

Polarisierte Elektronen

- Allgemeines
- Verwendung
- Erzeugung
- Nachweis



H. Waldmann

Allgemeines

Def:

Die Spins (Eigendrehimpuls) eines Elektronenensembles haben eine bevorzugte Richtung.

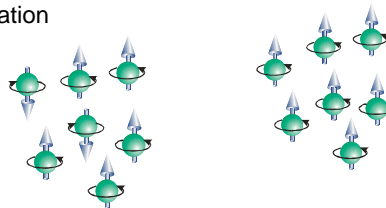
Wenn alle Spins die gleiche Richtung haben \Rightarrow totale Polarisation

Ansonsten \Rightarrow partieller Polarisation

$$P = \frac{N \uparrow - N \downarrow}{N \uparrow + N \downarrow}$$

P: Polarisation

N: Anzahl



Verwendung

- Oberflächenmagnetismus in der Festkörperphysik (SPLEED)
- Teilchen-Austausch-Prozesse in der Atomphysik
- Bestimmung von Formfaktoren in der Kernphysik
- Spin-Strukturen in der Hochenergiephysik

Erzeugung

- Welche Methoden „gehen“ nicht?
- Stoßionisation polarisierter He*-Atome (He- Afterglow)
- Sokolov-Ternov-Effekt bei Speicherringen
- Feld- und Photoemission aus ferromagnetischen Schichten (z.B. EuS)
- **Photoionisation aus Verbindungs-Halbleitern** (z.B. GaAs)
- uvm.

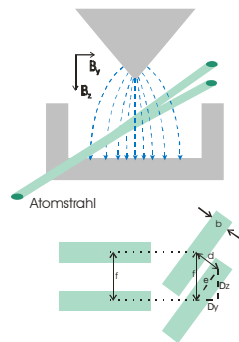
Welche Methoden „gehen“ nicht?

Polarisationsfolien

Funktioniert nur bei Photonen

Stern-Gerlach Filter

Funktioniert nur bei ungeladenen Atomstrahlen



Mag. WW $F_z^m = \pm \mu \frac{\partial B_z}{\partial z}$ $\Delta F_z^m = 2 \frac{e\hbar}{2m} \frac{\partial B_z}{\partial z}$

Lorentzkraft $\vec{F}_L = q(\vec{v} \times \vec{B})$ $F_z^L = -evB_y$ $\Delta F_z^L = -ev\Delta B_y = -ev \frac{\partial B_y}{\partial y} \Delta y = ev \frac{\partial B_z}{\partial z} \Delta y$

$\tan \varepsilon = \frac{\Delta y}{\Delta z} > \sin \varepsilon = \frac{d}{f}$

$\frac{f}{\Delta z} \Delta y = \frac{\Delta F_z^m}{\Delta F_z^L} \Delta y = \frac{\hbar}{mv} = \frac{\hbar}{p} = \frac{\lambda}{2\pi} > d > b$

$\Delta p_b \ll p \quad b \cdot \Delta p_b \approx \hbar \Rightarrow b \approx \frac{\hbar}{\Delta p_b} < \frac{\hbar}{p} \text{ bzw. } p < \Delta p$

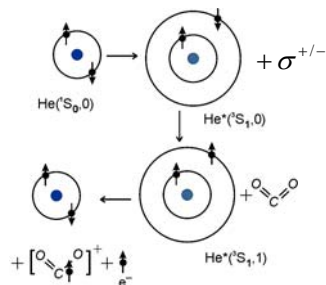
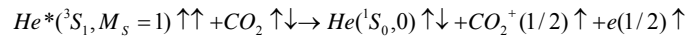
Stoßionisation polarisierter He*-Atome

Prinzip:

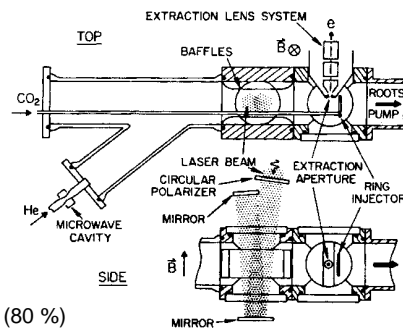
Erzeugung metastabiler He*-Atome durch eine Gasentladung

Polarisierung durch optisches Pumpen mit zirkular polarisierten Photonen $\sigma^{+/-}$

Emission von polarisierten Elektronen durch Stöße mit CO₂-Molekülen



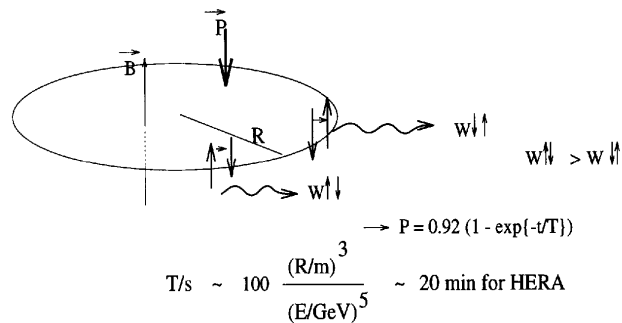
P=0.8 (80 %)



Sokolov-Ternov-Effekt

Prinzip:

In Speicherringen werden Elektronen durch die Synchrotronstrahlung polarisiert. Ein Emissionsprozess, der mit einem Spin-Flip von "up" nach "down" begleitet wird, ist etwas wahrscheinlicher als umgekehrt. \Rightarrow Anreicherung von polarisierten Elektronen mit Spin "down". (LEP, HERA)



Feld- und Photoemission aus ferromagnetischen Schichten

Prinzip:

Durch Anlegen eines elektrischen Feldes oder durch Einstrahlung von Photonen werden unterhalb des Curie-Punktes pol. Elektronen emittiert.

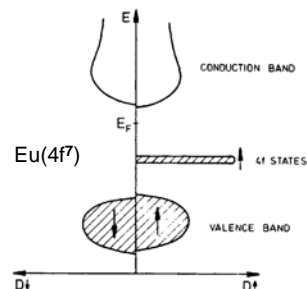
Verwendete Ferromagnetica:

Fe, Ni, Co, EuO, **EuS**, EuLaO, seltene Erden, Actiniden, ferromagn. Legierungen, einfache Ferrite,

Voraussetzung:

Zustandsdichten für spinup und spindown Elektronen im Ferromagneten sind unterschiedlich (am besten realisiert bei Seltenen Erden)

Nach Hund'scher Regel sind die Spins der f-Elektronen parallel



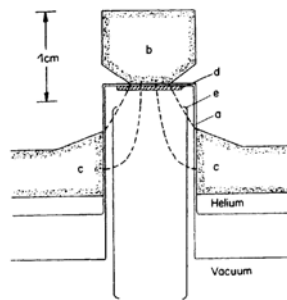
Belegung einer Spitze aus Wo mit dünnem Film aus EuS (EuO)

Erzeugung einer geordneten Schicht durch Annealing (1000K)

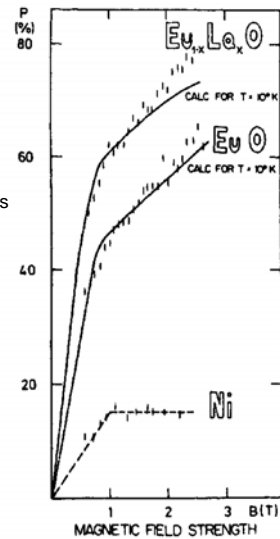
Anlegen eines Magnetfeldes zur Sättigung der Magnetisierung

Abkühlung unterhalb T_c (16.6 K (EuS), 69 K (EuO))

Bestrahlung mit Photonen bzw. Anlegen eines elektrischen Feldes



$P=0.9$ (90 %)

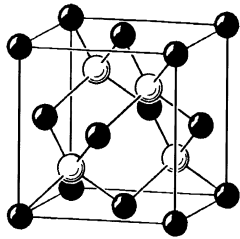


Photoionisation aus Verbindungs-Halbleitern

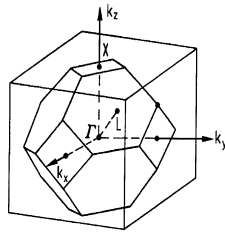
- Prinzip:
 1. Polarisation durch selektive Anregung im Halbleiter
 2. Darauf folgende Emission
- Verwendete Materialien:
 - III-V-Verbindungen (GaAs), II-IV-V₂-Verbindungen - Chalkopyrite (CdSiAs₂)
 - Deformierte Kristallschichten
 - Supergitter
 - uvm.
- Lebensdauer einer Kathode

GaAs

Zwei kubisch
flächenzentrierte Gitter
Zinkblendestruktur

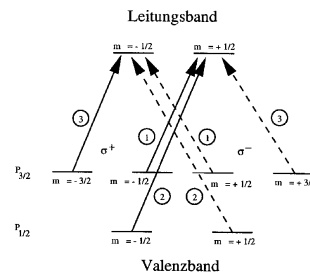
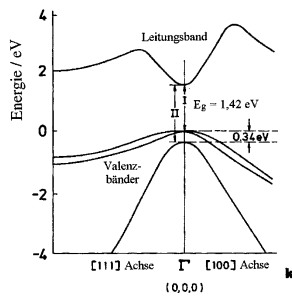
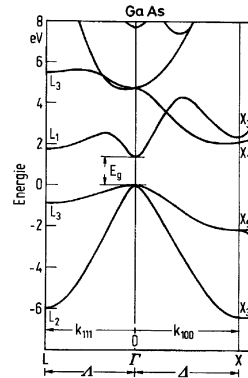


Beschreibung der
Elektronenzustände
⇒ Reziproker Raum
(Impulsraum,
Fourierraum)



Brillouinzone

⇒ Bandstruktur



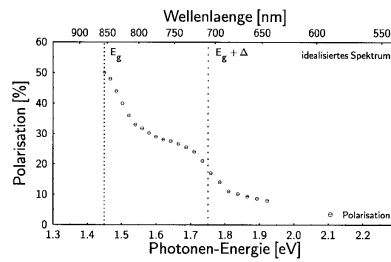
Auswahlregeln:

$$\sigma^+ : \Delta m = +1$$

$$P=0.5 \text{ (50 \%)}$$

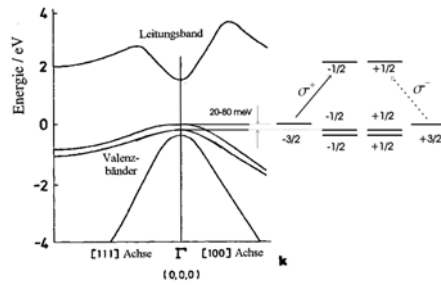
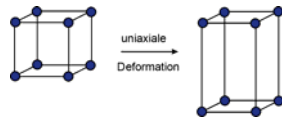
$$\sigma^- : \Delta m = -1$$

$\sigma^{+/-}$: rechts- bzw. linksdrehendes
zirkularpolarisiertes Licht



Deformierte Kristallschichten

Symmetrierniedrigung z.B. durch uniaxiale Deformation führt zu einer teilweisen Aufhebung der Entartung (Kristallfeldtheorie)



Erzeugung der Deformation:

durch Druck
1 kbar \rightarrow 6 meV (geht nicht!!)

durch „Gitterfehlpassung“

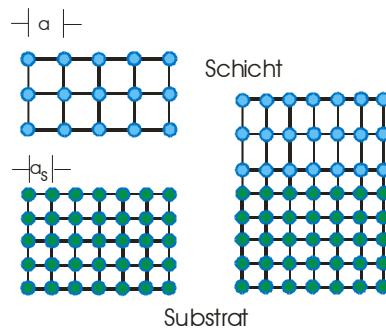
$P=1.0$ (100 %)

Gitterfehlpassung

Zwei Kristallgitter mit unterschiedlicher Gitterkonstante.
Das Material mit der größeren Gitterkonstante wird epitaktisch auf das mit der kleineren Gitterkonstante (Substrat) aufgebracht. (Schichtdicke < 400 nm)

z.B. $\text{GaAs}_{0.95}\text{P}_{0.05}$ auf $\text{GaAs}_{0.7}\text{P}_{0.3}$

$$\Delta a \approx 1\% \rightarrow \Delta E \approx 56 \text{ meV}$$



Herstellungsverfahren:

**MetalOrganic
Chemical
Vapour
Deposition** $\text{Ga}(\text{CH}_3)_3$
 AsH_3
 $\text{P}(\text{CH}_3)_3$

Überströmen von metallorganischen Verbindungen über ein erhitztes Substrat

Beispiel einer GaAsP-Photokathode

	As-cap	Mg doping
d = 20nm		$7 \cdot 10^{17} - 10^{19}$
d = 150nm	GaAs _{0.95} P _{0.05}	
d = 1000nm	GaAs _{0.7} P _{0.3}	
	SL 10 pairs	
	GaAs _{0.55} P _{0.45} GaAs _{0.85} P _{0.15}	
d = 200nm		
d = 100nm	GaAs _{0.7} P _{0.3}	
d = 300nm	GaAs _{0.8} P _{0.2}	
d = 300nm	GaAs _{0.9} P _{0.1}	
	GaAs substrate	
d = 0.5mm		

As-Schutzschicht
(muss durch Annealing entfernt werden)

Deformierte Schicht

Substrat für die deformierte Schicht

Grenzschichten zum Einfang von
Kristallfehlern des GaAs-Trägers

Trägermaterial

Austritt der Elektronen ins Vakuum

Eine Potentialstufe von ca. 4 eV hindert die Elektronen vom Austritt ins Vakuum.

$$E_V > E_L \quad \chi = E_V - E_L$$

χ : Elektronenaffinität

F : Austrittsarbeit (GaAs: ~ 5 eV)

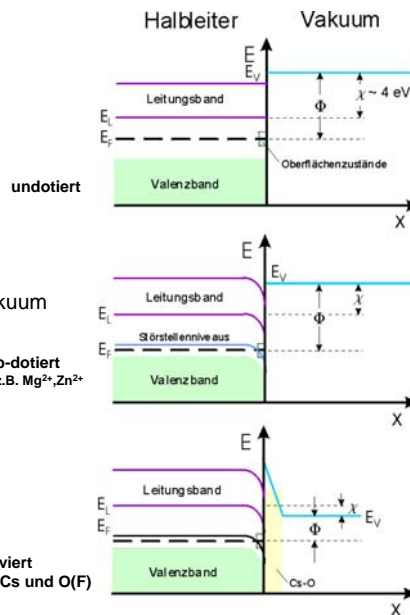
E_V : Vakuumniveau

E_L : Leitungsbandminimum

E_F : Fermi-Niveau

Voraussetzung für einen Austritt ins Vakuum
ist eine negative Elektronenaffinität
(NEA)

1. Bandverbiegung durch p-Dotierung
(Absenkung ca. 1 eV)
(„fermi-level-pinning“)
2. Absenkung des Vakuumniveaus durch
Aktivierung (Beschichtung) mit Cs und O (F)



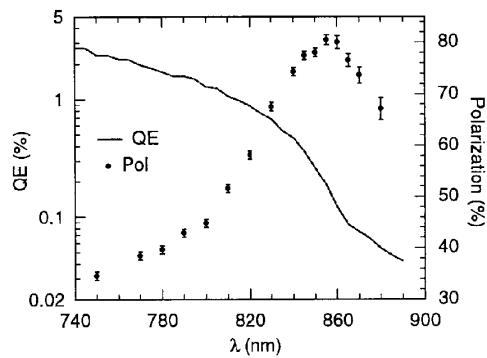
Aktivierung mit Cs und O (bzw. F)

1. Entfernung der As-Schutzschicht

Aufheizen auf 400°C

2. Aktivierung der Kathode („YoYo-Methode“)

- Anlegen von -100 V
- Bestrahlung mit monochromatischem Licht (z.B. He-Ne-Laser)
- Abscheidung von Cs
- nach einer gewissen Zeit setzt ein Photostrom ein, der ansteigt, bis ein Maximum überschritten ist
- Aufbringen von O₂ (neues Maximum des Photostroms)
- erneute Abscheidung von Cs, bis erneut Maximum erreicht ist
- Aufbringen von O₂ usw. (ca. 6 - 8 mal, bis der Photostrom nicht mehr zu steigern ist)



Strained GaAs,
aktiviert mit Cs und F
(SLAC)

SLAC:

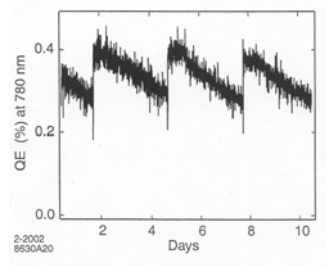
$I_e = 2 \mu\text{A}$
 Neuaktivierung nach 10 (!) Monaten
 Neubelegung mit Cs nach 3 - 5 Tagen
 Dauer: ca 20 min
 ⇒ Duty Cycle: 99%
 UHV: $< 1 \times 10^{-12}$ mbar

MAMI:

$I_e = 50 \mu\text{A}$
 Aktivierung (Austausch) alle 21 Std
 Dauer: ca 3 Std
 ⇒ Duty Cycle: 85%
 P = 52 %
 UHV: ca. 1×10^{-11} mbar

Lebensdauer der Kathode

Beobachtung: Quantenausbeute fällt mit der Zeit ab.



2 mögliche Gründe:

- Abscheidung von O durch stimulierte Desorption von der Wand der Gun-Kammer
- Sputterprozesse hervorgerufen durch ionisiertes Restgas in der Gun, das in Richtung der Kathode beschleunigt wird.

Nachweis

- Tauschek-Polarimeter
- Compton-Polarimeter
- Mott-Polarimeter
- Møller-Polarimeter

Touschek-Polarimeter

Prinzip:

Spinabhängige Elektron-Elektron Streuung im Strahl.

Durch eine Energieänderung können die Elektronen außerhalb der Akzeptanz des Beschleunigers liegen.

Wirkungsquerschnitt ist abhängig von der Spineinstellung der Streupartner (minimal für parallele Spins)

Messung über die Abnahme der Elektronen im Ring

Nachteil:

Verfälschung der Messung durch eine hohe Untergrundrate der Elektronen, die an einem Restgasmolekül streuen.

Compton-Polarimeter

Prinzip:

Spinabhängige Elektron-Photon Streuung:

zirkular pol. Photonen werden an transversal pol. Elektronen rückgestreut.

Unterschiedlicher Wirkungsquerschnitt der gestreuten Photonen in den beiden Halbkreisen oberhalb und unterhalb der Elektronenbahn.

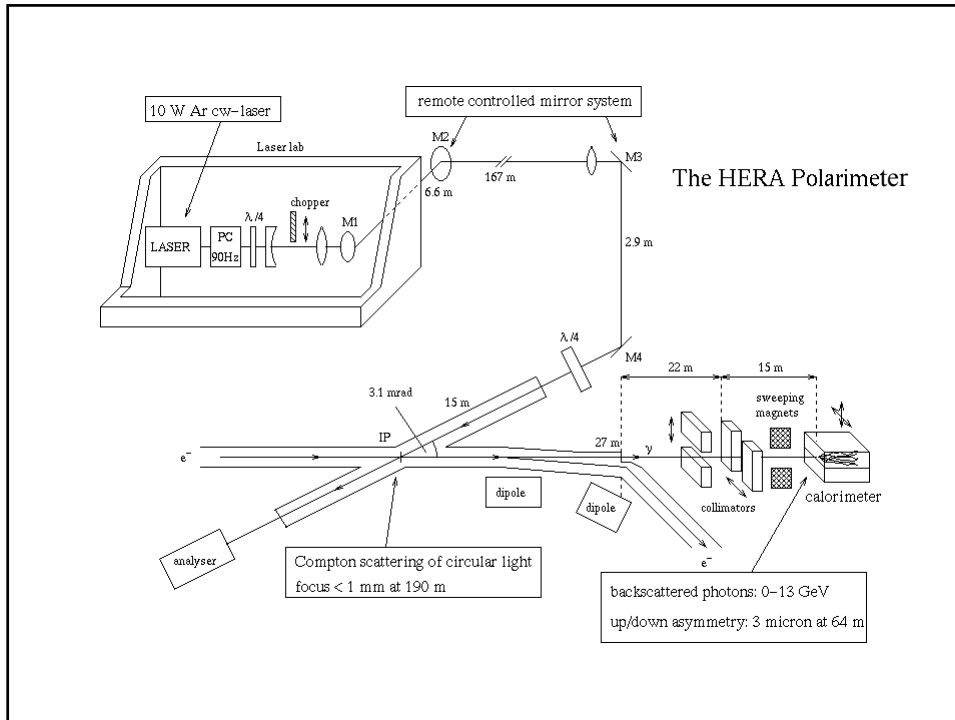
Geeignet für hohe Strahlintensitäten.

Fast keine Beeinflussung des Strahls.

2 Methoden der Ermittlung der Strahlpolarisation:

1. Bestimmung der Zählratenasymmetrie
2. Ermittlung der vertikalen Verschiebung des Schwerpunkts des Profils der rückgestreuten Photonen

HERA, PETRA, ELSA



Mott-Polarimeter

Prinzip:

Spinabhängige Elektronenstreuung an Atomkernen
 Messung über den differentiellen Wirkungsquerschnitt
 vorw. geeignet für niedrige Energien (<math>< 1 \text{ MeV}</math>)

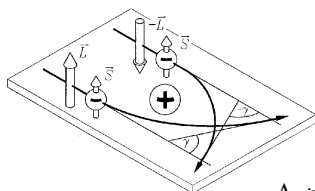
$$\frac{\delta\sigma}{\delta\Omega}$$

$$V(\vec{r}) = V_C(\vec{r}) + V_{LS}(\vec{r})$$

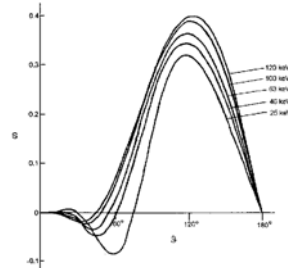
Streu-
potential Coulomb-
potential \vec{L} - \vec{S} -Kopplungs-
potential

Der Wirkungsquerschnitt ist verschieden
 für $L \uparrow \uparrow S$ zu $L \uparrow \downarrow S$

\vec{L} entsteht durch Bewegung des Atomkerns im
 Ruhesystem der Elektronen

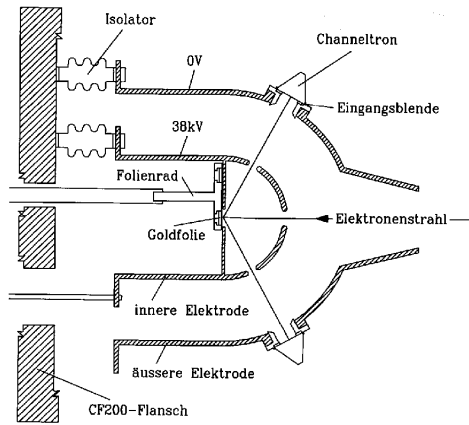


$$A_\gamma := \frac{N_\gamma - N_{-\gamma}}{N_\gamma + N_{-\gamma}} = S_\gamma \cdot P$$



A_γ : rechts-links Asymmetrie
 N_γ : Zählrate
 $S_\gamma = S(\gamma, Z, E_e)$: Shermanfunktion

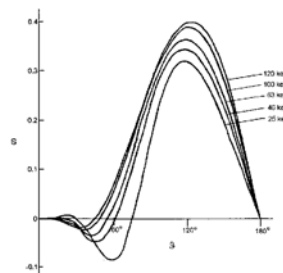
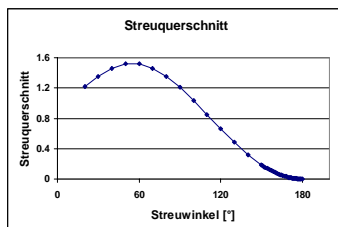
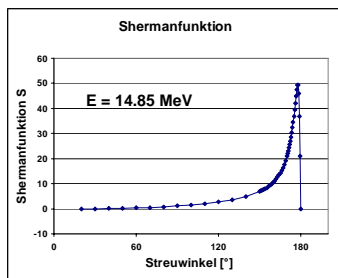
Mott-Polarimeter (MAMI)



Der Winkel der Detektoren zum Strahl hängt von der Elektronenenergie ab.

Die Gegenspannung wird angelegt, um inelastisch gestreute Elektronen abzufangen.

Hohe Energien (> 1MeV)



Detektion bei hohen Streuwinkeln
Hohe Präzision der Winkeleinstellung
Der Streuquerschnitt ist bei hohen Winkeln sehr klein

Møller-Polarimeter

Prinzip:

Spinabhängige Elektron-Elektron Streuung (Møllerstreuung).

Streuung an einer magnetisierten Metallfolie und Herausschlagung eines Elektrons.

Messung über den differentiellen Wirkungsquerschnitt $\frac{\delta\sigma}{\delta\Omega}$

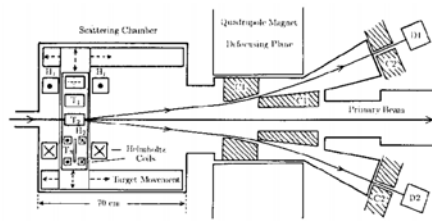


Fig. 3. Schematic Møller-polarimeter geometry.

3 Komponenten:

- magn. Metallfolie (pol. Elektronentarget)
- Magnetanordnung zur Trennung von Primärstrahl und gestreuten Elektronen
- Detektoranordnung

Streufolie:

- Permendur (Vacoflux) (49%Fe, 49% Co, 2% V)
- Sättigung bei 0.01 T, höchste Polarisierbarkeit von allen gebräuchlichen Materialien

Institute mit Quellen für pol. Elektronen

HERA
PETRA
SPEAR
LEP

DESY
DESY
SLAC/SSRL
CERN

Sokolov Ternov
Sokolov Ternov
Sokolov Ternov
Sokolov Ternov

SLAC
MAMI
ELSA
MIT Bates

Stanford Linear Accelerator
Mainzer Racetrack Microtron
Elektronen-Stretcher-Anlage - Univ. Bonn
Massachusetts Institute of Technology
Cambridge, MA

GaAs
GaAs, GaAsP
GaAs, Supergitter
GaAs, GaAsP

KEK

High Energy Accelerator Research
Organization, Tsukuba, Jp

GaAs

AmPS ring

Amsterdam Puls Stretcher and
Storage Ring (bis 1998)

GaAs, GaAsP

CEBAF

JLab Newport News, VA

GaAs

ORSAY
Uni Bielefeld

Institut de Physique Nucléaire

He Afterglow
EuS

BINP

Budker Inst. of Nuclear Physics, Novosibirsk ?