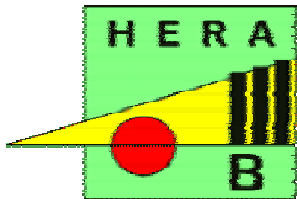


# Entwicklung und Test von Detektoren für extreme Teilchenraten

## Was haben wir bei HERA-B gelernt ?

Bernhard Schmidt  
DESY-Heidelberg-Siegen

# Detektoren für extreme Teilchenraten bei HERA-B

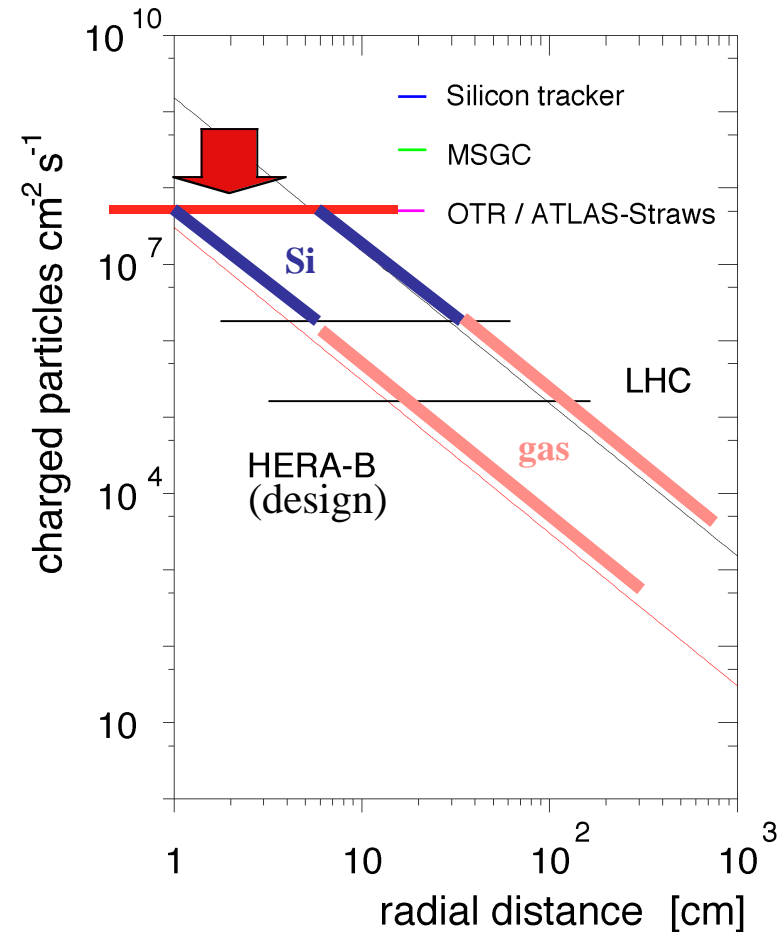


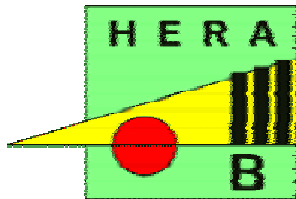
## *der Plan :*

- genehmigt 1995
- gebaut 1998
- in Betrieb 1999

Was haben wir gelernt ?

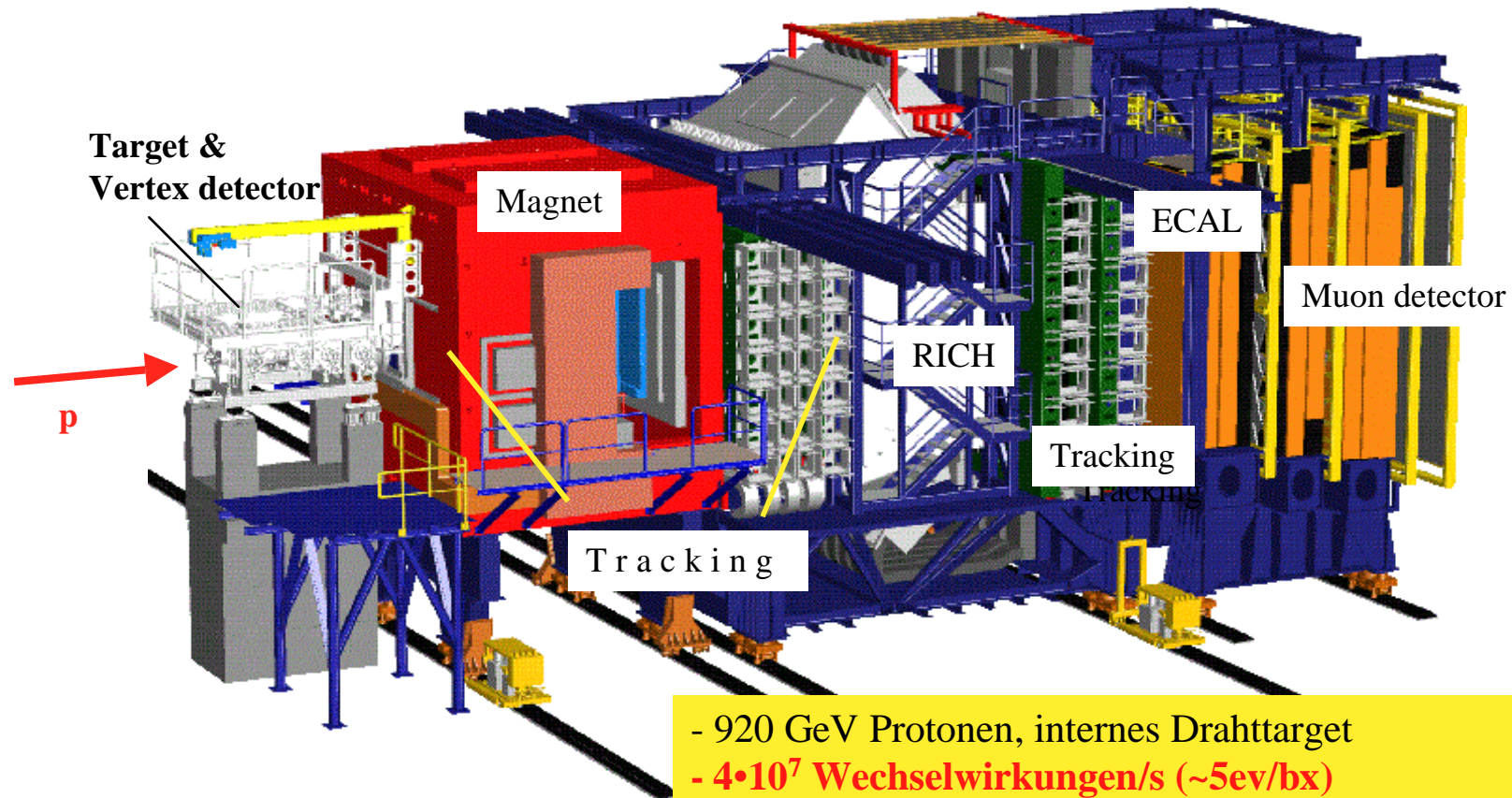
- technologisch
- methodisch
- organisatorisch





DESIGN

# „Fixed target Experiment, Hadronische B-Fabrik“



- 920 GeV Protonen, internes Drahttarget
- $4 \cdot 10^7$  Wechselwirkungen/s ( $\sim 5 \text{ ev/bx}$ )
- Schneller di-lepton Trigger  
( $J/\psi$  trigger)

200 000 direkte  $J/\psi / h$

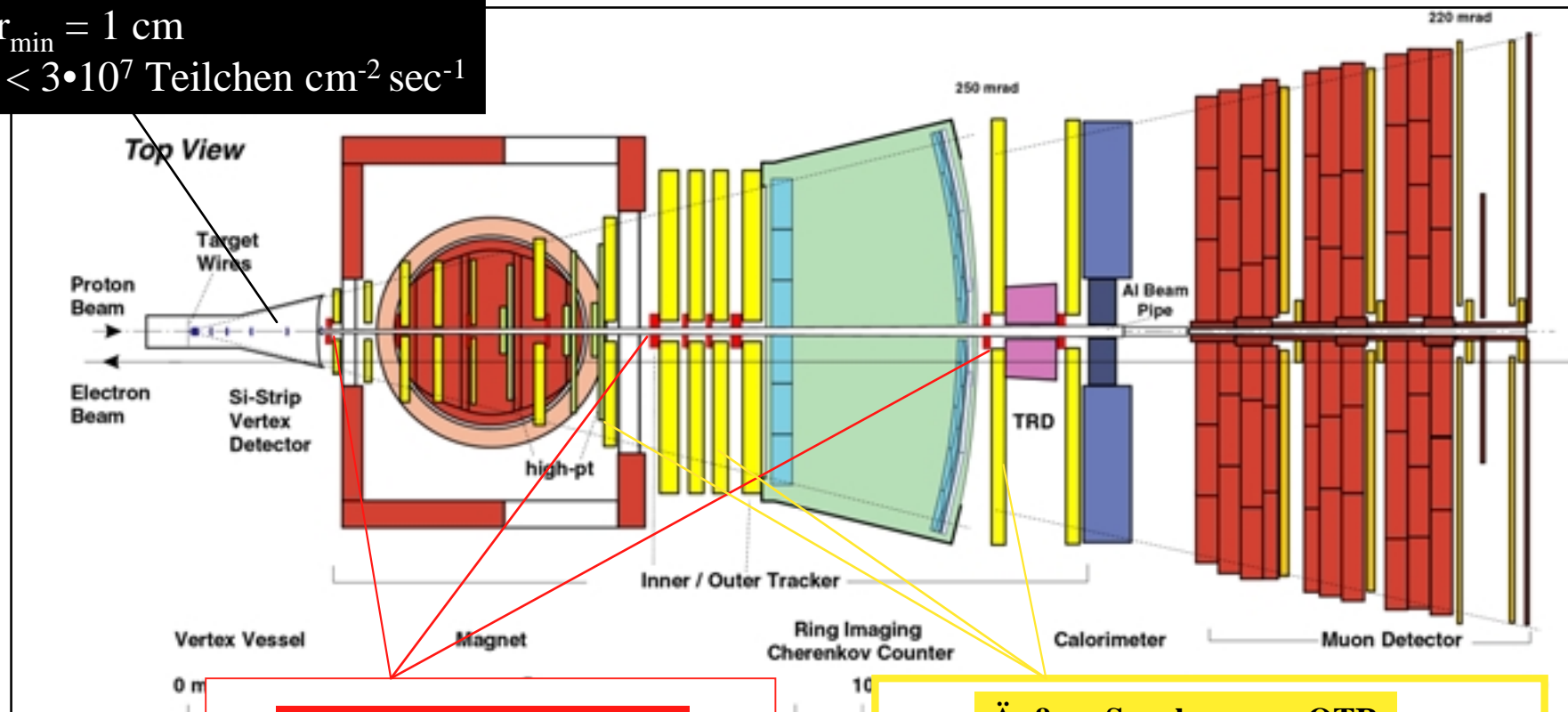
100  $B \rightarrow J/\psi X / h$

# Spurdetektoren bei HERA-B

$3 \cdot 10^7$  Teilchen / sec  $\cdot 1/r^2$

## Vertex Detektoren

- $r_{\min} = 1$  cm
- $< 3 \cdot 10^7$  Teilchen  $\text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$



### Innere Spurkammern ITR

- $r_{\min} = 6$  cm
- $< 10^6$  Teilchen  $\text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$
- Vorwärtsrichtung in CM

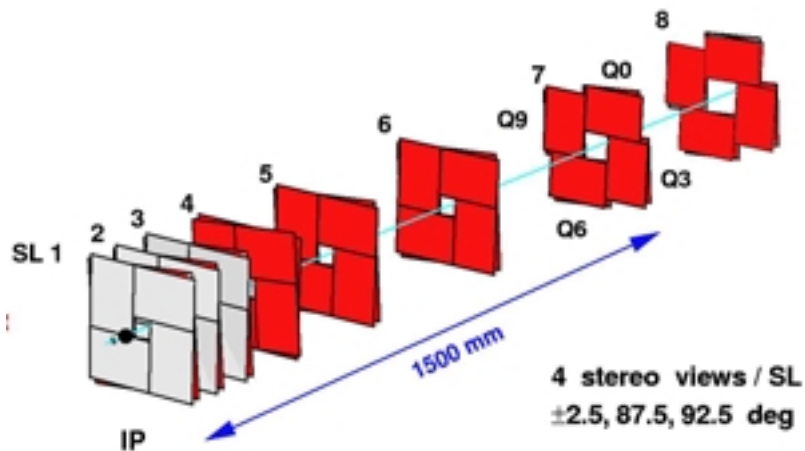
### Äußere Spurkammern OTR

- $r_{\min} = 20$  cm
- $< 10^5$  Teilchen  $\text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$
- Rückwärtsrichtung (CM)

# VERTEX TRACKER

MPI-K (Heidelberg), MPI-P (München)

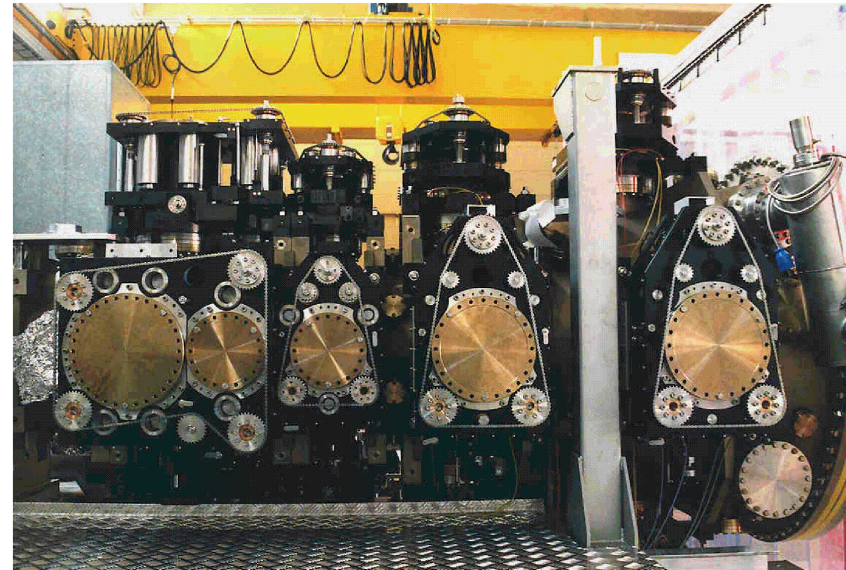
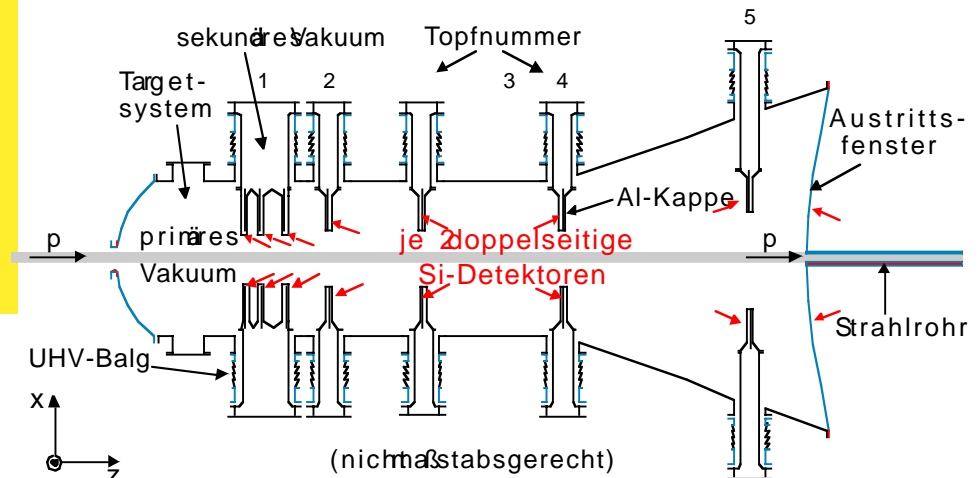
- 64 Doppelseitige Si-Streifenzähler
- 50  $\mu\text{m}$  pitch
- tolerant gegen hohe, inhomogene Strahlenlast
- custom made frontend-Elektronik



Detektormodule radial und lateral verschiebbar

Bernhard Schmidt (DESY)

## Roman Pot System im Vakuum des Protonenrings



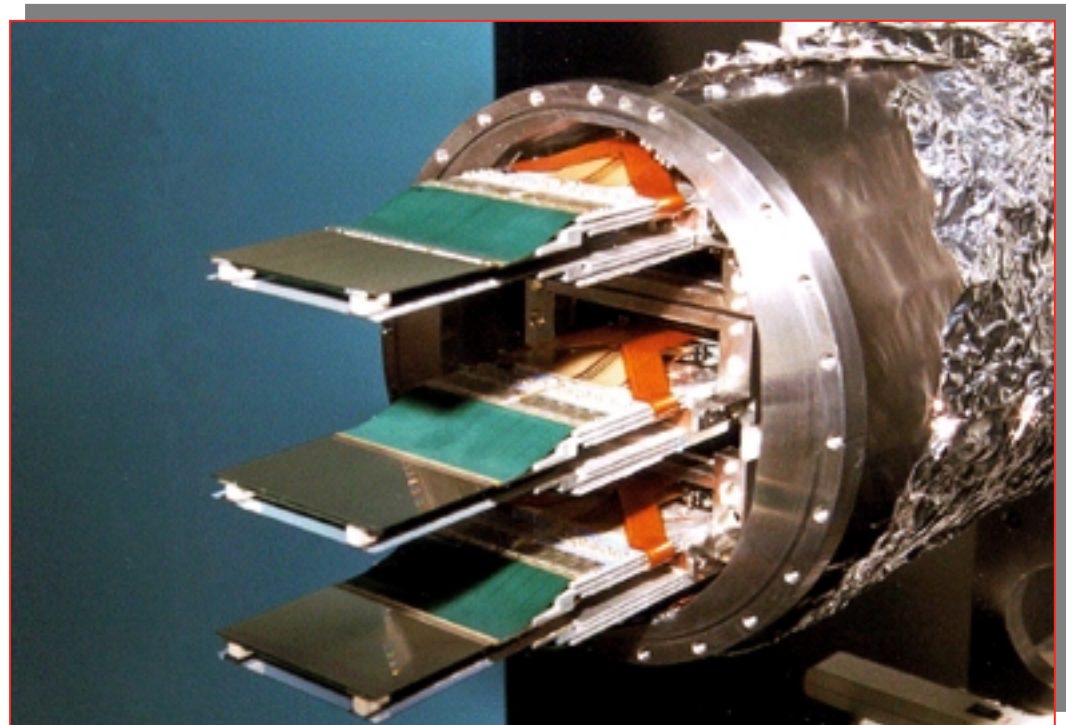
## Mehrere Stufen *voll funktionsfähiger* Prototypen:

1996 : Klebtechnik, Mechanik etc. optimiert

1997 : Elektronik und Kühlung etc. optimiert

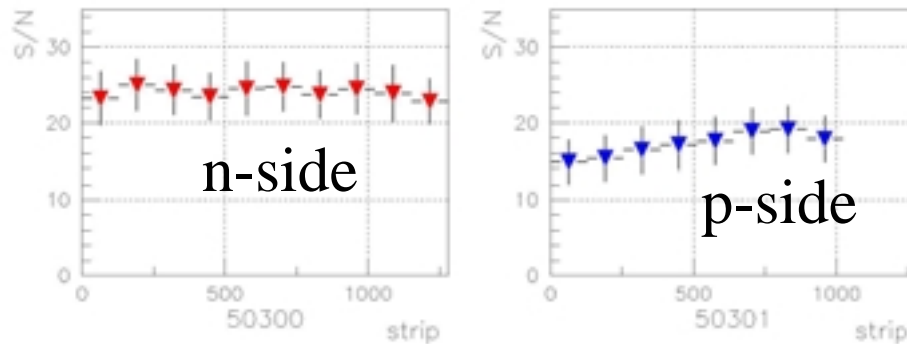
1998 : ~ endgültiges Design

1999 komplettes  
System installiert



## Leistungsdaten des Vertexdetektors: ~ Design !

Exzellentes signal/noise



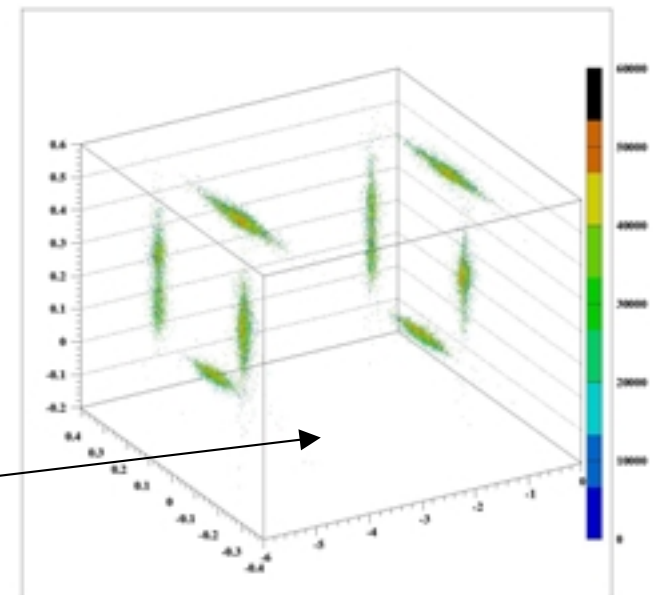
Hit efficiency : > 98%

Intrinsische Auflösung <  $3\mu\text{m}$

Noise occupancy < 0.1 %

Tote read out chips : 20/1072

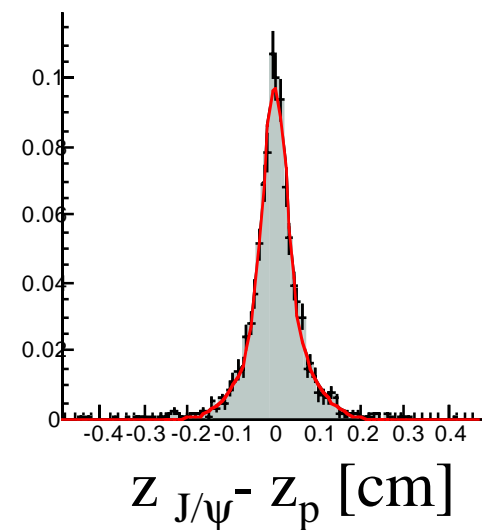
*Primäre Vertices bei  
einem Run mit 8 Targets*



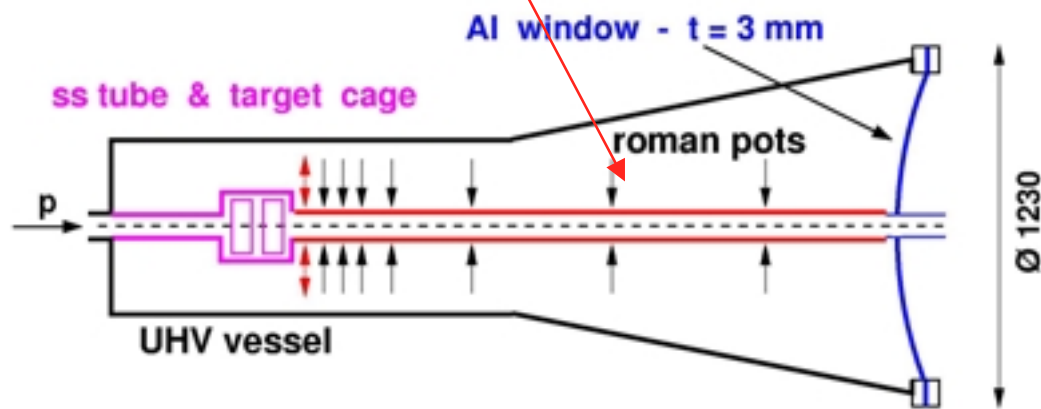
Tracking efficiency  $\sim 96\%$  ( $p > 1\text{GeV}$ )  
Vertexing “ 94 %

Primäre Vertexauflösung :  $45\text{ }\mu\text{m}$  transv.,  $470\text{ }\mu\text{m}$  long.  
für sekundäre 2-Spurvertices ( $J/\psi$ ):  $25\text{ }\mu\text{m}$  transv.,  $325\text{ }\mu\text{m}$  long.

Zerfallslängenauflösung :  $530 \pm 40\text{ }\mu\text{m}$   
(gemessen)



Strahl'abschirmung' durch  
ein (virtuelles) Strahlrohr  
(keine Masse, hohe Leitfähigkeit)



AC Protonenstrom (bunches)

“Wake fields”

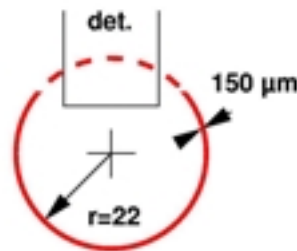
Resonanzen

Energieeinkopplung in den  
Tank



## Die Historie:

- Berechnungen
- excessive Modelltests
- Erprobung



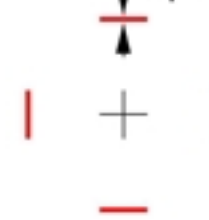
Slit tube

Ø 125 µm



wires

5 µm



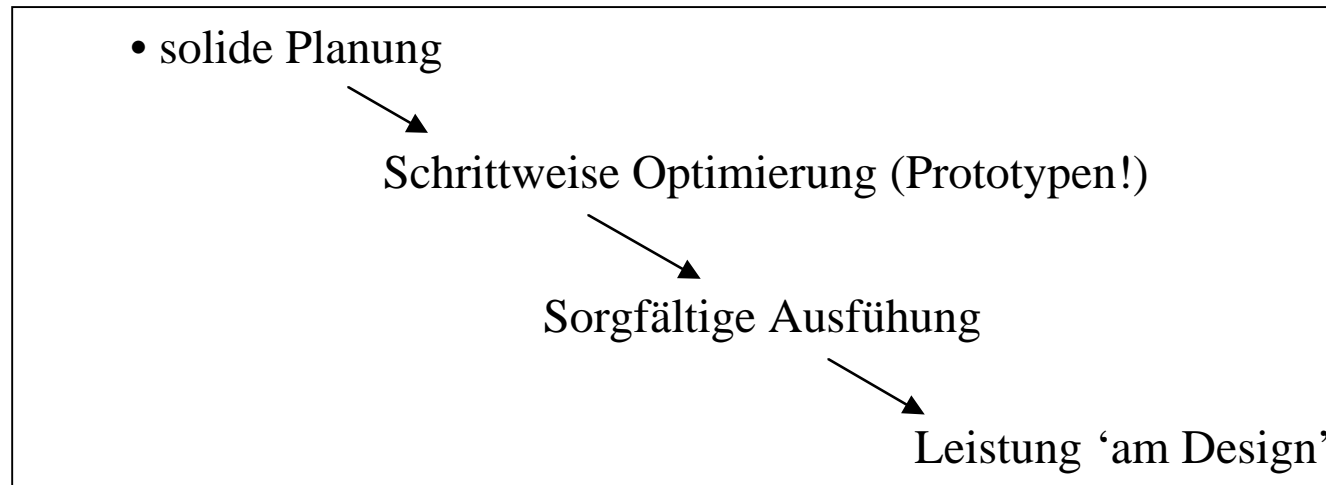
5µm bands

?



## *Was haben wir gelernt ?*

- “Silizium” ist eine ausgereifte, robuste Technologie:



- doppelseitige Technologie machbar und verlässlich
- komplexe Detektorstruktur im Speicherringvakuum

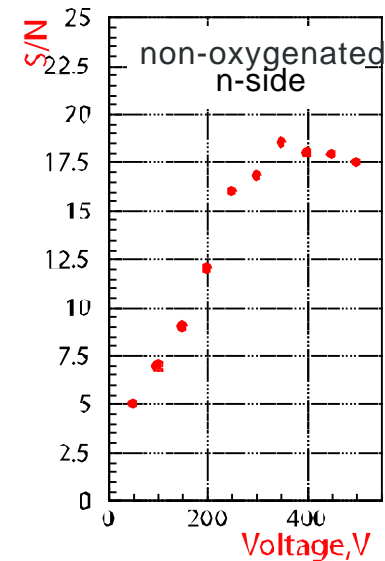
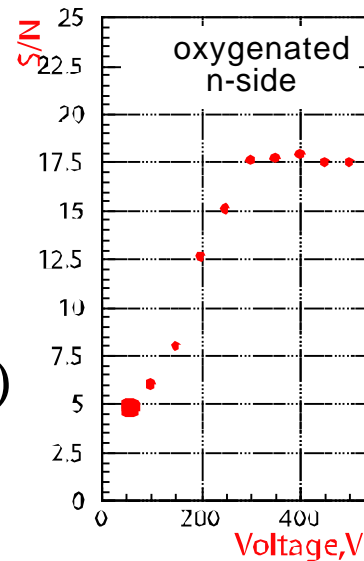
*Strahlenhärte ???*

# .. keine Alterungseffekt in HERA-B

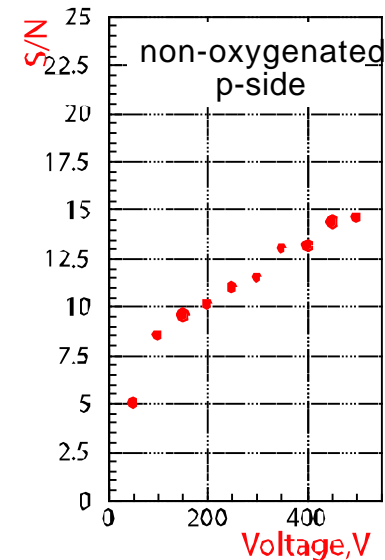
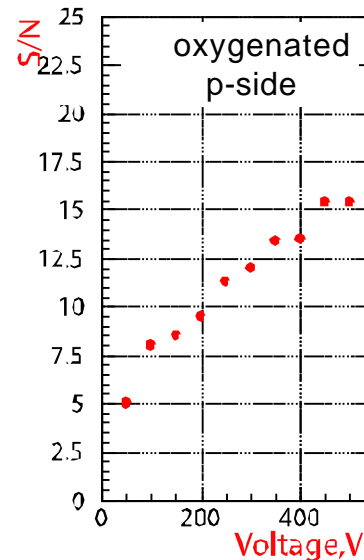
(nicht erwartet, da nur ~1/5 “Designbetriebsjahr”..)

Externe beam tests  
20 MeV Protonen  
(original HERA-B module)

*Noch gutes S/N nach  
1Jahr equ.  
Bestrahlung.*



S/N  
17  
22

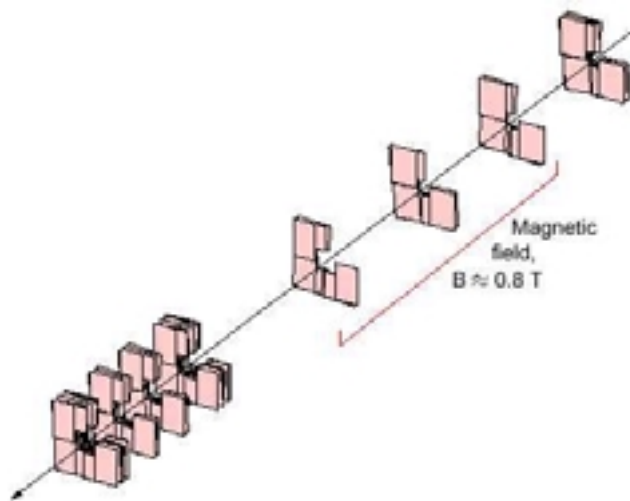


15  
16  
after  
1 year  
equiv.  
irrad.

$> 2 \times 10^{14}$

# Inner Tracker

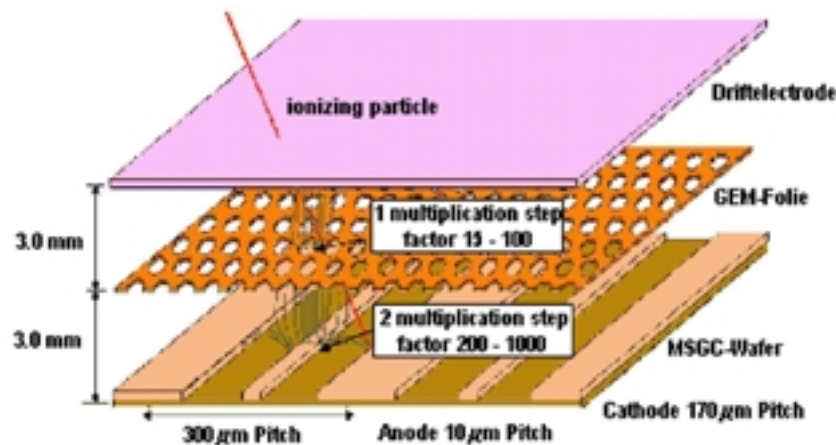
Uni-HD, Uni-Siegen, Uni-Zürich



- 184 individuellen Detektoren
- 27 x 27 cm<sup>2</sup> Detektorgröße
- 18 m<sup>2</sup> Gesamtfläche
- 140 000 Auslesekanäle (ADC)

## Konstruktive Details

- zweistufige Gasverstärkung
- **M**icro **S**trip **G**as **C**hambers (MSGC)
- **G**as **E**lectron **M**ultiplier
- 300 µm Rastermaß der Streifen, Glassubstrat
- nur 6 mm Bauhöhe
- Auslese durch “custom made ASIC chips (HELIX)”



*Neuartige Detektortechnologie !*

Gas - Micropattern - Detektor  
Spurkammersystem

Leipzig, 2002

# HISTORIE

**1995** (Genehmigung von HERA-B) :

“MSGC sind eine für Hochratenexperimente geeignete Technologie [1,2,3..]”

- Technologisch entwickelt
- Langzeitstabilität geprüft (>10 Jahre LHC)
- Produktion grosser Substrate mit guter Qualität möglich

ABER : alles *Extrapolationen* aus Laborerfahrungen !

... es fehlte der Beweis...

**A posteriori : alles falsch !**

*Die Technologie der Detektoren musste in prinzipiellen Punkten geändert und neu entwickelt werden !*

- 1) Borosilikatglas ist *prinzipiell* nicht Langzeitstabil unter starker Bestrahlung (Änderung der elektrischen Eigenschaften)

1995

Oberflächenbeschichtung (definierte Leitfähigkeit) mit DLC (“diamond like coating”) entwickelt [Sauli(CERN), Zech(Siegen)]

1996

- 2) Detektoren mit DLC sind ungeeignet für intensive **Hadronenstrahlen** (induzierte elektrische Entladungen, Zerstörung der Elektrodenstruktur innerhalb Tagen..)

**Bestrahlungstests mit Röntgen- oder Elektronenstrahlen (Labor) sind *nicht* repräsentativ für Hadronische Umgebung !**

**Bestrahlungstests mit realistischer (Experiment!) Teilchenart notwendig.**

Zweistufige Gasverstärkung, Vorstufe mit **GEM** (gas electron multiplier) [Sauli (CERN)]

1997

**Neue Technologie !**



1998

Auch **MSGC - GEM** Detektoren haben Probleme mit Überschägen **in Hadronstrahlen**

(full size Prototypen im PSI Strahl)



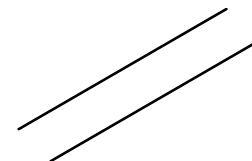
lösbar durch ändern der Feldgeometrie

Alterungstests mit *Serienkammern* : massive Alterung  
(aging) nach kurzer Zeit ! (Ar-DME Gasmischung)

Alle (viele) Tests mit 'kleinen Prototypen'  
waren erfolgreich gewesen !



lösbar durch Ar-CO<sub>2</sub>, aber deutlich reduzierte  
Spannungsfestigkeit und höhere Neigung zu  
Überschägen.



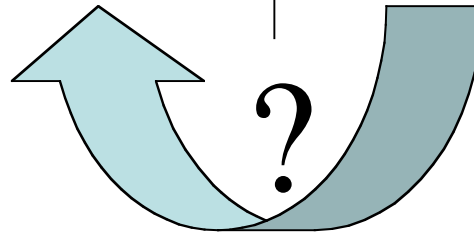
# *Alterungsphänomene : Langzeitstabilität unter Bestrahlung*

## Reale Anwendung

- ‘full size’ Detektoren
- großflächige Bestrahlung (inhomogen)
- hohe Strahlungsintensität
- lange Standzeit (Jahre)
- hadronischer Strahlungsmix
- komplexes System (viele Detektoren)

## “klassischer” Labortest

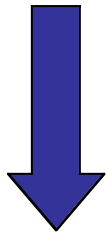
- Testkammern
- kleinflächige Bestrahlung
- sehr hohe Strahlungsintensität
- kurze Dauer ( < Monate)
- Röntgenstrahlung (Elektronen)
- einfaches System (ein Detektor)



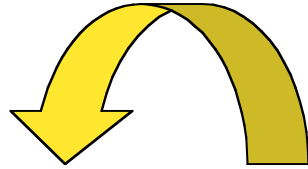
Modellannahmen über ‘Alterungsmechanismen’ !

mikroskopisch

- Elektronendichte
- Photonendichte
- Ionendichte
- Radikale
- stabile Gaskomponenten/Fragmente
- Feldverteilung
- Temperaturverteilung
- .....

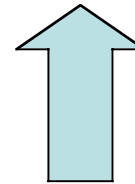


*Schädigung (aging)*



makroskopisch

- lokale Bestrahlungsstärke
- integrale Bestrahlungsstärke
- Strahlenart
- Elektrische Spannungen
- Makroskopische Gaszusammensetzung
- Forcierter Gasfluß
- Umgebungstemperatur
- ....

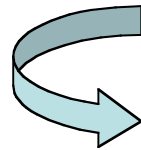


steuerbare Parameter

*KEIN Test (beschleunigt, verkleinert..) hat  
identische mikroskopische Parameter wie das  
spätere Experiment !*

Für konventionelle Anwendungen ( $\ll$  LHC Raten)  
gut bewährte Annahme  
(ein-Parameter Ansatz)

*Schädigungsrate  $\sim$  lokale Stromdichte*

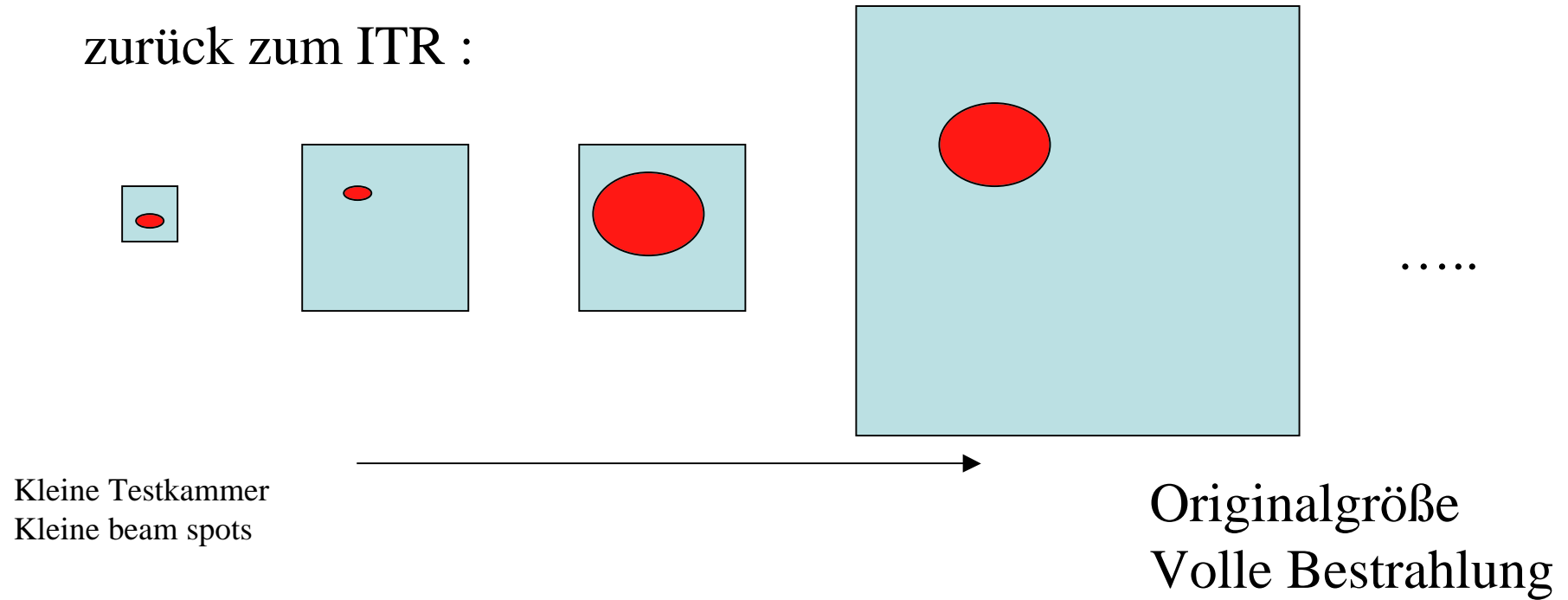


- integraler Schaden (aging)  $\sim$  akkumulierte Ladung
- unabhängig von bestrahlter Fläche
- unabhängig von Strahlungsintensität (in Grenzen)
- keine nichtlokalen Phänomene

Viele Evidenzen zeigen mittlerweile :

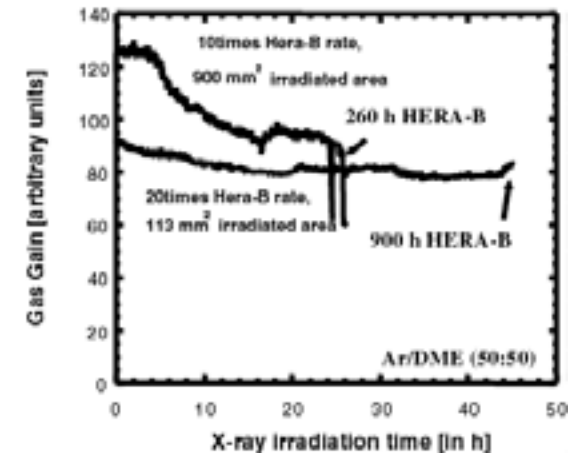
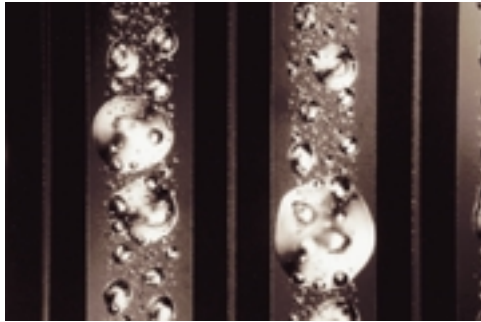
für Detektoren bei LHC -Raten nicht erfüllt...

zurück zum ITR :

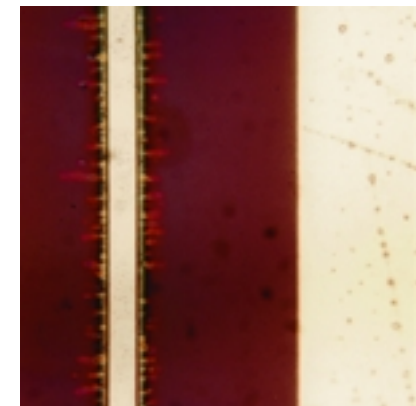
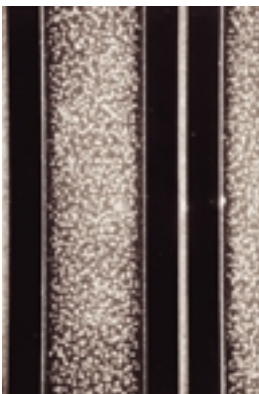


Röntgenstrahlung -  $\alpha$ -Strahlung -  $\pi/p$  beam (PSI)

*Jeder Entwicklungsschritt  
zeigte NEUE Schadensphänomene !*



- Schädigungsrate  $\sim$  **Bestrahlungsintensität**  
(z.B. hohe 'Beschleunigung' -> weniger Alterung, oder umgekehrt !)
- Schädigungsrate hängt von **bestrahlter Fläche** ab  
(grosse Fläche -> mehr Alterung)
- Art und Umfang der Schäden hängen von **Strahlungsart** ab  
(Hadronen gefährlicher als Elektronen / Photonen)
- diverse Gas (Plasma) chemische Reaktionen involviert  
(Polymerisation, Ätzen der Streifen, Ätzen der DLC Schicht, Aufquellen des GEM...)



## Produktion der GEM - MSGC Kammern :

Herstellung der grossen (27x27cm<sup>2</sup>) **MSGC Platten** auf 0.4mm Glas zunächst problematisch. Verbesserung der Spinning-, Reinigungs- und Ätztechnologie war erforderlich (IMT, Greifensee CH).



Produktion von ~200 Platten mit  $\leq 2\%$  **Anodenfehlern**

Herstellung der grossen (27x27cm<sup>2</sup>) **GEM Folien** durch CERN-EST-DEM ständig optimiert



Produktion von ~200 GEMs ohne Kurzschlüsse

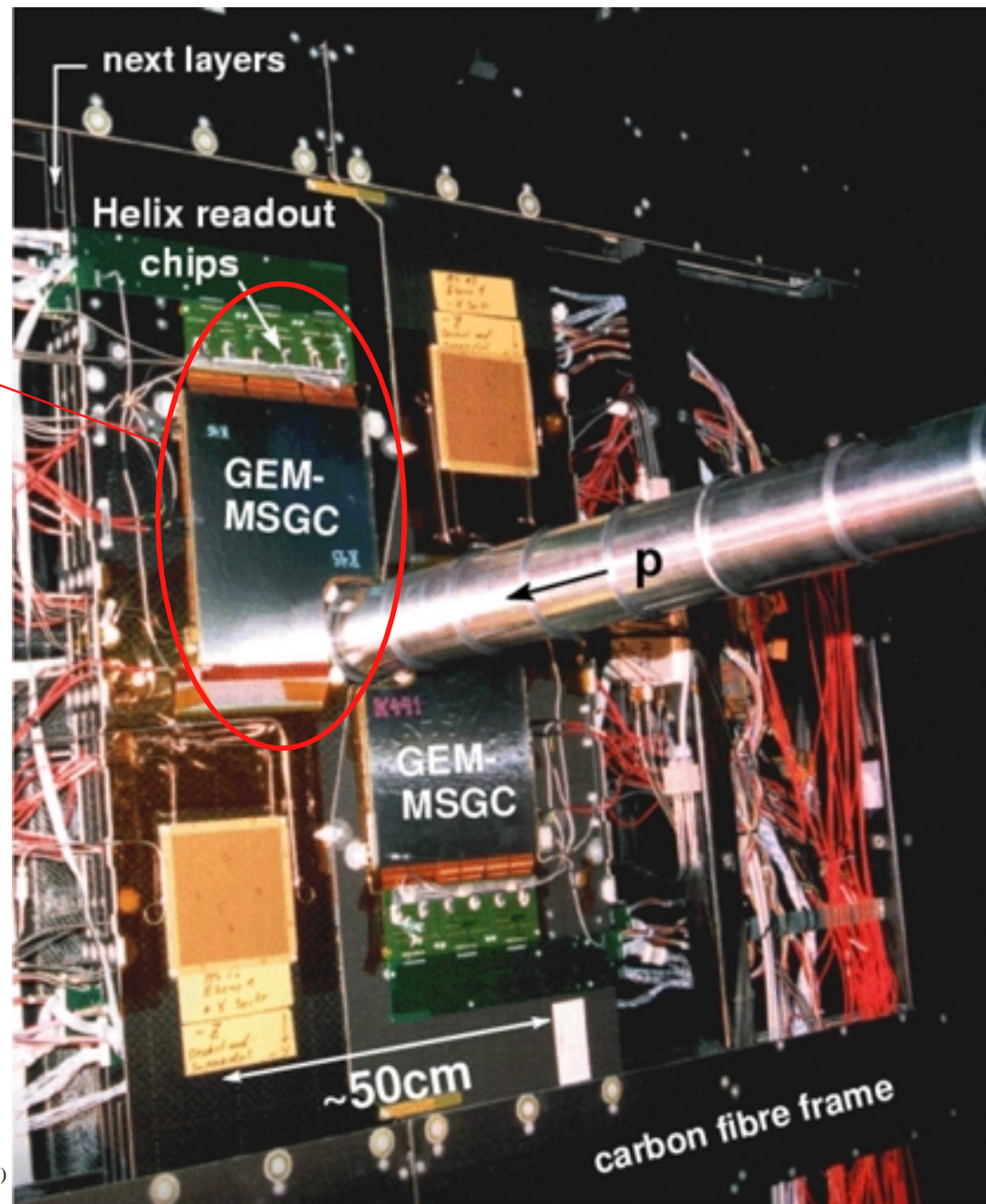
*Problem* : grosse Variationen (2.5) der Verstärkung von Folie zu Folie

Herstellung der kompletten Kammern inclusive FE-Elektronik durch Univ. Heidelberg, Siegen Zürich innerhalb ~ 6 Monaten



Ende 1999 ITR zu 90 % installiert.

**Detektor**



## Erfahrungen im 'Commissioning Run' 2000 :

- keine Routineoperation bisher
- Kammern benötigen langwieriges und sorgsames HVTraining im beam
- individuelle Gainanpassung notwendig (GEM Verstärkung)
- Noise Probleme im Read-out
- keine HV Probleme bei hohen Raten
- Ortsauflösung wie erwartet  $\sim 80 \mu\text{m}$
- Effizienz  $\geq 90\%$  für einige Kammern gezeigt, kann generell erwartet werden

## Ausblick auf 2002/2003 :

ITR voll installiert, gründlich Überarbeitet im shutdown 2001  
(Kammerprobleme, Noise Situation)



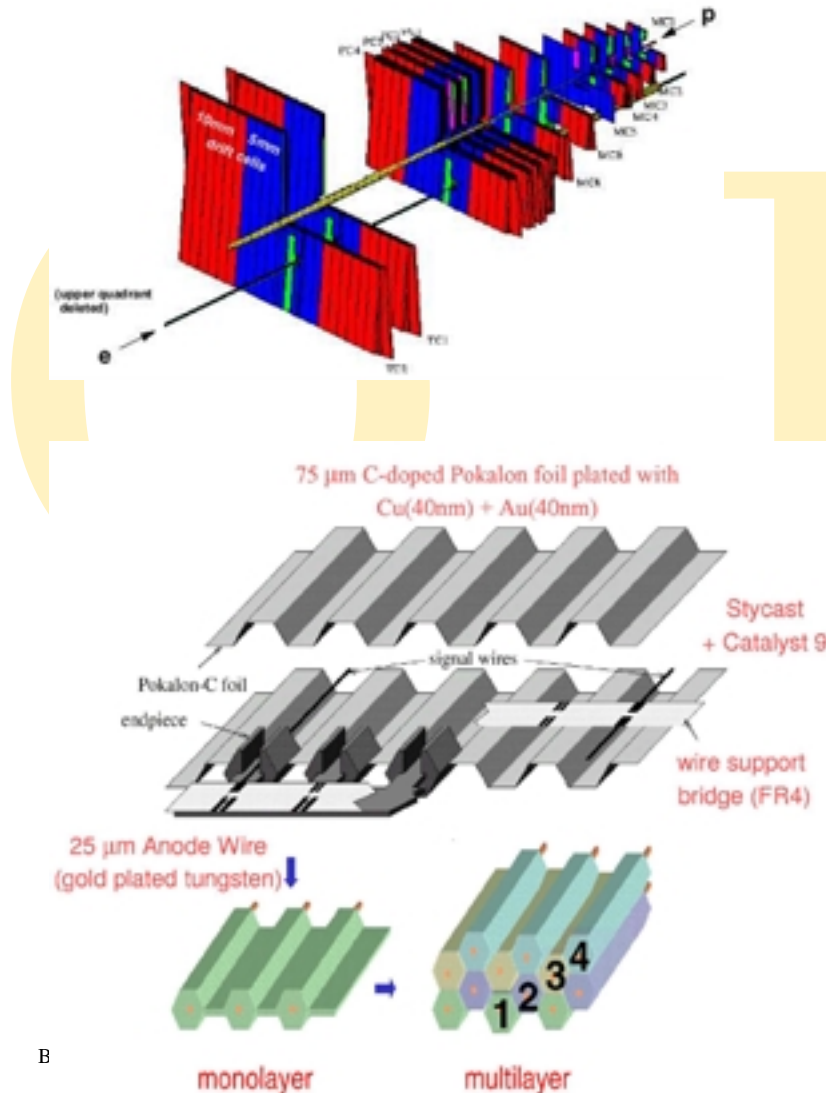
**MSGC - GEM Tracker sollte mit  
akzeptabler Effizienz laufen.**

## Haben wir was gelernt ?

- ‘konventionelle’ MSGC sind untauglich für LHC-artige Experimente
- MSGC + GEM Detektoren sind an der Grenze, keine ‘robuste’ Technologie. Bisher kein Beweis der Langzeitstabilität unter realen Bedingungen.
- Tests der ‘Strahlenhärte’ sind sehr viel kritischer (und komplexer) als zunächst angenommen

Konsequenzen : kein LHC Experiment wagt  
‘micropattern’ Detektoren. (CMS, LHC-b)  
COMPASS : Triple-GEM Detektor

# OTR : klassische Drahtkammertechnologie



- 978 individuelle Module
- max. Maß eines SL 4.6 x 6.5 m
- 8000 m<sup>2</sup> Kathodenfläche
- 115 000 Auslesekanäle (TDC)

(DESY-HH, DESY-Zeuthen, NIKHEF, JINR-Dubna, HU-Berlin, Beijing)

Dünne ( $X_0$ ) Konstruktion, wenig Masse  
Selbsttragend  
massenproduktionsfähig  
bezahlbar

## Konstruktion der OTR Module

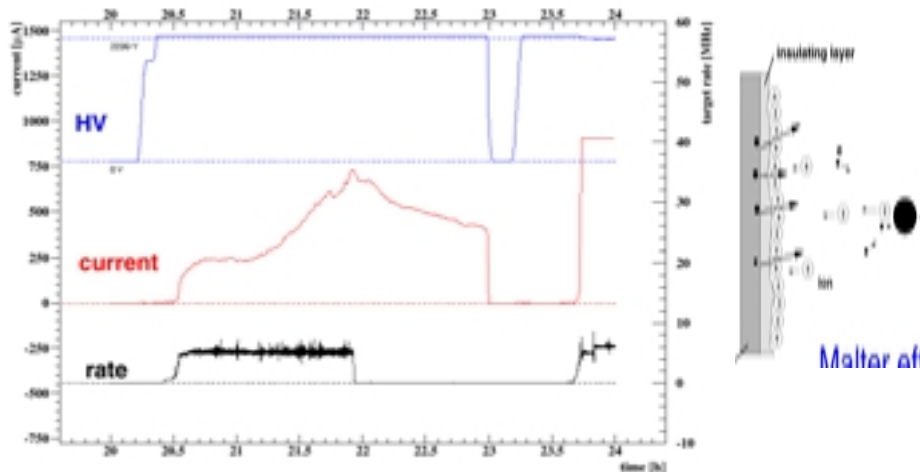
- offene Honeycomb Geometrie
- Kathoden aus Kohlenstoff 'gedopten' Polycarbonat Folien (Pokalon-C, faltbar, leitfähig)
- 5 mm and 10 mm Zellen
- lagenweise Produktion
- Drähte von GFK Streifen gehalten
- offener Gasaustausch, kein erzwungener Fluss

Strahlungsresistenz zunächst (1996) “verifiziert” :

*keine Schäden bis 4.5 C/cm  
(~ 10 HERA-B Jahre)*

- kleine (cm) Testkammern
- kleinflächige Bestrahlung
- Röntgenröhre
- Ar-CH<sub>4</sub>-CF<sub>4</sub> Gasmischung

Erste Prototypkammer (~1m) in HERA-B (1997) :



*Kammer funktionsunfähig  
nach wenigen **Stunden**,  
Dunkelströme durch  
Maltereffekt*

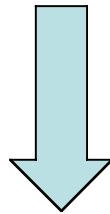
(unzureichende  
Oberflächenleitfähigkeit der  
Kathodenfolie)

## Intensives R&D Programm (statt Massenproduktion)

➡ *Malter Effekt nur bei grossflächiger, hadronischer Bestrahlung initiierbar*

> 1 Jahr beam tests mit 100 MeV  
 $\alpha$ -Strahl, Zyklotron FZ-Karlsruhe

(1998)



Sehr schnelles 'Altern' durch  
Polymerisationen an den Anoden  
(auch mit Röntgen, genügender  
Fläche)



Beschichtung der  
Kathodenfolien mit 90 nm  
Cu/Au  
(8000 m<sup>2</sup> !)

**Malter**



~~CH<sub>4</sub>~~ im Gas,  
(Ar-CO<sub>2</sub>-CF<sub>4</sub>)  
Überprüfung aller  
Strukturmaterialien

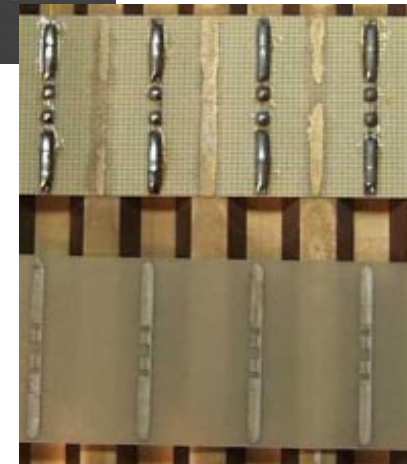
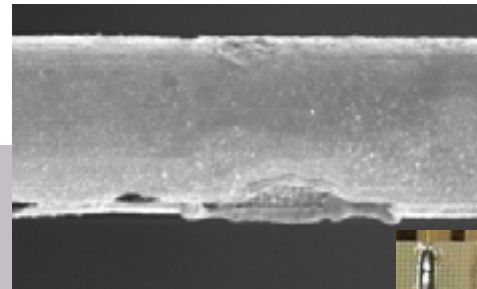
*ausreichend (HERA-B) stabile Lösung gefunden*



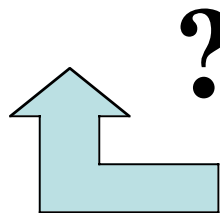
**Massenproduktion**

## Offene Fragen :

- Aggressivität des  $\text{CF}_4$  beherrschbar ?  
(ätzt die Anoden, GFK Streifen, Ablagerungen auf Kathoden)
- Einfluss der Gasfeuchte ?  
(widersprüchliche Resultate, zu feucht -> GFK leitfähig, zu trocken -> Anodenschäden (schwellen, reißen..))



- Rolle langlebiger Radikale ? (Existenz unzweifelhaft)



**Intensive Forschungen für  
ATLAS-TRT bei CERN**

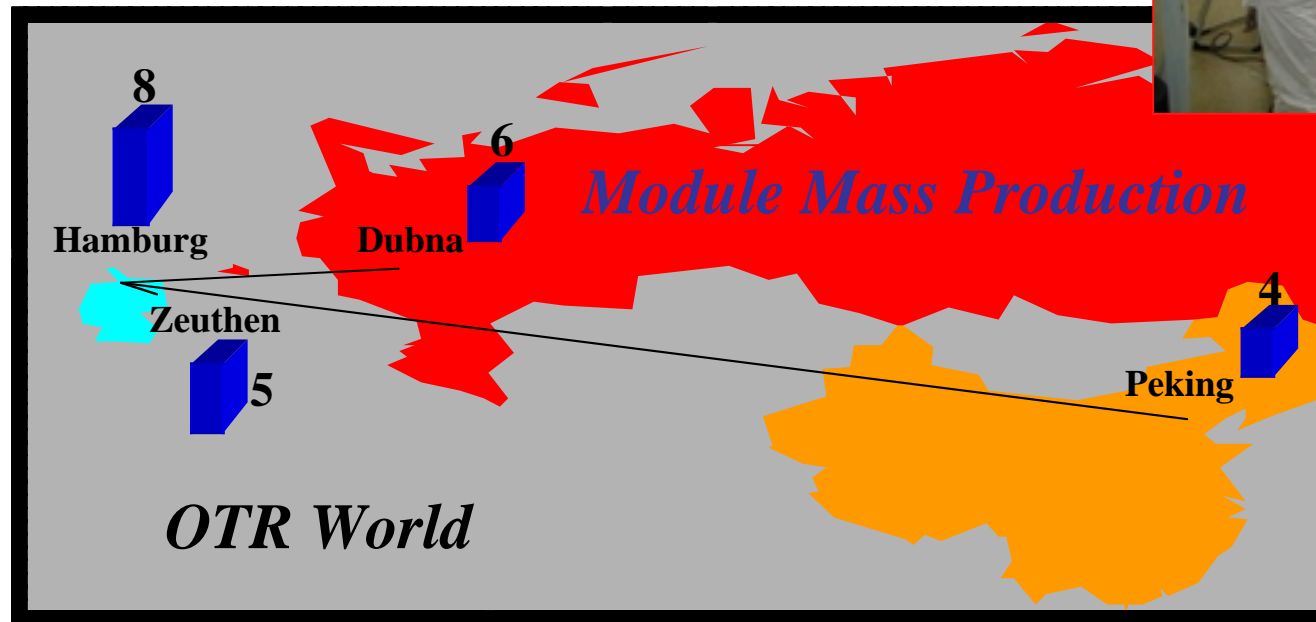
# Produktion des OTR

**1000 Detektormodule  
in 9 Monaten !**

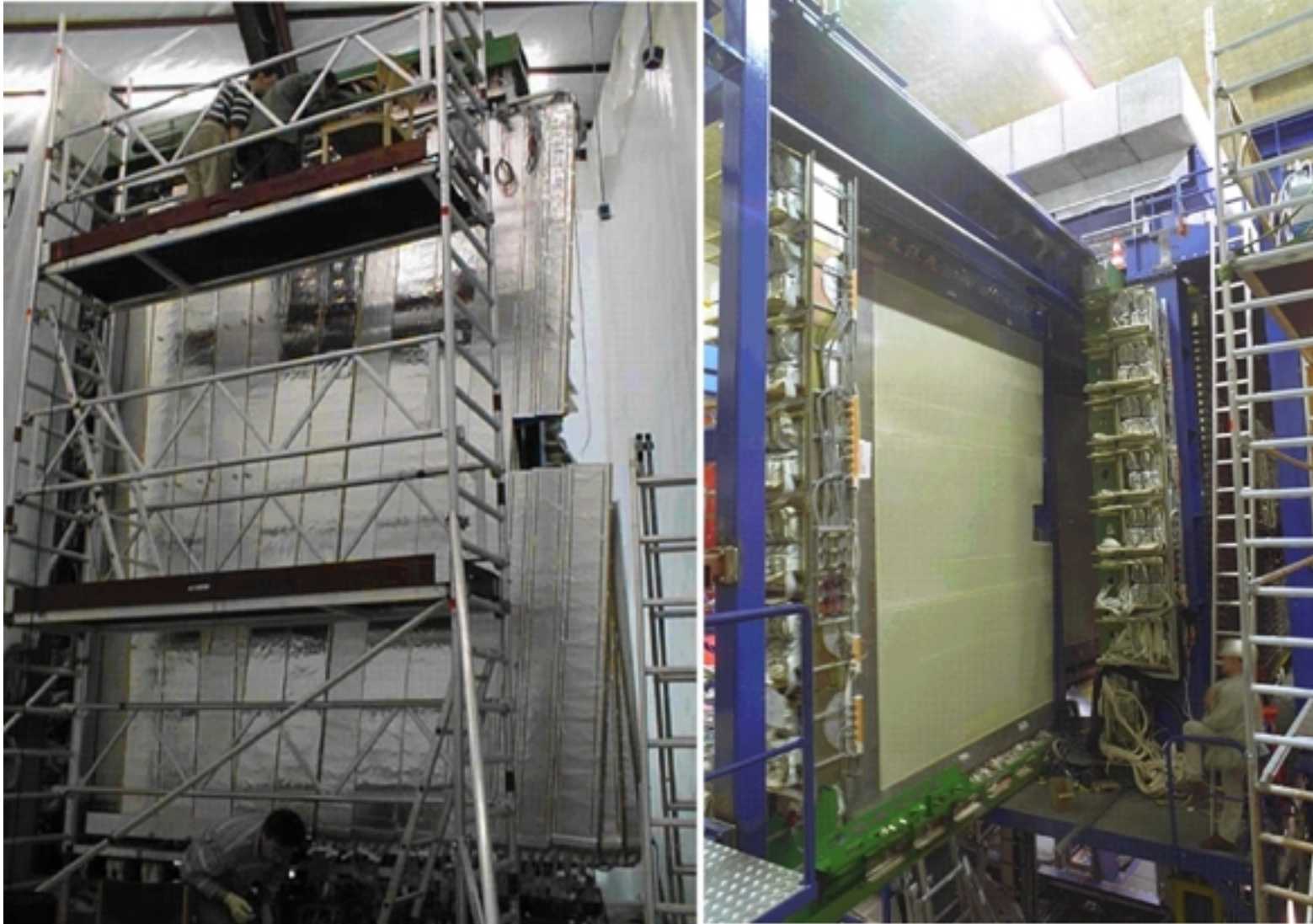
8000 m<sup>2</sup> Kathodenfolie  
115 000 Drähte  
~1.5 Millionen Lötstellen  
.....

~ 0.7%  
tote Kanäle

**> 100 Physiker und Techniker  
Parallel an 4 Produktionsstätten**



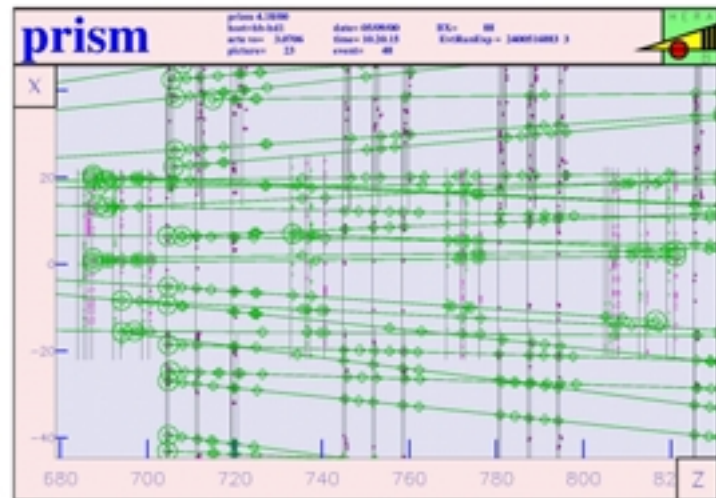
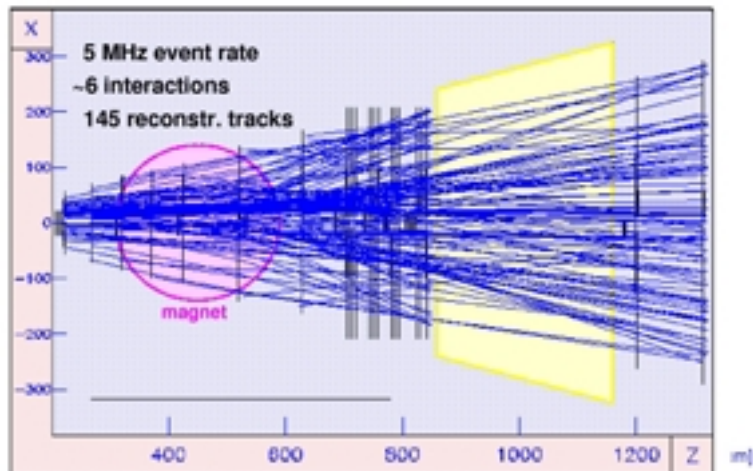
## Installation aller 'Superlagen' Ende 1999 abgeschlossen



Bernhard Schmidt (DESY)

DPG-Tagung Leipzig, 2002

## Betriebserfahrung 2000 (~ 2500 Stunden bei $< 1/5$ Designrate)



### *Routinebetrieb als 'Tracker'*

~80% tracking efficiency für alle Spuren  
>95% “ für Triggerspuren

### *HV Stabilität am Limit*

Mechanische Stabilität,

“Kondensatorproblem”



Ende 2000 ~7 % tote Kanäle  
Reduzierte Gasverstärkung

### *Noise Probleme*



Höhere Schwellen, 4fC statt 2.5 fC

Typische Effizienz (Zelle) ~ 90% (98% design)  
Auflösung ~ 350  $\mu\text{m}$  (200  $\mu\text{m}$  design)

## Ausblick auf 2002/2003 :

- HV Probleme drastisch reduziert

(16 000 Kondensatoren getauscht, mechanische Versteifung)

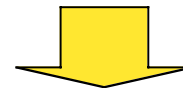


~1% tote Kanäle  
nominale Verstärkung

- noise Problem behoben



Alle Schwellen nominal



deutlich gesteigerte Effizienz erwartet !

Erster kurzer run im Dezember 2001 vielversprechend

# Resumé

- ‘neue Technologien’ sind erst dann zertifiziert, wenn sie *in allen Details, als komplettes System unter realistischen Bedingungen* getestet sind.
- 

- In der Entwicklungsphase kommt dem rigorosen Testen realistischer ‘full size’ Prototypen zentrale Bedeutung zu.

Jede Abweichung der Parameter von der späteren Anwendung birgt unkalkulierbare Risiken.

Nennenswerter Anteil des Gesamtaufwands an €, Zeit, manpower... Hier investiert, zahlt sich aus.

- Tests der **Strahlenhärte** (‘aging tests’) für Hochratendetektoren sind nicht-trivial und extrem kritisch. Jede Annahme muß überprüft werden.

kein simples Skalenverhalten !

- Strahlungsintensität (lokal)
- “ (integral)
- Strahlungsart (Hadronen vs. X-rays)
- inhomogene Strahlungsprofile (nichtlokale Effekte)
- Gasaustausch (global, lokal)
- Temperatur
- Zeit (?)
- .....

+

Strukturmaterialien, Gas, Hilfsstoffe..

- Testparameter müssen systematisch variiert werden, Abhängigkeiten verstanden und reproduziert .

sonst keine Extrapolation möglich !

- kein Parameter sollte mehr als einen Faktor 10 zum Experiment extrapoliert werden.

---

**Bauphase** : organisatorisches Problem.

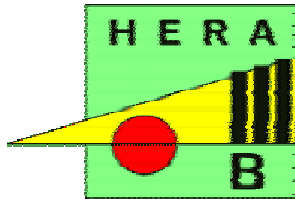
Lösbar, sofern man nicht 'ad hoc' ändern muss.  
(siehe oben...)

Die Entwicklung der Detektoren für HERA-B hat substantielle Beiträge zum Thema ‘Hochratendetektoren’ geliefert.

---

HERA-B ist **KEIN** schlüssiger Test für Langzeitstabilität unter LHC Bedingungen, da normalerweise Rate 5 - 10 mal unter Design. (Kurze Testphasen ausgenommen).

es bleibt spannend...



Pattern Recognition :	Y. Gorbunov	T208
Charmonium Physik :	U. Husemann	T305
Alignment ITR :	T. Zeuner	T308
Muon Pre-Trigger :	M. Böcker	T309
Multiplizitätsveto :	C. Cruse	T309
Multiplizitätsveto :	M. Brüggemann	T309
2. Triggerstufe :	L. Sözüer	T604