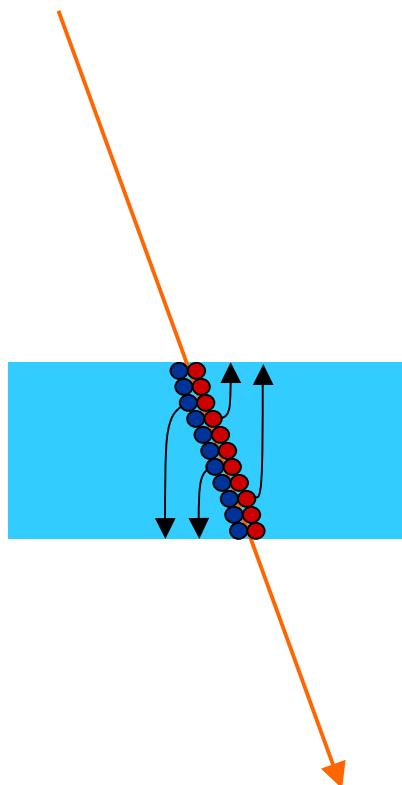




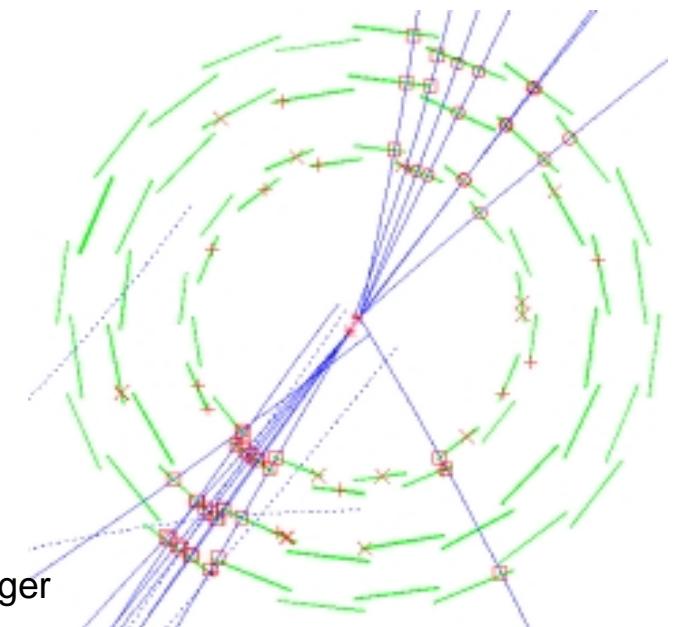
DPG Frühjahrstagung, Bonn, 26.3.2001

Neue Halbleiter-Detektorsysteme für die Teilchenphysik

Lutz Feld, Universität Freiburg



- Prinzip und Technologie
- Bauformen
- Halbleitersensoren als Spurdetektoren
 - am Large Hadron Collider
 - an einem zukünftigen e+e- Linearbeschleuniger



Das Prinzip eines Halbleitersensors mit pn-Übergang

1. erzeuge ein elektrisches Feld

Spannung für Verarmung der vollen Sensor-Dicke:

$$V_{FD} = d^2 N_{eff} \frac{q}{2\epsilon\epsilon_0}$$

effektive Dotierdichte N_{eff} gegeben durch

- ursprüngliche Dotierung
- strahleninduzierte Veränderungen

2. mit möglichst kleinem Dunkelstrom

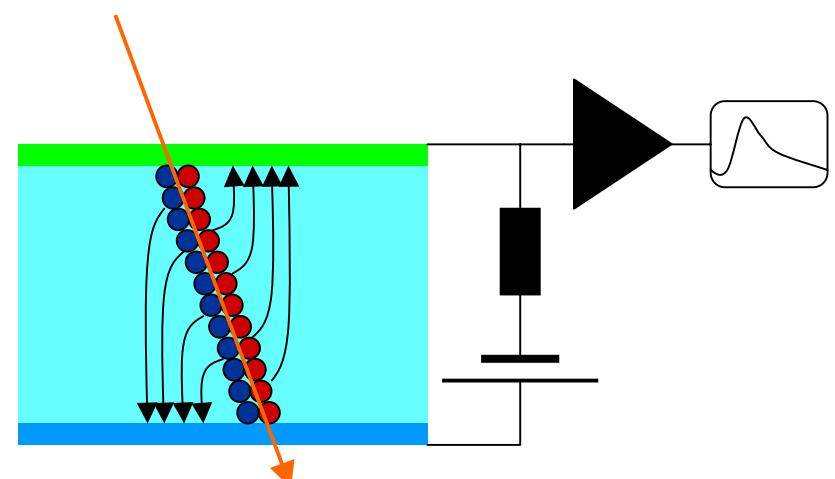
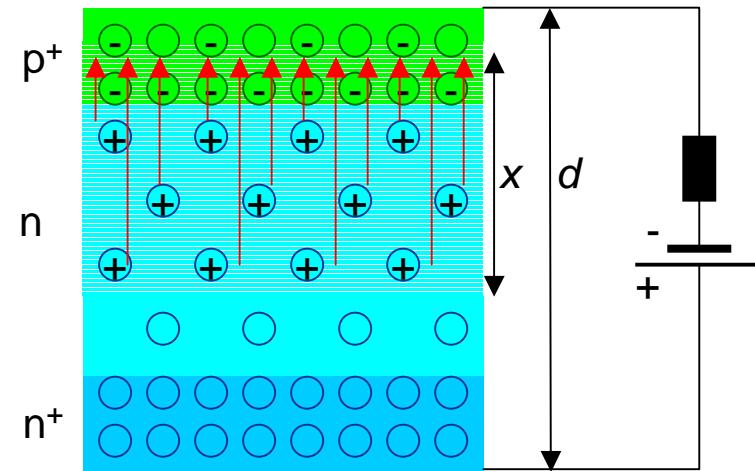
$$I \propto \frac{1}{\tau_g} \times T^2 \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \times Volumen$$

Ladungsträger-Lebensdauer τ_g gegeben durch

- ursprüngliche Kristallqualität
- strahleninduzierte Veränderungen

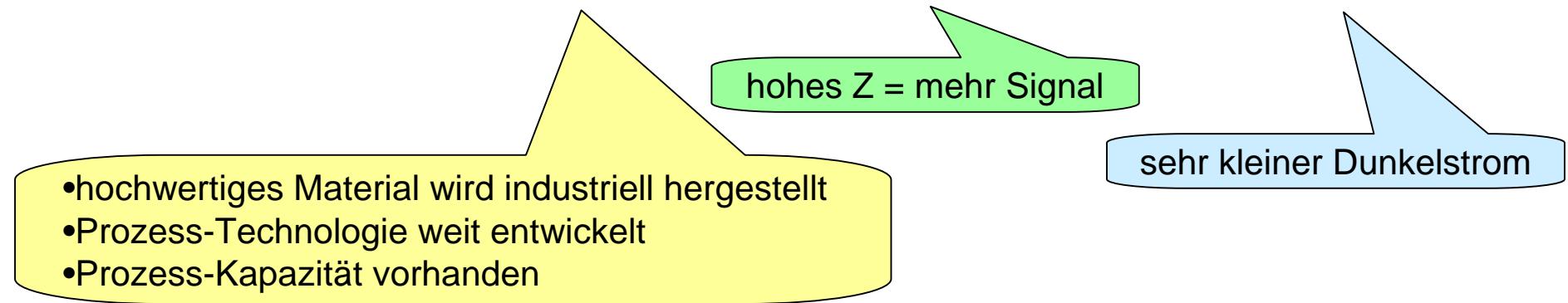
3. ionisierende Strahlung erzeugt freie Ladungsträger

4. Ladungsträger driften zu den Elektroden und induzieren ein Signal



Verschiedene Halbleitermaterialien

	Si	Ge	GaAs	CdTe	Diamant	SiC
Bandlücke E_g (eV)	1.12	0.67	1.42	1.56	5.48	2.99
Energie pro eh-Paar (eV)	3.6	2.9	4.2	4.7	13.1	6.9
Signal für MIP in 300μm (e)	24000	50000	35000	35000	9300	~19000
Z	14	32	31+33	48+52	6	14+6

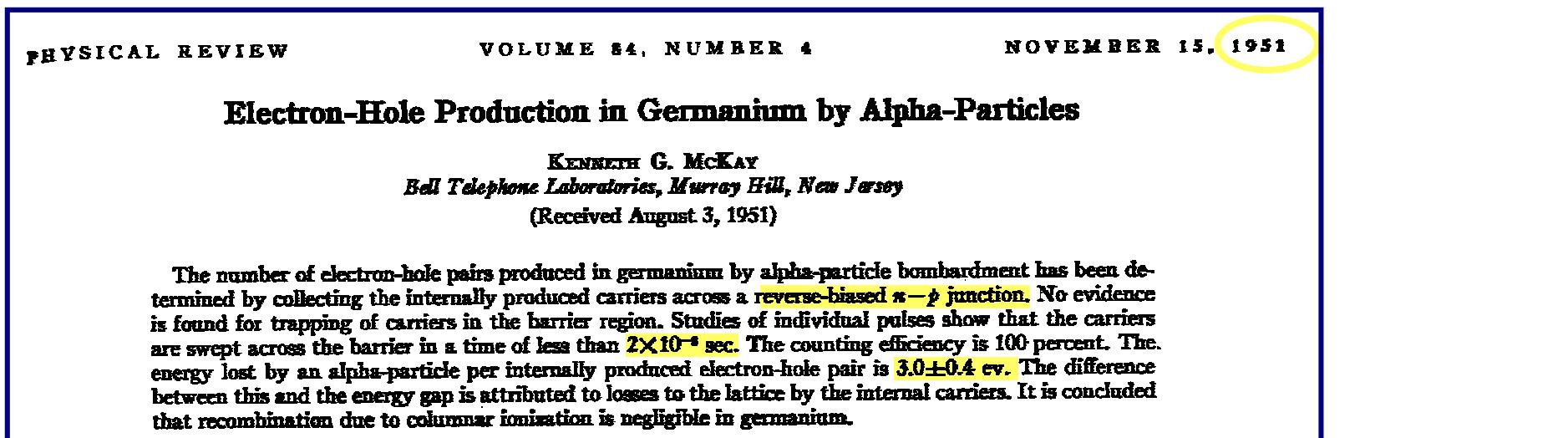


- Silizium ist heute das einzige Material für die Herstellung großflächiger Detektoren
Material für Detektoren muss sehr rein und hochohmig sein (1-8kOhm.cm)
- bei anderen Materialien gibt es zum Teil noch große Probleme mit Homogenität und Ladungssammeleffizienz

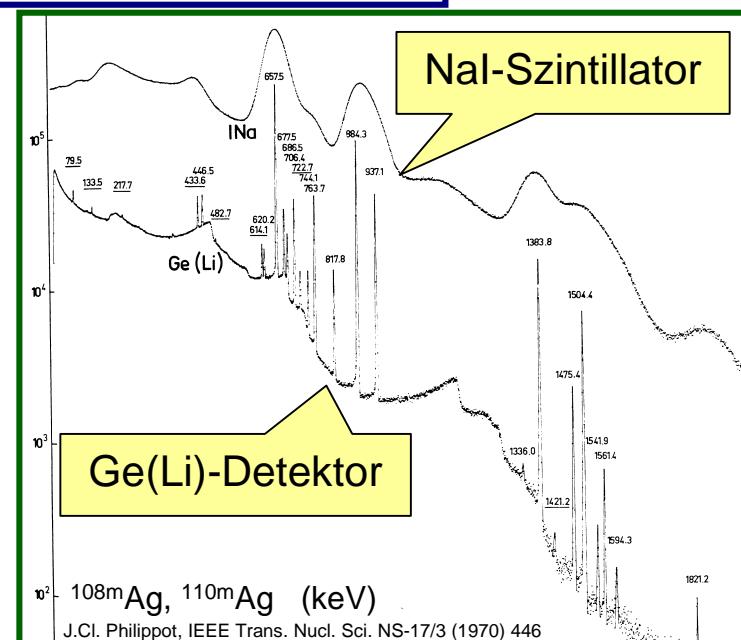
Vorteile von Halbleiter-Detektoren

- viele Ladungsträger pro deponierter Energieeinheit \Rightarrow gute Zählstatistik
3.6eV pro eh-Paar in Si (Ionisationsenergie in Gasen $\sim 30\text{eV}$)
- hohe Dichte ermöglicht dünne Detektorschichten
24000 eh-Paare in $300\mu\text{m}$ Si für ein MIP (entspricht $0.32\% X_0$)
- Ladungsträger frei beweglich \Rightarrow schnelle Ladungssammlung
typisch $\sim 10\text{ns}$ in $300\mu\text{m}$ Si
- Integration von Sensor und Ausleseelektronik möglich
Herstellung sehr kompakter und rauscharmer Detektorsysteme
- für Silizium: Ausgangsmaterial und Herstellung ähnlich wie bei Mikroelektronik
es kann von industrieller Erfahrung, Entwicklung und Produktion profitiert werden d.h. aber auch: Herstellung und Aufbau von Detektorsystemen ist Hochtechnologie und nicht billig

Die Idee ist nicht ganz neu....

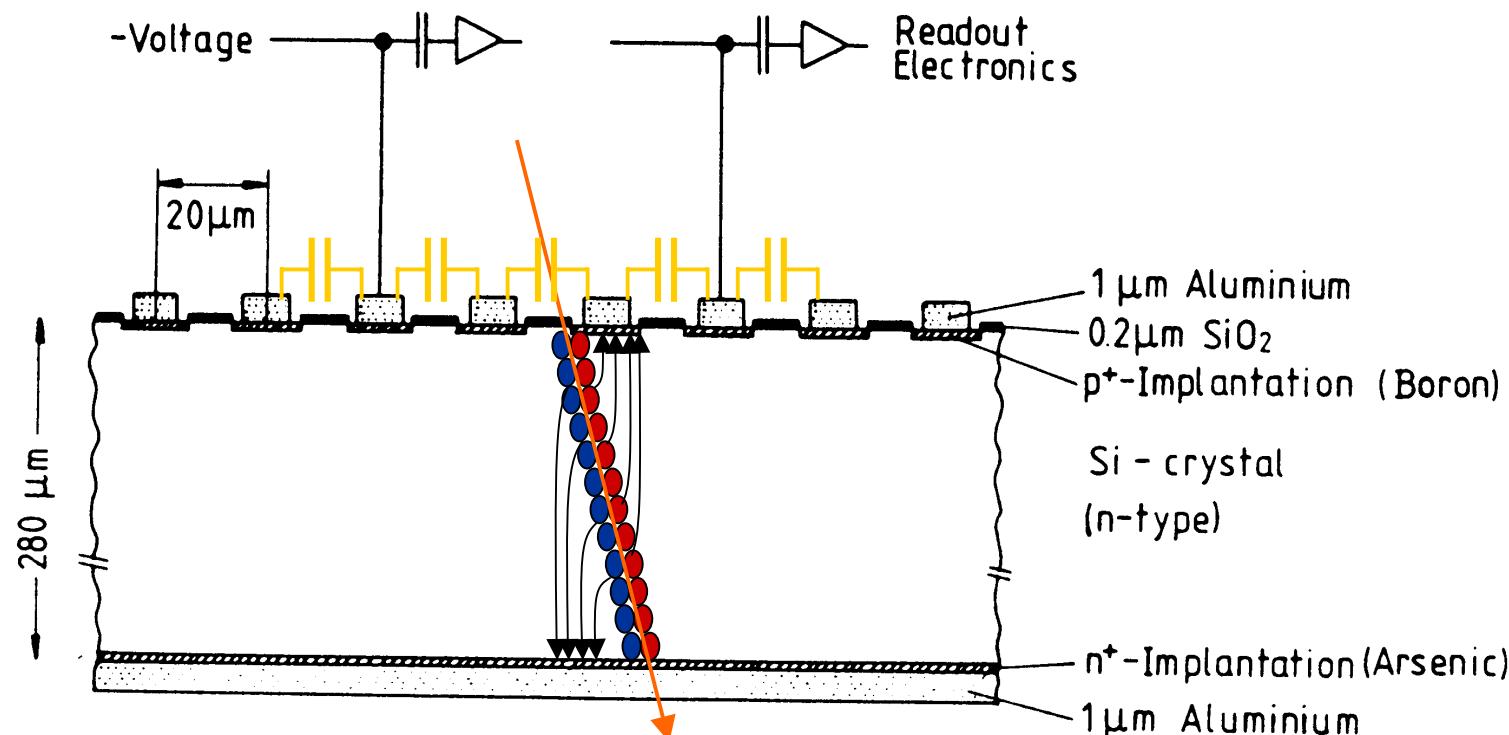


- Spektroskopie seit den 50er Jahren
- sehr hohe Energieauflösung
- keine Ortsinformation
- für Teilchenphysik braucht man
 - präzise Ortsinformation
 - feine Segmentierung
 - schnelle Auslese
 - „größere“ Nachweisfläche / viele Lagen

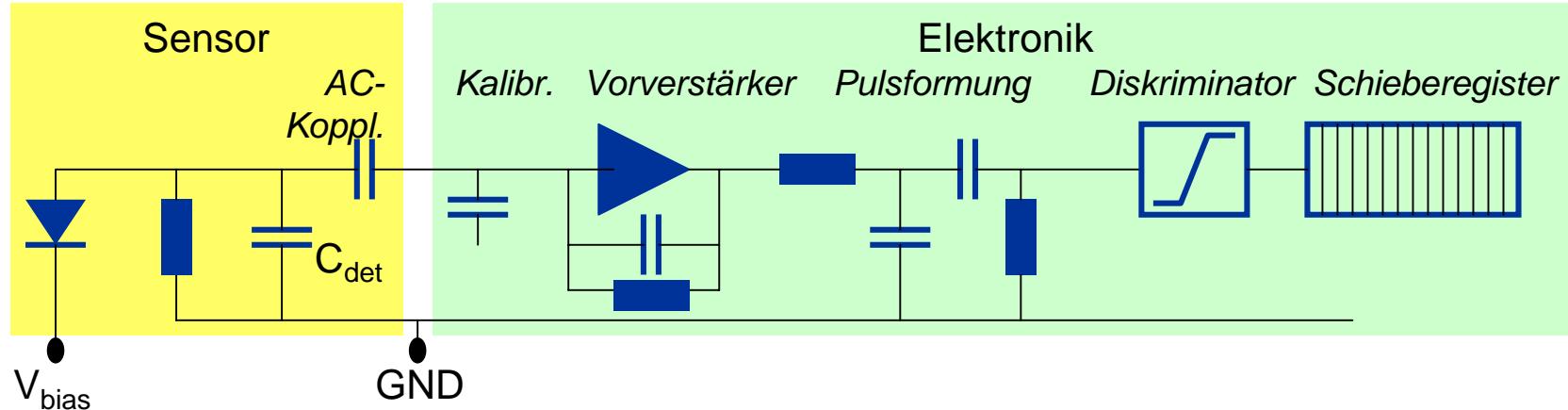


Anwendung der Planar-Technologie

- Prozesse für Dotierung, Strukturierung, Kontakte, Passivierung etc., entwickelt in der Mikroelektronik-Industrie
- in den 70er Jahren erstmals angewendet für Sensor-Herstellung (J.Kemmer)
- typische minimale Strukturgröße: einige Mikrometer



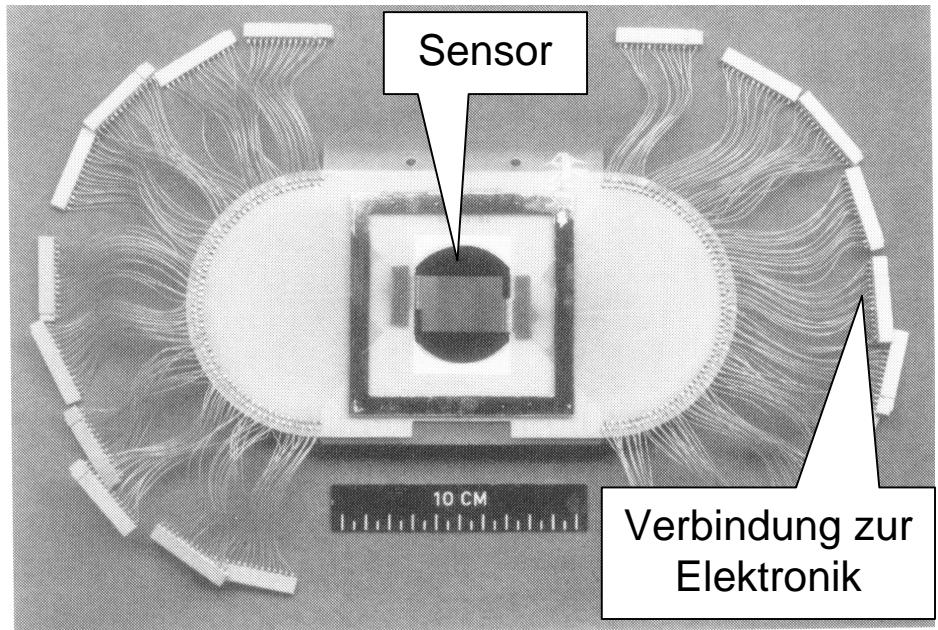
Auslese-Elektronik



- Rauschen
 - Detektor-Kapazität $N_C \sim a + b \cdot C_{\text{det}} \left(\sim \frac{1}{\sqrt{\tau}} \right)$ τ : Zeitkonstante der Pulsformung
 - Dunkelstrom $N_I \sim \sqrt{I \cdot \tau}$
 - Widerstand in Serie $N_R \sim C_{\text{det}} \sqrt{R/\tau}$
- Segmentierung von Sensor und Elektronik in n Teile:
(bei gleicher gesamter Leistungsaufnahme) $N_{\text{Teil}} \approx \frac{N_{\text{Ganzes}}}{\sqrt{n}}$

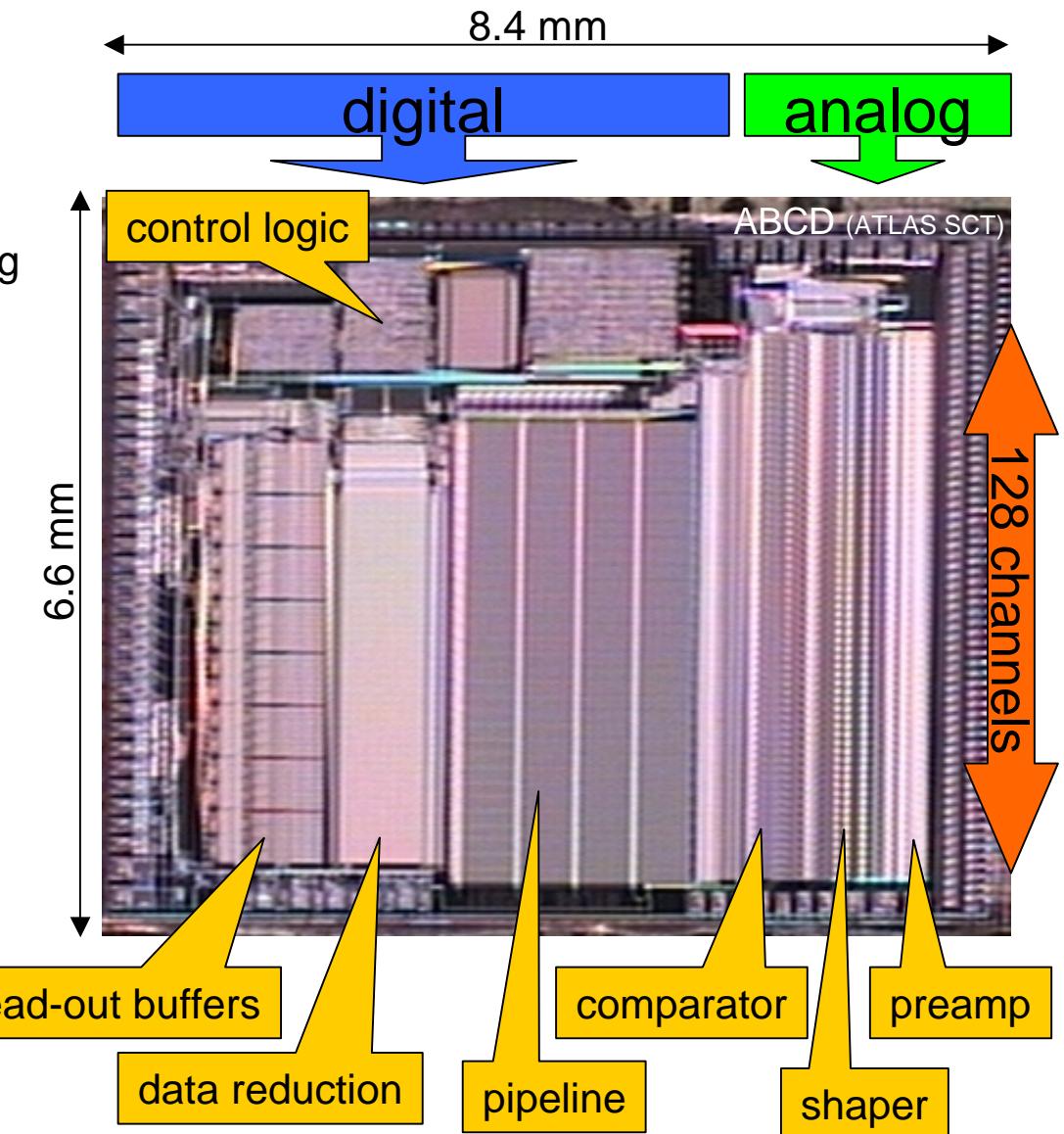
Erste Anwendung in der Teilchenphysik: NA11

- erste Anwendung in einem Teilchenphysik-Experiment (1981, NA11):
Streifendetektor
 - 1200 Streifen-Dioden mit $20\mu\text{m}$ Abstand
 - $24 \times 36 \text{ mm}^2$ Nachweisfläche
 - Ortsauflösung $\sim 5\mu\text{m}$
 - 8 Lagen, später mehr
- präzise Spurvermessung erlaubt
Identifikation von Charm-Teilchen
durch sekundäre Vertices
- $\sim 1\text{m}^2$ Auslese-Elektronik (!)
- nächster Schritt:
spezielle integrierte Schaltkreise



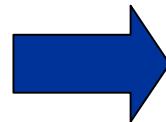
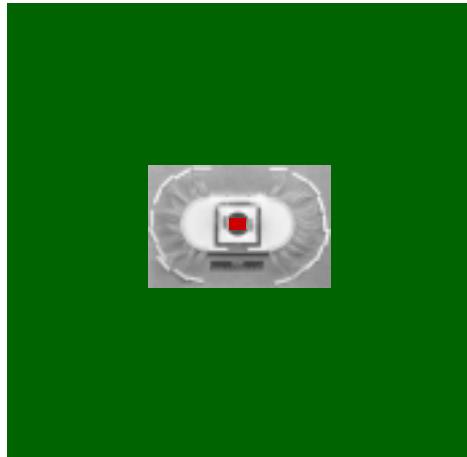
Very Large Scale Integration Auslese-Chips

- VLSI ermöglicht:
 - hohe Kanal-Dichte
 - Datenverarbeitung und Speicherung lokal am Detektor
 - geringes Rauschen
 - niedrige Verlustleistung
- industrielle Herstellung
- Integrationsdichte wächst ständig
 - erster Chip (MICROPLEX) in 5 μ m
 - jetzt 0.25 μ m-Technologie

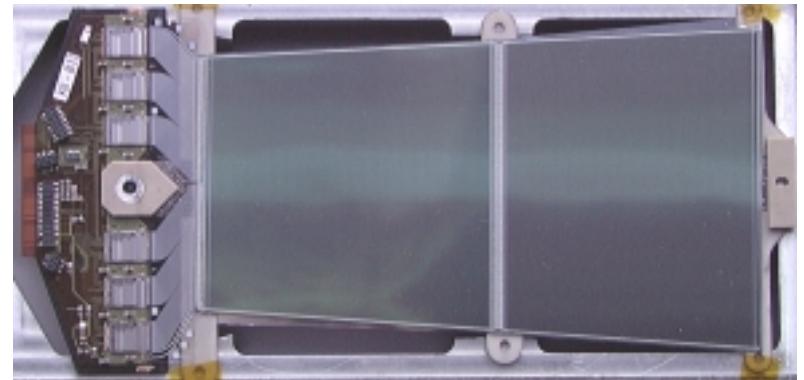


Fixed-Target \Rightarrow Collider-Experimente

9 cm² Sensor mit 10000cm² Elektronik



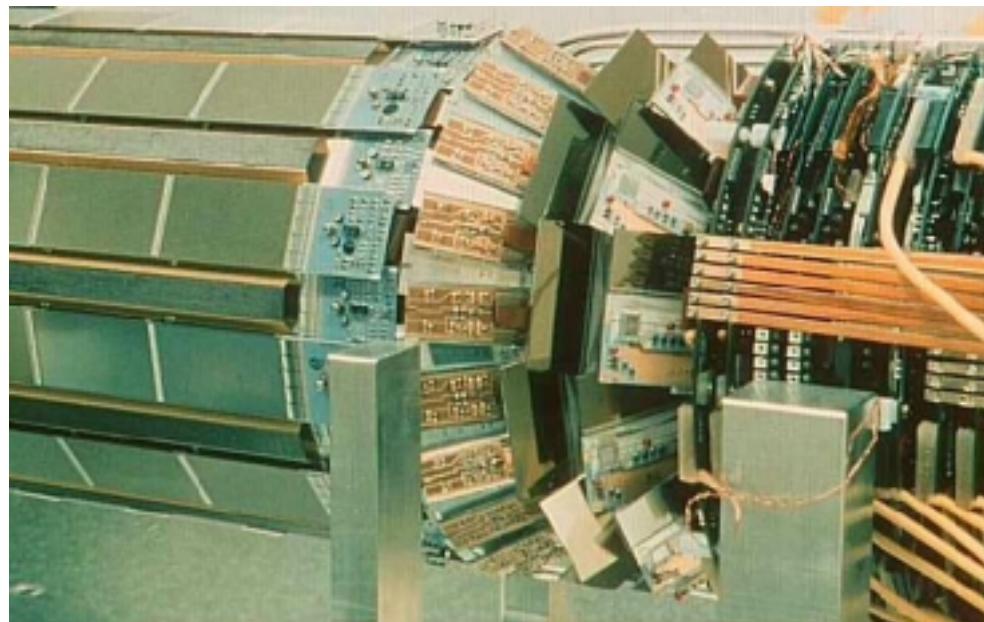
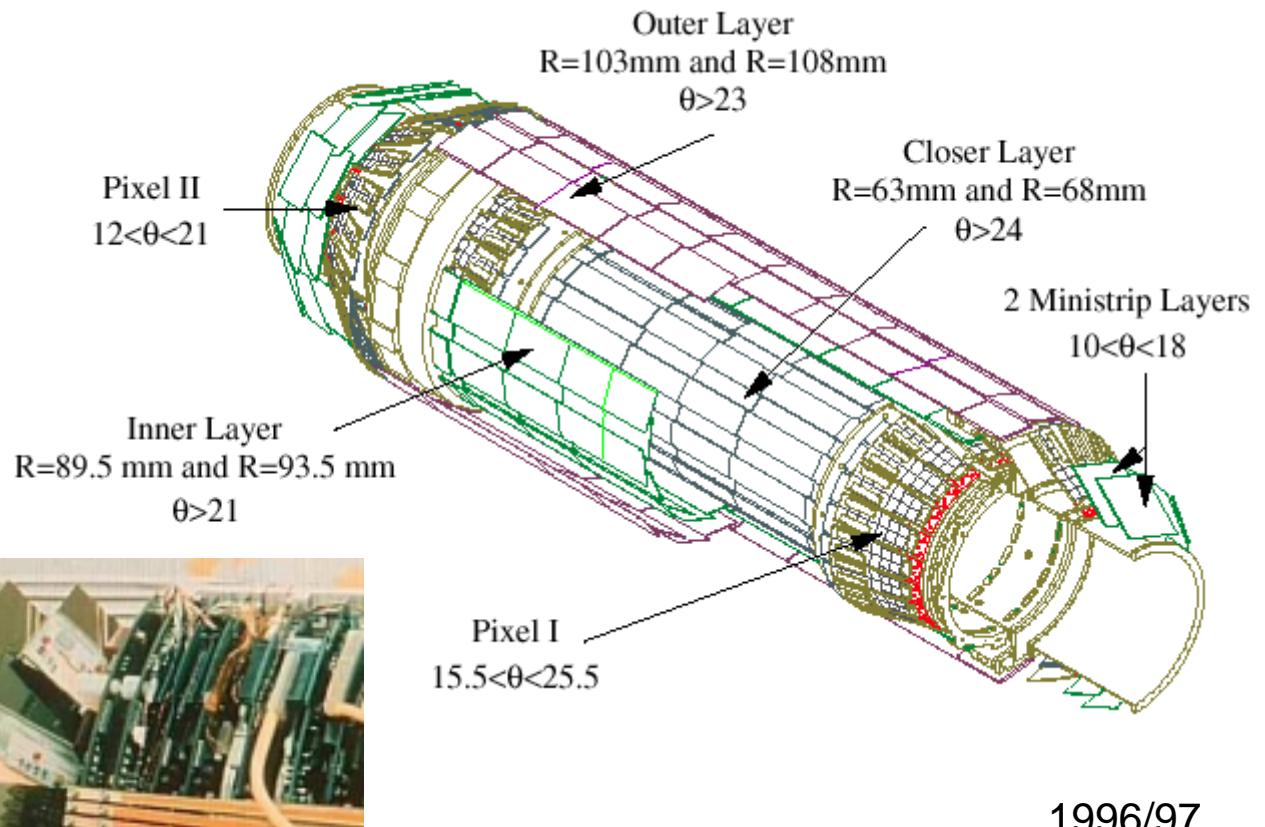
160 cm² Sensor mit 20cm² Elektronik



- mit VLSI-Chips können Silizium-Detektoren in Collider-Experimente eingebaut werden
seit Ende der 80er Jahre haben (fast) alle Collider-Experimente einen Silizium-Vertex-Detektor (zuerst in MARKII)
- zusätzlich erforderlich sind miniaturisierte „Leiterplatten“: Elektronik-Hybride
- kleinste Baugruppe: ein ‚Detektor-Modul‘
 - erhält Betriebsspannung und Steuer-Signale
 - liefert analoge oder digitale Daten auf typ. einer seriellen Leitung (Kupfer oder Glasfaser)

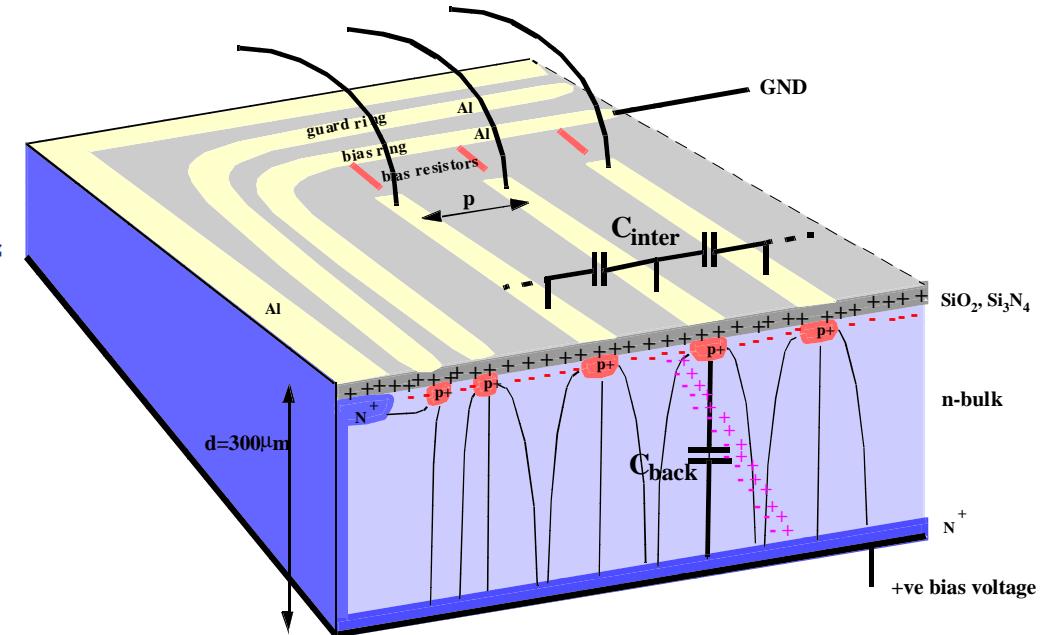
Beispiel: DELPHI am LEP e⁺e⁻-Speicherring

- 1.8 m² Silizium
- 175000 Streifen
- 1.2 Mio. Pixel



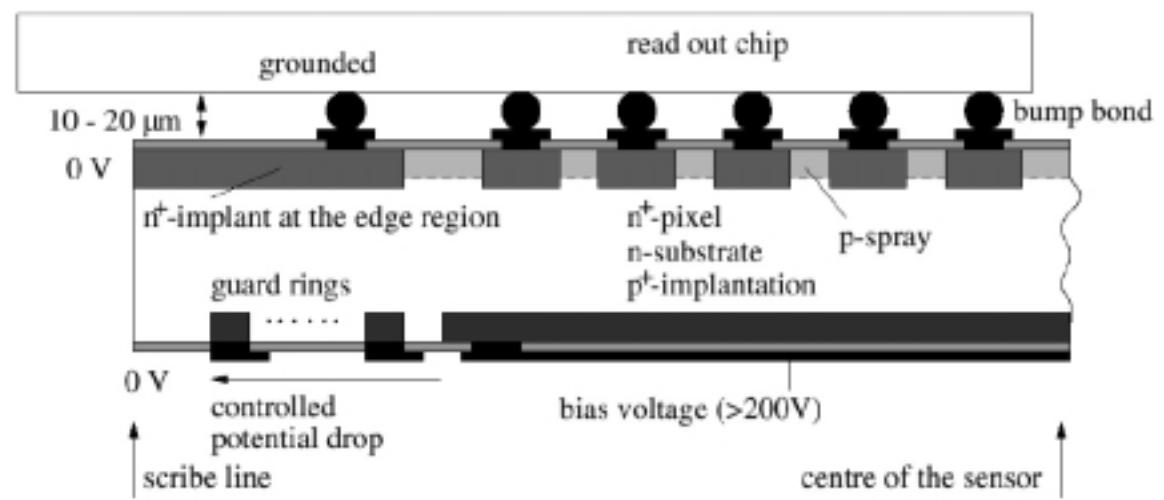
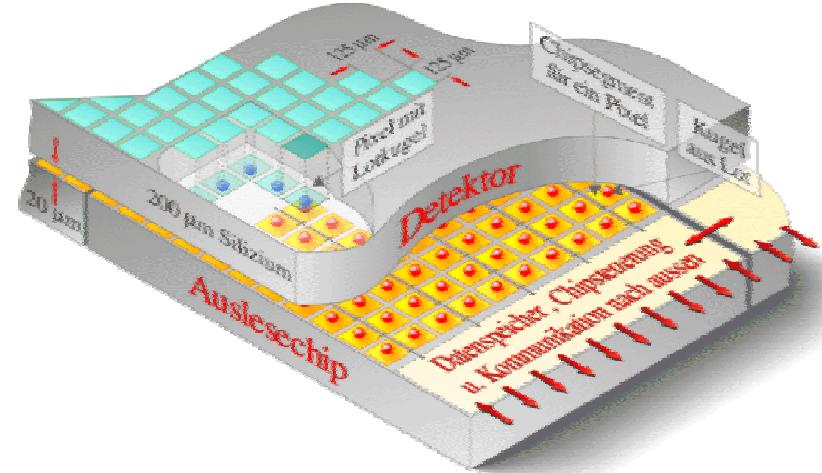
Streifendetektor

- verbreitetster Detektortyp
- einseitige Strukturierung auf der ‚p-Seite‘ ist am einfachsten (und billigsten: 10-20 CHF/cm²)
- MIP-Signal in 300µm Si: ~24000e
- Streifenkapazität ~1.5pF/cm
⇒ Rauschen für 12 cm Streifen ~1500e ($\tau=25\text{ns}$)
- AC-Kopplung schützt Elektronik vor Dunkelstrom
- Strukturierung der ‚n-Seite‘ erlaubt Messung der zweiten Koordinate:
doppelseitiger Streifenzähler ⇒ ‚2D‘-Information mit relativ wenigen Kanälen
Problem: Mehrdeutigkeiten



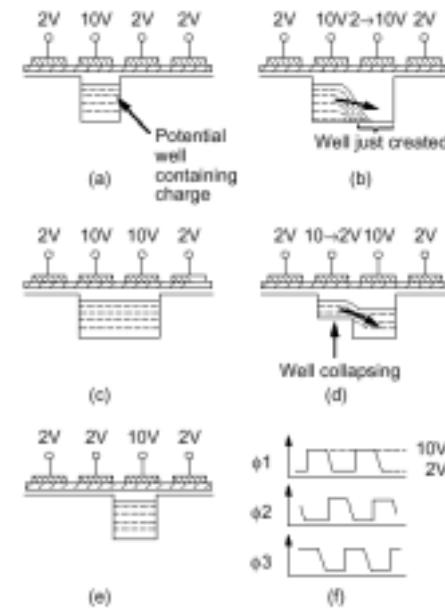
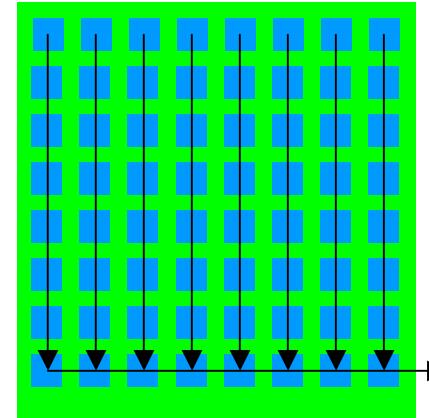
Hybrider Pixeldetektor

- Segmentierung der Diode in Pixel
(Seitenlänge 50-500µm)
- echte 2D Koordinatenmessung
- viele Kanäle/Verbindungen
- Ausleseelektronik über jedem Pixel,
auf gleicher Fläche (typ.)
- kleine Kapazität
⇒ niedriges Rauschen (<200e)
- kleiner Dunkelstrom
- 94/95 WA97, NA57, 96/97 DELPHI,
97/98 NA50, typ. ~1Mio. Pixel



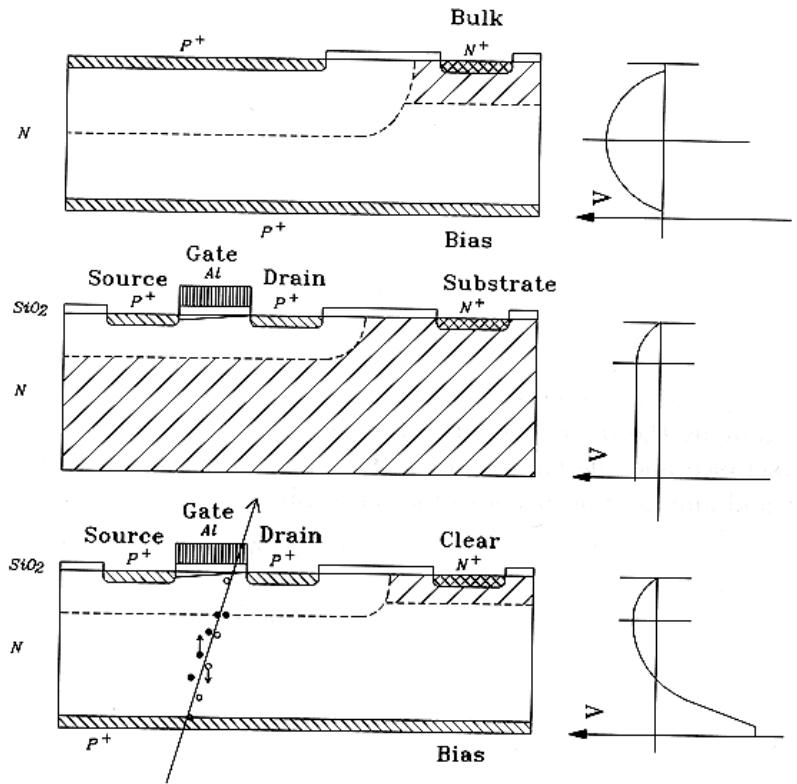
Charge Coupled Devices

- Ladungssammlung unter segmentierten Elektroden (MOS oder *pn*)
- Ladung wird durch mehrere alternierende Steuersignale zur Ausleseelektronik geschoben
- 2D-Information mit rel. wenigen Kanälen
- kleine Pixel ($20 \times 20 \mu\text{m}^2$) \Rightarrow Auflösung $\sim 4 \mu\text{m}$
- Auslese dauert viele Zyklen ($\geq 100 \mu\text{s}$), während Sensor immer sensitiv ist
- Betrieb bei typ. 200 Kelvin um Ladungsverluste zu minimieren
- aufgrund des geringen Rauschens kann eine sehr dünne aktive Schicht ausreichen ($\sim 20 \mu\text{m}$)
- \Rightarrow SLD Vertex-Detektor seit 1991



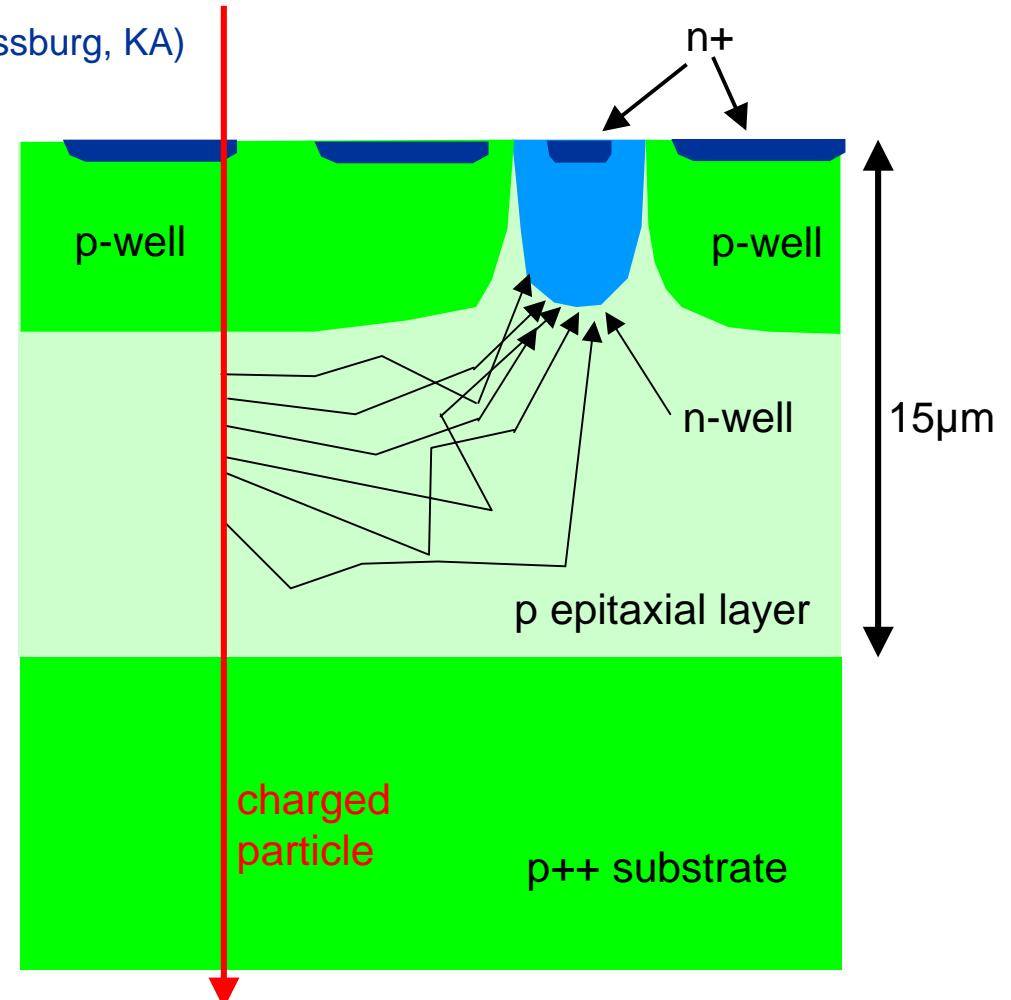
DEPleted Field Effect Transistor

- Integration von Sensor und erstem Verstärker
- auf hochohmigem Detektormaterial
- sehr kleine Kapazität \Rightarrow sehr niedriges Rauschen
- Signalladung wird durch Auslesen nicht zerstört
- Operation zum Löschen der Ladung notwendig (Puls oder kontinuierlich)
- DEPFET-Matrix kann seriell oder in Projektionen ausgelesen werden
- schnelle Pixel-Auslese nur mit Auslese-Chip (hybrid)
*Vorteil gegenüber konventionellem hybriden Pixel-Detektor:
stärkeres Ausgangssignal und kleineres Rauschen*
- noch keine Anwendung in Hochenergiephysik



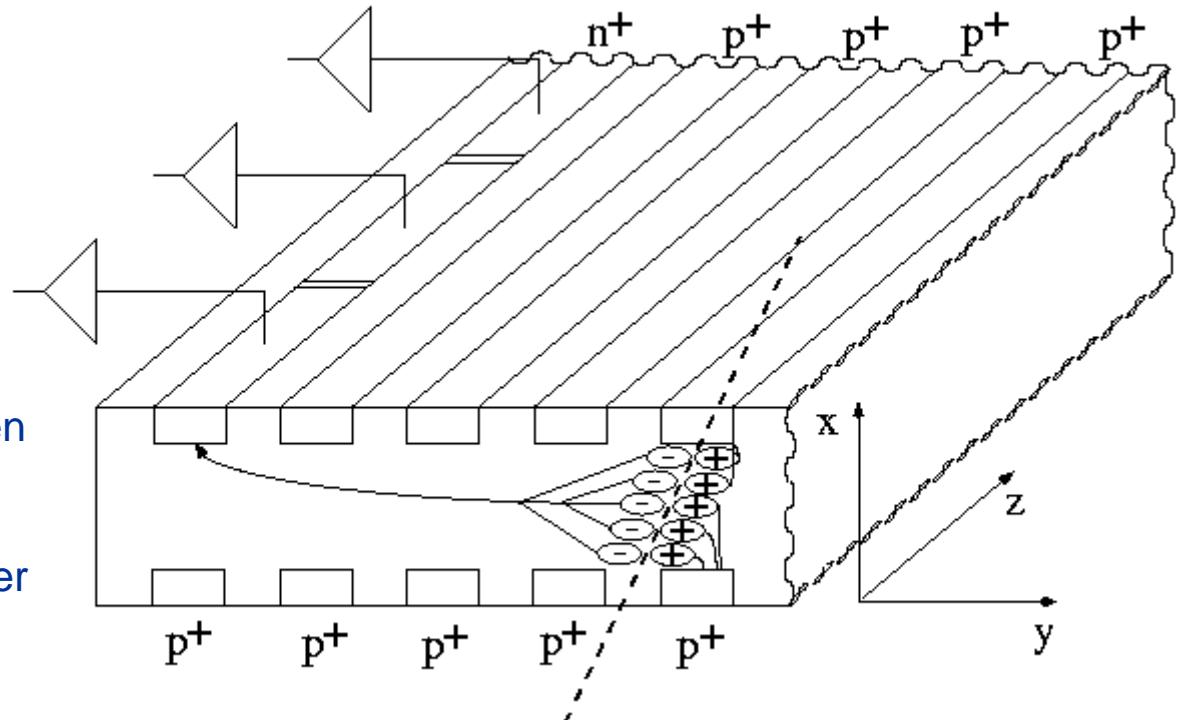
Monolithischer CMOS-Pixeldetektor

- CMOS auf Standardwafer (IReS+LEPSI, Strassburg, KA)
- Integration von Sensor und Elektronik
 - weniger Material
 - keine Draht- oder Bump-Bonds
 - hohe Packungsdichte (submicron VLSI)
 - hohe Ortsauflösung
 - strahlenhart
 - niedriger Preis
- MIMOSA Chip: 64x64 Pixel, $20 \times 20 \mu\text{m}^2$
 - Diode $3 \times 3 \mu\text{m}^2 \Rightarrow 3.1 \text{ fF} \Rightarrow \sim 30 \text{ e Rauschen}$
 - $\sim 1000 \text{ e Signal} \Rightarrow \text{S/N} \sim 20 \dots 40$
 - Ortsauflösung $1 \text{ - } 2 \mu\text{m}$
 - Effizienz $\sim 99.5\%$
 - $\sim 100 \text{ ns}$ für Ladungssammlung
- Bau von sehr dünnen Detektoren (wenige $10 \mu\text{m}$)

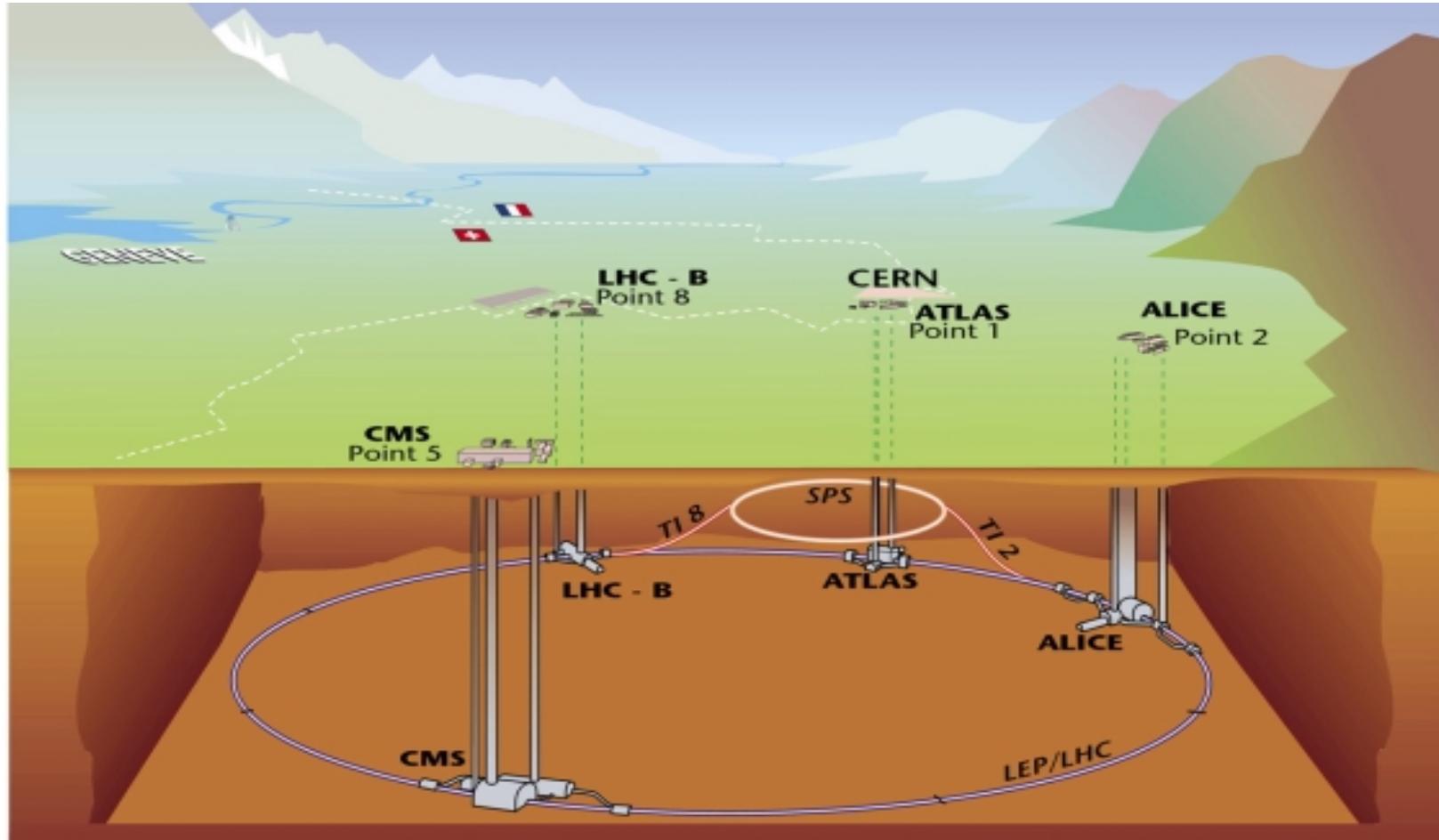


Silizium-Driftdetektor

- Verarmung von beiden Seiten
- Potentialminimum für Elektronen in der Mitte der Sensors
- Elektronen driften im Minimum zur Anode
- Ortsmessung über Driftzeit und segmentierte Anode
- 2D-Information mit wenigen Kanälen
- gute Auflösung erfordert Kenntnis der Verteilung der Dotierung und der Temperatur (typ. $50\mu\text{m}$ aus Driftzeit)
- Anode kann sehr klein sein
⇒ niedriges Rauschen
- ⇒ ALICE (1.3m^2), STAR



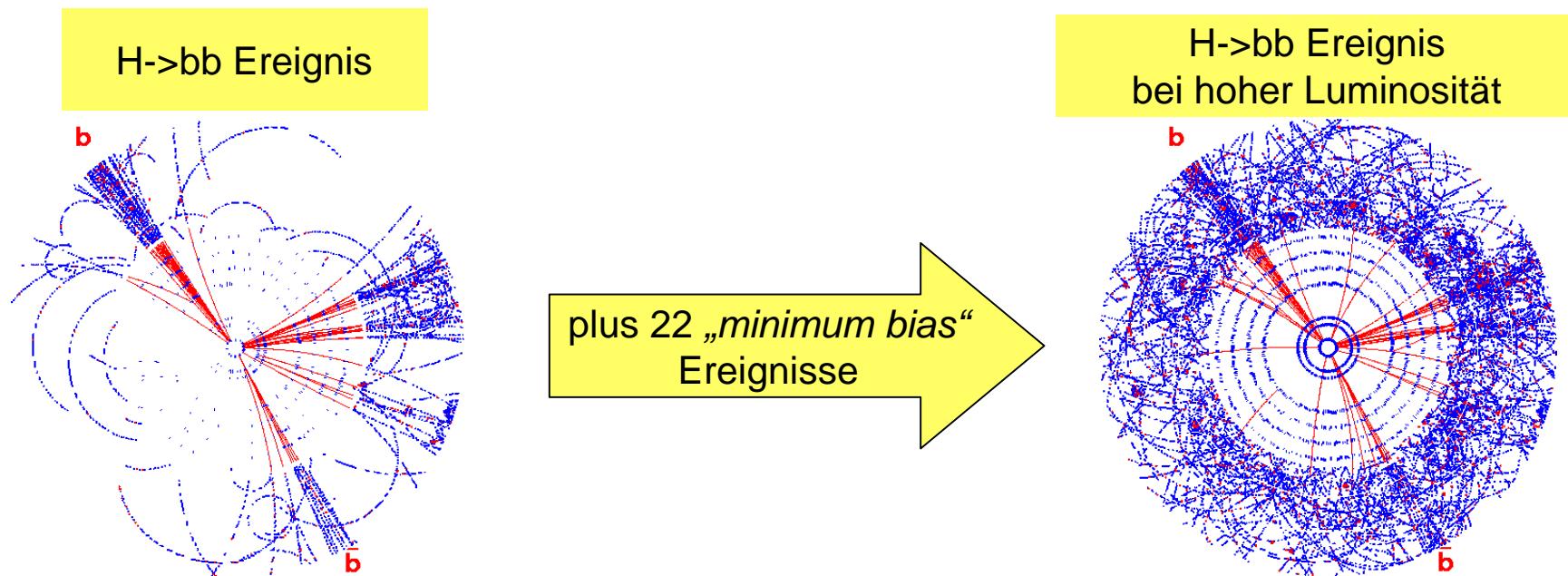
Large Hadron Collider am CERN



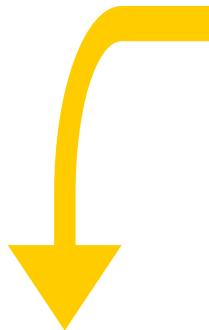
- pp-Kollisionen mit 14 TeV Schwerpunktsenergie
- Zwei „Universal“-Experimente: ATLAS and CMS
- Zwei spezialisierte Experimente: ALICE (Schwerionen) und LHC-b (b-Physik und CP)
- erster Strahl in 2005, erste Physik-Kollisionen in 2006

Anforderungen an Spurdetektoren am LHC

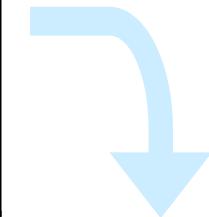
- hohe Luminosität ($10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)
 - etwa 1000 Teilchen alle 25 ns, aus ~23 sich überlagernden Ereignissen
 - sehr hohe Spurdichten
 - hohe Strahlenbelastung
- \Rightarrow schnelle, strahlenharte Detektoren mit hoher Granularität
(Ortsauflösung steht nicht allein im Vordergrund)
- Pixel-Detektoren im innersten Bereich
- Streifen-Detektoren bilden die ‚zentrale Spurkammer‘



Silizium am Large Hadron Collider



		ATLAS	CMS	ALICE	LHCb
Pixel	Fläche (m^2)	2.3	1.1	0.23	
	Kanäle (Mio.)	140	45	14.4	
Streifen	Fläche (m^2)	61.1	214	5.12	0.6 +
	Kanäle (Mio.)	6.2	11.4	2.6	0.22 +
Drift	Fläche (m^2)			1.26	
	Kanäle (Mio.)			0.192	



Pixel-Detektorsysteme am LHC

haben etwa die Größe von Vertex-Detektoren an LEP
~2m² Sensorfläche
~100 Mio. Pixel
3 Lagen

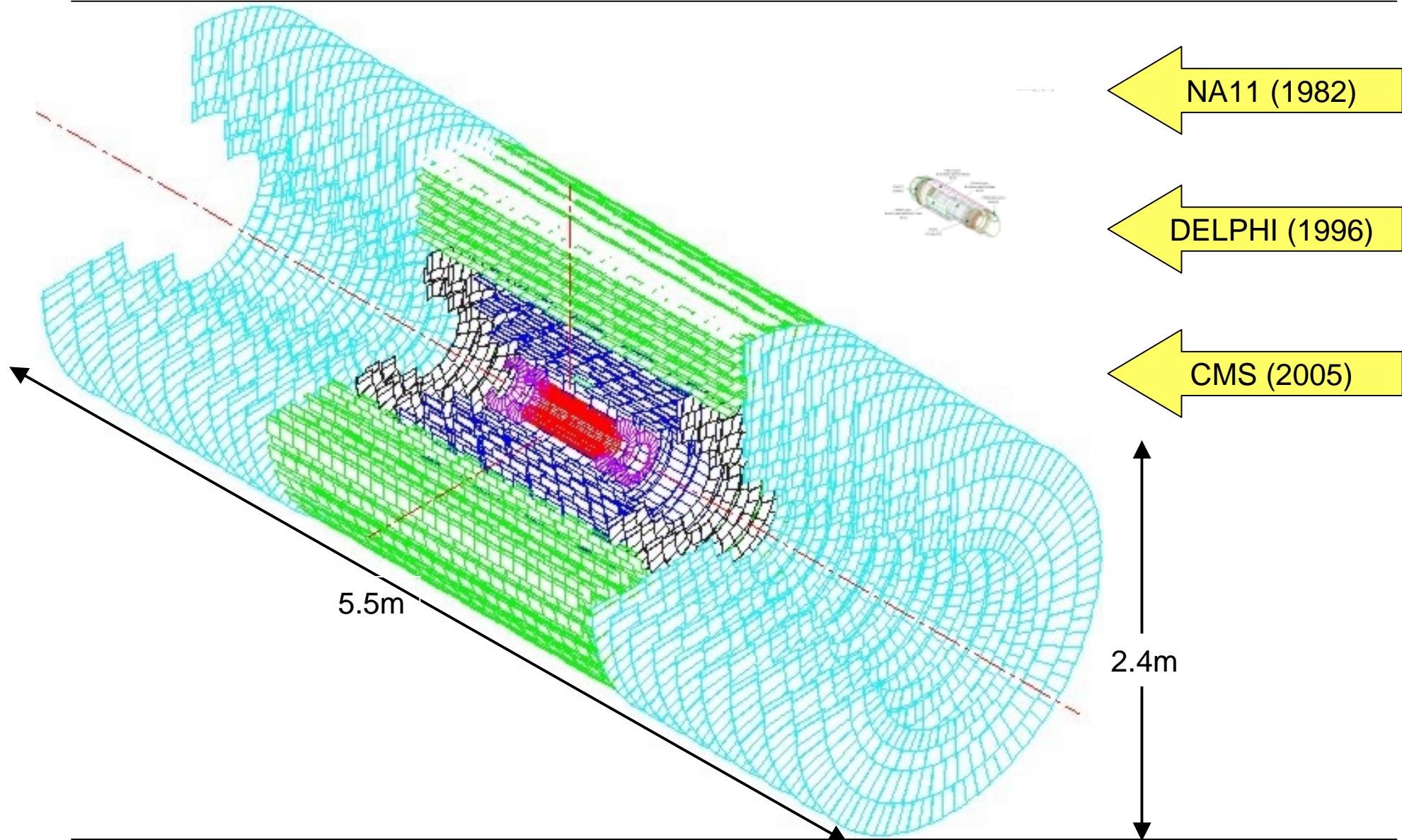
Streifen-Detektorsysteme am LHC

- haben eher die Größe von klassischen gasgefüllten Spurkammern
- bis zu ~200m² Sensorfläche
- bis zu ~10 Mio. Kanäle
- bis zu 10 Lagen

Herausforderungen:

- Strahlenhärte
- Taktrate 40MHz und S/N>10
- mechanische und thermische Stabilität
- Massenproduktion + Kosten

Größenvergleich verschiedener Siliziumdetektoren-Systeme



Strahlenbelastung am LHC

zwei Arten von Strahlenbelastung:

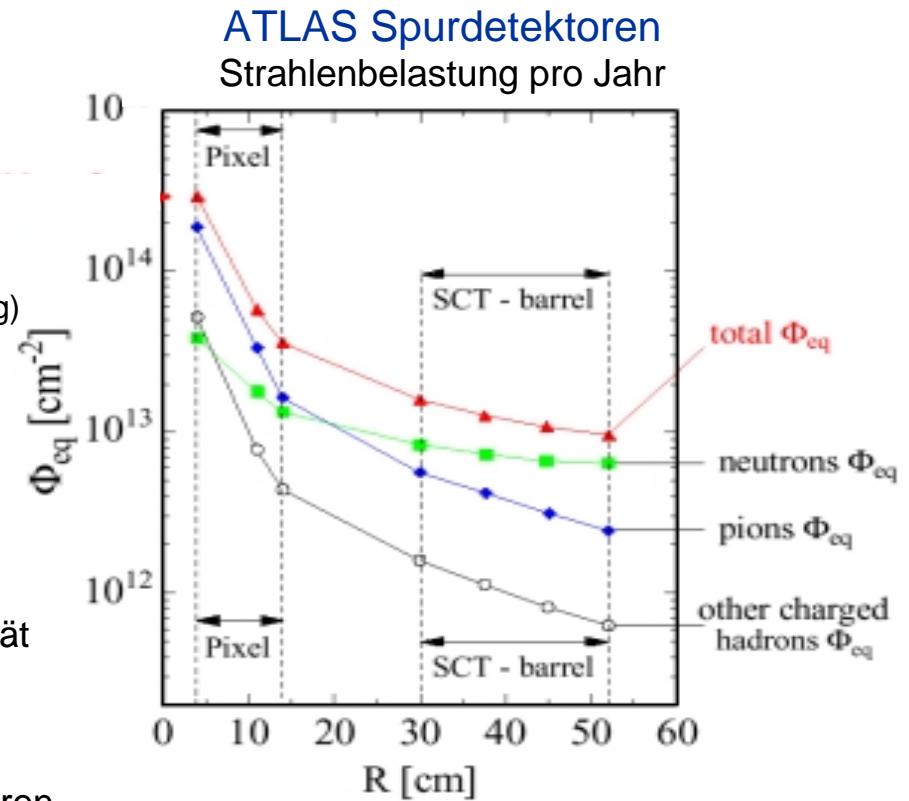
- ionisierender Energieverlust
 - erzeugt Ladungsträger
- nicht-ionisierender Energieverlust
 - erzeugt Fehlstellen im Kristall
 - hängt von Energie und Teilchenart ab (Fluß-Normierung)

Sensoren

- Anstieg des Dunkelstroms
- Änderung der Verarmungsspannung
- Störstellen \Rightarrow Verringerung des Signals
- Anstieg der Oxid-Ladungen \Rightarrow Streifen/Pixel-Kapazität

Auslese-Chips

- Anstieg der Oxid-Ladungen beeinflusst MOS-Strukturen
- Reduktion der Stromverstärkung in Bipolar-Transistoren
- parasitäre Strukturen und Ströme
- transiente Phänomene: Änderung von logischen Zuständen etc.



Streifen-Detektoren in 10 Jahren:

$\sim 1.5 \times 10^{14}$ 1-MeV-Neutronen/cm²

~ 60 kGy

Pixel-Detektoren pro Jahr:

$\sim 3 \times 10^{14}$ 1-MeV-Neutronen/cm²

~ 150 kGy

Änderung der Verarmungsspannung

- Strahlung erzeugt Zustände die wie Akzeptoren wirken und macht Donatoren unwirksam

$$V_{FD} = d^2 N_{eff} \frac{q}{2\epsilon\epsilon_0}$$

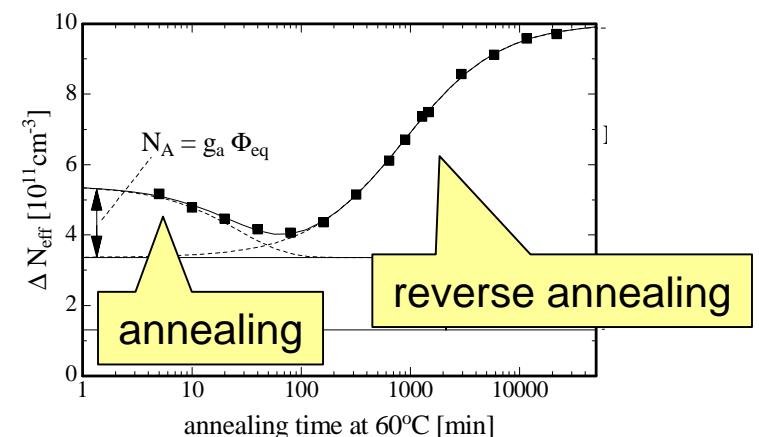
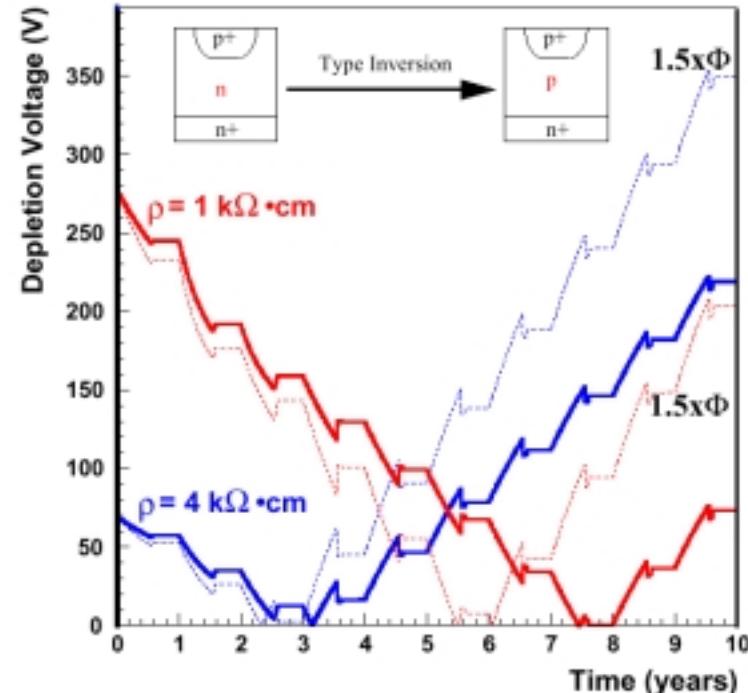
⇒ Typ-Inversion von *n*-Typ nach *p*-Typ

⇒ Anstieg der Verarmungsspannung:

- Streifen: bis ~300V nach 10 Jahren
- Pixel: bis ~200V pro Jahr

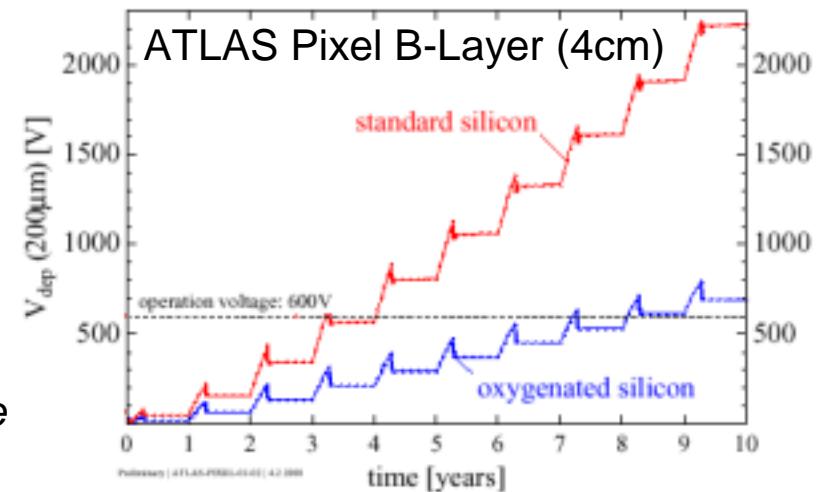
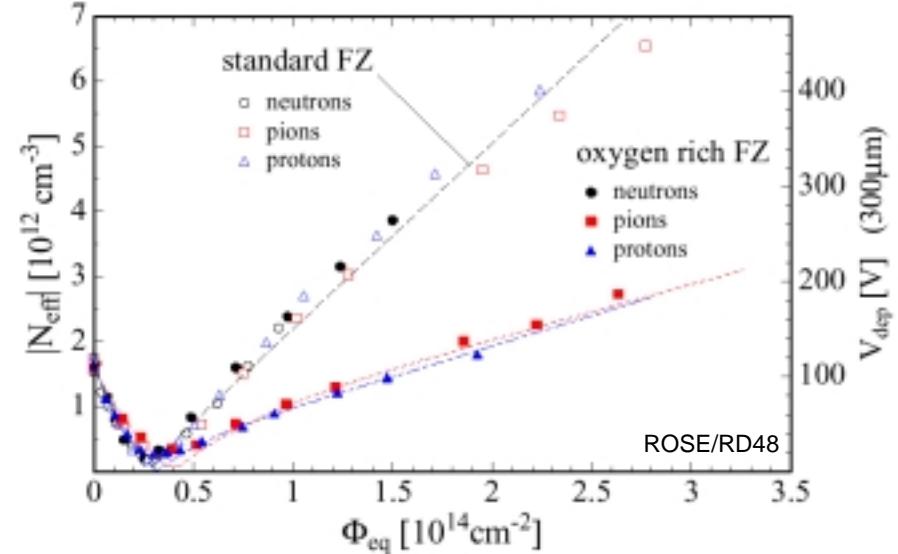
- Strahlenschaden ist nur zum Teil stabil, Veränderungen sind stark temperaturabhängig

- Maßnahmen:
 - spannungsfeste Sensoren (bis ~500V und höher)
 - n*⁺-in-*n* funktioniert auch bei teilweiser Verarmung
 - T<0°C um 'reverse annealing' zu unterdrücken



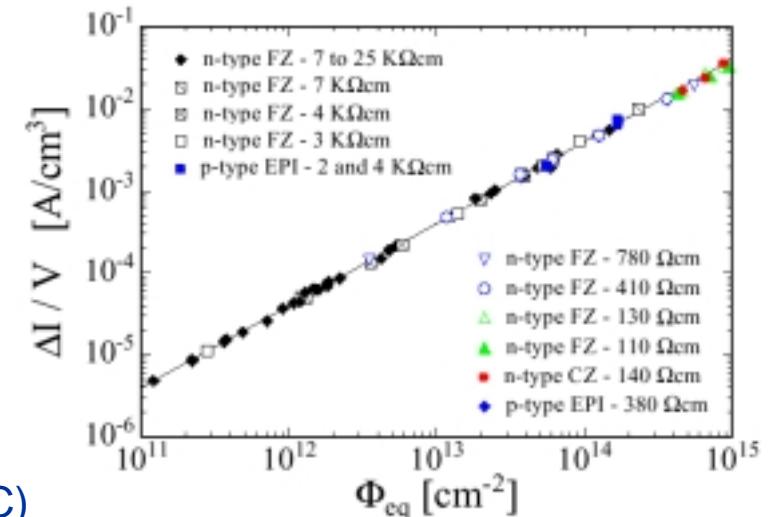
Sauerstoff-angereichertes Silizium

- Sauerstoff-Anreicherung reduziert den Anstieg der Verarmungsspannung
- allerdings nur für geladene Teilchen, nicht bei Neutron-Bestrahlung
- Ursache noch nicht ganz aufgeklärt
 - Sauerstoff verbindet sich mit Störstelle und macht sie elektrisch inaktiv
 - Neutron-Bestrahlung erzeugt Störstellen-Cluster
- bisher keine negativen Effekte der Sauerstoff-Anreicherung gefunden
- erster Ansatzpunkt die Strahlenhärtete von Silizium zu verbessern,
die meisten anderen Maßnahmen machen nur die Symptome erträglicher



Anstieg des Dunkelstroms und Thermische Stabilität

- Strom steigt linear mit nicht-ionisierendem Energieverlust
- ein Teil des Strahlenschadens heilt aus (temperaturabhängig)
- nach 10 Jahren am LHC:
~2mA für ein typisches Streifen-Detektormodul (bei -10°C)
- Problem: $2\text{mA} \times 500\text{V} = 1\text{W} (!)$
 \Rightarrow Erwärmung der Sensoren
 \Rightarrow möglicherweise positive Rückkopplung (*thermal runaway*)
- Abhilfe:
 - Betrieb bei etwa -10°C
 - effiziente Kühlung mit kleinen Temperaturgradienten
 - thermische Trennung von Sensoren und Elektronik



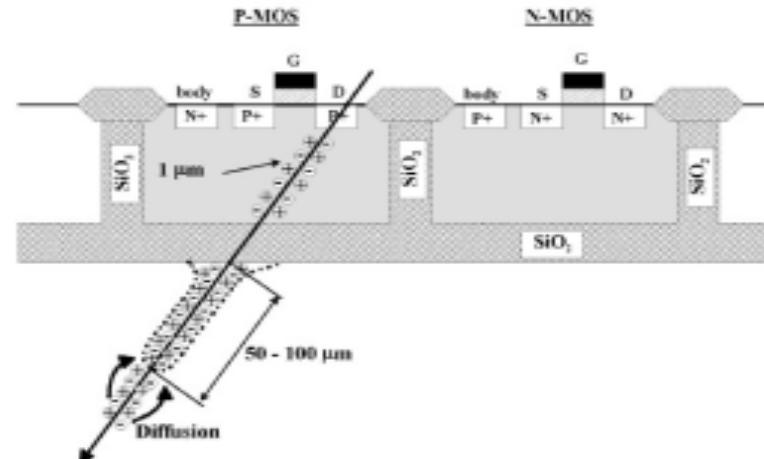
$$I \propto \frac{1}{\tau_g} \times T^2 \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \times \text{Volumen}$$

Strahlenharte Chips: zwei Technologien

„klassische strahlenharte Prozesse“,

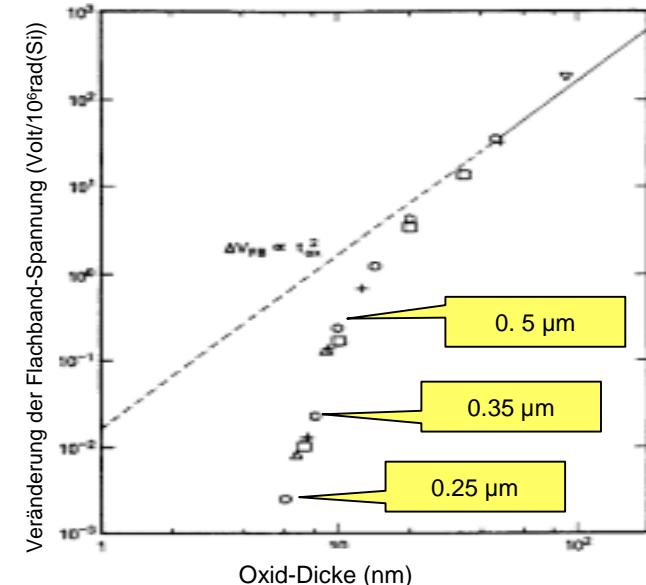
z.B. DMILL BiCMOS-Prozess

- CMOS, JFET und bipolare Transistoren
- 0.8µm Strukturgröße
- Strahlenhärtung spezifiziert bis 100kGy
 - Trennung der einzelnen Bauteile voneinander und vom Substrat durch SiO₂-Wände
 - sehr hohe Oxid-Qualität (niedrige Temperaturen)
- *spezieller Prozess, niedrige Ausbeute, teuer*

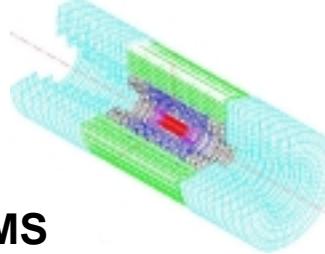
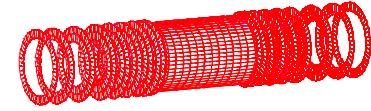


„Sub-Mikrometer CMOS-Prozesse“

- Miniaturisierung im Sub-Mikrometer Bereich führt zu Oxiddicken von wenigen Nanometern
⇒ Aufladung des Oxids stark unterdrückt
- daher sind Sub-Mikrometer CMOS-Chips ‚intrinsisch‘ strahlenhart
- zusätzlich werden spezielle Designregeln benötigt
- Sub-Mikrometer CMOS ist Industriestandard
⇒ preiswert und hohe Ausbeute

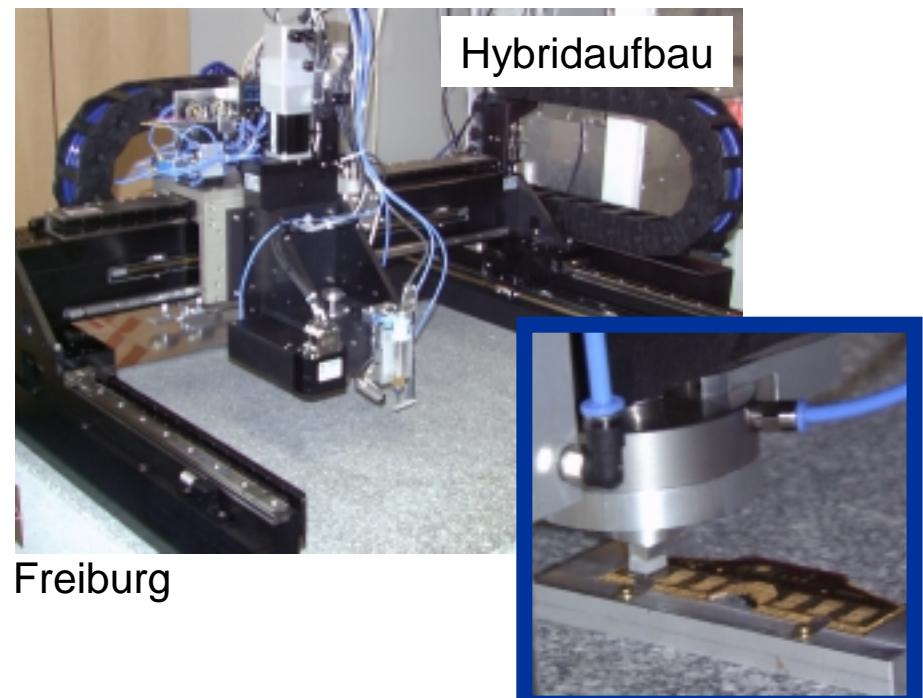
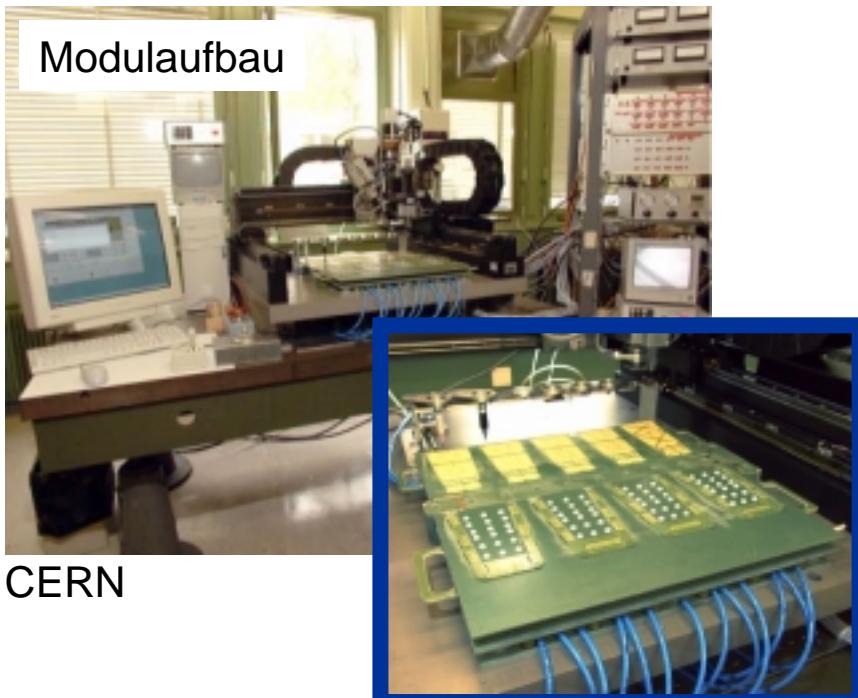


Vergleich der Streifen-Detektoren von ATLAS und CMS

	 CMS	 ATLAS
Silizium-Fläche	214 m ²	61 m ²
Wafer-Größe	6" (4")	4"
Kanäle	11.4 Mio.	6.2 Mio.
Hybride/Module	17700	4088 x 2
Chips	APV25 (0.25μm)	ABCD3T (DMILL)
Datentransfer	analog, optisch	binär, optisch
Verlustleistung	~35kW	~35kW
Kühlung	einphasig	evaporativ
Strahlungslänge gesamter Tracker, eta <0.6	0.3 X ₀	0.3 X ₀
Kosten	~70 Mio. CHF	~45 Mio. CHF

Massenproduktion von Streifen-Modulen: Montage

- bisher: manuell unter Messmaschine
- neue Entwicklung: präzise, vollautomatische Platzierung
 - Sensor-Montage: Aufkleben der Sensoren auf den Modul-Rahmen (8 Module/Stunde)
 - Hybrid-Montage: Aufkleben der Chips auf die Hybride (8 Hybride/Stunde)
 - erreichte Platziergenauigkeit $\sim 2\mu\text{m}$



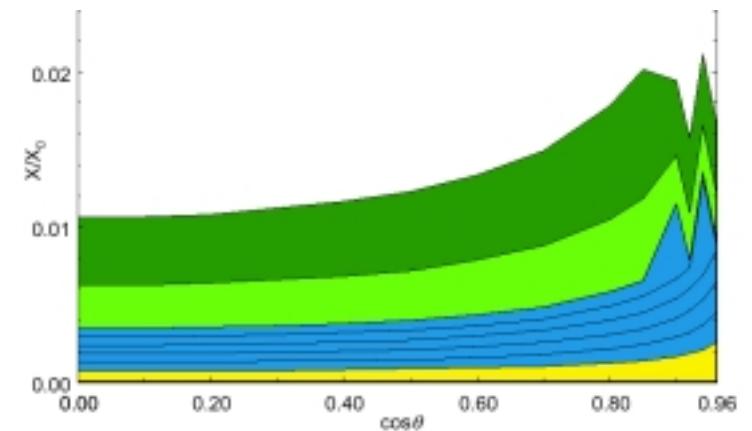
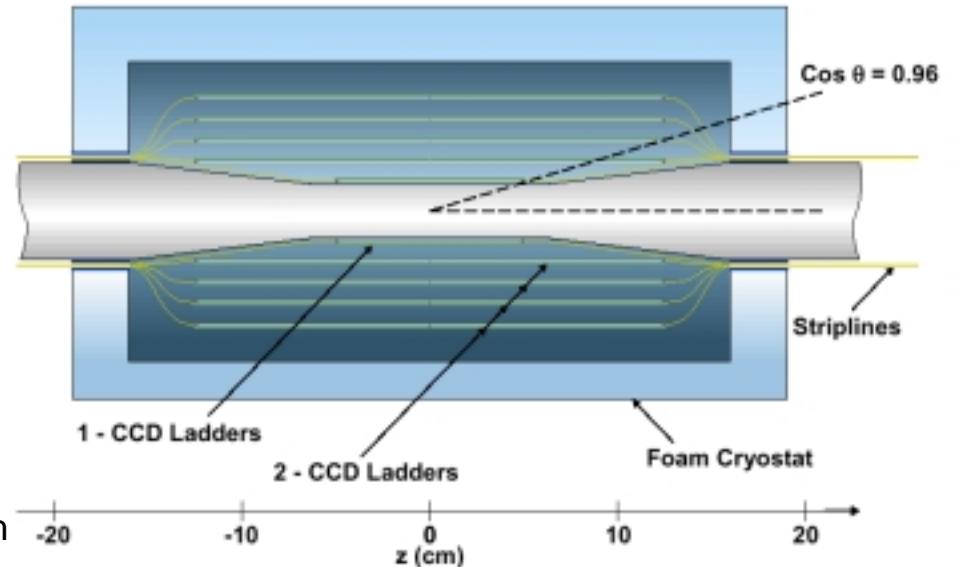
ATLAS und CMS Streifen: Stand und Offene Fragen

- ATLAS und CMS Streifen-Detektoren befinden sich jetzt in der Vorbereitung der Produktion:
 - F&E größtenteils abgeschlossen, ~20 Module gebaut, (z.T.) bestrahlt und getestet (ATLAS)
 - weitere Vor-Serienproduktion in den nächsten Monaten (CMS: 200 Module)
 - dieses Jahr eine Reihe von „*Final Design Reviews*“ und „*Production Readiness Reviews*“
 - Produktionszentren in der Qualifizierungsphase
 - Beginn der Produktion ab Ende 2001

- Kritische Aspekte, die erst während der Serienproduktion geklärt werden können:
 - Ausbeute bei Chips und Sensoren in der Produktion?
 - Tatsächliche Kosten?
 - Wie viele Module brauchen nach dem Bau eine Sonderbehandlung?
 - Wie verhält sich das System als Ganzes?
 - elektrisch (kohärentes Rauschen ...)
 - thermisch (Konvektion ...)
 - mechanisch (Stabilität ...)

Silizium-Spurdetektorsysteme für TESLA

- genaue Spurvermessung zur Identifikation von sekundären Vertices
 - minimaler Materialeinsatz
 - möglichst dicht am Strahlrohr ($R=1.5$ cm)
- drei Systeme sind vorgeschlagen (TDR):
 - CCD
 - 50 μm dicker, 12.5 cm langer CCD-Sensor
 - 20x20 μm^2 Pixel, 1.5-3 μm Ortsauflösung
 - Strahlenhärt e ist noch nachzuweisen
 - monolithische CMOS-Pixel
 - ähnlich CCD-Version, aber strahlenhart
 - deutlich mehr Verlustleistung im aktiven Bereich
 - kann man 12.5cm lange Strukturen bauen?
 - hybride Pixel
 - Ortsauflösung <7 μm nur mit „Zwischen-Pixeln“ erreichbar
 - mehr Material und Verlustleistung im aktiven Bereich
 - Strahlenhärt e und schnelle Auslese garantiert
- SiW „imaging calorimeter“
 - ~3000 m² Silizium, 40 Lagen (!)
- +



Zusammenfassung und Ausblick

- 20 Jahre interessante Entwicklungsarbeit und herausragende Erfolge in der Anwendung von Silizium-Detektorsystemen in der Teilchenphysik
- mit dem LHC beginnt eine neue Ära, in der große Silizium-Spurdetektoren die klassischen Spurkammern ersetzen (zumindest an Hadron-Collidern),
der Einsatz in dieser extrem schwierigen Umgebung scheint zu funktionieren
- die Entwicklung des inneren Spurdetektors für den kommenden e^+e^- -Linear-Beschleuniger stellt neue Herausforderungen
- eine Ende der Entwicklung ist nicht in Sicht:
 - *neue Ideen sind vorgeschlagen und versprechen wesentliche Fortschritte*
 - *die Weiterentwicklung in der Mikroelektronik wird neue Möglichkeiten eröffnen*
- viele Entwicklungen finden unmittelbar Anwendung in anderen Bereichen
 - *Astrophysik*
 - *Bildgebende Systeme in Medizin, Biologie, Materialprüfung.....*
- 6 Parallel-Sitzungen über Halbleiterdetektoren diese Woche