

DIAMANT ALS SENSORMATERIAL FÜR DETEKTOREN

Wolfgang Lange, DESY Zeuthen



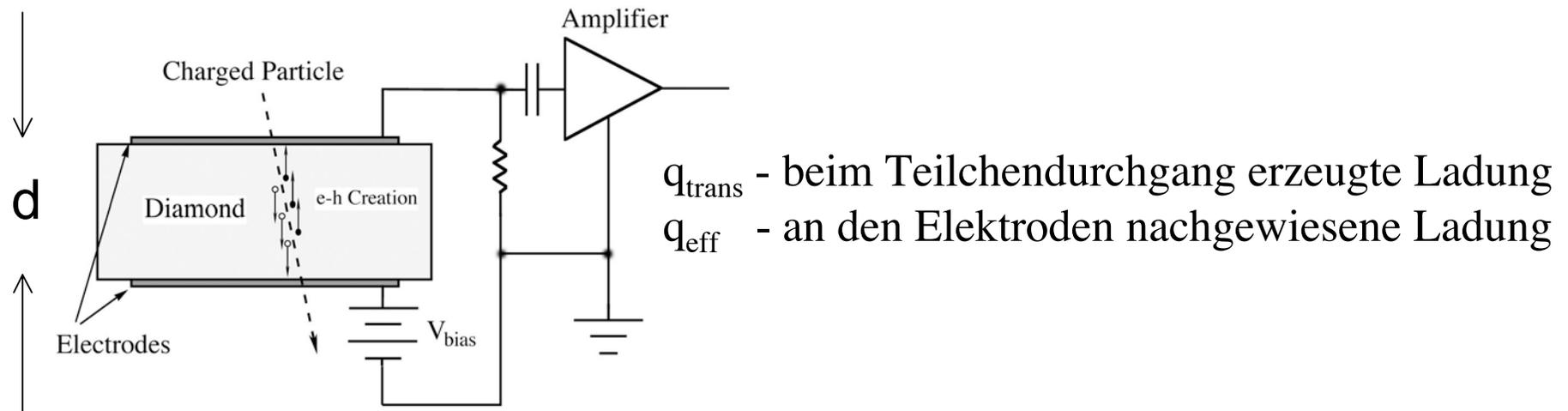
INHALT

1. Festkörper als Detektormaterial
 - Grundlagen
 - Materialien
2. Diamantbasierte Detektoren
 - Herstellung
 - Polykristalline Diamanten und Diamant-Einkristalle
 - Messungen, Ergebnisse
 - Anwendungen
3. Zusammenfassung



1. Festkörper als Detektormaterial (1)

Beschränkung auf Teilchennachweis durch Ionisation:



q_{trans} : Energieeintrag / Weg, Ionisationsenergie / e^- -h-Paar (Material)

q_{eff} : Ladungsverluste

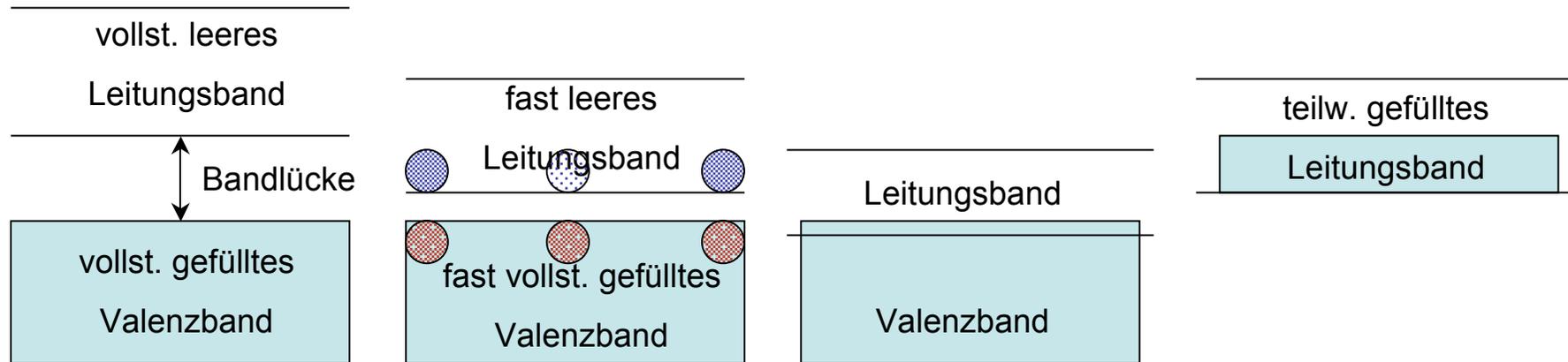
weiterhin: Geschwindigkeit der Ladungssammlung (Mobilität, Driftgeschw.)

Dielektrizitätskonstante -> Detektorkapazität



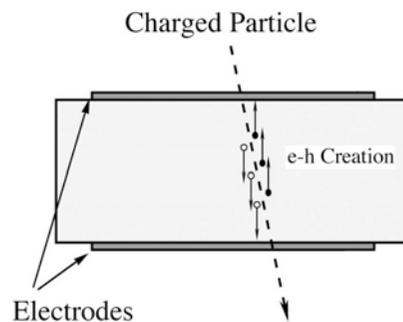
1. Festkörper als Detektormaterial (2)

Leitfähigkeit der Festkörper :



Isolator: Drift

-> el. Feld



Halbleiter:

Rekombination

-> Verarmung
(el. Feld)

← **Leiter:** →

Rekombination

-> ungeeignet!



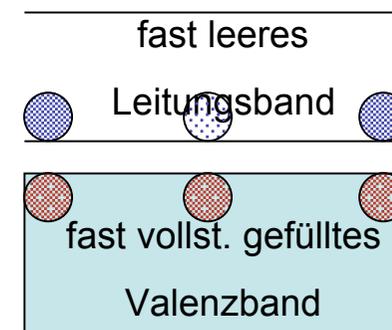
1. Festkörper als Detektormaterial (3)

Materialien - *gewünscht werden*:

- geringe Wechselwirkungsverluste (Spurmessung!)
- hohe Signalausbeute, geringes Rauschen, schnelle Reaktion
- Strahlungsfestigkeit, ggf. mech. Festigkeit, Wärmeleitfähigkeit

- Halbleiter: Silizium ($Z = 14$)

Durch Anlegen eines elektrischen Feldes “verarmt”,
damit auch Trennung der e⁻/h⁺-Paare



- Isolator: Kohlenstoff in der Modifikation “Diamant” ($Z = 6$)



1. Festkörper als Detektormaterial (4)

	Si	diamond
Band gap [eV]	1.12	5.45
Electron mobility [cm ² /Vs]	1450	2200
Hole mobility [cm ² /Vs]	500	1600
Saturation velocity [cm/s]	0.8x10 ⁷	2x10 ⁷
Breakdown field [V/m]	3x10 ⁵	2.2x10 ⁷
Resistivity [Ω cm]	≤ 2x10 ⁵	>10 ¹³
Dielectric constant	11.9	5.7
Displacement energy [eV]	13-20	43
e-h creation energy [eV]	3.6	13
Ave e-h pairs per MIP per μm	89	36
Charge coll. dist. [μm]	full	~250

→ Vergleich zu Si

Signal, Leckstrom

**schnelle Ladungs-
sammlung**

kleine Kapazität

Strahlungsfestigkeit

**kleinere Signale
(weniger e⁻/h-Paare)**

PLUS extrem hohe Wärmeleitfähigkeit

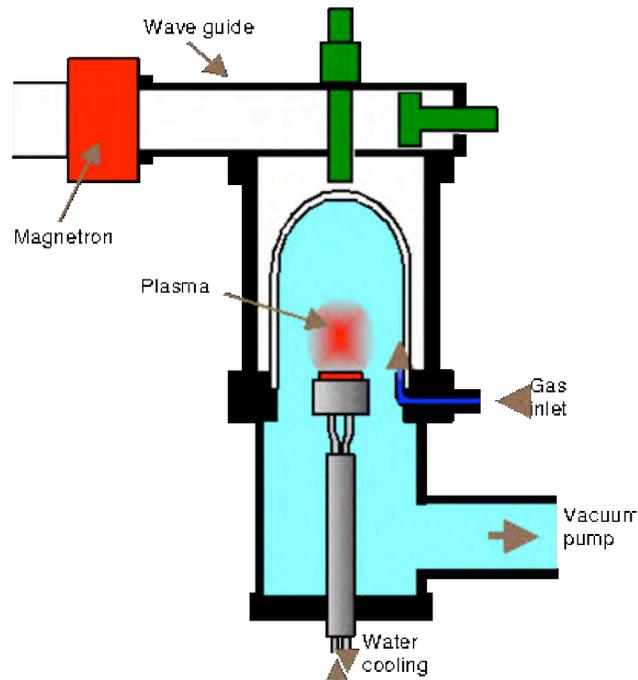


2. Diamant als Detektormaterial (1)

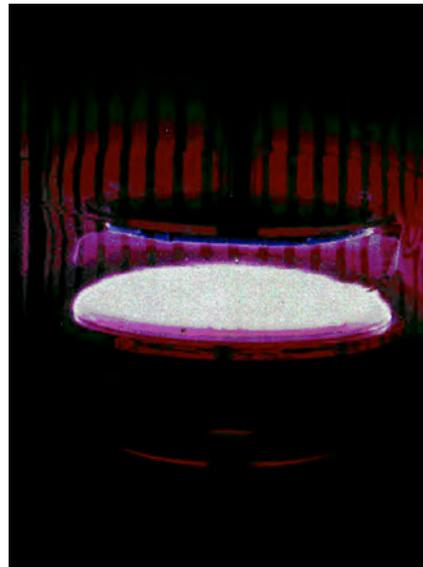
2.1. Herstellung

Chemische Abscheidung aus der Dampfphase - CVD

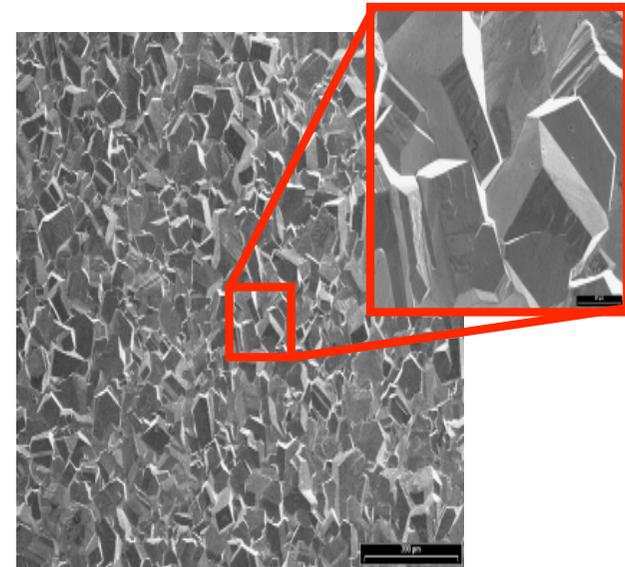
Prinzip:



Blick in den Reaktor:



“Granulation” auf dem Substrat:



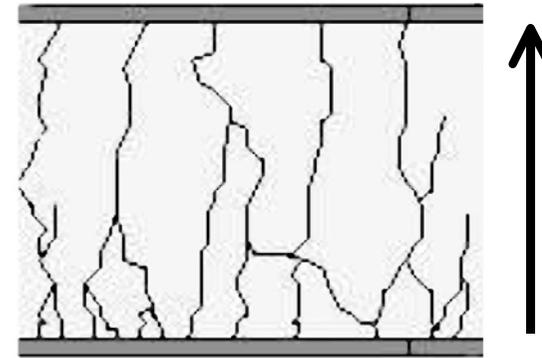
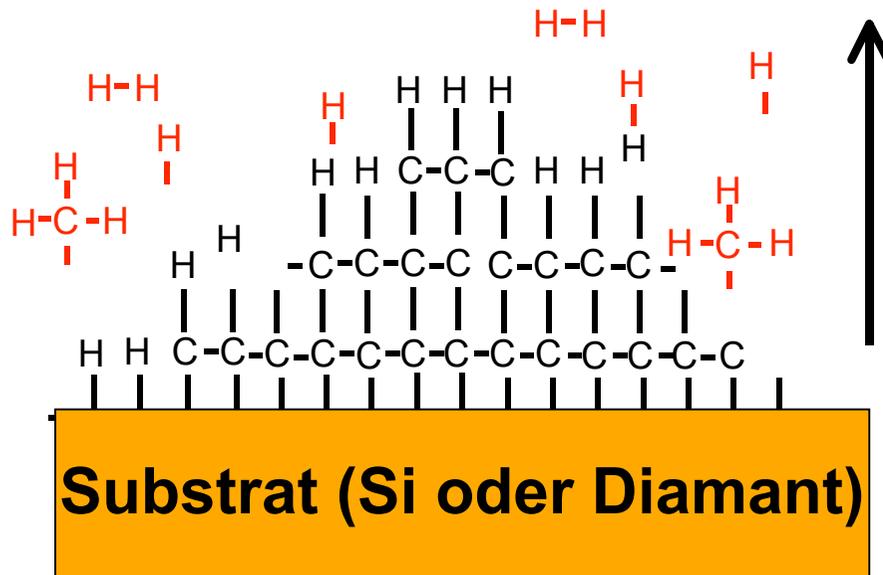
© REM-Foto: INFN, M. Bruzzi



2.1. Herstellung (2)

Dampfphase: Methanplasma (CH_4)

Prinzip:



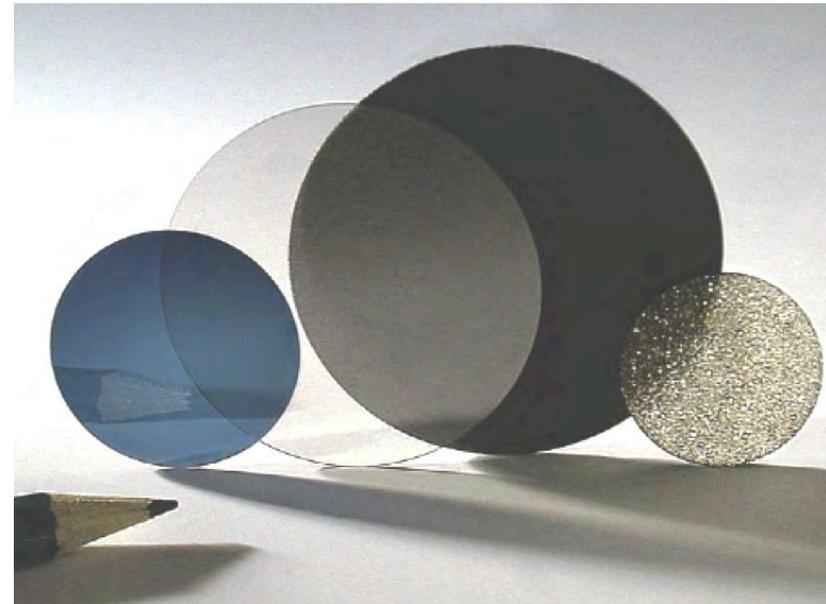
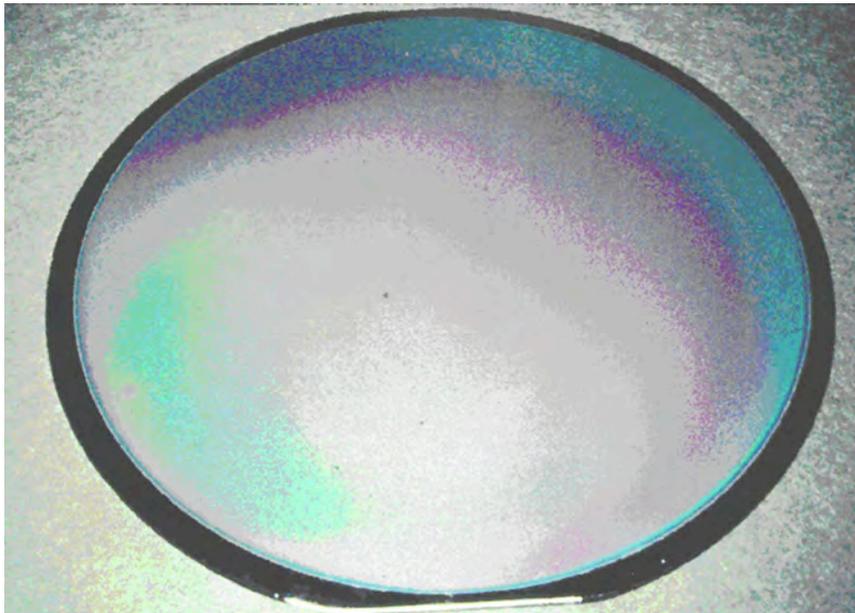
- stabförmiges Wachstum auf dem Si- oder Diamantsubstrat
- Korngröße wächst von der Substratseite aufwärts
-> polykristallin!
- Wachstum ca. $1 \mu\text{m} / \text{h}$
- seit ca. einem Jahr auch Einkristalle
(auf Diamant-Einkristall)



2.1. Herstellung (3)

Gewachsene Scheibe:

- Durchmesser = 100...150 mm, $d \geq 0.2$ mm (... ca. 1 mm)
- Schleifen und Polieren -> optische Oberflächen

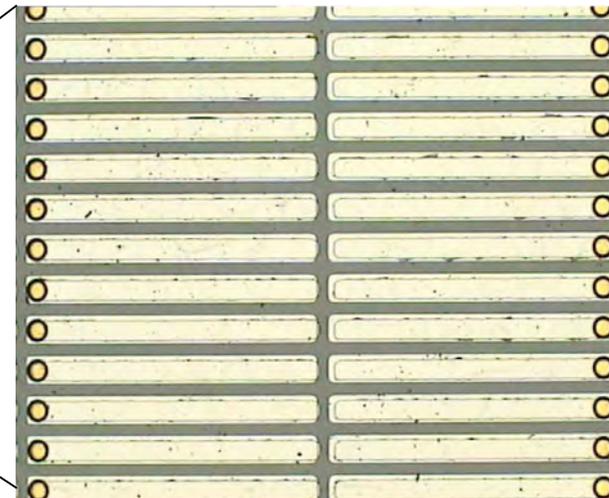
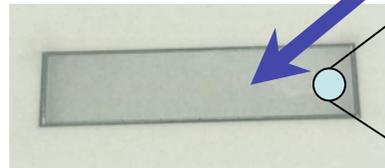
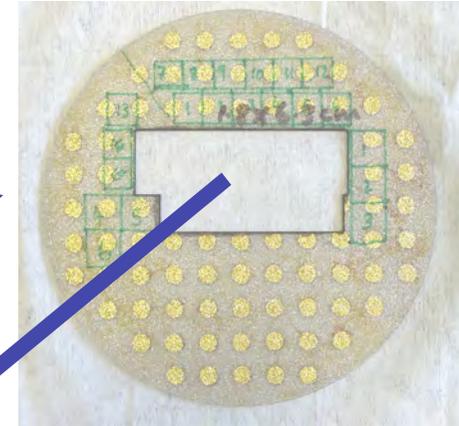


© Fotos: FAP Freiburg



2.1. Herstellung (4)

Vermessung der Scheibe, Strukturierung



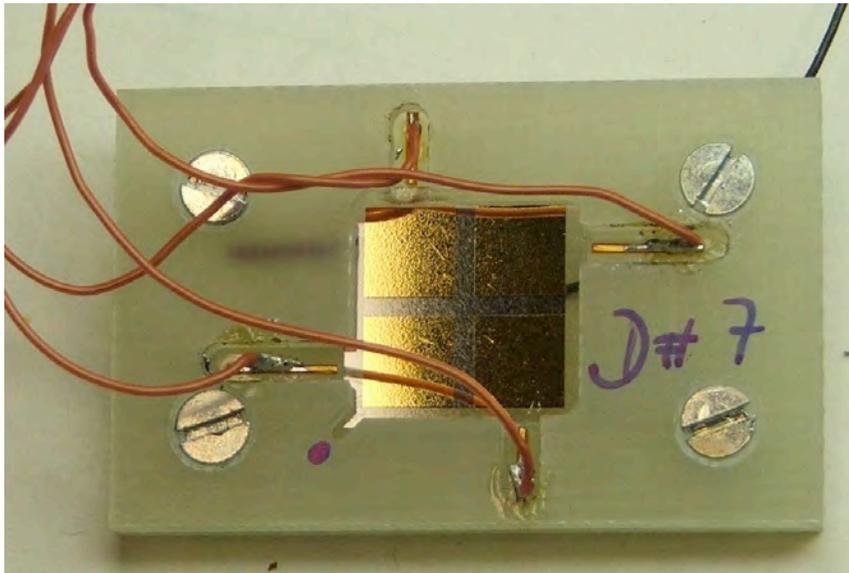
© Fotos: E6, RD42, ATLAS (CERN)



2.2. Polykristalline Diamantdetektoren (1)

Versuchsmuster für DESY Zeuthen:

- Element Six, Ltd. (E6), UK
- Fraunhofer-Institut f. Angewandte Festkörperphysik Freiburg (FAP)
- Nat. Scient. & Educ. Center of Particle and HE Physics, Minsk, Belarus



Vermessung von:

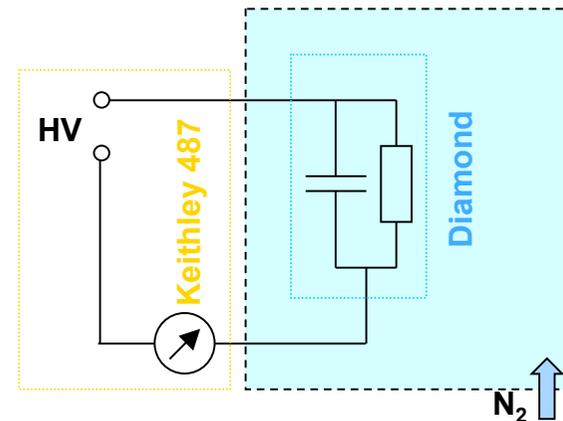
- statischen elektrischen Eigenschaften (I/V, C/V, I/t, I/T etc.)
- Nachweiseigenschaften (CCD vs. (V, Linearität, t, x-y etc.)
- Strahlungsfestigkeit



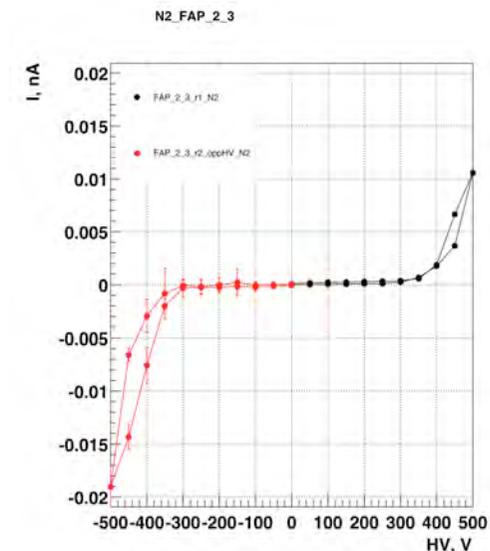
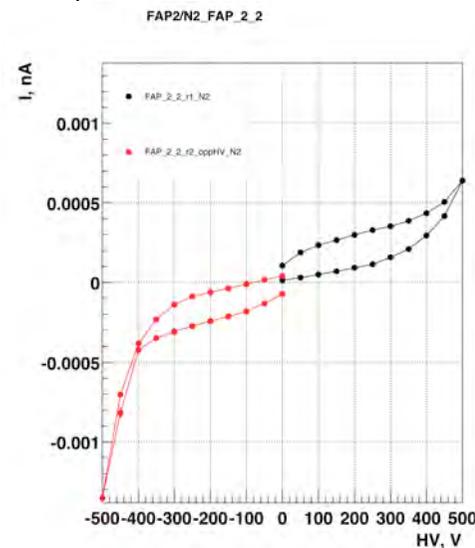
2.2. Polykristalline Diamantdetektoren (2)

Statische elektrische Eigenschaften:

- Strom-Spannungs-Messung
 - qualitativ unterschiedliches Verhalten
 - kontaktabhängig (?)
 - exemplarabhängig (Reinheit)-> ergänzende Untersuchungen (BTU Cottbus: Raman-Spektren)



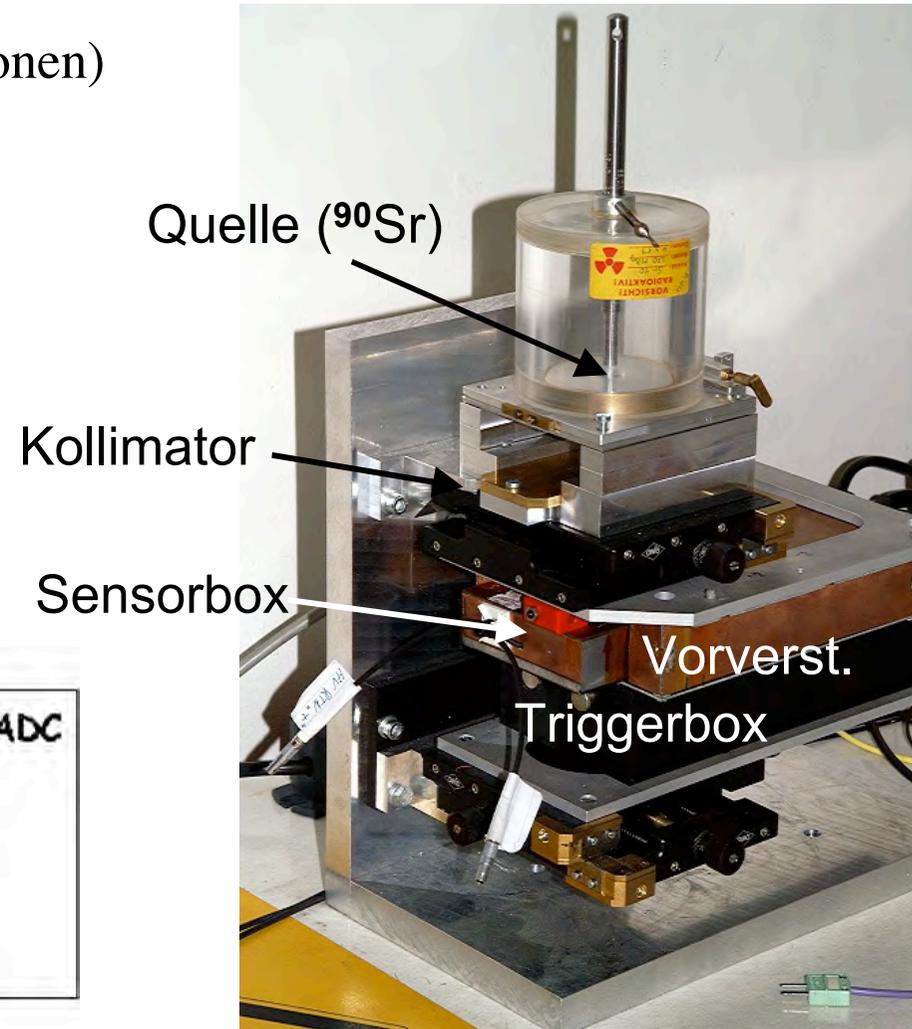
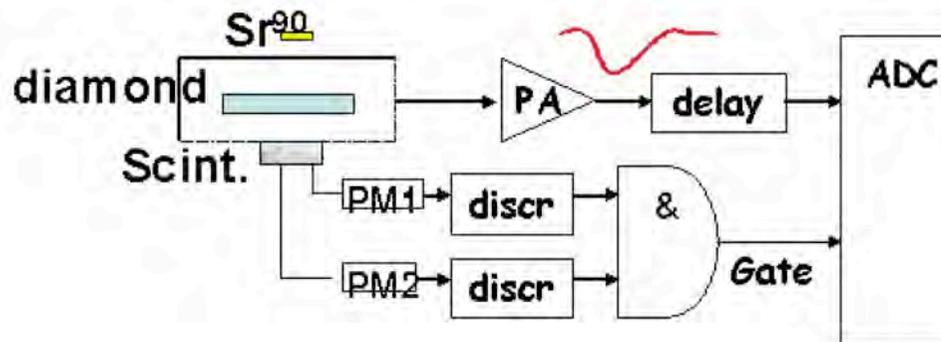
- I/V abhängig von Exposition (Strukturveränderungen)
- keine C/V-Abhängigkeit (Isolator)



2.2. Polykristalline Diamantdetektoren (3)

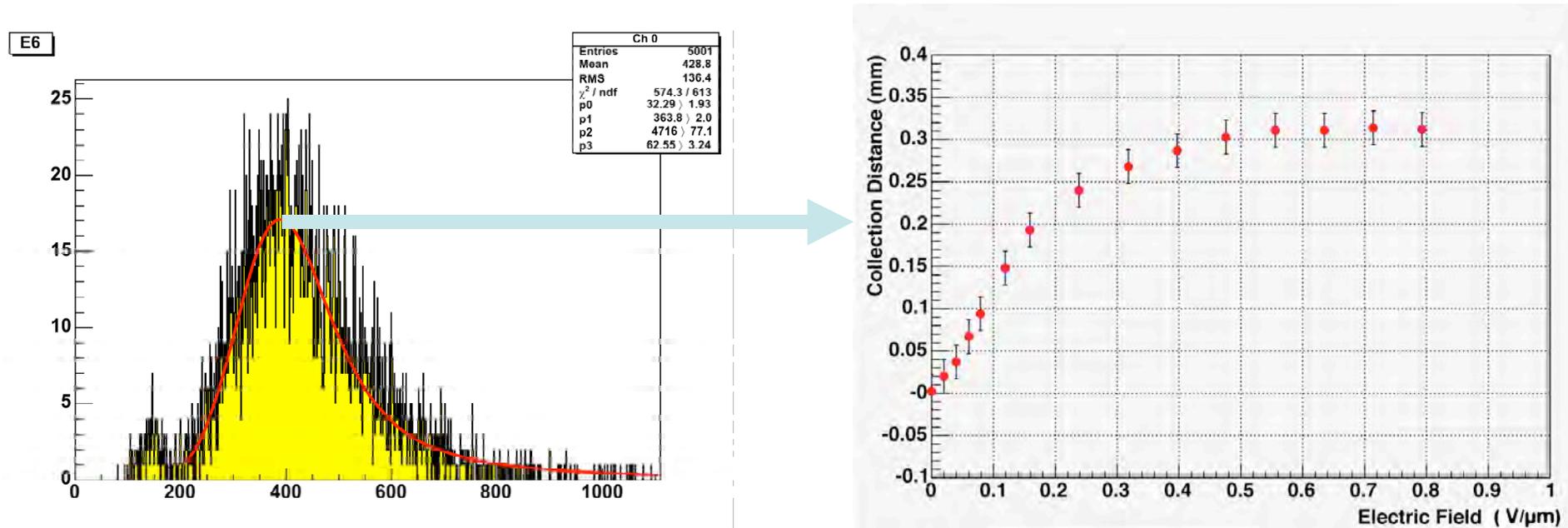
Nachweiseigenschaften:

- minimal ionisierende Teilchen (Elektronen)
mit ^{90}Sr -Quelle:
- Histogrammierung der Daten
-> Ladungssammeleffizienz,
CCD (“mittlere freie Weglänge”)
 $\text{CCD} = d * q_{\text{Ist}} / q_{\text{Soll}}$
- CCD vs. V, Dosis



2.2. Polykristalline Diamantdetektoren (4)

Nachweiseigenschaften: CCD vs. E-Feld

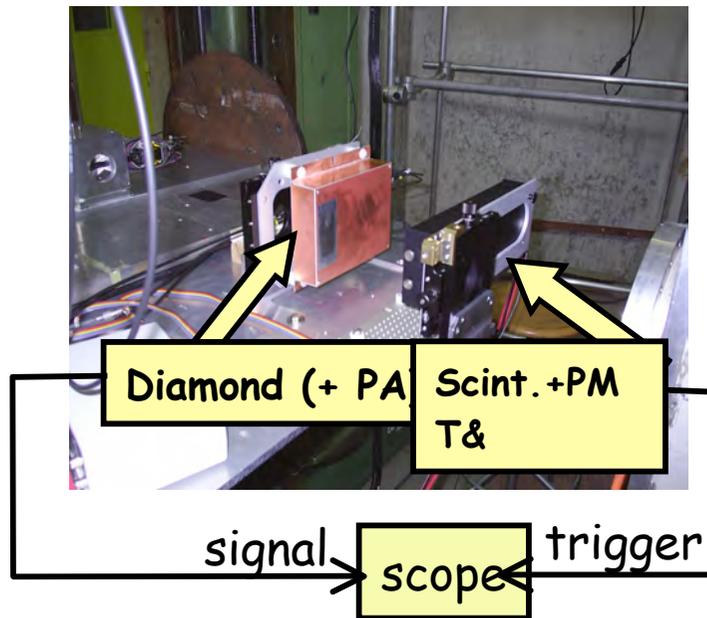


- Ladungssammeleffizienz 5...50% ($0.05d < \text{CCD} < 0.5d$)

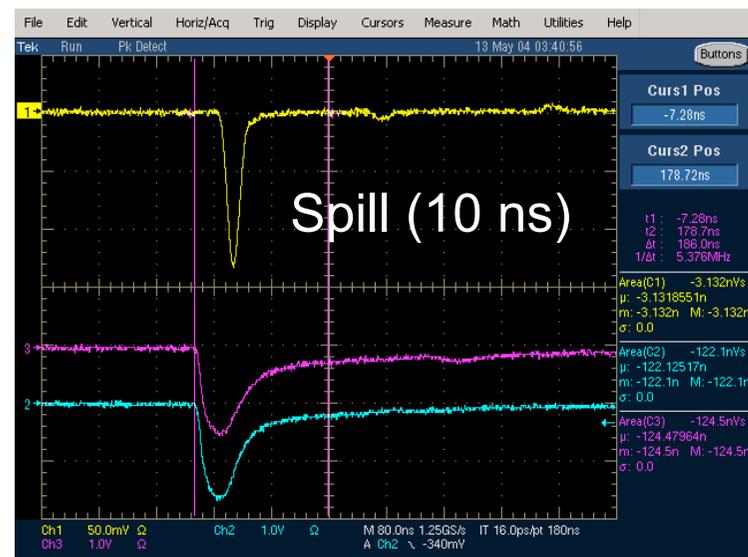
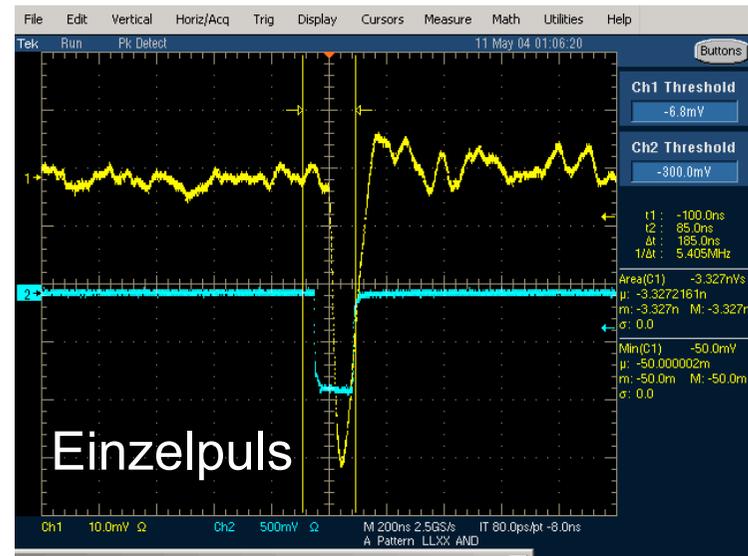


2.2. Polykristalline Diamantdetektoren (5)

Nachweiseigenschaften: Linearität

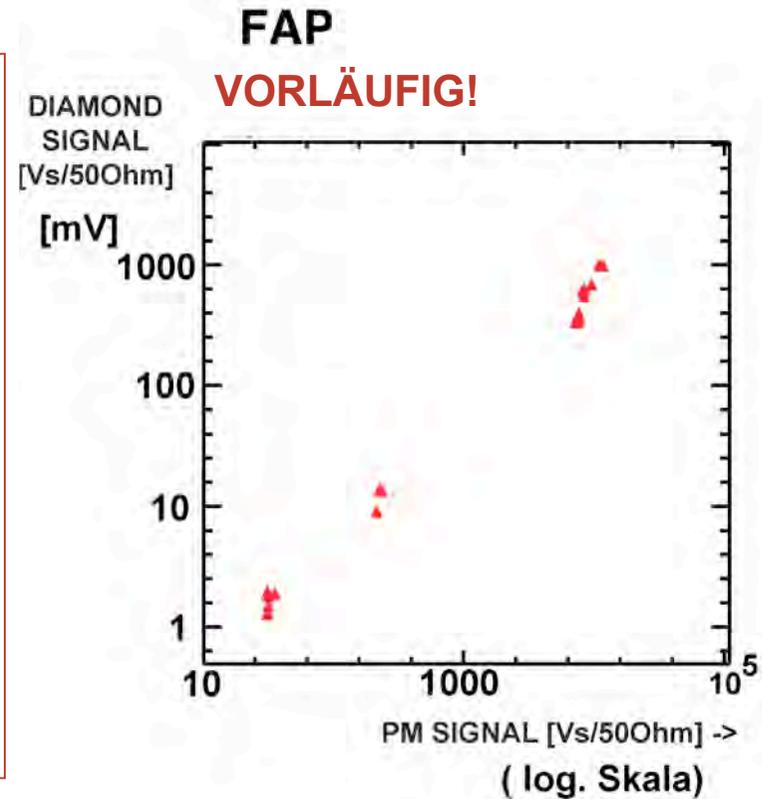
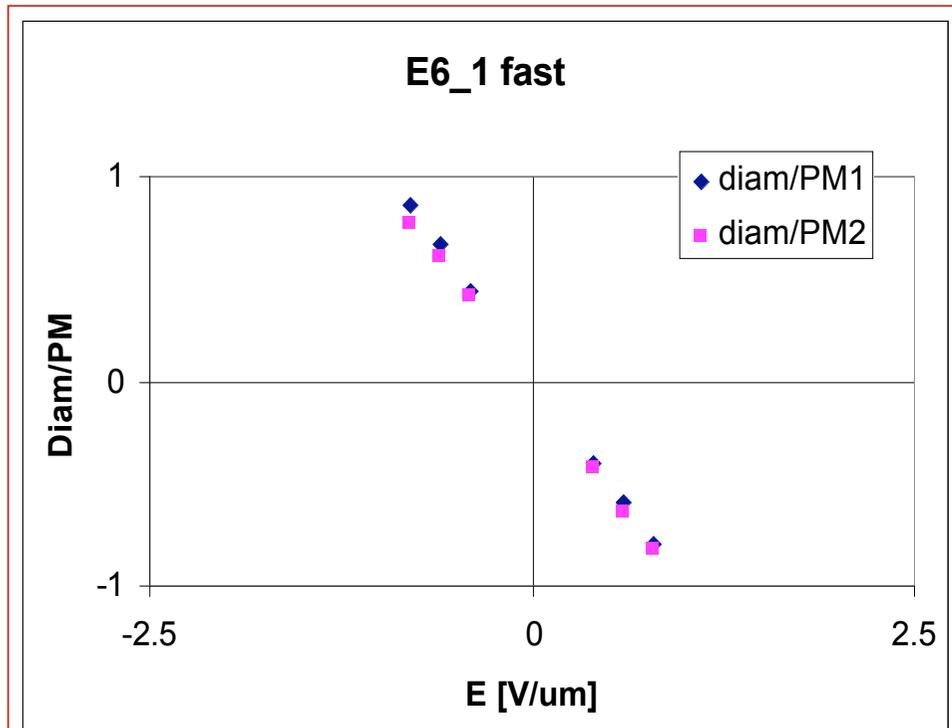


- Messung am CERN-PS
- bis zu 10^7 Teilchen / Spill (10 ns)
- Sensoren sind linear (Meßgenauigkeit: muß wiederholt und verfeinert werden!)



2.2. Polykristalline Diamantdetektoren (6)

Nachweiseigenschaften: Linearität



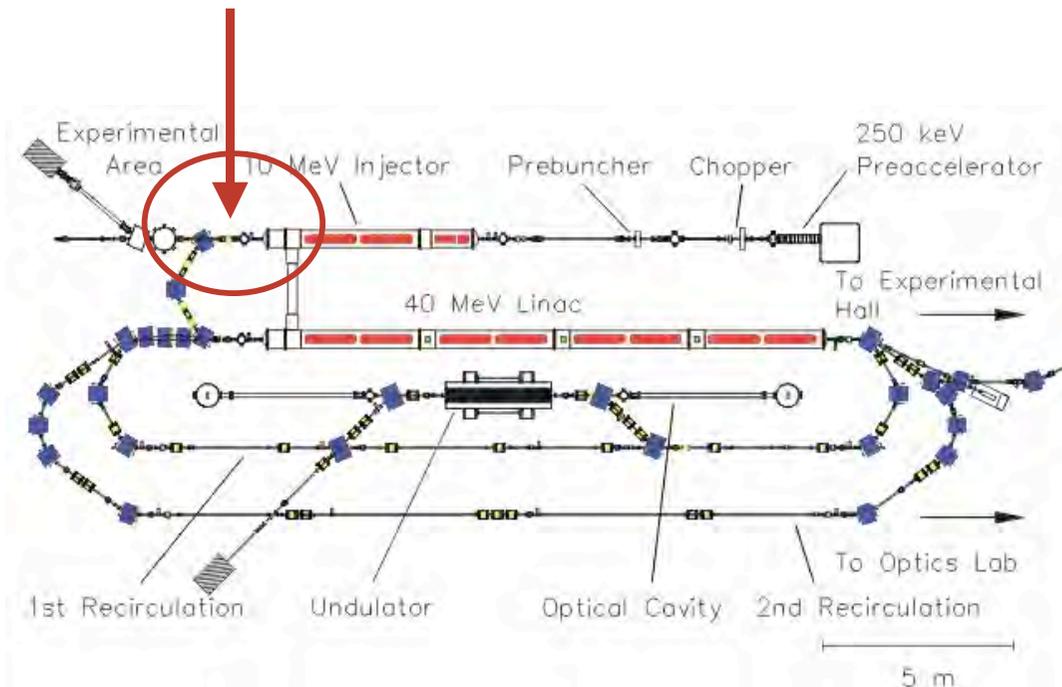
2.2. Polykristalline Diamantdetektoren (7)

Nachweiseigenschaften: Strahlungsfestigkeit (1)

- Messung am S-DALINAC (TU Darmstadt), Dosen bis zu mehreren MGy

Benutzung des Injektors des S-DALINAC:

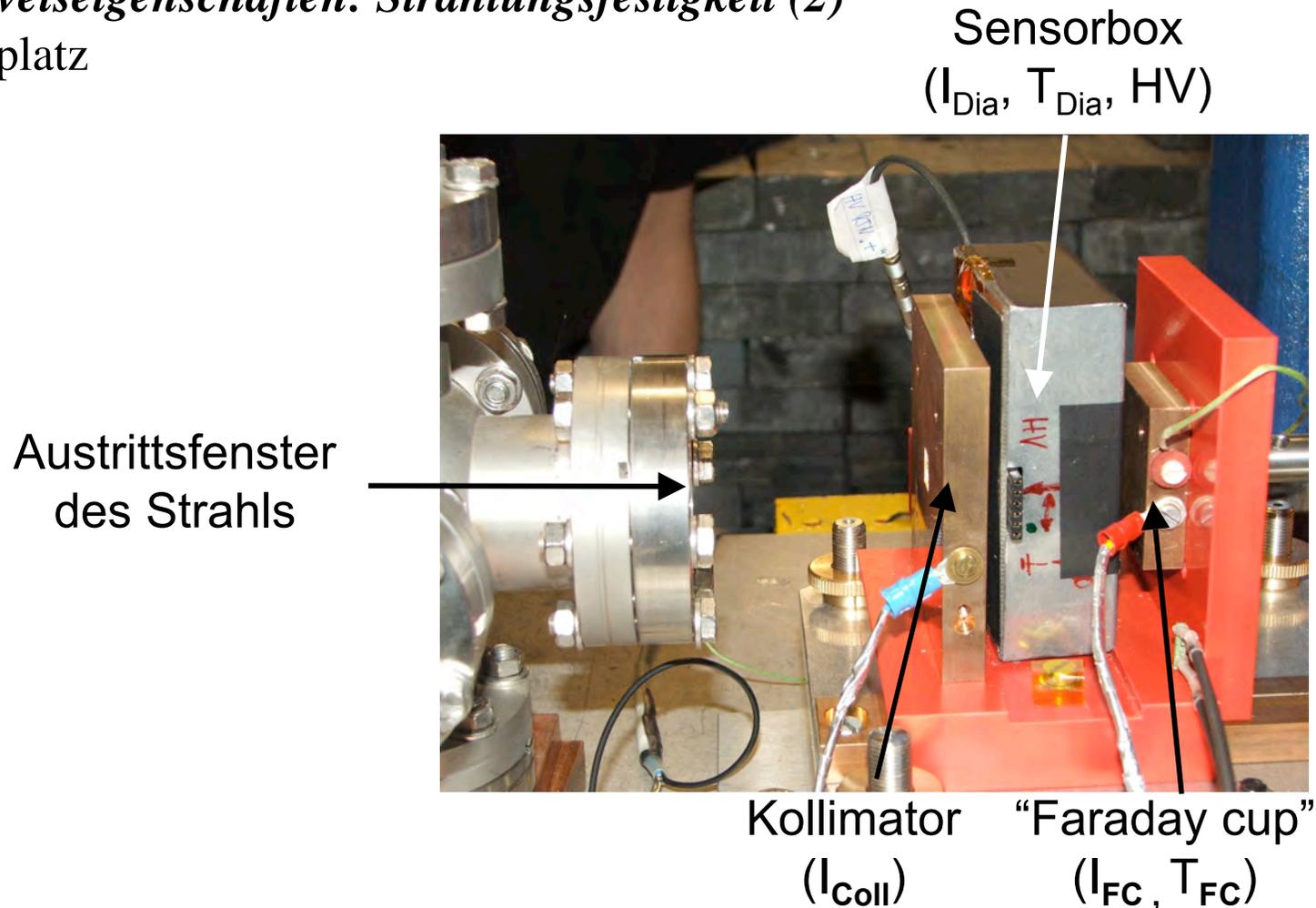
10 ± 0.015 MeV, Strahlströme von **1 nA bis 50 μ A**



2.2. Polykristalline Diamantdetektoren (8)

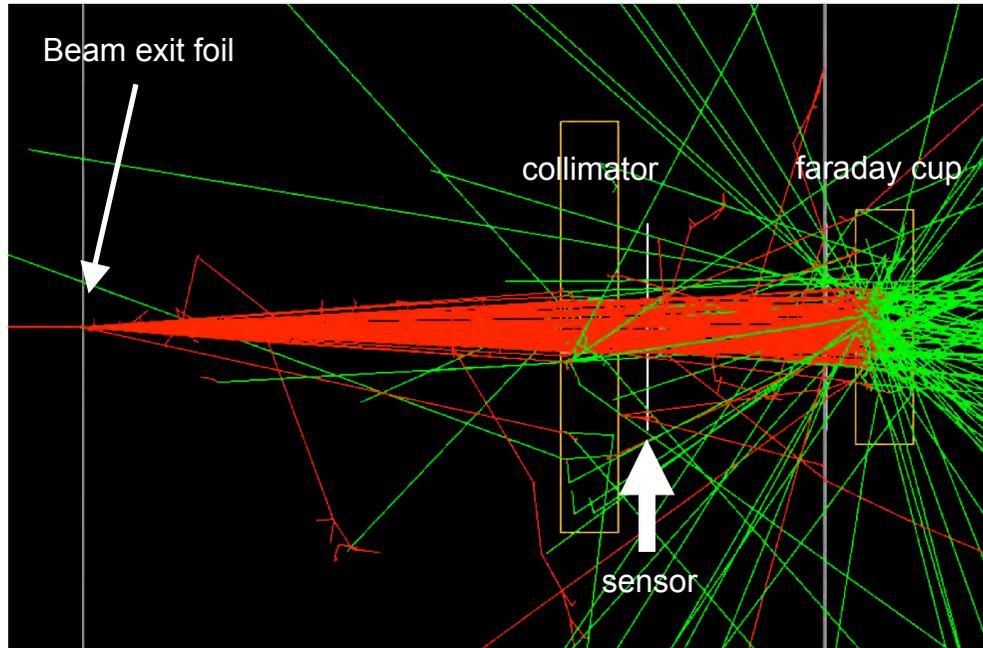
Nachweiseigenschaften: Strahlungsfestigkeit (2)

- Meßplatz



2.2. Polykristalline Diamantdetektoren (9)

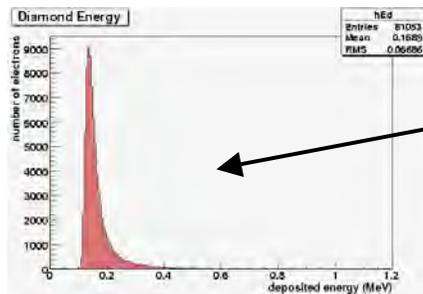
Nachweiseigenschaften: Strahlungsfestigkeit (3): Simulation



optimiert:

- Distanzen
- Kollimator, ratio R (s.u.)

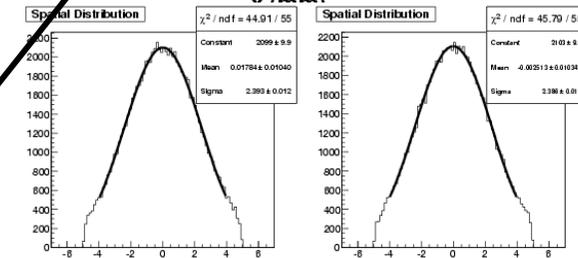
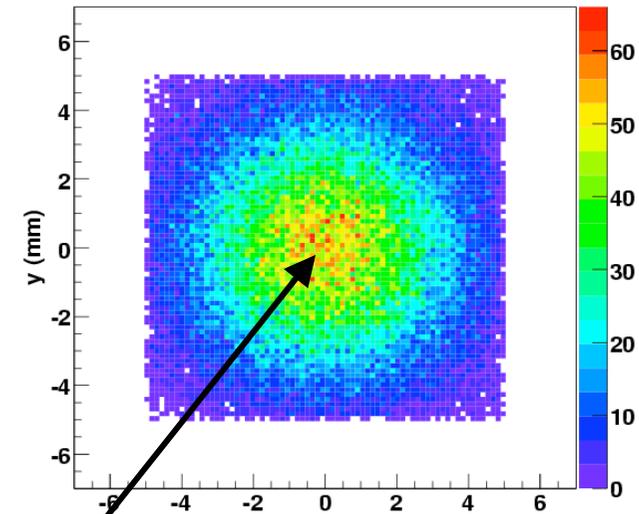
Statistik: (--> $R = (N_{FC}/N_{Sensor}) = 0.98$)



Energiedeposition

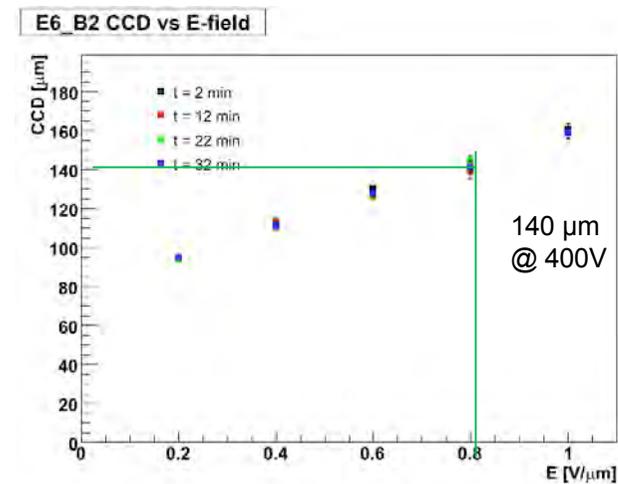
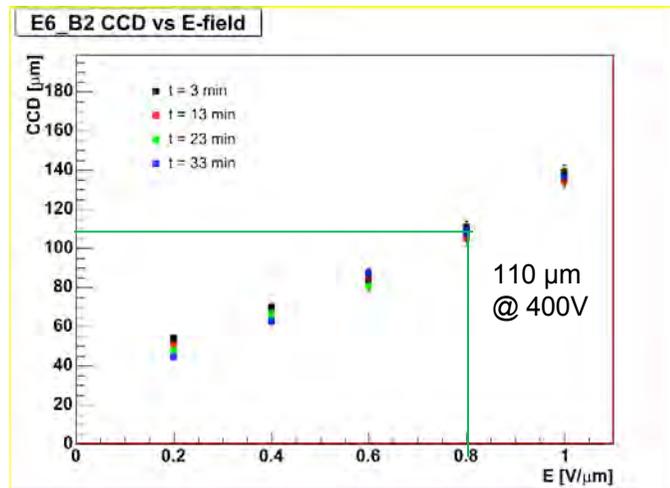
Projektion der Verteilung

Spatial Distribution



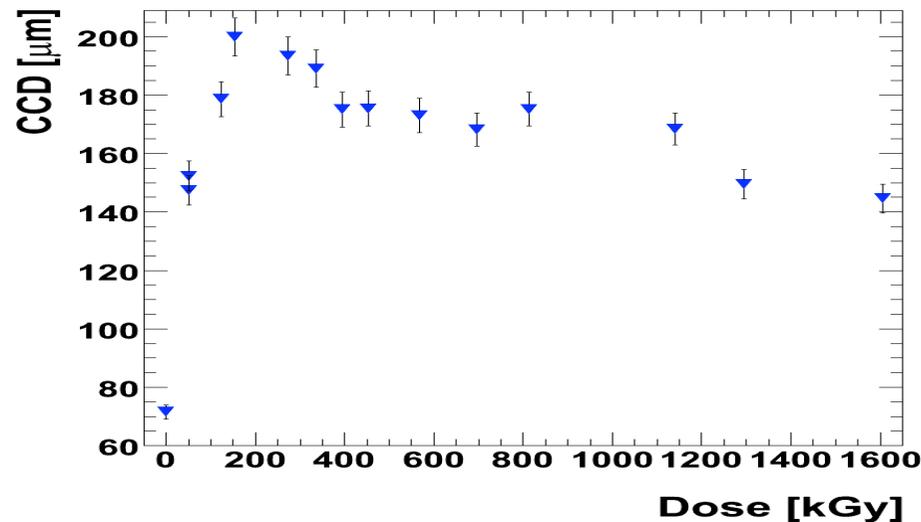
2.2. Polykristalline Diamantdetektoren (10)

Nachweiseigenschaften: Strahlungsfestigkeit (4): Ergebnisse



vor der
Bestrahlung
(pumping?)

E6_B2 CCD vs dose at 400V

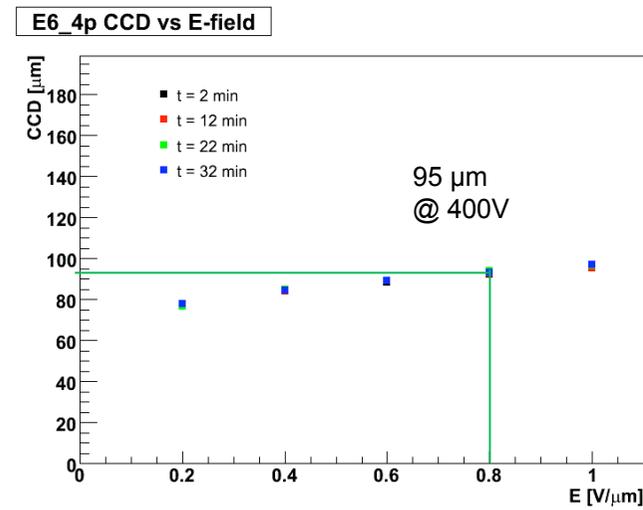
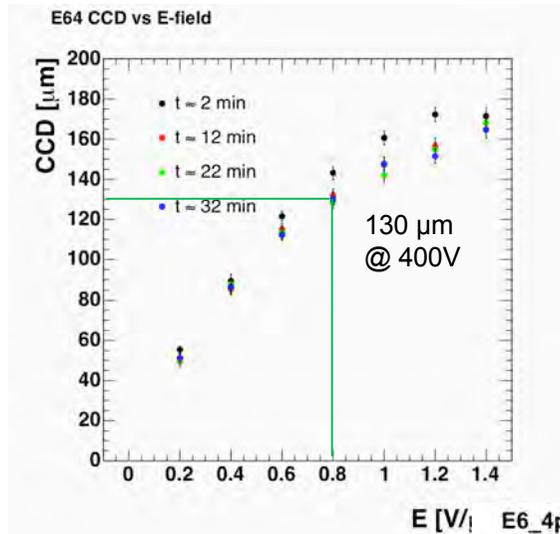


nach der
Bestrahlung

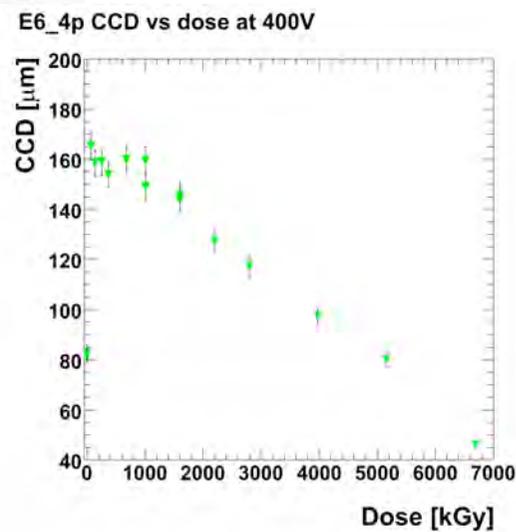


2.2. Polykristalline Diamantdetektoren (11)

Nachweiseigenschaften: Strahlungsfestigkeit (5): Ergebnisse



vor der
Bestrahlung

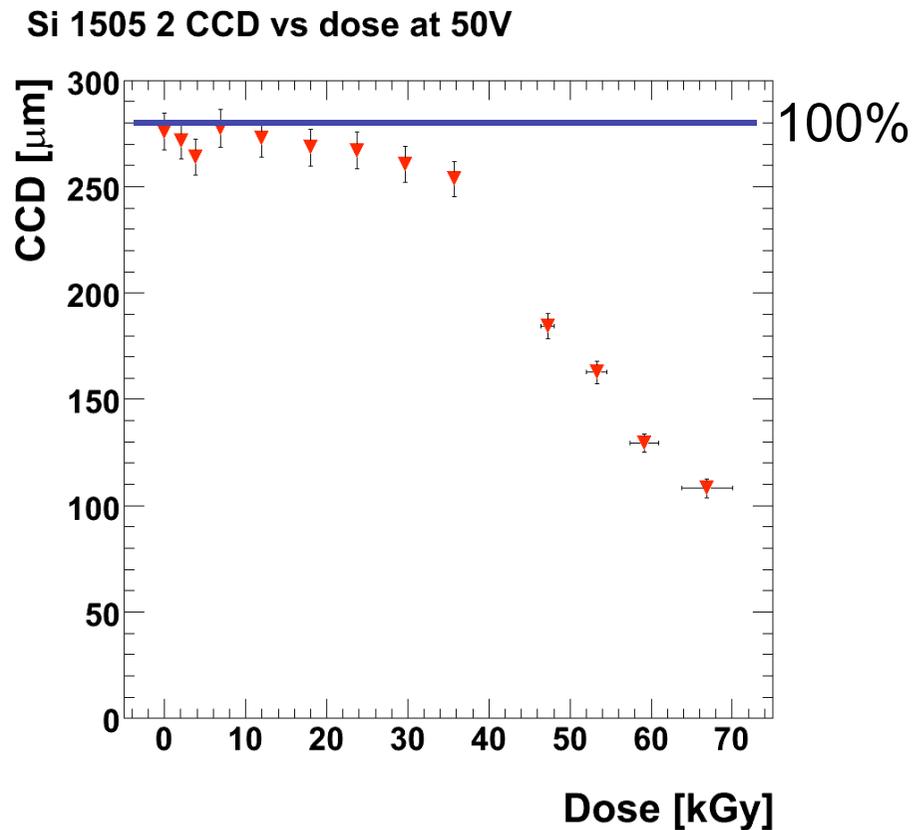


nach der
Bestrahlung



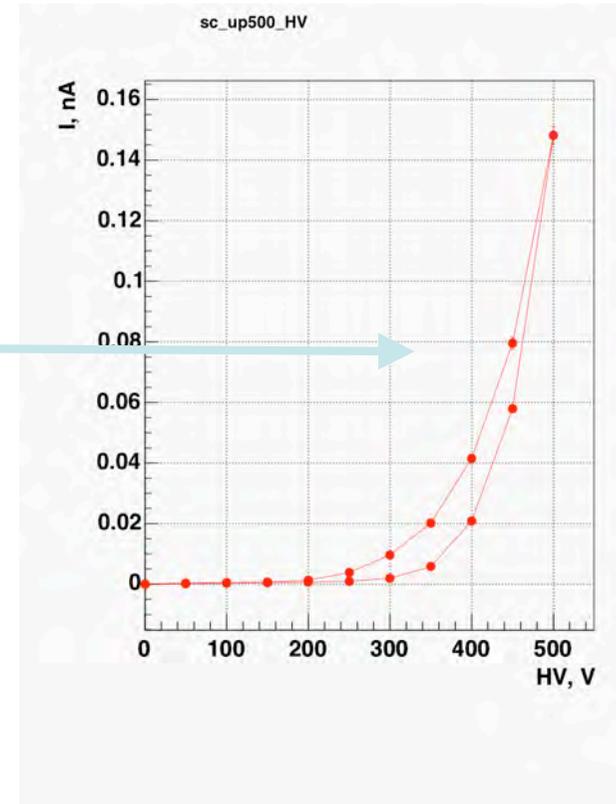
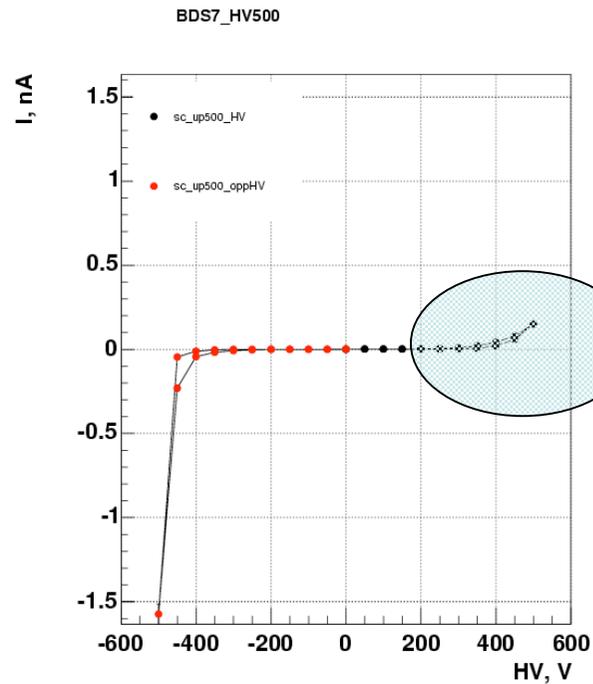
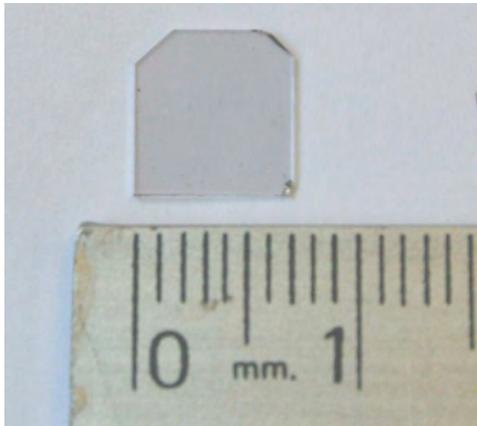
2.2. Polykristalline Diamantdetektoren (12)

Nachweiseigenschaften: Strahlungsfestigkeit (6): Ergebnisse - Referenz Silizium



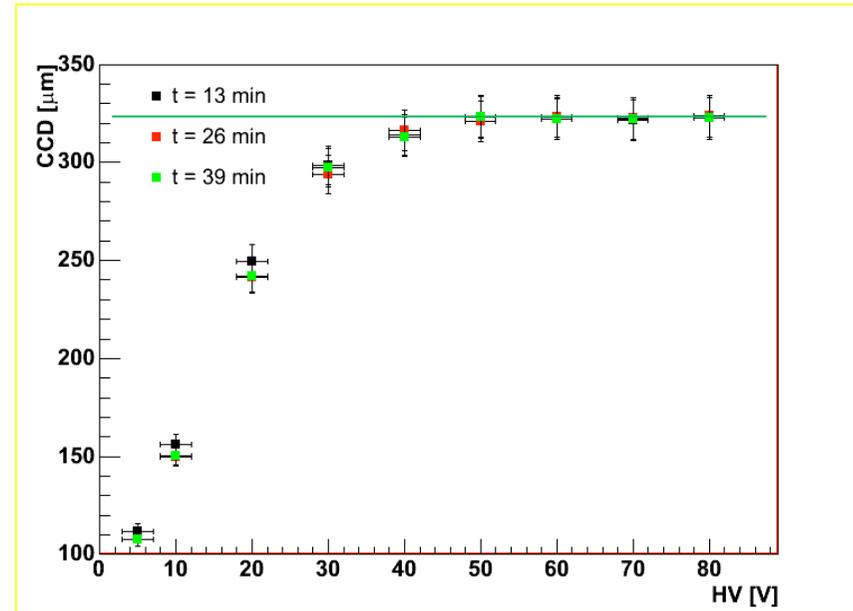
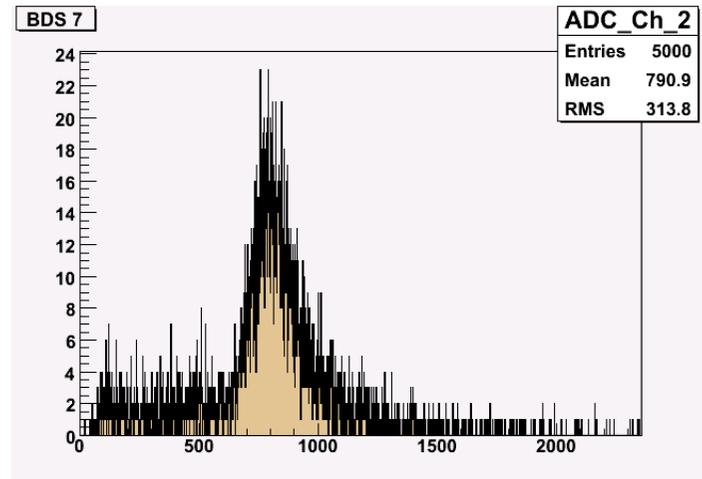
2.3. Einkristalline Diamantdetektoren (1)

*Versuchsmuster von Element Six, Ltd.: 7 * 7 mm², später metallisiert (Dmr. 3 mm)*



2.3. Einkristalline Diamantdetektoren (2)

klar separiertes Spektrum - Ladungssammlungseffizienz sehr gut (100%)
1 MIP erzeugt 11.5 ke^- (1.84 fC)

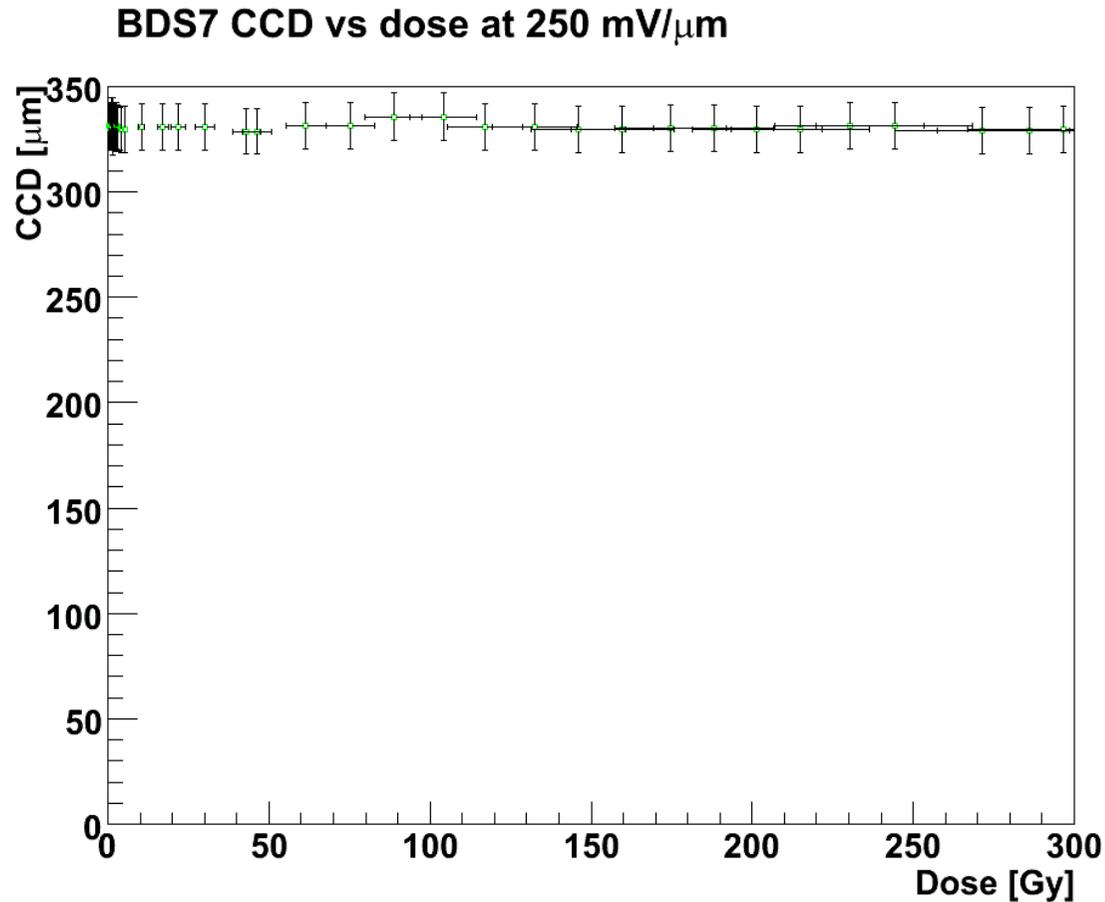


CCD erreicht
Maximum @ 50V
(100% Effizienz,
 $d = 320 \mu\text{m}$)



2.3. Einkristalline Diamantdetektoren (3)

klar separiertes Spektrum - Ladungssammlungseffizienz sehr gut



CCD @ 80V
(100% efficiency,
 $d = 320 \mu\text{m}$),
gemessen für kleine
Dosen (^{90}Sr)

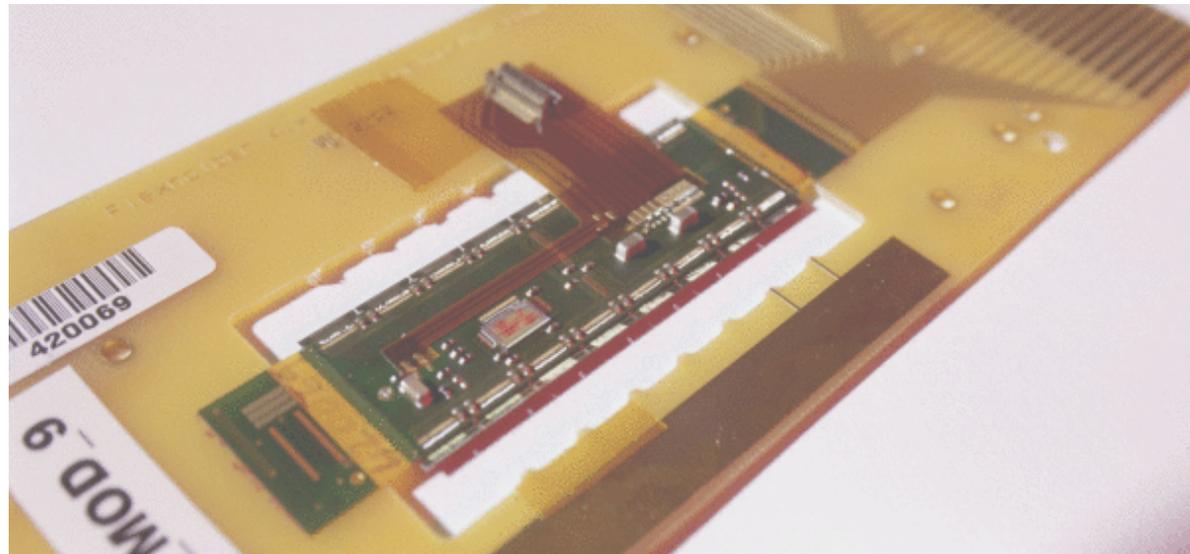
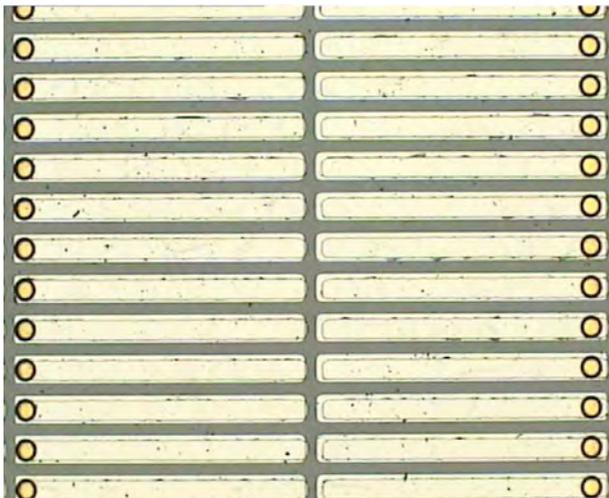


2.4. Anwendungen

2.4.1. Polykristalline Diamantdetektoren

Faustregel: hohe Strahlendosen und Temperaturen, aber kleine Anzahl Detektoren

- Strahlungsmonitore (8...32 Stück / Experiment) -> kleine Teleskope
- Strahldiagnose / Luminositätsmessung (CDF, Babar, CMS, ATLAS...)
- Detektoren für schwere Ionen (Stripdetektoren)
- “Pionieranwendung” für Koordinatendetektoren: ATLAS-Pixel-Muster



2.4. Anwendungen

2.4.2. Einkristalline Diamantdetektoren

Erste Modellanwendung in Zeuthen:

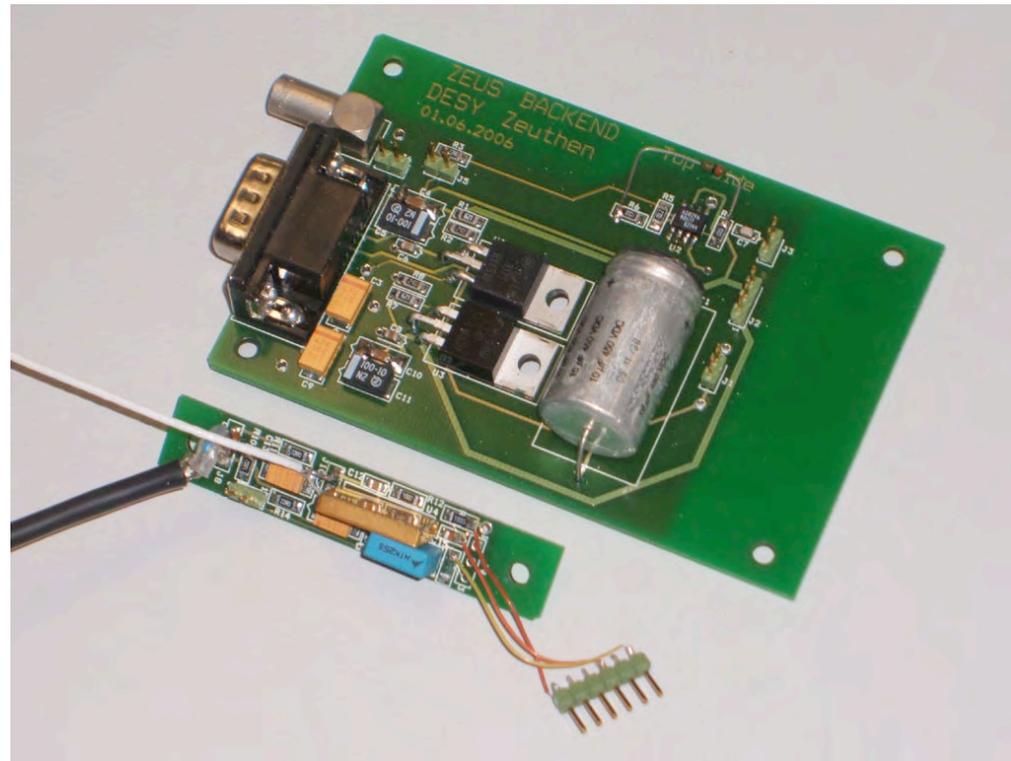
- Strahlungsmonitor (erster Test bei ZEUS, da U. Koetz auch Diamanten testet)

Status:

✓ Sensor, Elektronik,
Gehäuse

✓ gemessen im Labor

Einbau bei ZEUS vorbereitet
(nächster Zugang 06.12.2006)



3. Zusammenfassung

- Diamantdetektoren sind eine Alternative für den Einsatz unter schwierigen Bedingungen: hohe Strahlungs Dosen, hohe Temperaturen ohne Kühlung.
- Herstellungsniveau steigt kontinuierlich, leider keine Konkurrenz (E6 dominiert).
- Polykristalline Diamanten eignen sich für Applikationen, bei denen Nachweisschwellen gesetzt werden können (z.B. nicht für Energiemessung -Kal.!).
- Einkristalline Diamanten haben wesentlich bessere Eigenschaften, sie stehen noch ganz am Anfang ihrer Entwicklung.
- In Zeuthen wurde die für die Vermessung von Diamanten notwendige Infrastruktur aufgebaut. Wo nötig, wurden Kooperationspartner gefunden (TU-DA, BTU CB).
- Zeuthen kann Diamantsensoren verarbeiten (bonden, kleben etc.).
- Ziel der Arbeiten in Zeuthen ist die Entwicklung strahlungsfester Sensoren für das “Beam-Kalorimeter” eines zukünftigen Linearbeschleunigers (z.B. ILC); derartige Sensoren müssen Dosen von 10 MGy (elektromagnetisch) pro Jahr überstehen.
- Weitere Anwendungen als “spin off” sind denkbar und willkommen.



4. Zum Schluß:

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



TUNING OF TESTBEAM (1)

- Tuned the beam to currents in the Faraday cup of:
 - 10, 20, 50 and 100 nA
- This corresponds to dose rates of:
 - 59, 118, 295 and 590 kGy/h
- Dose controlled by beam current
- Error assumed $\sim 10\%$

