

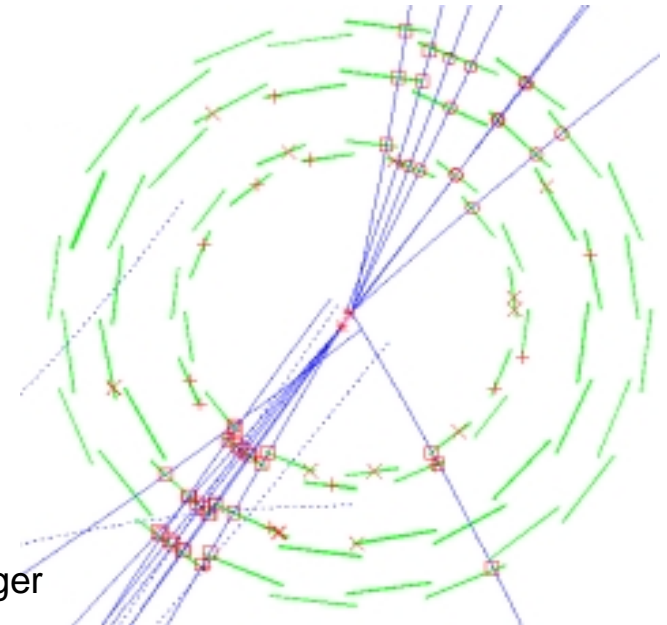
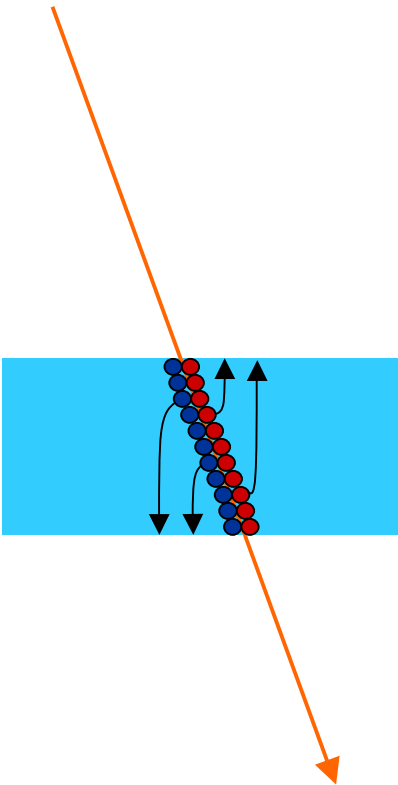


DPG Frühjahrstagung, Bonn, 26.3.2001

# 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

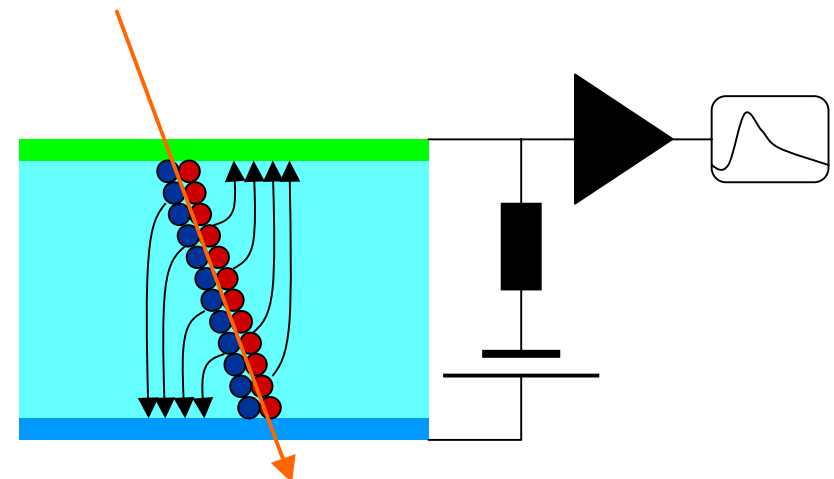
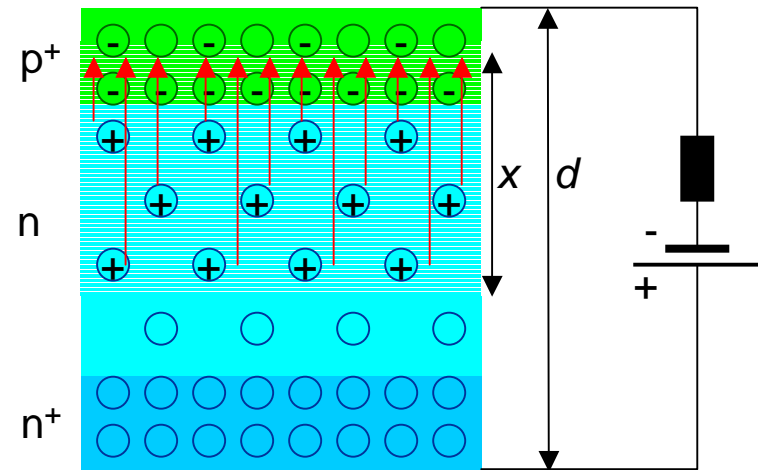
$$I \propto \frac{1}{\tau_g} \times T^2 \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \times \text{Volumen}$$

Ladungsträger-Lebensdauer  $\tau_g$  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 300 $\mu$ m (e) | 24000 | 50000 | 35000 | 35000 | 9300    | ~19000 |
| Z                                 | 14    | 32    | 31+33 | 48+52 | 6       | 14+6   |

hohes Z = mehr Signal

sehr kleiner Dunkelstrom

- hochwertiges Material wird industriell hergestellt
- Prozess-Technologie weit entwickelt
- Prozess-Kapazität vorhanden

- 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....

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 84, NUMBER 4

NOVEMBER 15, 1951

## Electron-Hole Production in Germanium by Alpha-Particles

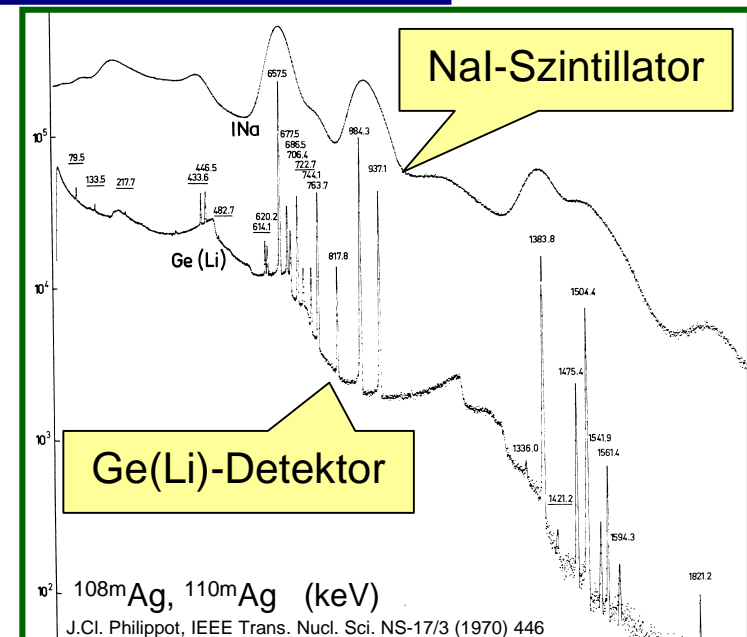
KENNETH G. MCKAY

*Bell Telephone Laboratories, Murray Hill, New Jersey*

(Received August 3, 1951)

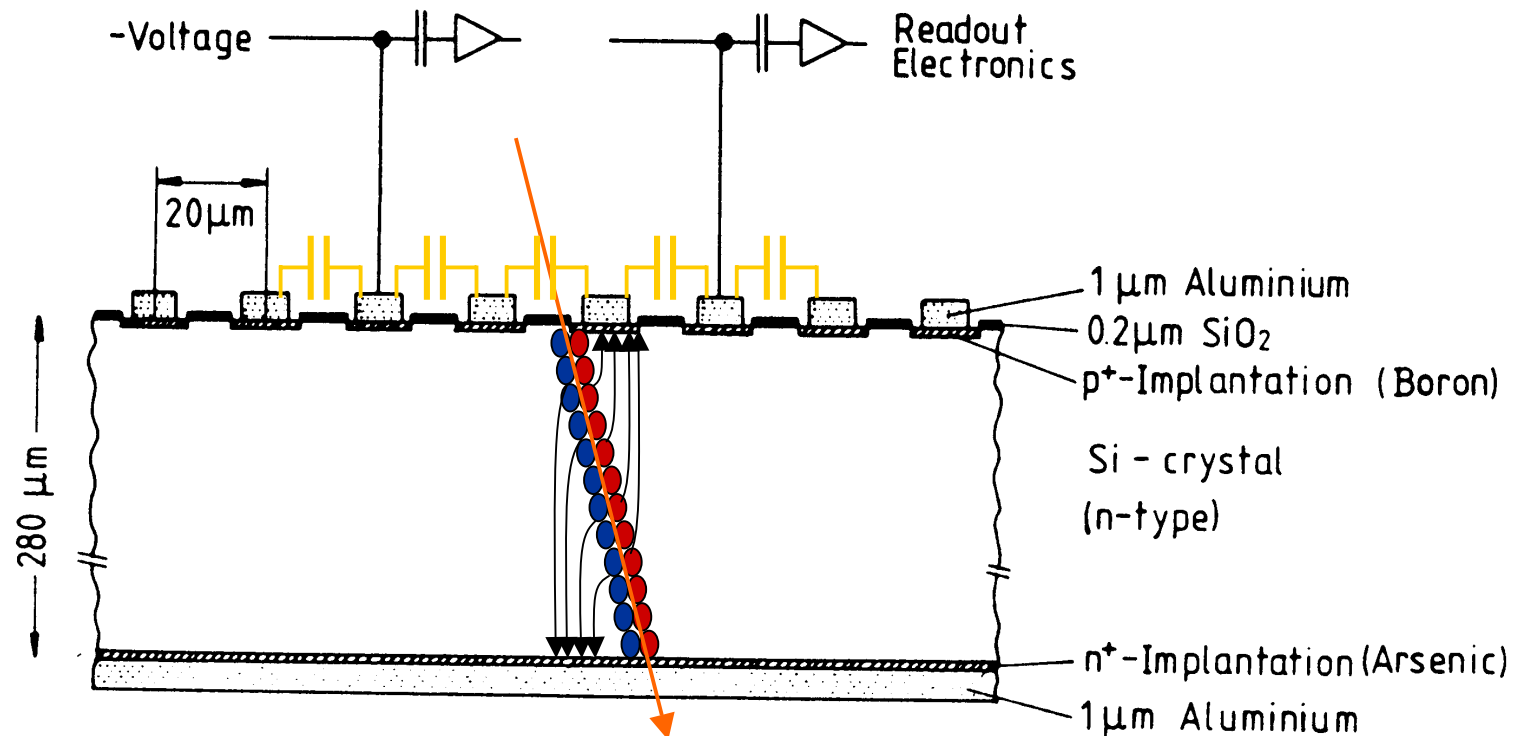
The number of electron-hole pairs produced in germanium by alpha-particle bombardment has been determined by collecting the internally produced carriers across a reverse-biased  $n-p$  junction. No evidence is found for trapping of carriers in the barrier region. Studies of individual pulses show that the carriers are swept across the barrier in a time of less than  $2 \times 10^{-8}$  sec. The counting efficiency is 100 percent. The energy lost by an alpha-particle per internally produced electron-hole pair is  $3.0 \pm 0.4$  ev. The difference between this and the energy gap is attributed to losses to the lattice by the internal carriers. It is concluded that recombination due to columnar ionization is negligible in germanium.

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

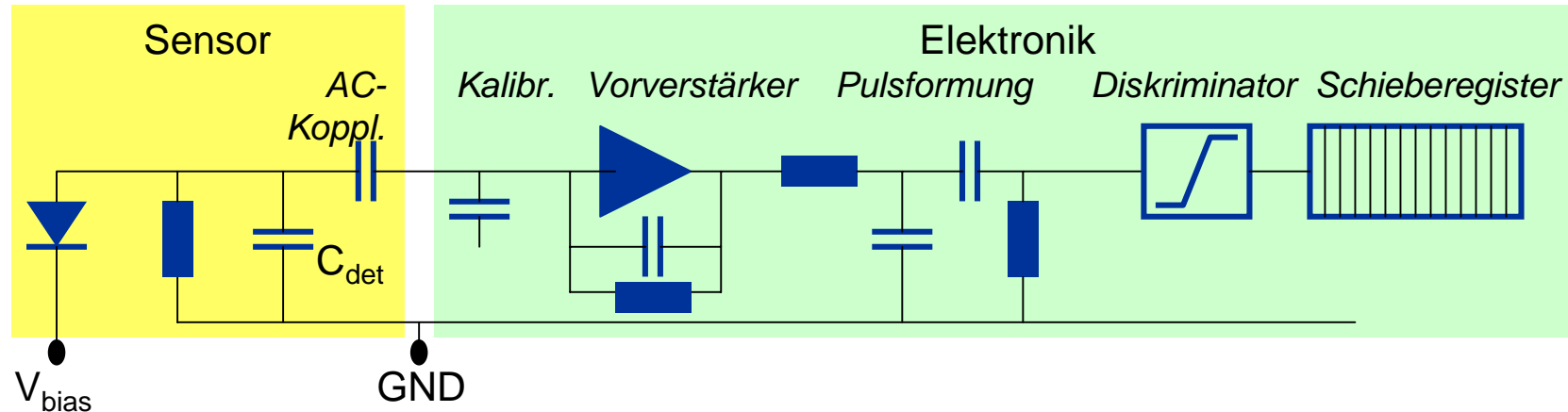


# Anwendung der Planar-Technologie

- 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  $N_C \sim a + b \cdot C_{\text{det}} \left( \sim \frac{1}{\sqrt{\tau}} \right) \tau : \text{Zeitkonstante der Pulsformung}$

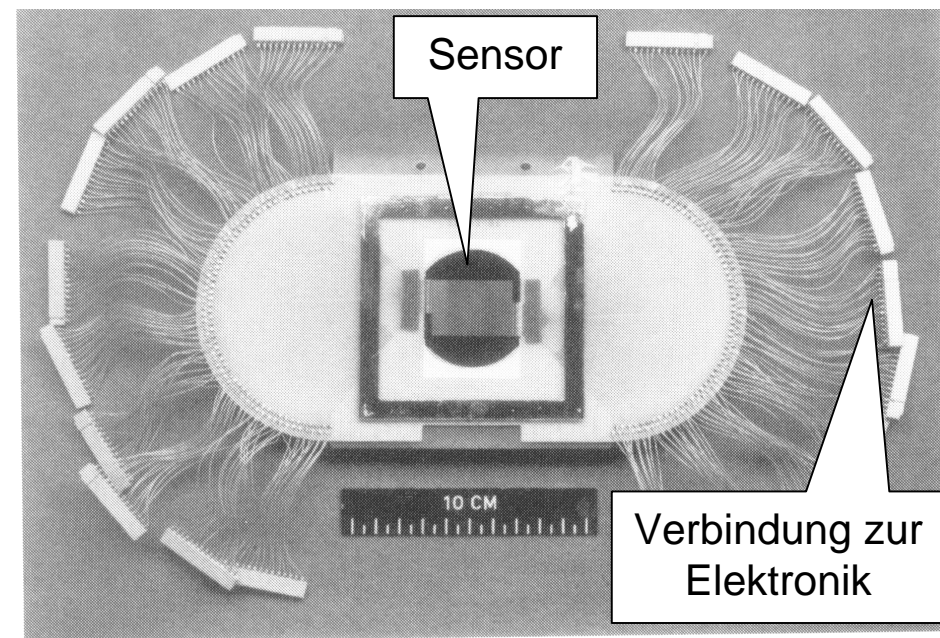
- Dunkelstrom  $N_I \sim \sqrt{I \cdot \tau}$

- Widerstand in Serie  $N_R \sim C_{\text{det}} \sqrt{\frac{R}{\tau}}$

- 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

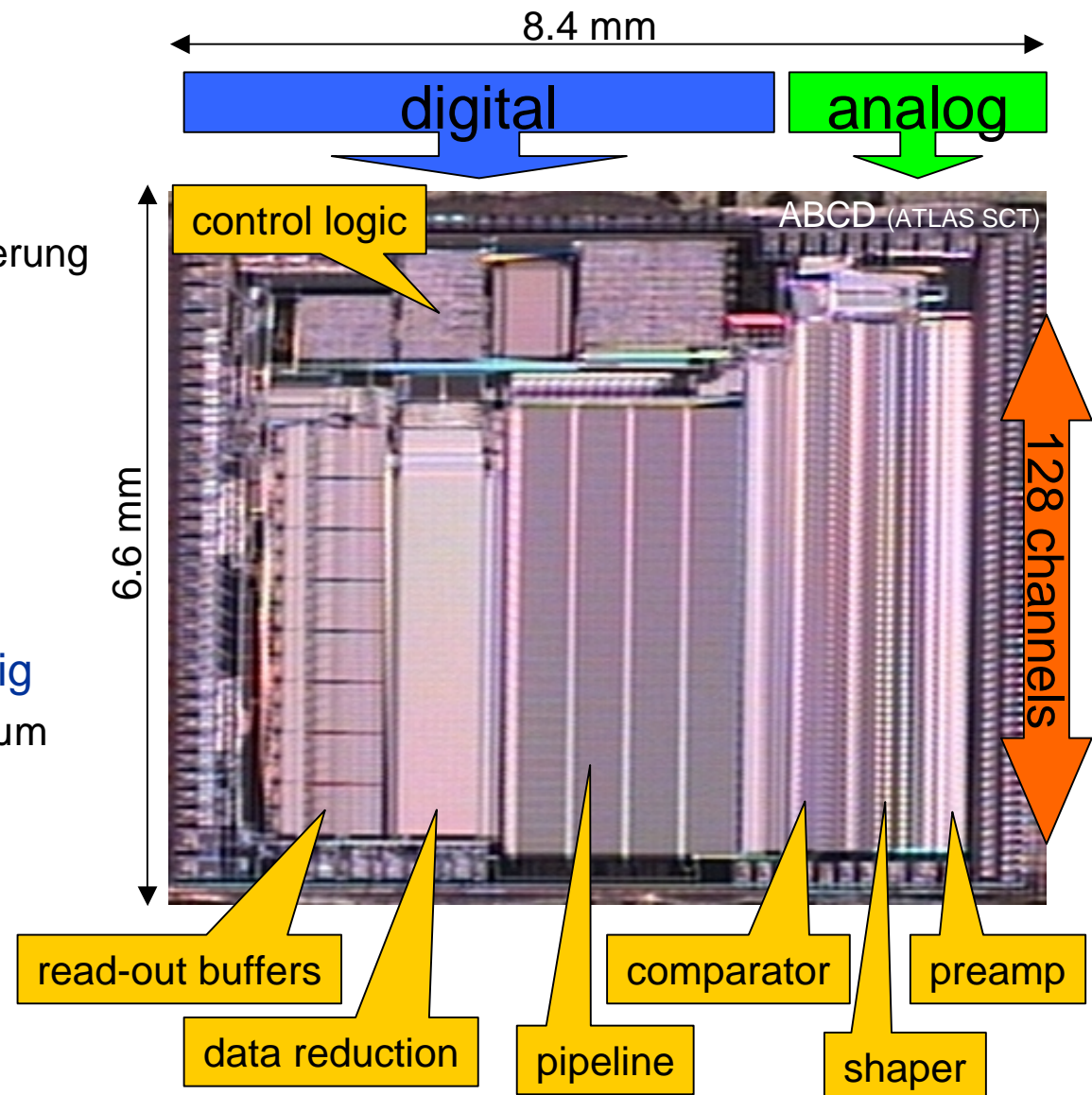
- erste Anwendung in einem Teilchenphysik-Experiment (1981, NA11): Streifendetektor
  - 1200 Streifen-Dioden mit  $20\mu\text{m}$  Abstand
  - $24 \times 36 \text{ mm}^2$  Nachweisfläche
  - Ortsauflösung  $\sim 5\mu\text{m}$
  - 8 Lagen, später mehr
- präzise Spurvermessung erlaubt Identifikation von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





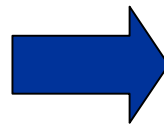
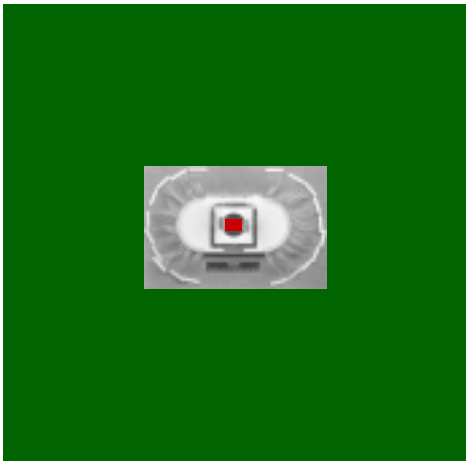
# VeryLargeScaleIntegration Auslese-Chips

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

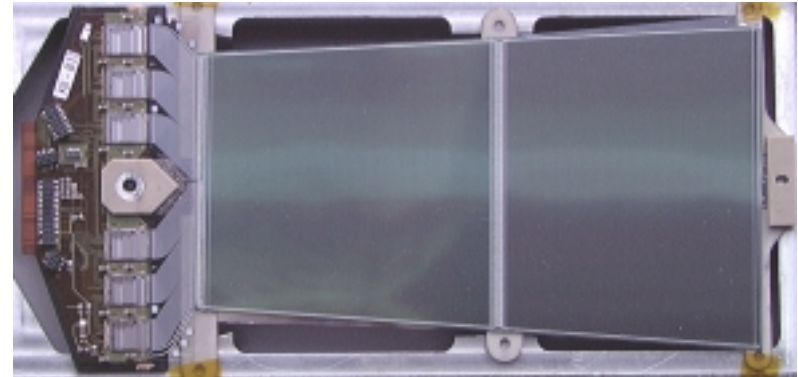


# Fixed-Target $\Rightarrow$ Collider-Experimente

9 cm<sup>2</sup> Sensor mit 10000cm<sup>2</sup> Elektronik



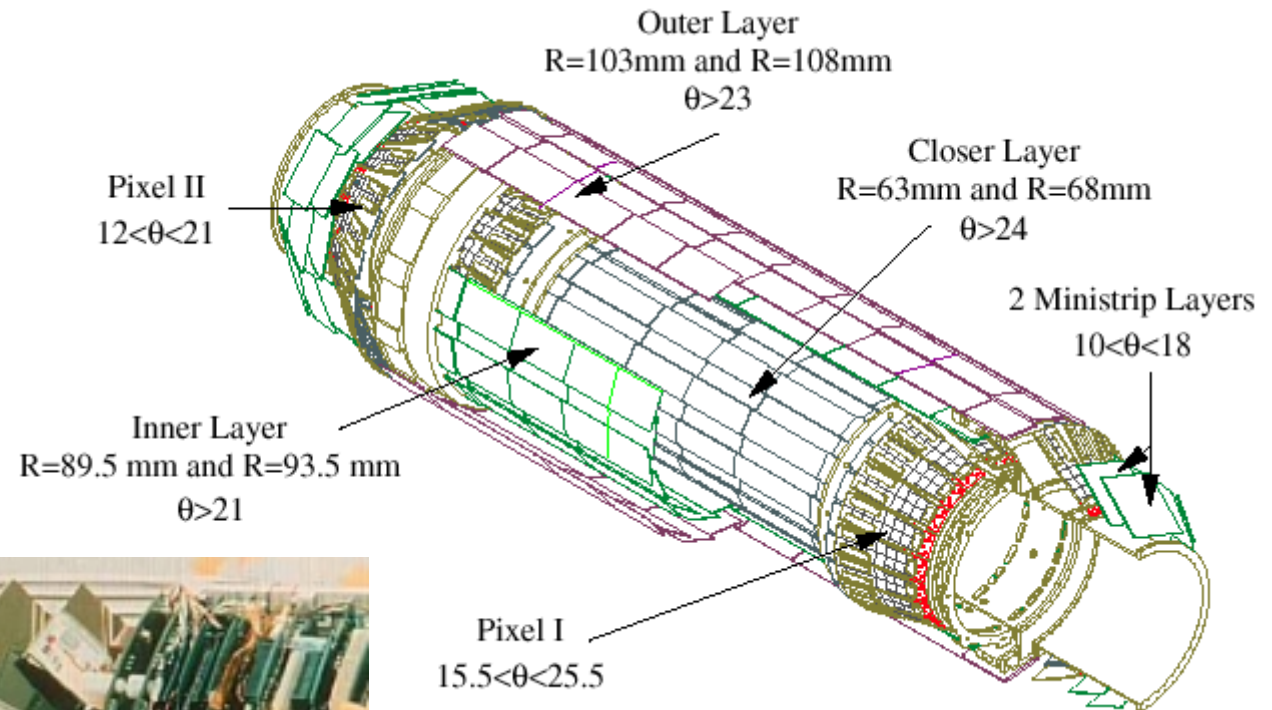
160 cm<sup>2</sup> Sensor mit 20cm<sup>2</sup> Elektronik



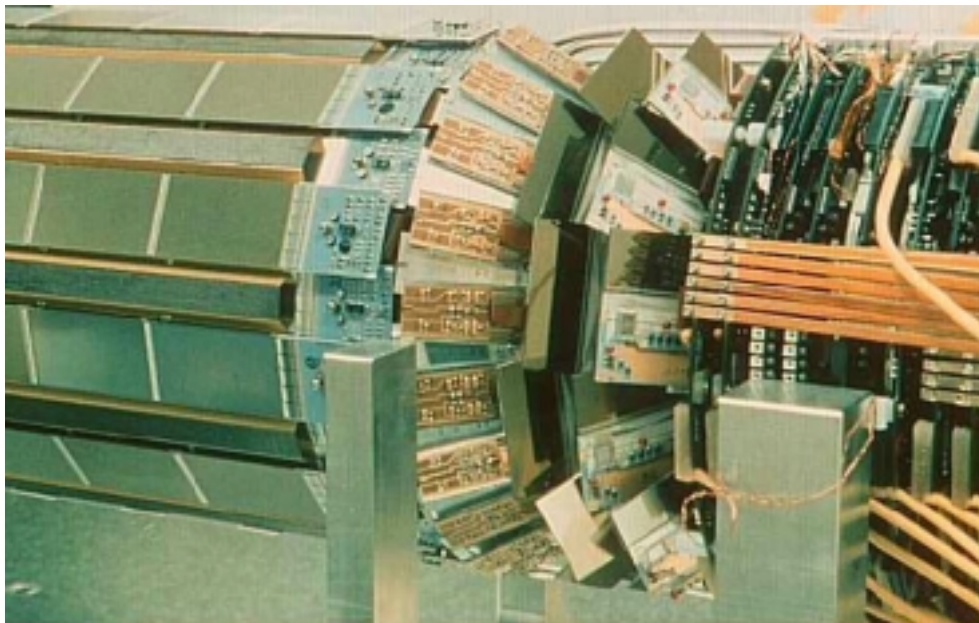
- mit VLSI-Chips können Silizium-Detektoren in Collider-Experimente eingebaut werden  
*seit Ende der 80er Jahre haben (fast) alle Collider-Experimente einen Silizium-Vertex-Detektor (zuerst in MARKII)*
- zusätzlich erforderlich sind miniaturisierte „Leiterplatten“: Elektronik-Hybride
- kleinste Baugruppe: 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 m<sup>2</sup> Silizium
- 175000 Streifen
- 1.2 Mio. Pixel

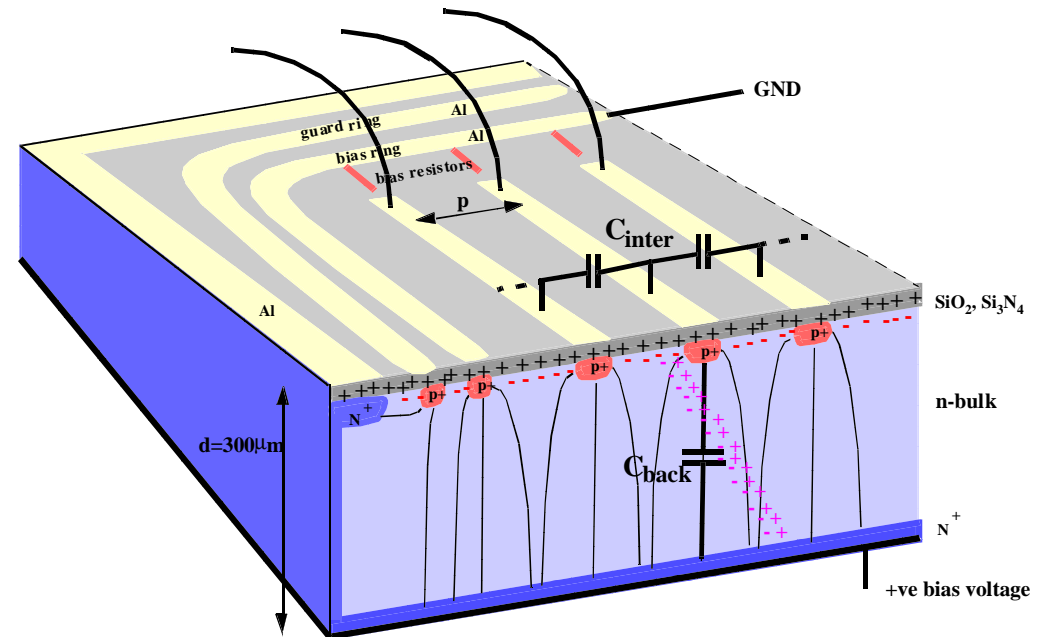


1996/97



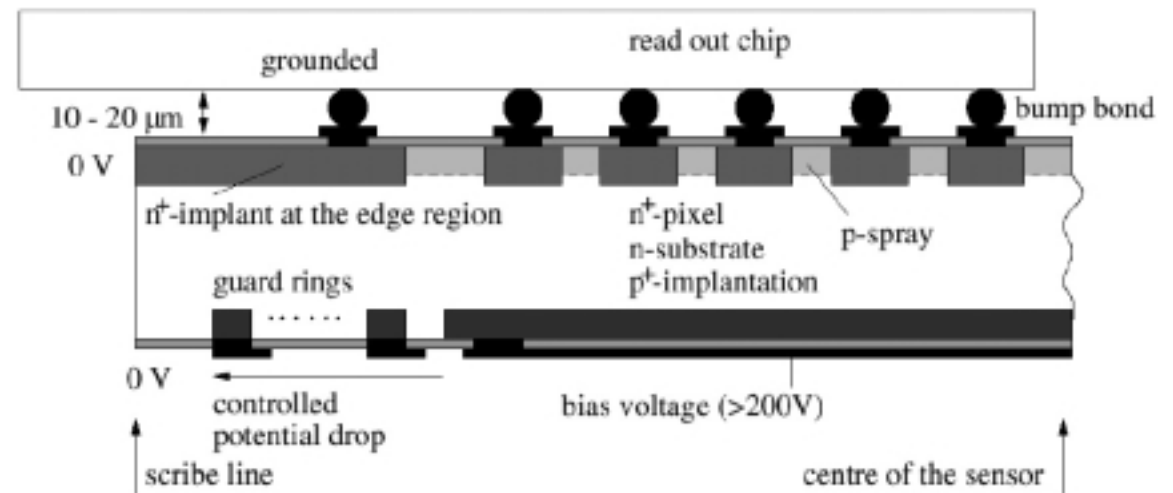
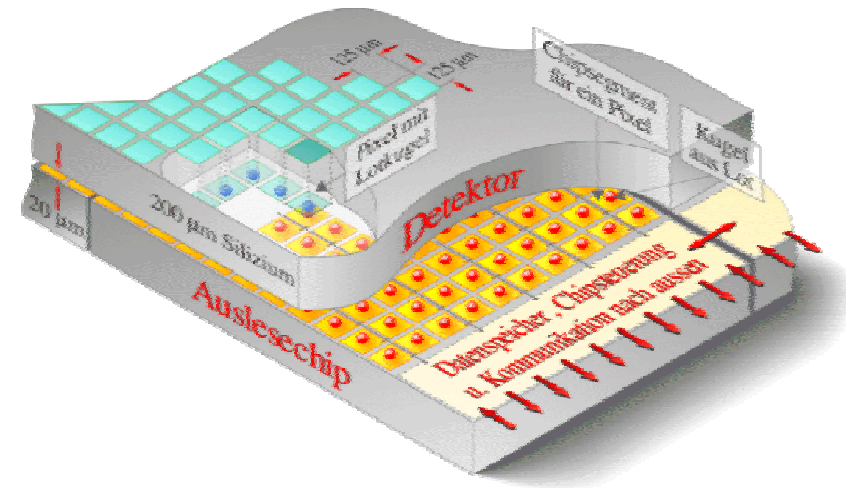
# Streifendetektor

- verbreitetster Detektortyp
- einseitige Strukturierung auf der ‚p-Seite‘ ist am einfachsten  
(und billigsten: 10-20 CHF/cm<sup>2</sup>)
- 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

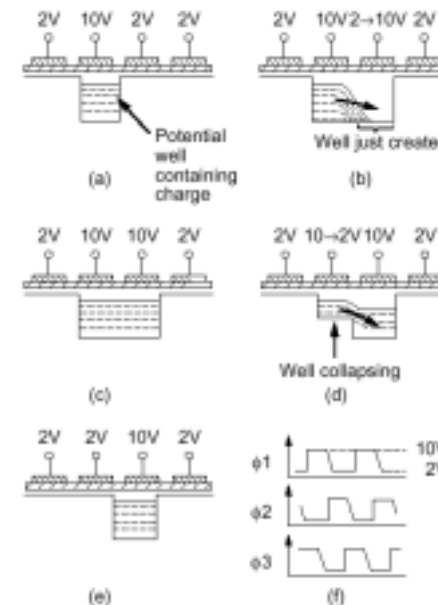
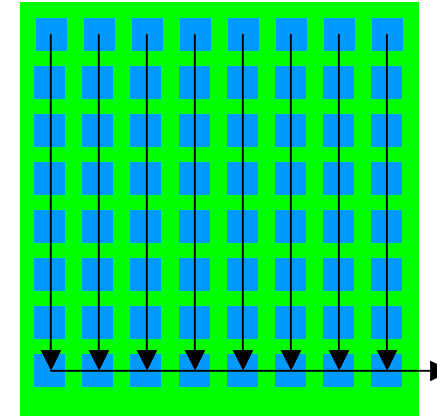
- Segmentierung der Diode in Pixel (Seitenlänge 50-500 $\mu\text{m}$ )
- echte 2D Koordinatenmessung
- viele Kanäle/Verbindungen
- Ausleseelektronik über jedem Pixel, auf gleicher Fläche (typ.)
- kleine Kapazität  
⇒ niedriges Rauschen ( $<200e$ )
- kleiner Dunkelstrom
- 94/95 WA97, NA57, 96/97 DELPHI,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





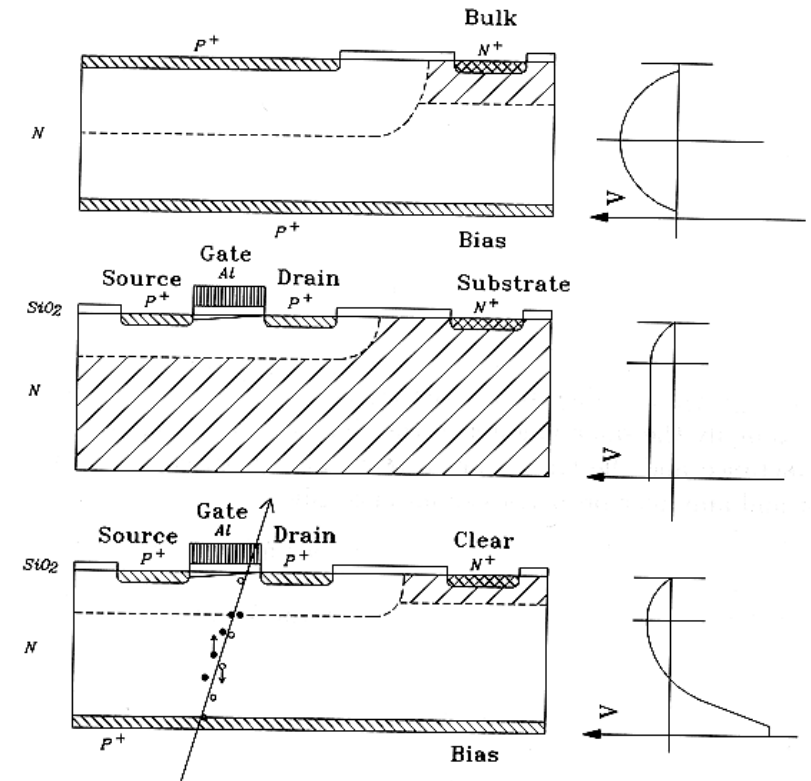
# Charge Coupled Devices

- Ladungssammlung unter segmentierten Elektroden (MOS oder *pn*)
- Ladung wird durch mehrere alternierende Steuersignale zur Ausselektronik 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



# DEP<sub>leted</sub>F<sub>ield</sub>E<sub>ffect</sub>T<sub>ransistor</sub>

- 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)

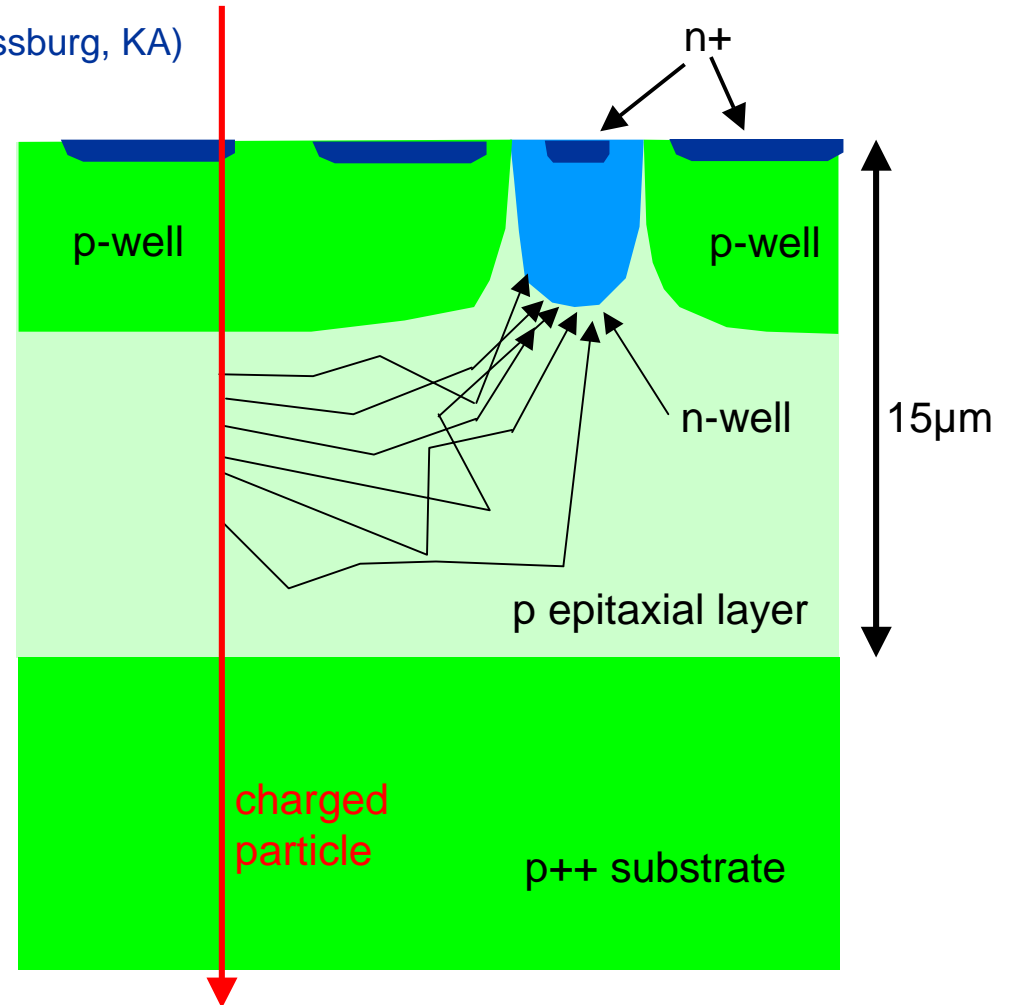
- Integration von Sensor und Elektronik

- weniger Material
- keine Draht- oder Bump-Bonds
- hohe Packungsdichte (submicron VLSI)
  - hohe Ortsauflösung
  - strahlenhart
- niedriger Preis

- MIMOSA Chip: 64x64 Pixel, 20X20 $\mu\text{m}^2$

- Diode 3X3 $\mu\text{m}^2 \Rightarrow 3.1\text{fF} \Rightarrow \sim 30e$  Rauschen
- $\sim 1000 e$  Signal  $\Rightarrow S/N \sim 20 \dots 40$
- Ortsauflösung 1-2 $\mu\text{m}$
- Effizienz  $\sim 99.5\%$
- $\sim 100\text{ns}$  für Ladungssammlung

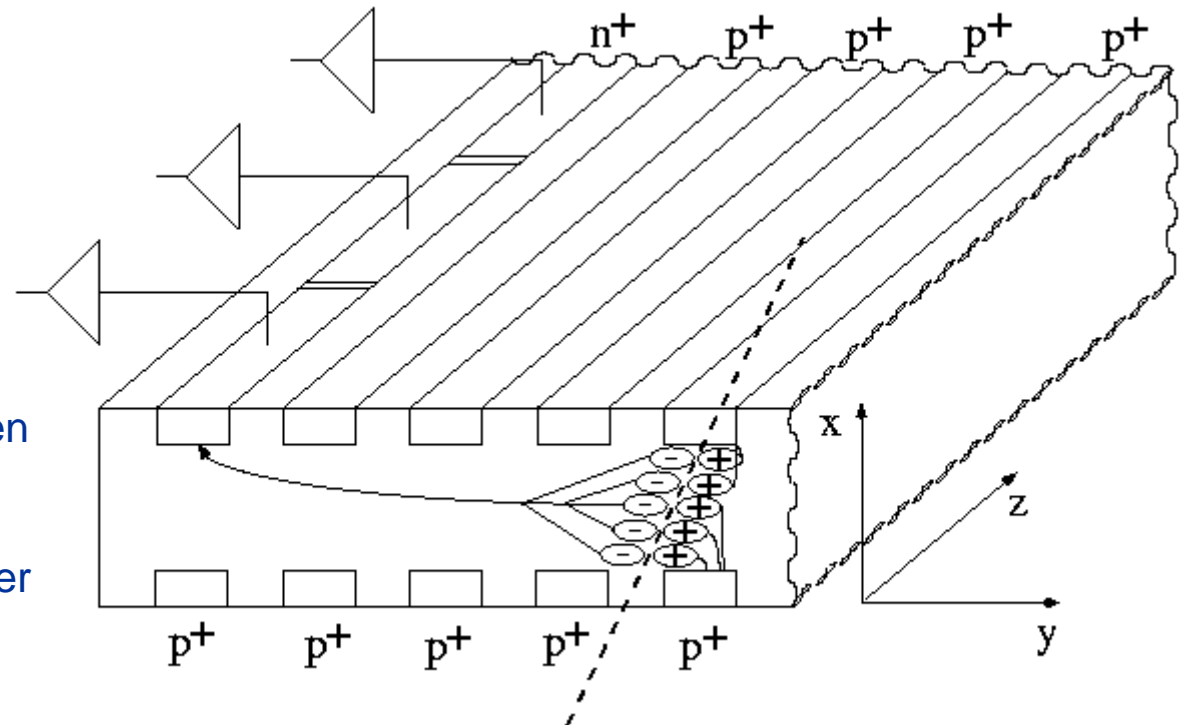
- Bau von sehr dünnen Detektoren (wenige 10  $\mu\text{m}$ )



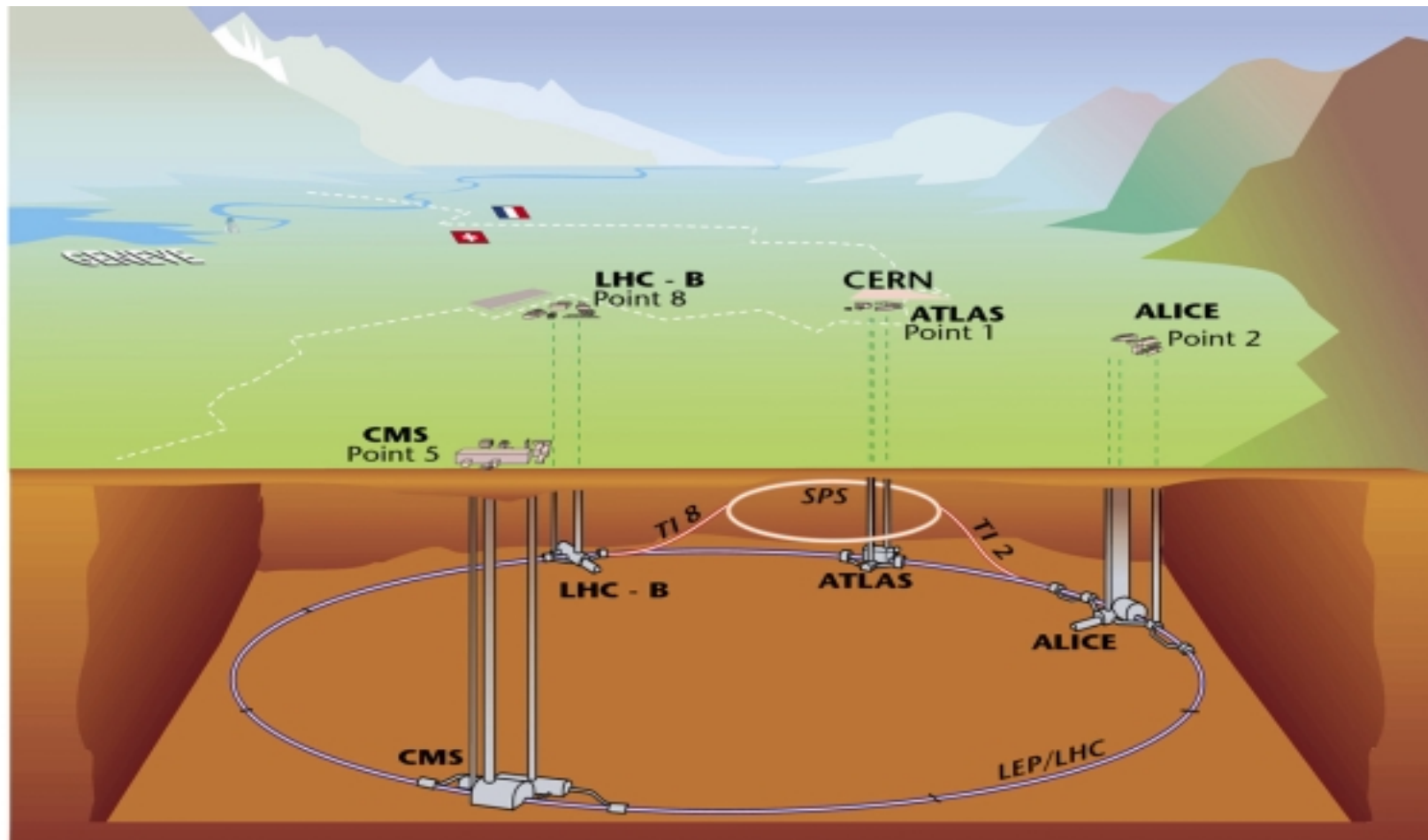


# Silizium-Driftdetektor

- 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 ( $1.3\text{m}^2$ ), STAR



# Large Hadron Collider am CERN

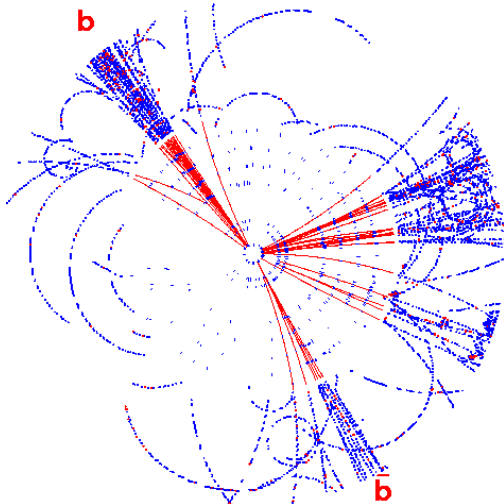


- pp-Kollisionen mit 14 TeV Schwerpunktsenergie
- Zwei „Universal“-Experimente: ATLAS and CMS
- Zwei spezialisierte Experimente: ALICE (Schwerionen) und LHC-b (b-Physik und CP)
- erster Strahl in 2005, erste Physik-Kollisionen in 2006

# Anforderungen an Spurdetektoren am LHC

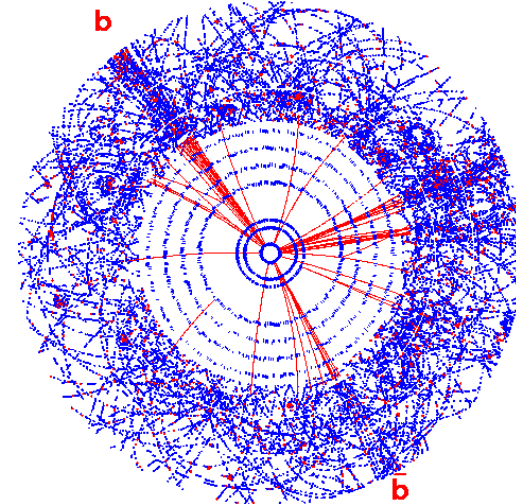
- hohe Luminosität ( $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )
  - etwa 1000 Teilchen alle 25 ns, aus ~23 sich überlagernden Ereignissen
  - sehr hohe Spurdichten
  - hohe Strahlenbelastung
- ⇒ schnelle, strahlenharte Detektoren mit hoher Granularität  
(Ortsauflösung steht nicht allein im Vordergrund)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

H->bb Ereignis

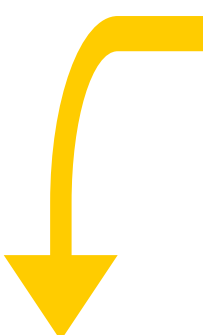


plus 22 „*minimum bias*“  
Ereignisse

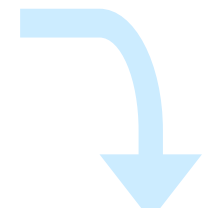
H->bb Ereignis  
bei hoher Luminosität



# Silizium am Large Hadron Collider



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



## Pixel-Detektorsysteme am LHC

haben etwa die Größe von Vertex-Detektoren an LEP  
 ~2m<sup>2</sup> Sensorfläche  
 ~100 Mio. Pixel  
 3 Lagen

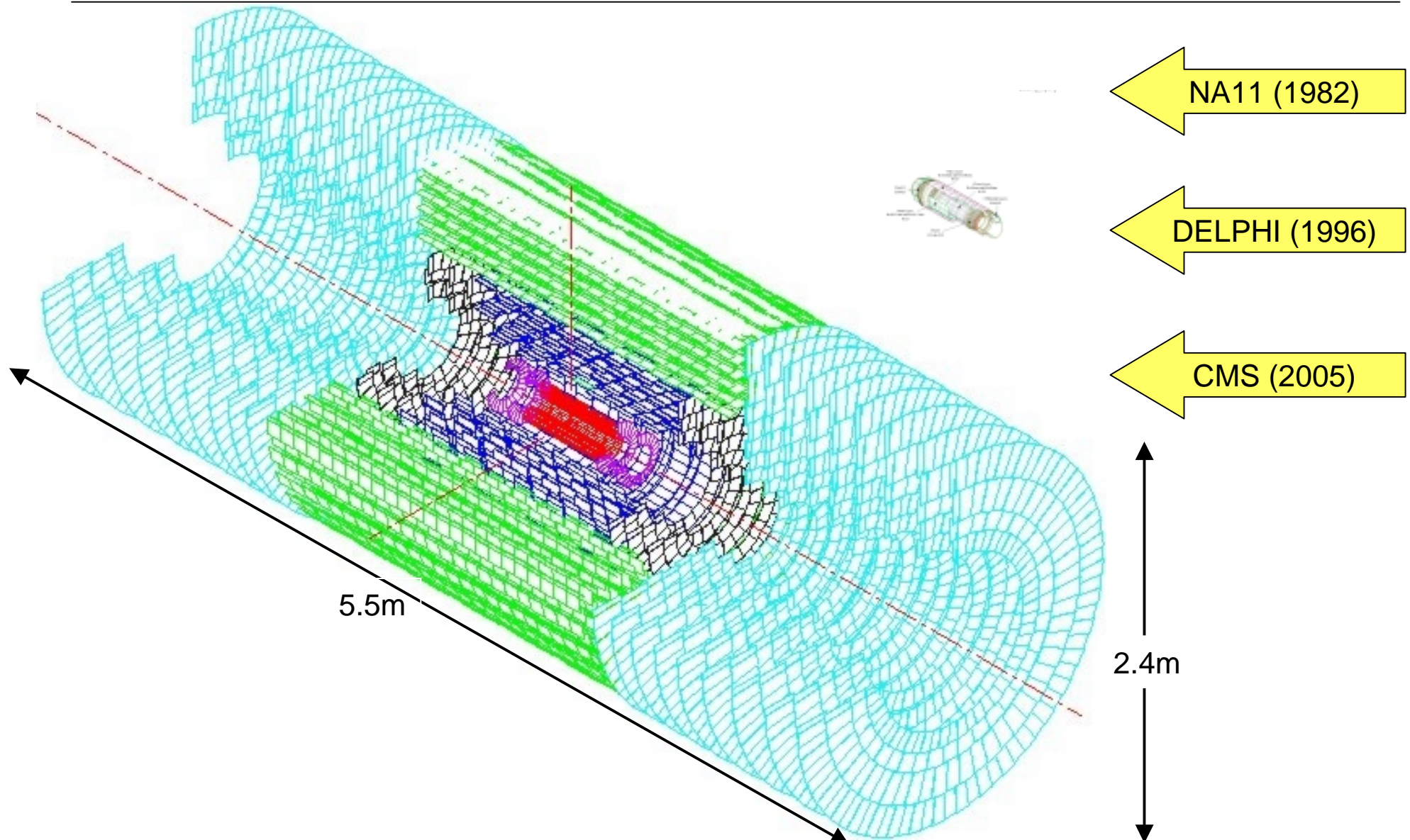
## Streifen-Detektorsysteme am LHC

- haben eher die Größe von klassischen gasgefüllten Spurkammern
- bis zu ~200m<sup>2</sup> 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)

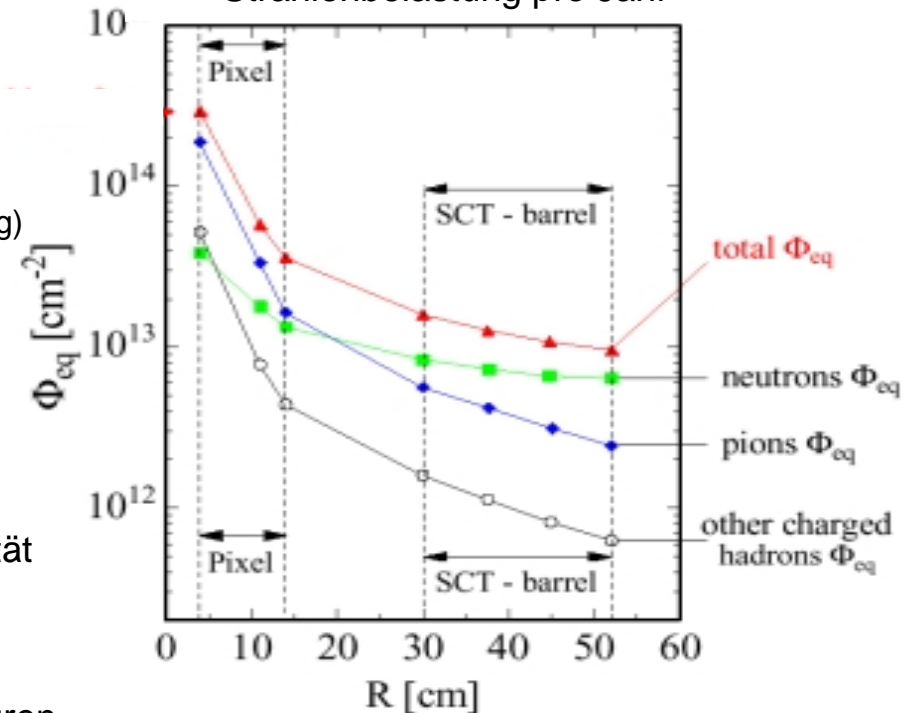
## ● Sensoren

- 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.

ATLAS Spurdetektoren  
Strahlenbelastung pro Jahr



Streifen-Detektoren in 10 Jahren:

$\sim 1.5 \times 10^{14}$  1-MeV-Neutronen/ $\text{cm}^2$

$\sim 60$  kGy

Pixel-Detektoren pro Jahr:

$\sim 3 \times 10^{14}$  1-MeV-Neutronen/ $\text{cm}^2$

$\sim 150$  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

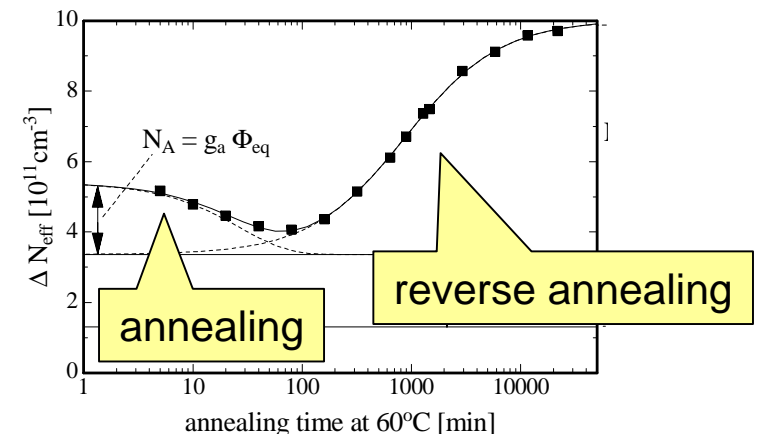
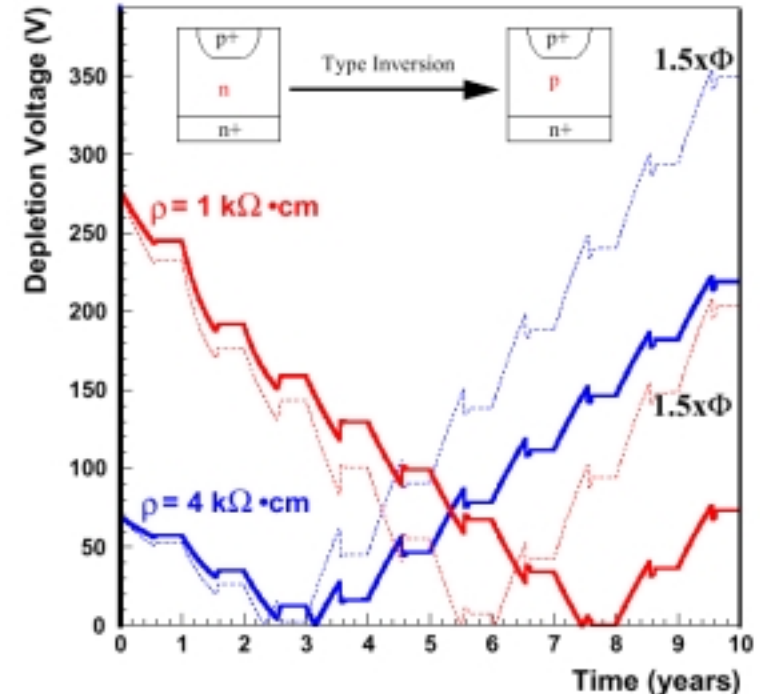
⇒ Anstieg der Verarmungsspannung:

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

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

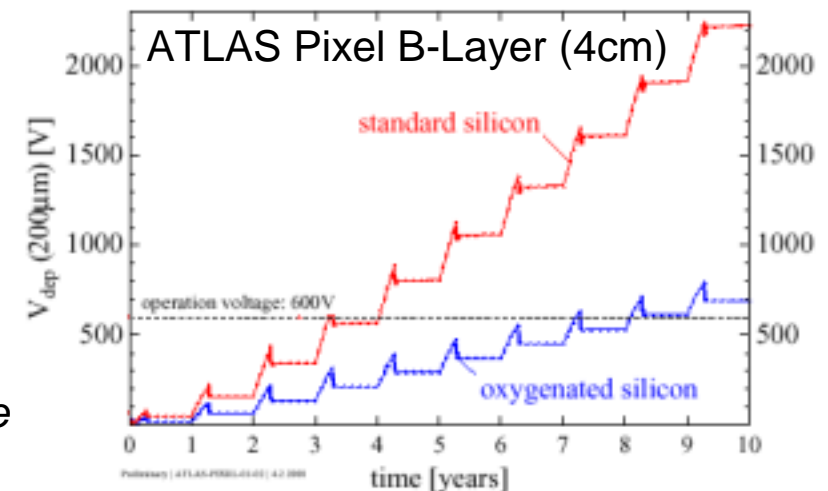
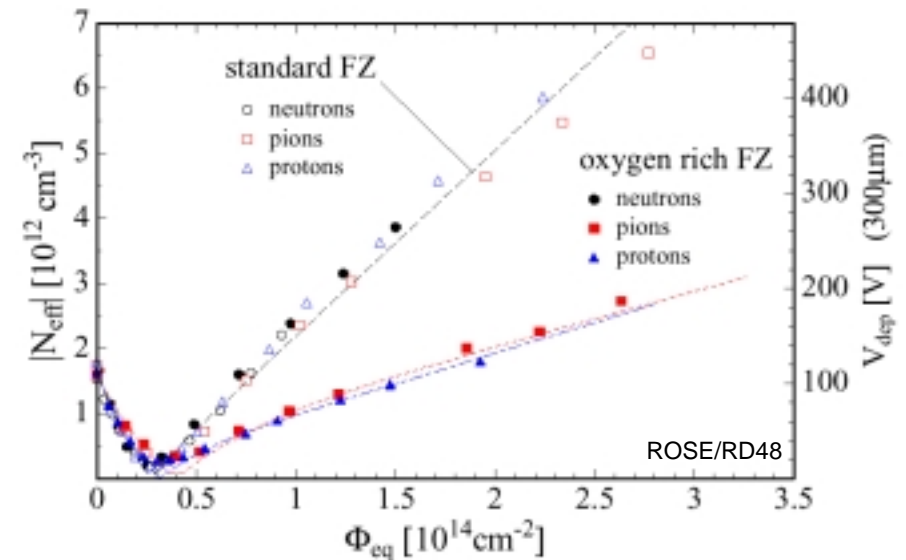
## Maßnahmen:

- spannungsfeste Sensoren (bis ~500V und höher)
- n*<sup>+</sup>-in-*n* funktioniert auch bei teilweiser Verarmung
- T < 0°C um ‚reverse annealing‘ zu unterdrücken



# Sauerstoff-angereichertes Silizium

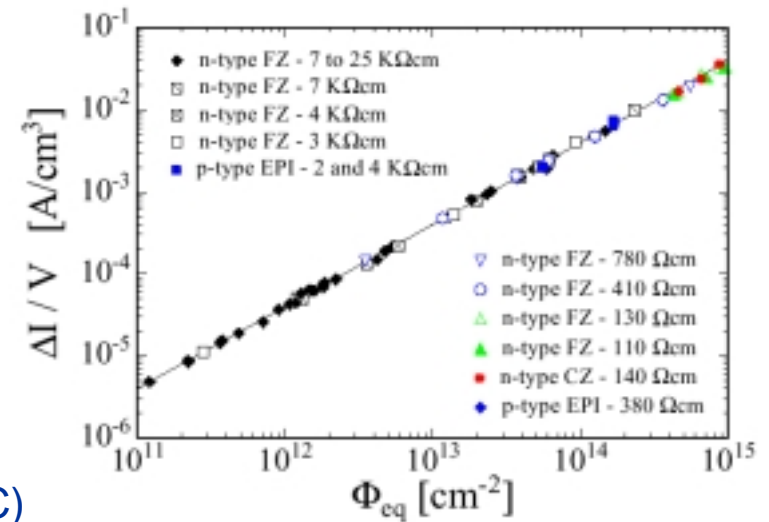
- Sauerstoff-Anreicherung reduziert den Anstieg der Verarmungsspannung
- allerdings nur für geladene Teilchen, nicht bei Neutron-Bestrahlung
- Ursache noch nicht ganz aufgeklärt
  - Sauerstoff verbindet sich mit Störstelle und macht sie elektrisch inaktiv
  - Neutron-Bestrahlung erzeugt Störstellen-Cluster
- bisher keine negativen Effekte der Sauerstoff-Anreicherung gefunden
- erster Ansatzpunkt die Strahlenhärte 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  $-10^{\circ}\text{C}$ )
- Problem:  $2\text{mA} \times 500\text{V} = 1\text{W}$  (!)  
⇒ Erwärmung der Sensoren  
⇒ möglicherweise positive Rückkopplung (*thermal runaway*)
- Abhilfe:
  - Betrieb bei etwa  $-10^{\circ}\text{C}$
  - effiziente Kühlung mit kleinen Temperaturgradienten
  - thermische Trennung von Sensoren und Elektronik

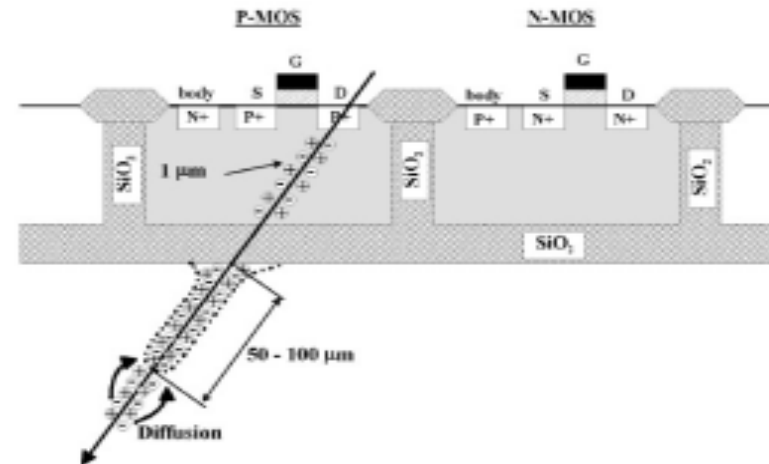


$$I \propto \frac{1}{\tau_g} \times T^2 \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \times \text{Volumen}$$

# Strahlenharte Chips: zwei Technologien

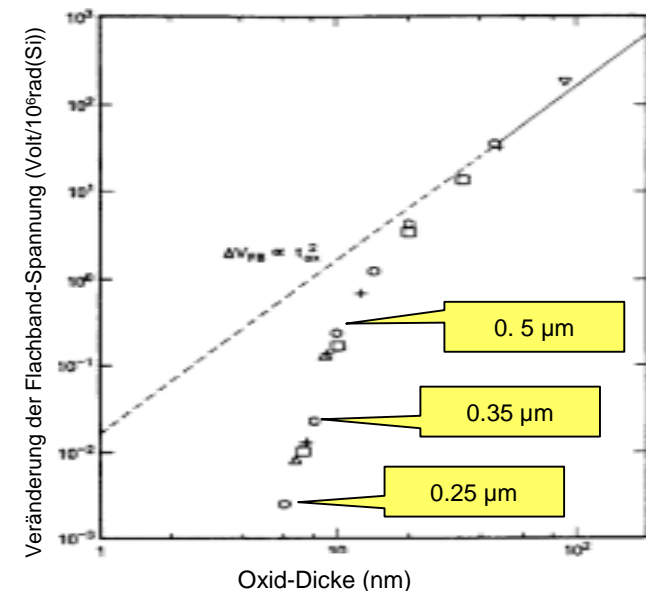
„klassische strahlenharte Prozesse“,  
z.B. DMILL BiCMOS-Prozess

- CMOS, JFET und bipolare Transistoren
- 0.8µm Strukturgröße
- Strahlenhärte spezifiziert bis 100kGy
  - Trennung der einzelnen Bauteile voneinander und vom Substrate durch SiO<sub>2</sub>-Wände
  - sehr hohe Oxid-Qualität (niedrige Temperaturen)
- *spezieller Prozess, niedrige Ausbeute, teuer*

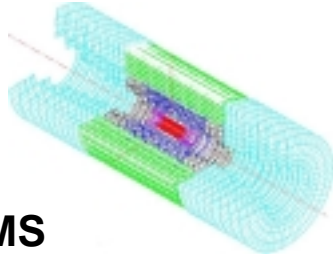
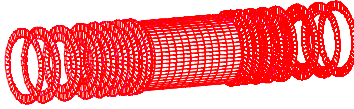


„Sub-Mikrometer CMOS-Prozesse“

- 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

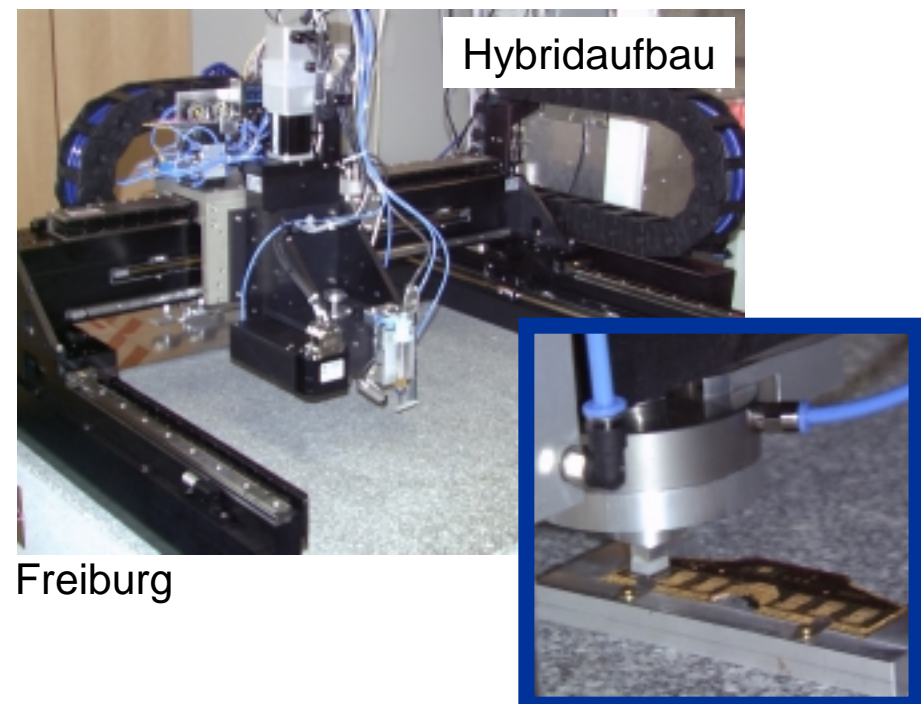
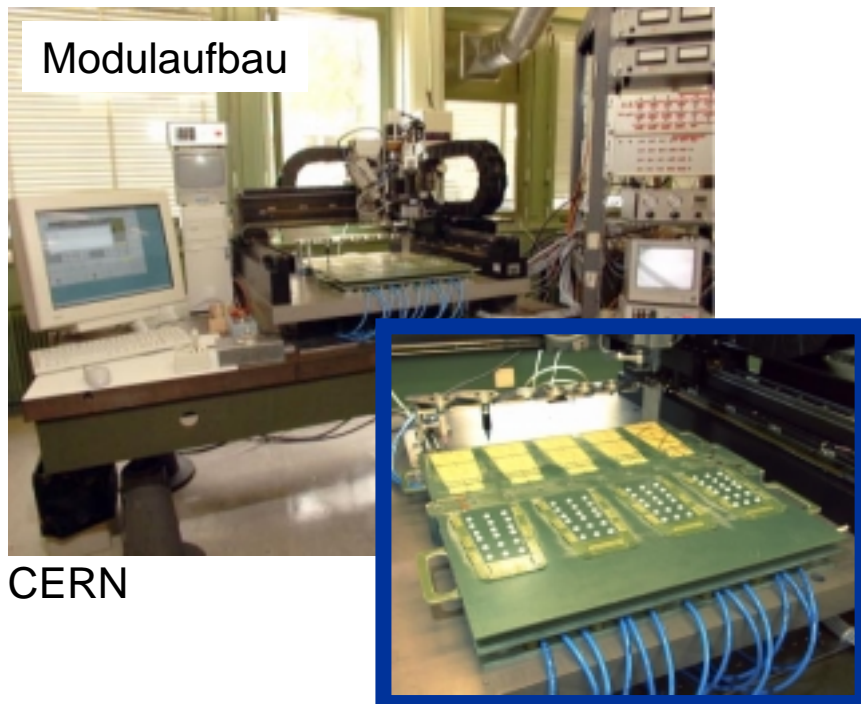


# Vergleich der Streifen-Detektoren von ATLAS und CMS

|  | <br><b>CMS</b> | <br><b>ATLAS</b> |
|--|--|---|
| <b>Silizium-Fläche</b>                                     | 214 m <sup>2</sup>   | 61 m <sup>2</sup>   |
| <b>Wafer-Größe</b>   | 6" (4")  | 4"  |
| <b>Kanäle</b>  | 11.4 Mio.  | 6.2 Mio.  |
| <b>Hybride/Module</b>                                      | 17700  | 4088 x 2  |
| <b>Chips</b>   | APV25 (0.25µm)   | ABCD3T (DMILL)  |
| <b>Datentransfer</b>                                       | analog,optisch   | binär, optisch  |
| <b>Verlustleistung</b>                                     | ~35kW  | ~35kW   |
| <b>Kühlung</b>   | einphasig  | evaporativ  |
| <b>Strahlungslänge</b><br>gesamter Tracker, $ \eta  < 0.6$ | 0.3 X <sub>0</sub>   | 0.3 X <sub>0</sub>  |
| <b>Kosten</b>  | ~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 ( $R=1.5\text{ cm}$ )

- drei Systeme sind vorgeschlagen (TDR):

- CCD

- 50 $\mu\text{m}$  dicker, 12.5 cm langer CCD-Sensor
- 20x20 $\mu\text{m}^2$  Pixel, 1.5-3 $\mu\text{m}$  Ortsauflösung
- Strahlenhärte ist noch nachzuweisen

- monolithische CMOS-Pixel

- ähnlich CCD-Version, aber strahlenhart
- deutlich mehr Verlustleistung im aktiven Bereich
- kann man 12.5cm lange Strukturen bauen?

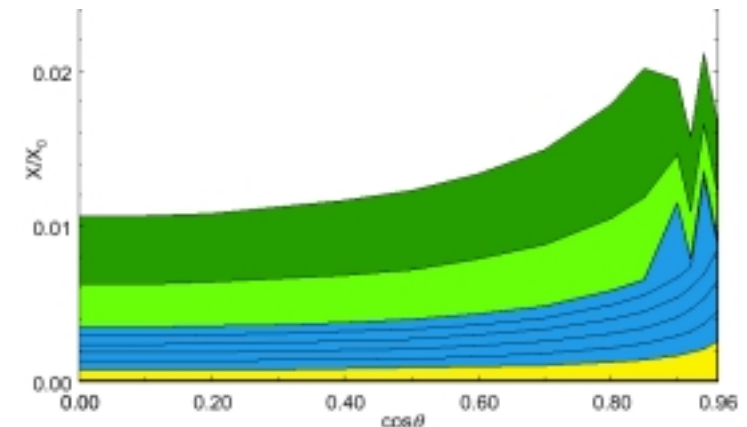
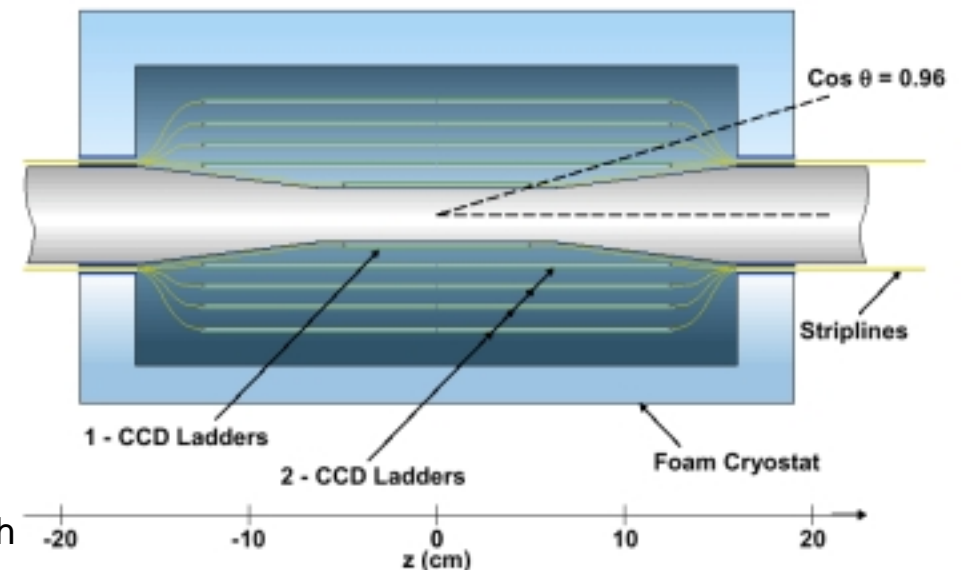
- hybride Pixel

- Ortsauflösung <7 $\mu\text{m}$  nur mit ‚Zwischen-Pixeln‘ erreichbar
- mehr Material und Verlustleistung im aktiven Bereich
- Strahlenhärte und schnelle Auslese garantiert

- SiW ‚imaging calorimeter‘

- ~3000  $\text{m}^2$  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