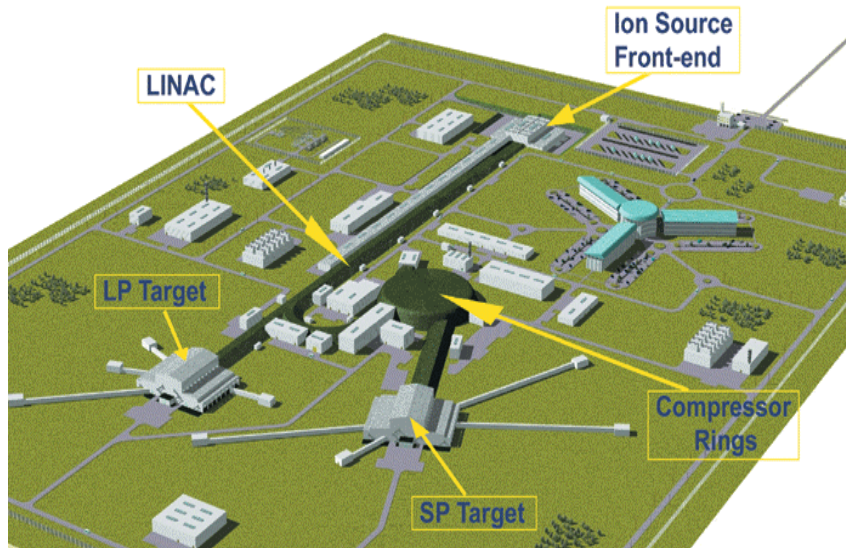
Neutronenquellen: Spallation



(Quelle: <http://www.ess-europe.de/>)

- Hier werden Neutronen von schweren Kernen abgedampft.
- Man beschießt die Kerne dazu mit hochenergetischen Protonen aus einem Linearbeschleuniger.
- Die kinetische Energie der Protonen bringt den Kern in einen hochangeregten Zustand. Beim Zurückfallen in den Grundzustand werden Neutronen emittiert.
- Der entstehende Neutronenstrahl ist gepulst. D.h. Experimente müssen anders ausgerichtet werden. Für einige Experimente ist das günstiger, für andere ziemlich schlecht.

Beispiel: ESS



(Quelle: <http://www.ess-europe.de/>)

- European Spallation Source, noch nicht gebaut.
- Beschleunigerleistung: 5MW
- Protonenenergie: 1,334GeV
- Max. Fluss in Puls:
 $1,3 \times 10^{17} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
- Durchschnittsfluss:
 $3,1 \times 10^{14} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
- Wiederholungsrate 50 bzw.
16 2/3 Hz
- Baukosten: 1,5 Mill. €
- Betriebskosten:
142 Mio. €/a



Instrumente

- Grundlegende Elemente
 - Neutronenleiter
 - Bragg-Beugung
 - Gitteranregungen
 - n-Detektor
- Diffraktometer
- Time-of-Flight Spectrometer (TOF)
- Dreichachsen-Spektrometer (DAS)
- Tomo-/Radiographie
- Positronenquelle
- Spin-Echo(SE)/Neutronen-Resonanz-Spin-Echo(NRSE)
- 3D-Polarisationsanalyse

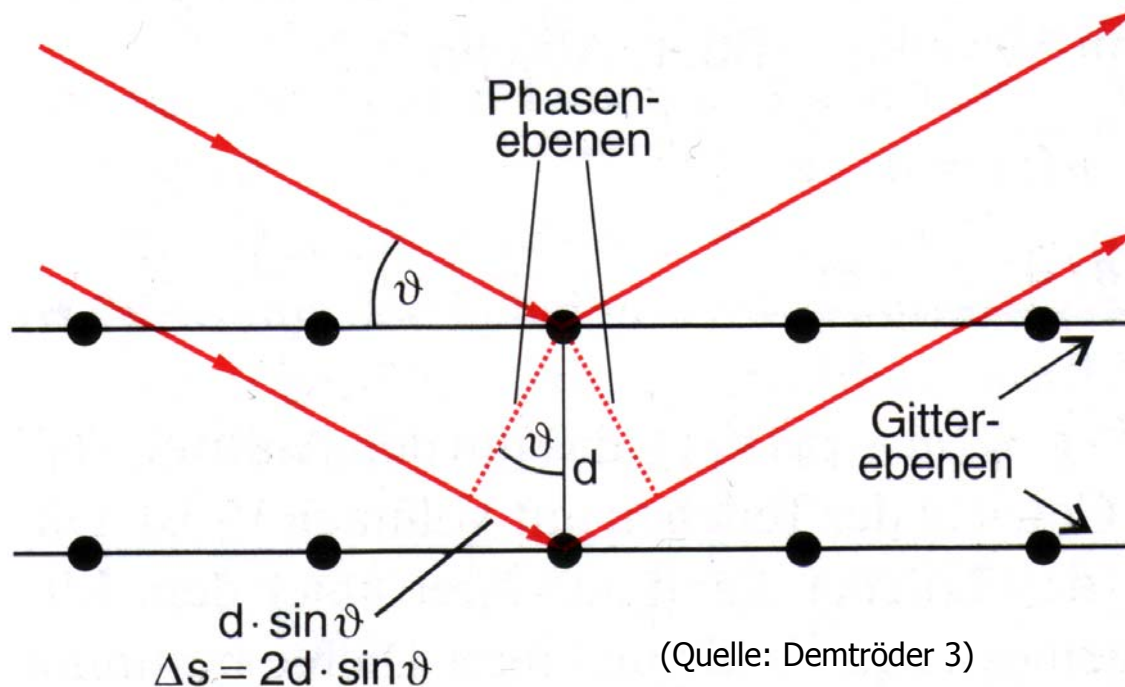
Neutronenleiter



(Quelle: <http://www.frm2.tu-muenchen.de/>)

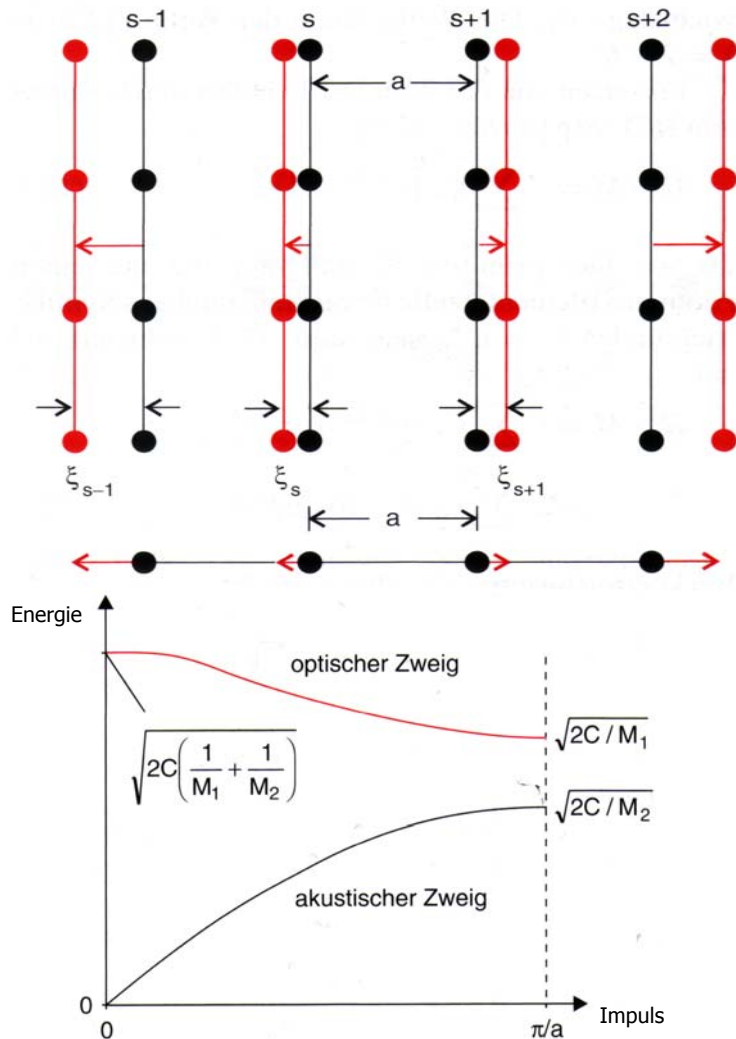
- Leiten Neutronen zu den Experimentierplätzen.
- Funktionsprinzip: Totalreflexion, ähnlich wie optischer Leiter (Glasfaserkabel).
- Hier: Reflexion an Nickel. Auch in mehreren Schichten übereinander.
- Allerdings sind die möglichen Winkel der Reflexion viel kleiner: $<1^\circ$ (Wellenlängenabhängig)
- Deswegen Girlanden-Streuung; Leiter sind mit großen Radius gekrümmt (einige Kilometer).
- So kann auch ein passendes Wellenlängenband vorselektiert werden.

Bragg-Beugung



- Beugung an Kristallebenen eines Einkristalls
- Durch Interferenz, werden in ausgezeichnete Richtungen nur diskrete Wellenlängen reflektiert.
- Bragg-Gleichung:
$$n\lambda_n = 2d \sin(\theta_n)$$

Gitteranregungen



- Die Atome in einem Festkörper können gegeneinander schwingen.
- Da diese schwingenden Atome alle miteinander gekoppelt sind (Bindung), können sie nicht frei schwingen, sondern nur in bestimmten Moden, d.h. nur bestimmte Energien und Impulse sind erlaubt.
- Dies wird in einer Dispersionsrelation dargestellt (Auftragung von Energie gegenüber Impuls).

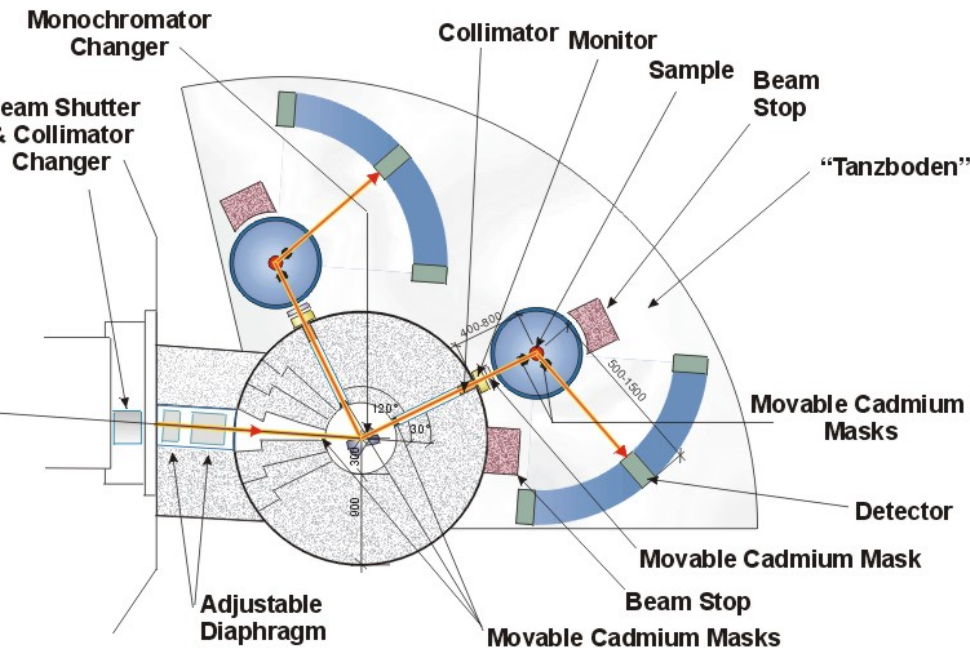
(Quelle: Demtröder 3)

n-Detektor



- Neutronen sind wegen ihrer Ladungsneutralität schwer nachzuweisen.
- Oft ist Neutronendetektor ein Gasdetektor.
- In diesem befindet sich ^3He .
- Neutronen werden über die Reaktion
 $^3\text{He} + n \rightarrow ^3\text{H} + p + 765 \text{ keV}$.
- Die Energie wird als elektromagnetische Strahlung (Photonen) abgegeben, und kann detektiert werden.

Diffraktiometer

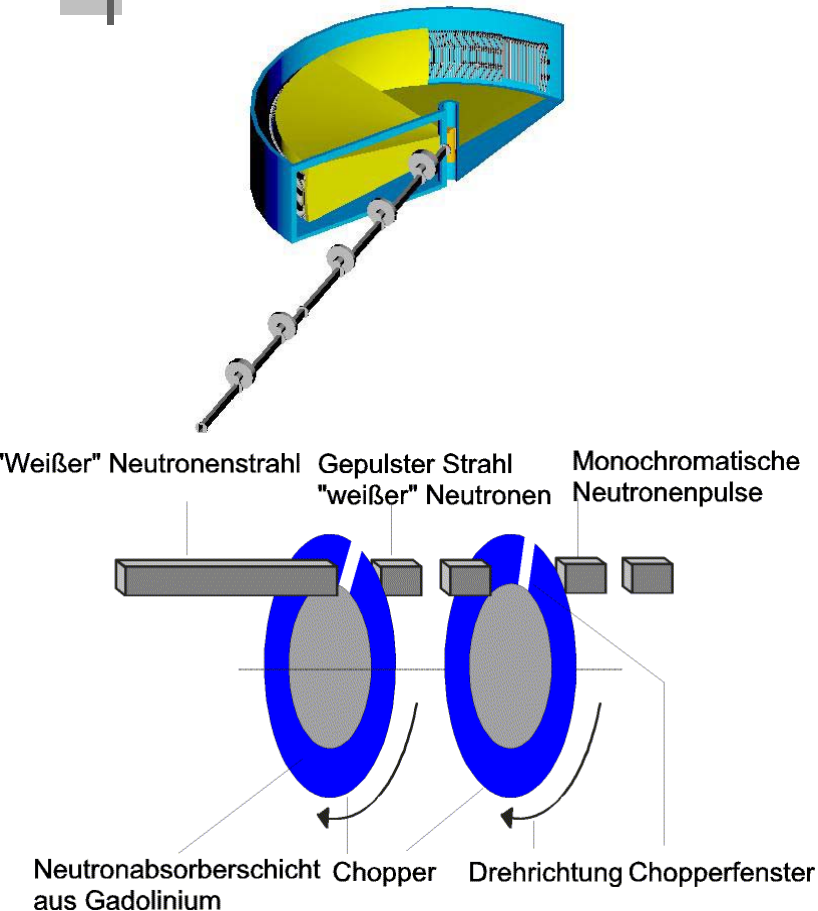


STRESS-SPEC Materialforschungs- Diffraktometer

(Quelle: <http://www.frm2.tu-muenchen.de/stresspec/index.html>)

- Monochromatisierung des X -Strahls.
- Elastische Streuung des Strahls an Probe.
- Messung der Intensitäten in unterschiedlichen Richtungen.
- Rücktrafo -> Infos über Kristallgitter.
- Wie sieht Gitter aus? Symmetrien? Oder bei bekannten Gitter: Gitterfehler, Materialdehnung, -abnutzung.
- Z.B. ICE-Radreifen!
- Auch möglich für Pulverproben, Flüssigkeiten mit langreichweitiger WW, bzw. quasielastische Diffusionsmessung.

Time-of-Flight-Spektrometer

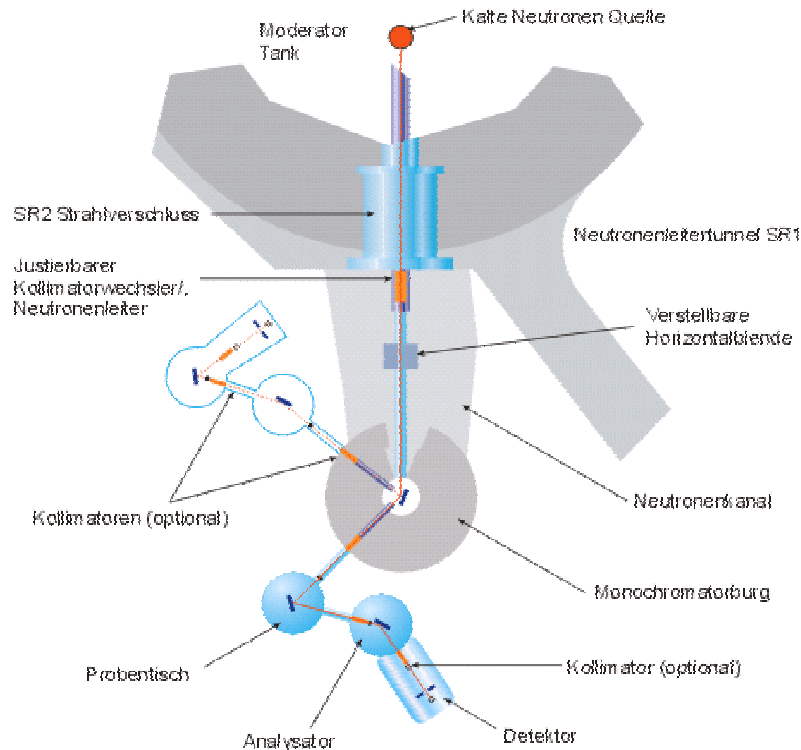


- Messung quasielastischer und inelastischer (Gitteranregung) Prozesse.
- Strahl wird durch Chopper gepulst und monochromatisiert.
- Nach der Streuung an der Probe werden, in möglichst großem Winkelbereich, die Neutronen detektiert, und durch Vgl. mit Eingangskanal Flugzeiten gemessen.
- Flugzeit ist proportional zur an die Probe übertragene Energie. (sehr gute Energieauflösung)
- Messung von Gitteranregungen in Probe.

Hochauflösendes Flugzeitspektrometer TOFTOF

(Quelle: http://www.frm2.tu-muenchen.de/instrumente_allgemein/index.html)

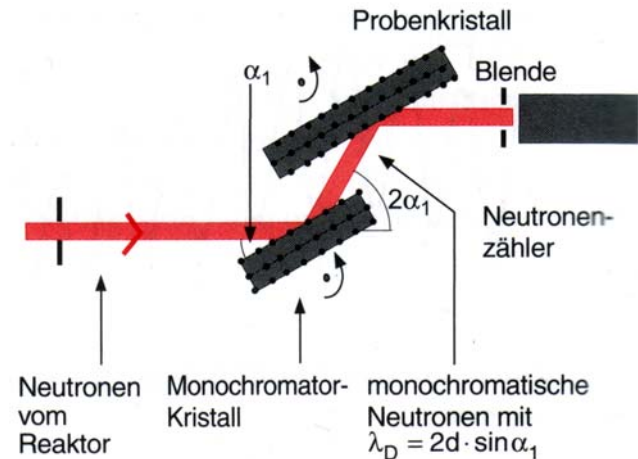
Dreiaachsen-Spektrometer



Panda Dreiachsenspektrometer

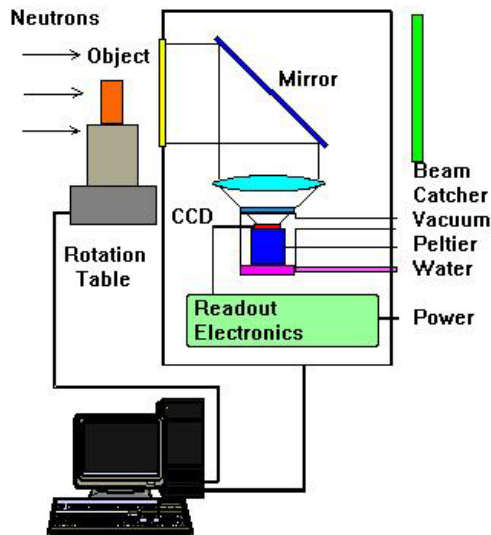
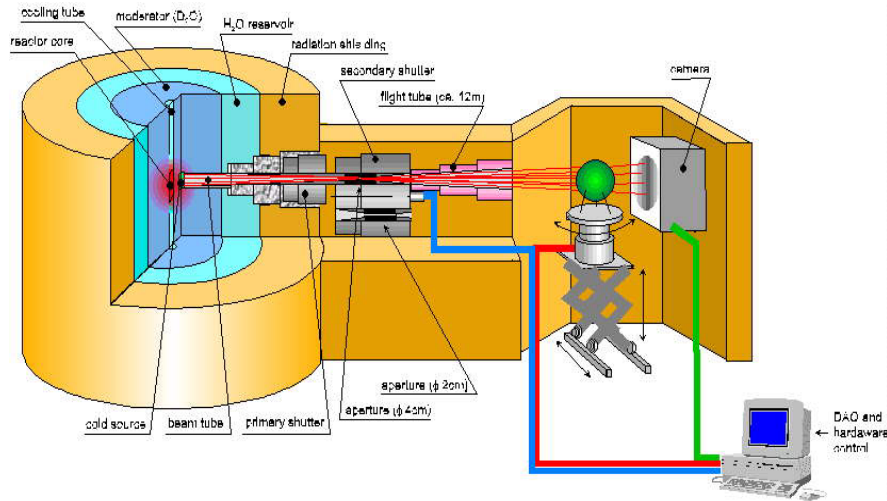
(Quelle: <http://www.frm2.tu-muenchen.de./panda/index.html>)

- Messung inelastischer Prozesse.
- Drei-Achsen: Monochromator-Probe-Analysator.
- Monochromator u. Analysator sind Kristalle, die Wellenlänge über Bragg-Beugung auswählen.
- Sehr gute Impuls-Auflösung.
- Mäßige Energieauflösung.



(Quelle: Demtröder 3)

Tomo-/Radiographie



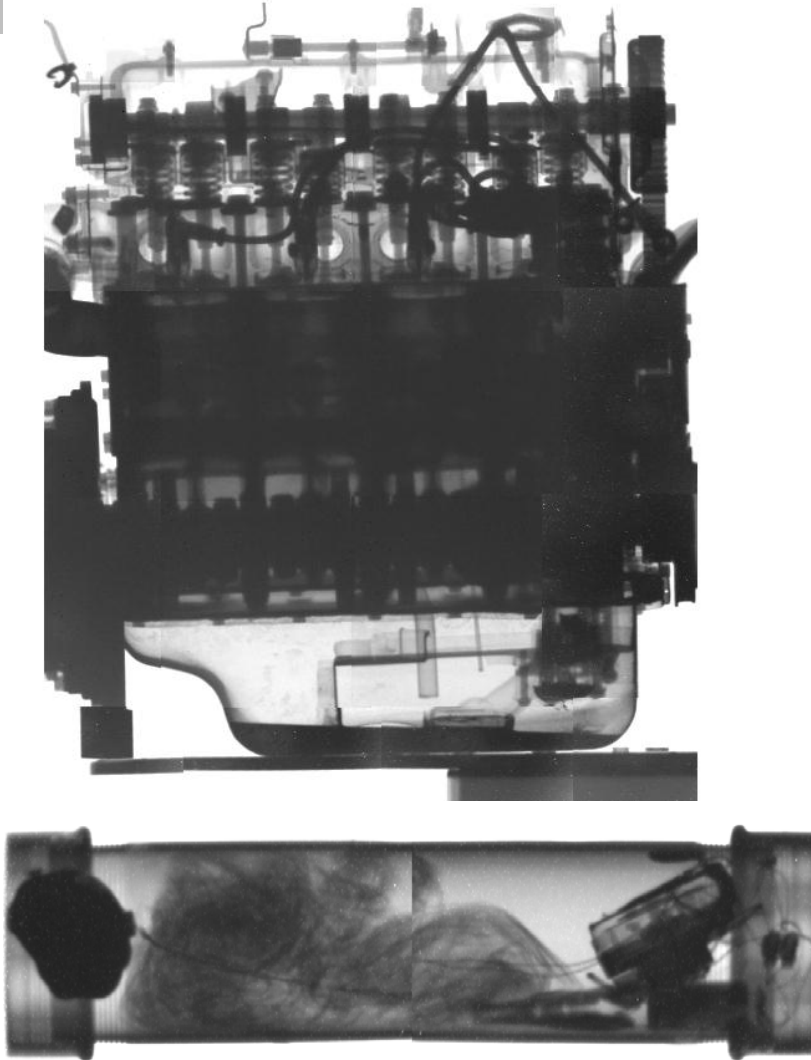
- Neutronen werden benutzt, um Proben zu durchleuchten.
- Neutronen lösen nach Transmission durch Probe in einem Szintillator (Gemisch aus silberdotierten Zinksulfid und Lithiumfluorid) folgende Reaktion aus:

$$n + \text{Li} \rightarrow \text{H} + \text{He} + 4,78 \text{ MeV}$$
- Die Reaktionsprodukte lösen durch Stoßionisation in Zinksulfid im Mittel $1,75 \times 10^5$ Photonen aus.
- Die Photonen werden in einem CCD-Chip detektiert und zu einem Bild zusammengefügt.

ANTARES

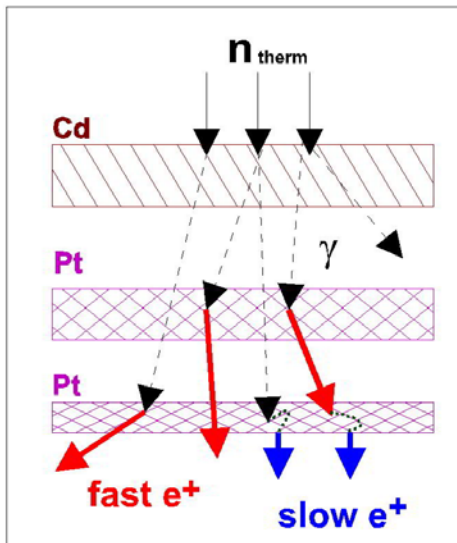
(Quelle: http://www1.physik.tu-muenchen.de/lehrstuehle/E21/e21_boeni.site/antares/web_new/main.htm)

Tomo-/Radiographie



- Da Transmissionskoeffizienten von verschiedenen Kernen extrem unterschiedlich sind sehr kontrastreiche Bilder.
- Aufnahmen aus verschiedenen Winkel erlauben 3D-Aufnahme(Tomographie).
- Heutige CCD-Chips lassen sich so schnell auslesen, dass Radiographie sogar zeitaufgelöst möglich ist.

Positronenquelle



n - capture

γ - emission

$\gamma \rightarrow e^+e^-$

$\gamma \rightarrow e^+e^-$

e^+ - moderation

e^+ - emission

(Quelle: <http://http://www.frm2.tu-muenchen.de/positron/index.html>)

- Neutronen werden in Cadmium absorbiert.
- Dabei entstehen Photonen.
- Diese erzeugen in Platin Elektron-Positron-Paare.
- Positronen werden genutzt um Festkörperphysik zu machen.
- Vorteil: Aufgrund ihrer positiven Ladung sind sie besonders geeignet Defekte in Festkörpern aufzulösen, die durch positive geladene Ionen entstehen.

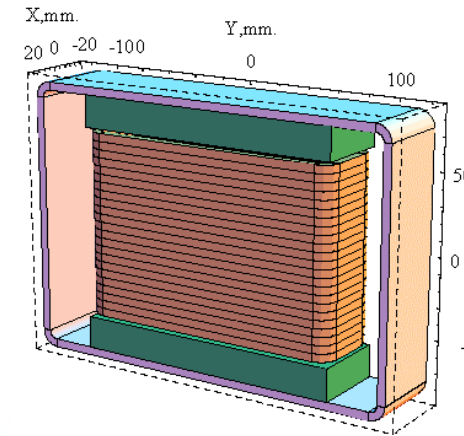
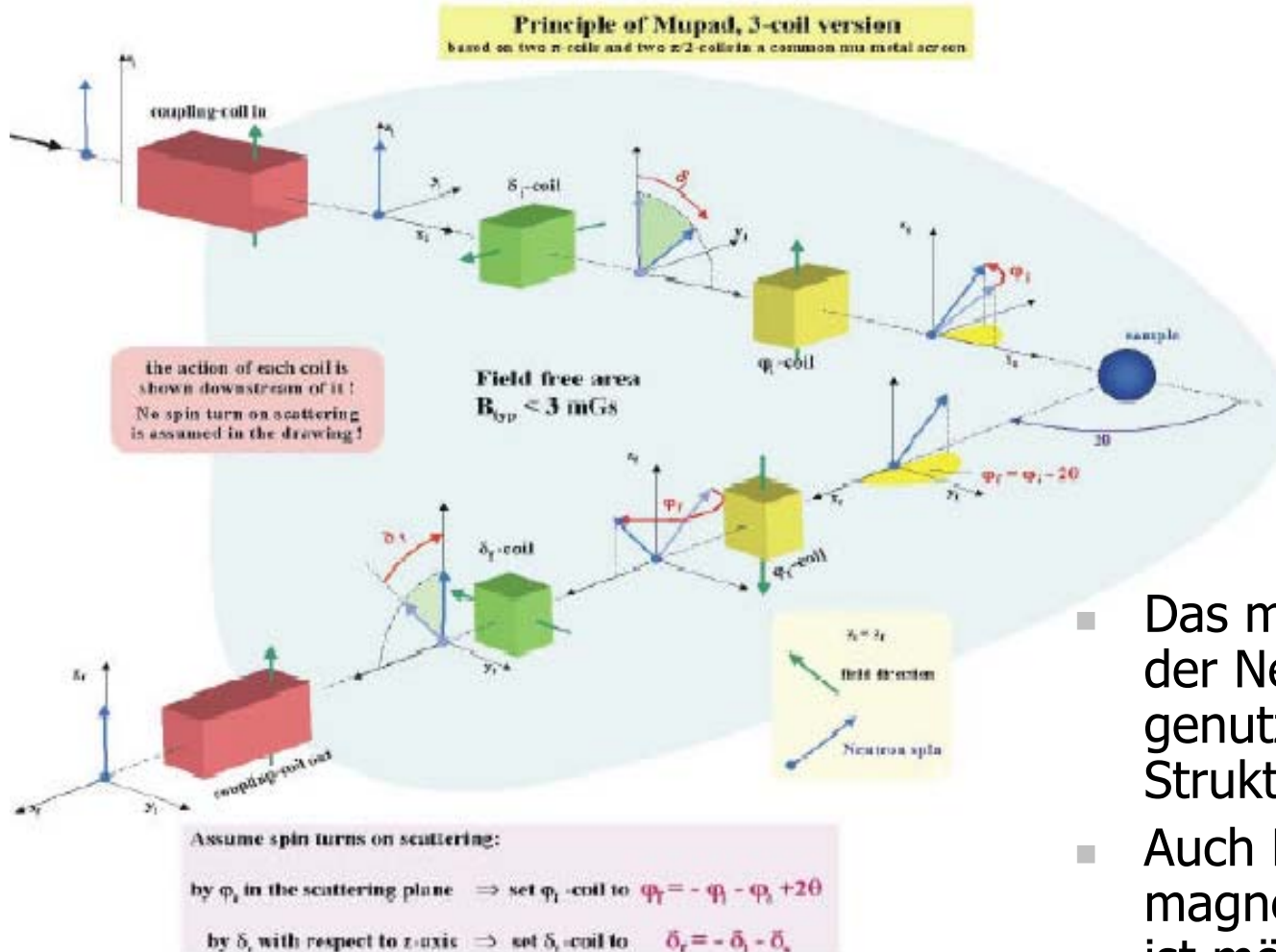
Spin-Echo



ZETA am ILL

- Beim Spin-Echo wird der Spin der Neutronen als weiterer Freiheitsgrad genutzt, indem der Energieübertrag auf die Probe kodiert wird.
- Sehr genaue Messung von Energieüberträgen möglich.
- Prinzip: s.Film

3D-Polarisationsanalyse



- Das magnetische Moment der Neutronen, wird hier genutzt, um magnetische Strukturen aufzuklären.
- Auch Messung magnetischer Anregungen ist möglich.



Literatur und Bilder

- Hecht: Optik
- Demtröder: Experimentalphysik 3 und 4
- Schwabl: Quantenmechanik
- Squires: The Theory of thermal neutron scattering
- <http://www.frm2.tu-muenchen.de/>
- <http://www.ill.fr/>
- <http://www.sns.gov>
- <http://www.ess-europe.de>