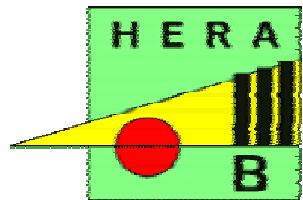


Entwicklung und Test von Detektoren für extreme Teilchenraten

Was haben wir bei HERA-B gelernt ?

Bernhard Schmidt
DESY-Heidelberg-Siegen

Detektoren für extreme Teilchenraten bei HERA-B

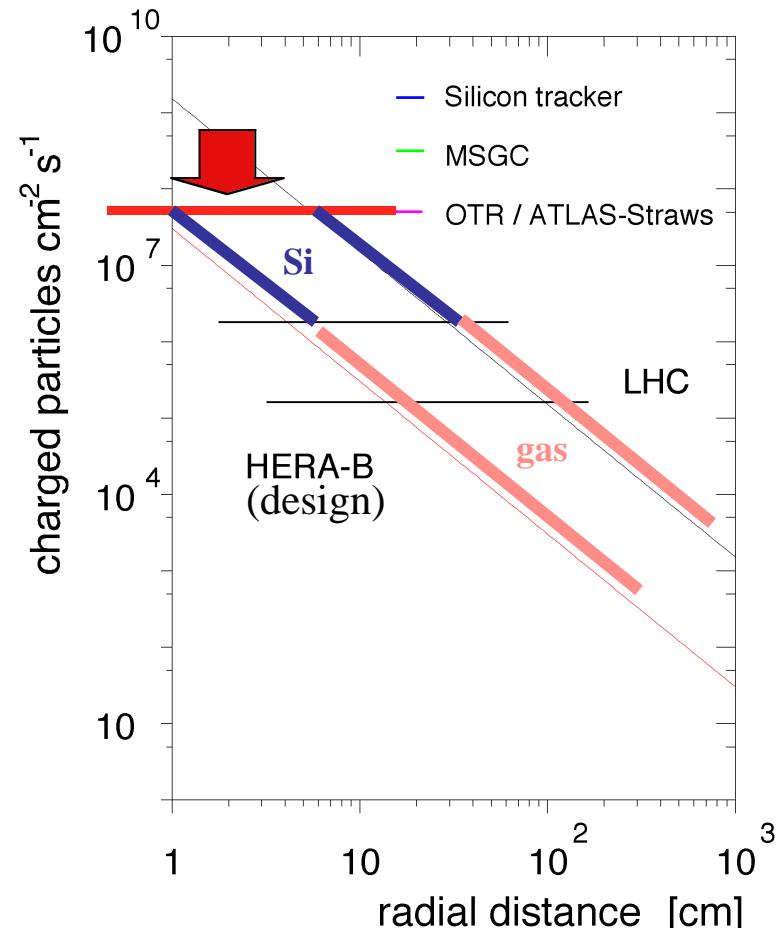


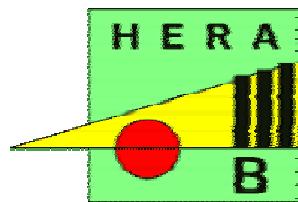
der Plan :

- genehmigt 1995
- gebaut 1998
- in Betrieb 1999

Was haben wir gelernt ?

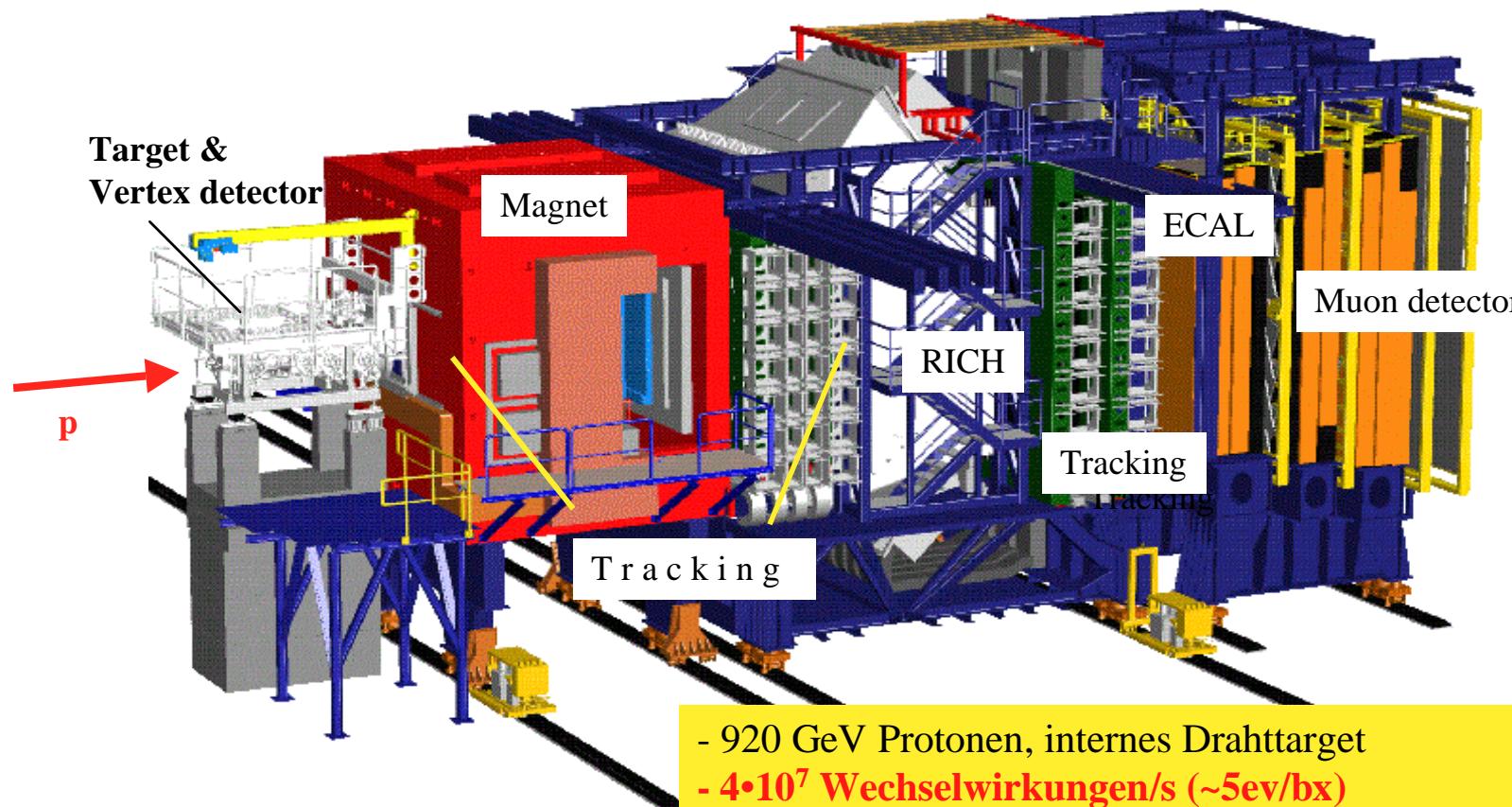
- technologisch
- methodisch
- organisatorisch





DESIGN

*„Fixed target Experiment,
Hadronische B-Fabrik“*



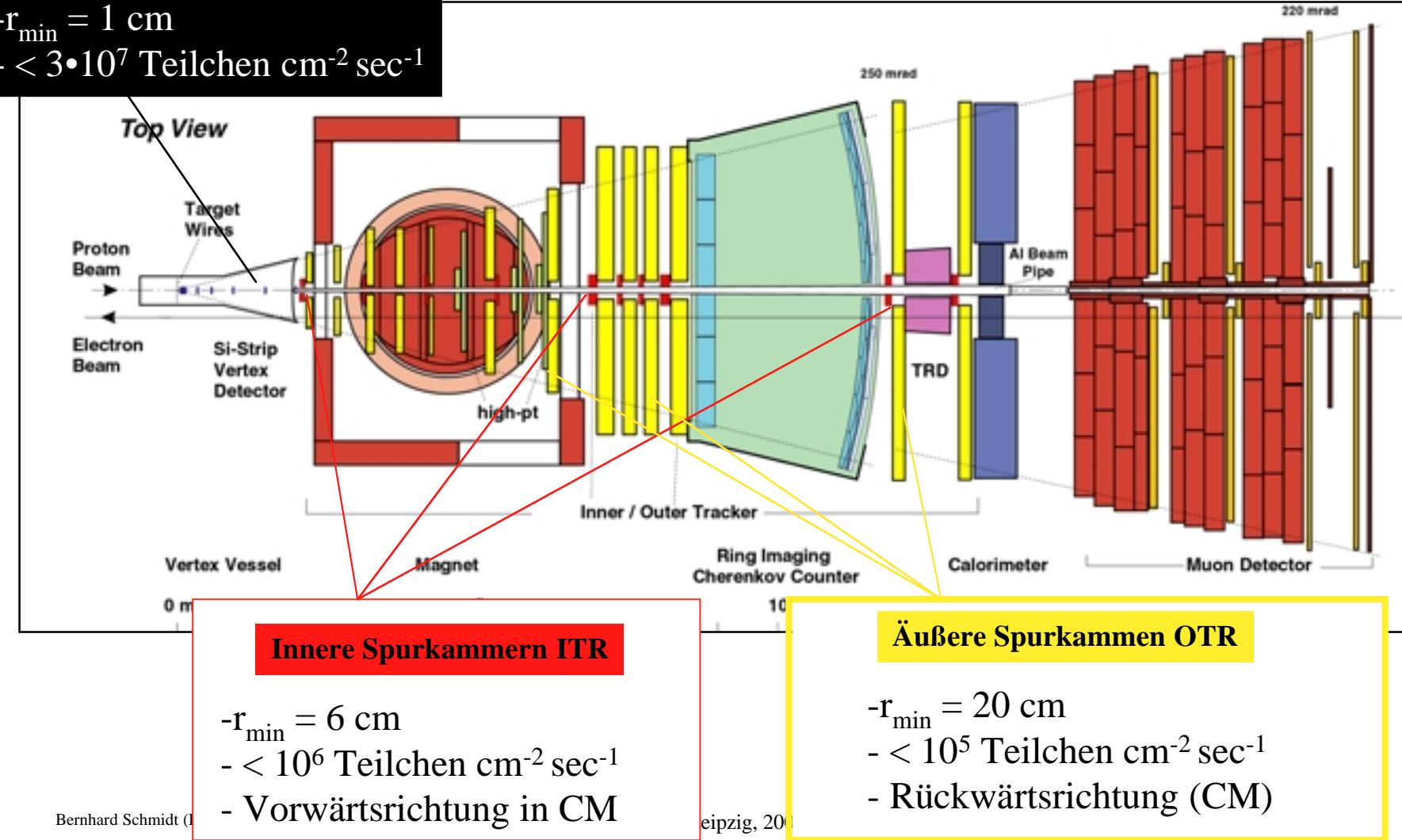
- 920 GeV Protonen, internes Drahttarget
- **$4 \cdot 10^7$ Wechselwirkungen/s ($\sim 5\text{ev/bx}$)**
- Schneller di-lepton Trigger
(J/ψ trigger)
200 000 direkte J/ψ /h
100 $\text{B} \rightarrow \text{J}/\psi X$ /h

Spurdetektoren bei HERA-B

$3 \cdot 10^7$ Teilchen / sec • 1/r²

Vertex Detektoren

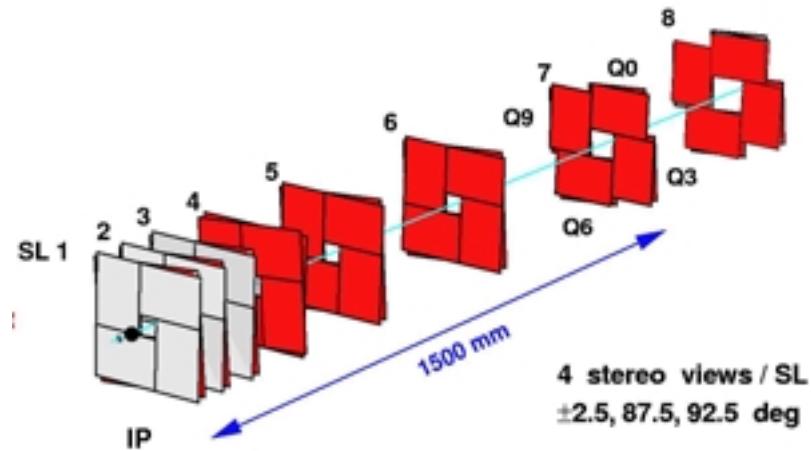
- $r_{\min} = 1$ cm
- $< 3 \cdot 10^7$ Teilchen cm⁻² sec⁻¹



VERTEX TRACKER

MPI-K (Heidelberg), MPI-P (München)

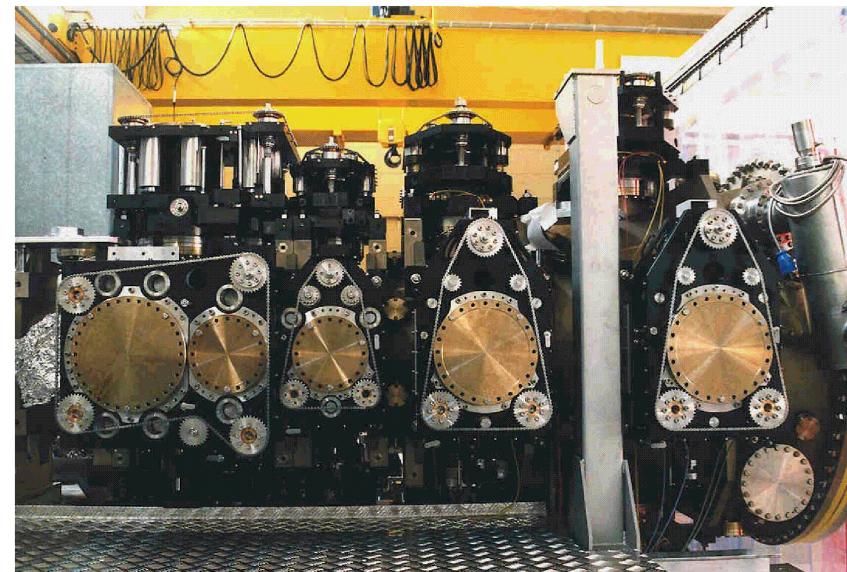
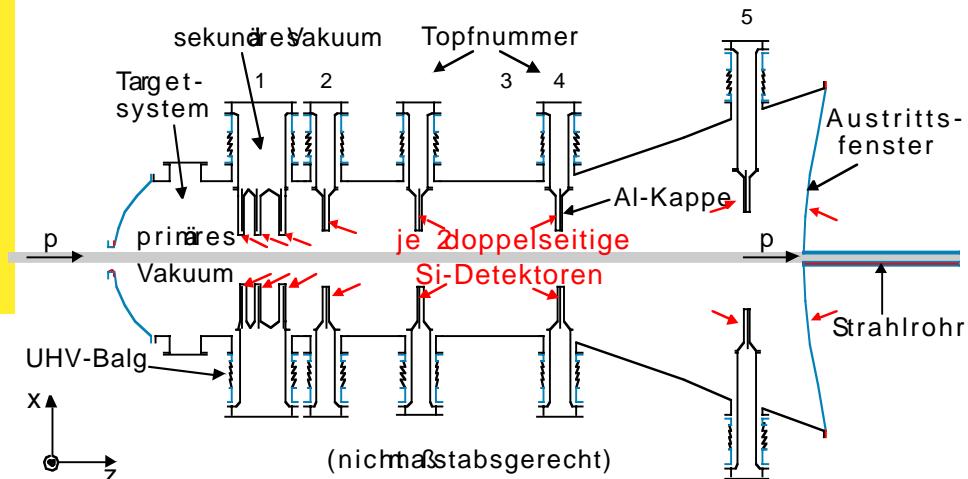
- 64 Doppelseitige Si-Streifenzähler
- $50 \mu\text{m}$ pitch
- tolerant gegen hohe, inhomogene Strahlenlast
- custom made frontend-Elektronik



Detektormodule radial und lateral verschiebbar

Bernhard Schmidt (DESY)

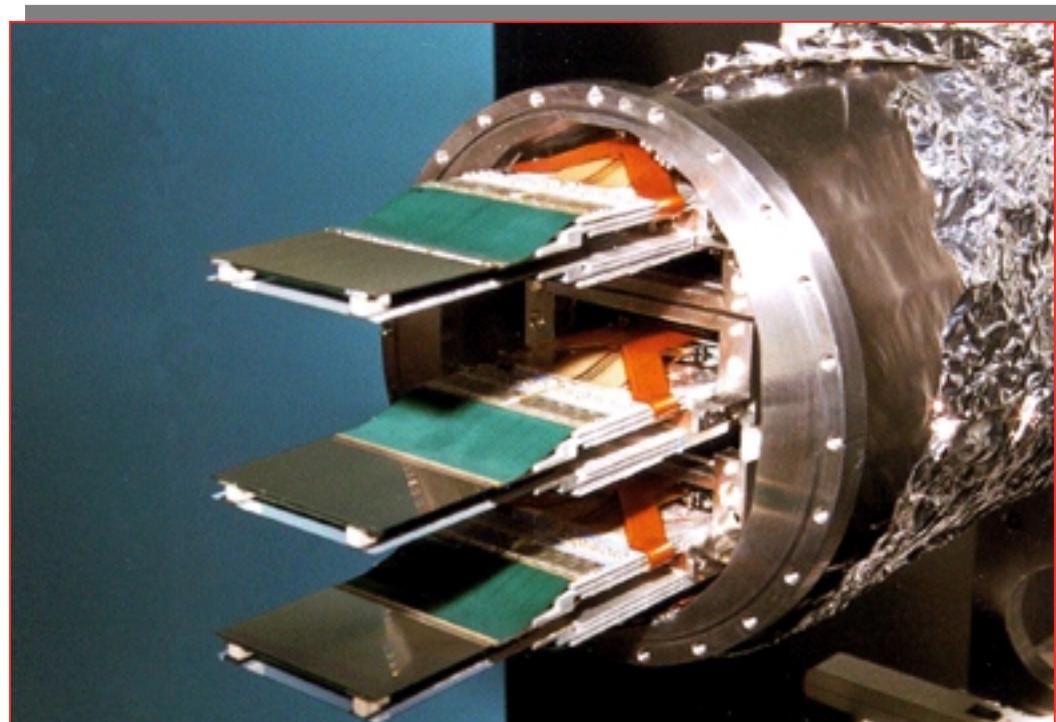
Roman Pot System im Vakuum des Protonenrings



Mehrere Stufen *voll funktionsfähiger* Prototypen:

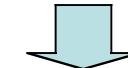
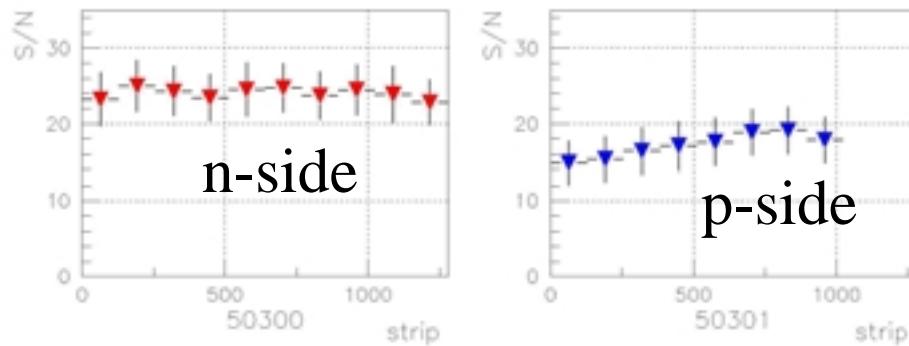
- 1996 : Klebetechnik, Mechanik etc. optimiert
- 1997 : Elektronik und Kühlung etc. optimiert
- 1998 : ~ endgültiges Design

1999 komplettes
System installiert



Leistungsdaten des Vertexdetektors: ~ Design !

Excellent signal/noise



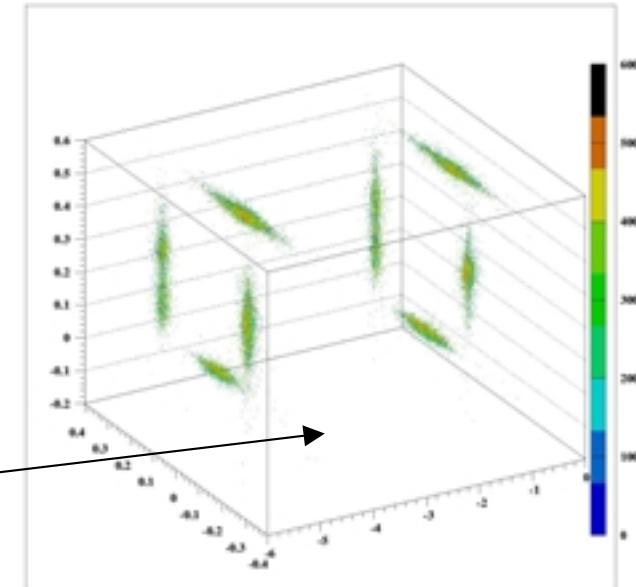
Hit efficiency : > 98%

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

Noise occupancy < 0.1 %

Tote read out chips : 20/1072

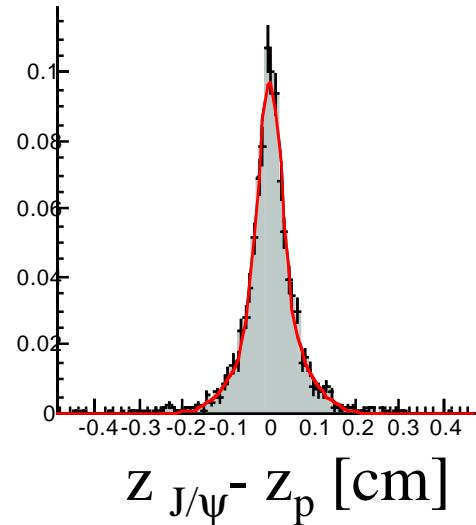
*Primäre Vertices bei
einem Run mit 8 Targets*



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

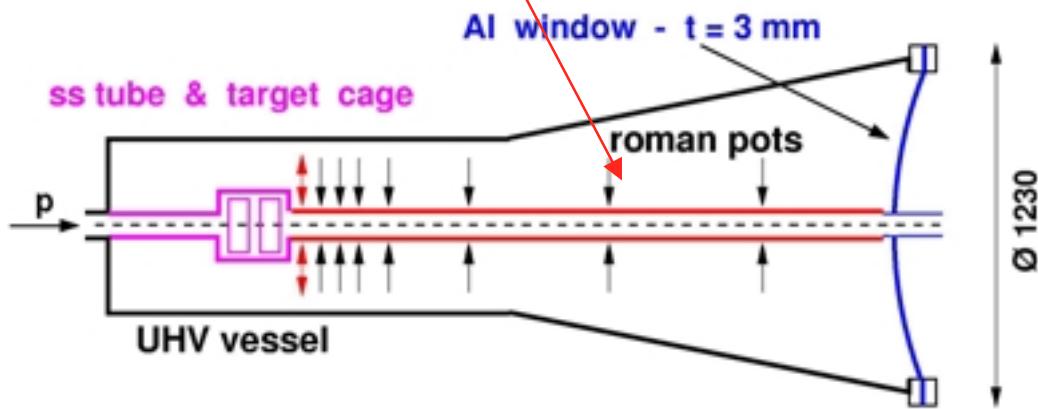
Primäre Vertexauflösung : 45 μm transv., 470 μm long.
für sekundäre 2-Spurvertices (J/ψ): 25 μm transv., 325 μm long.

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



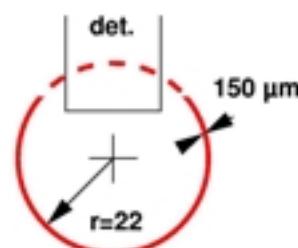
AC Protonenstrom (bunches)
 “Wake fields”
 Resonanzen
 Energieeinkopplung in den
 Tank

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

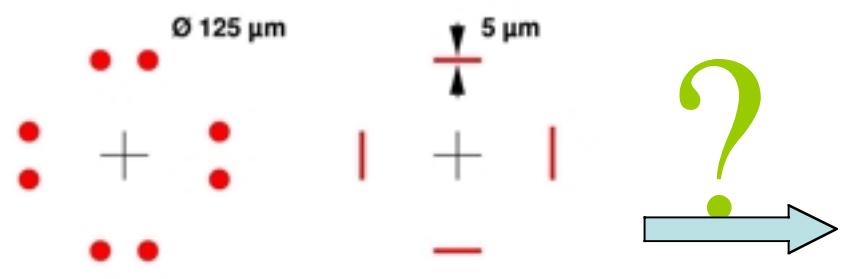


Die Historie:

- Berechnungen
- excessive Modelltests
- Erprobung

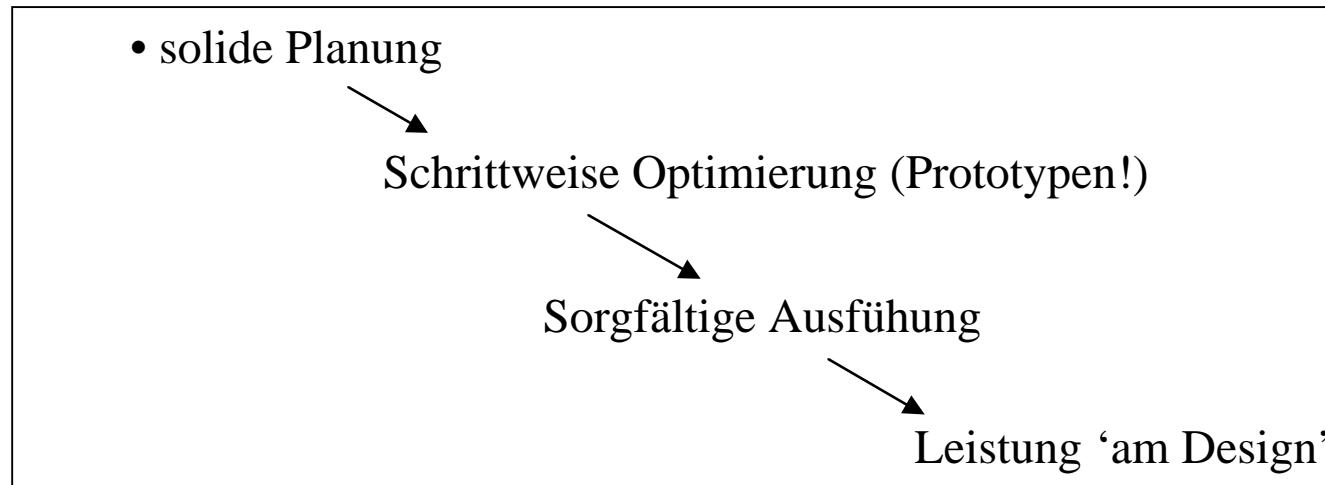


Slit tube



Was haben wir gelernt ?

- “Silizium” ist eine ausgereifte, robuste Technologie:



- doppelseitige Technologie machbar und verlässlich
- komplexe Detektorstruktur im Speicherringvakuum

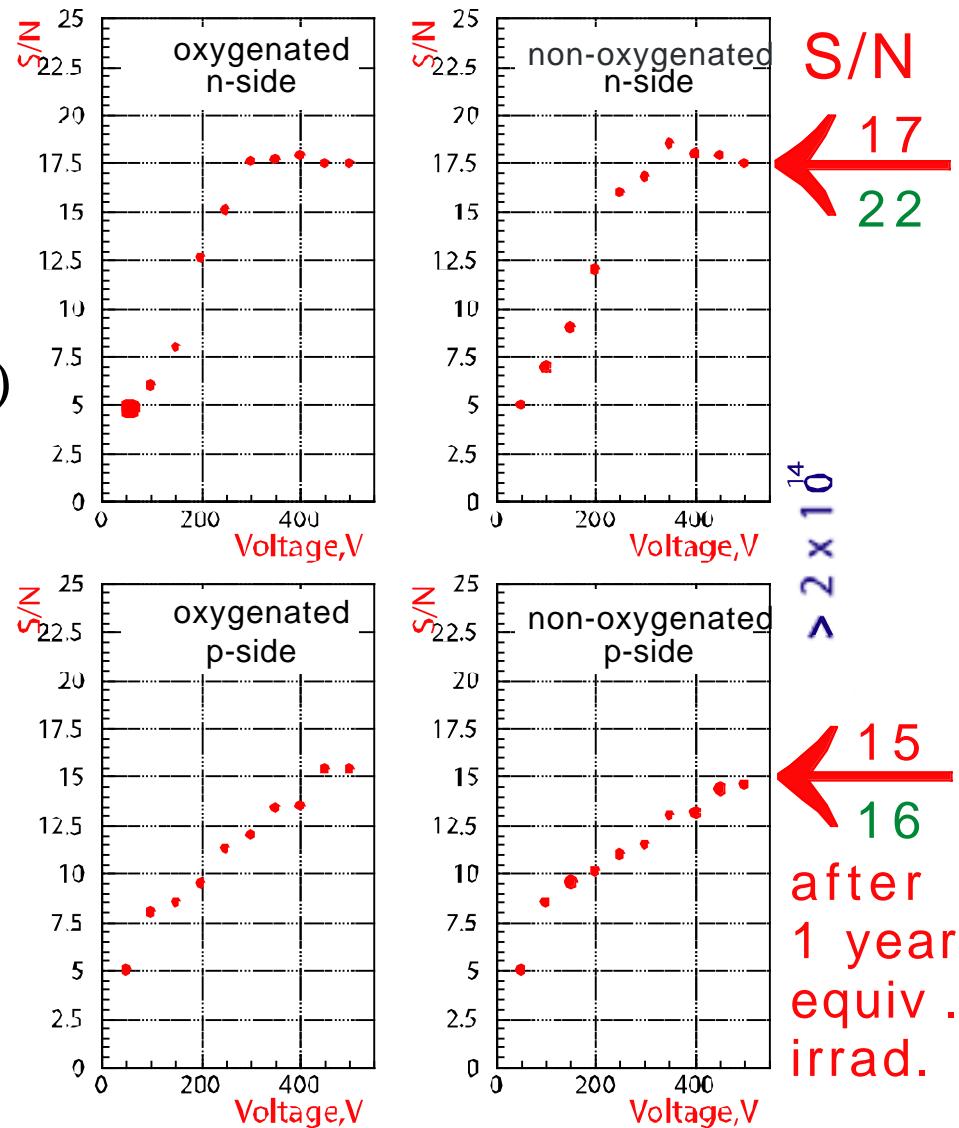
Strahlenhärte ???

.. keine Alterungseffekt in HERA-B

(nicht erwartet, da nur $\sim 1/5$ "Designbetriebsjahr" ..)

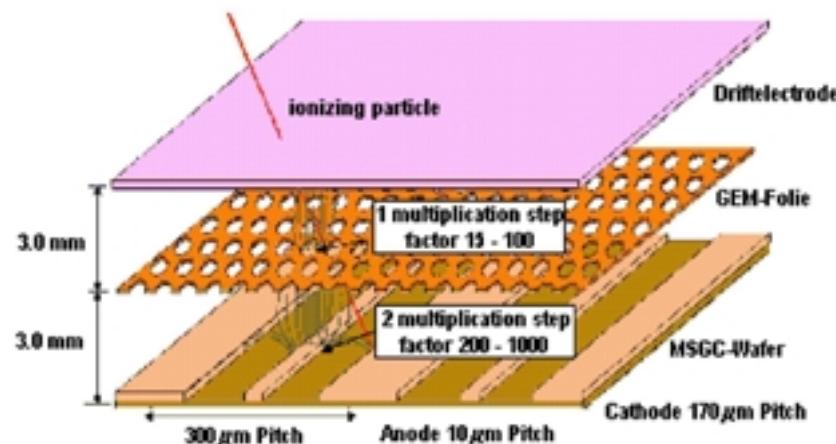
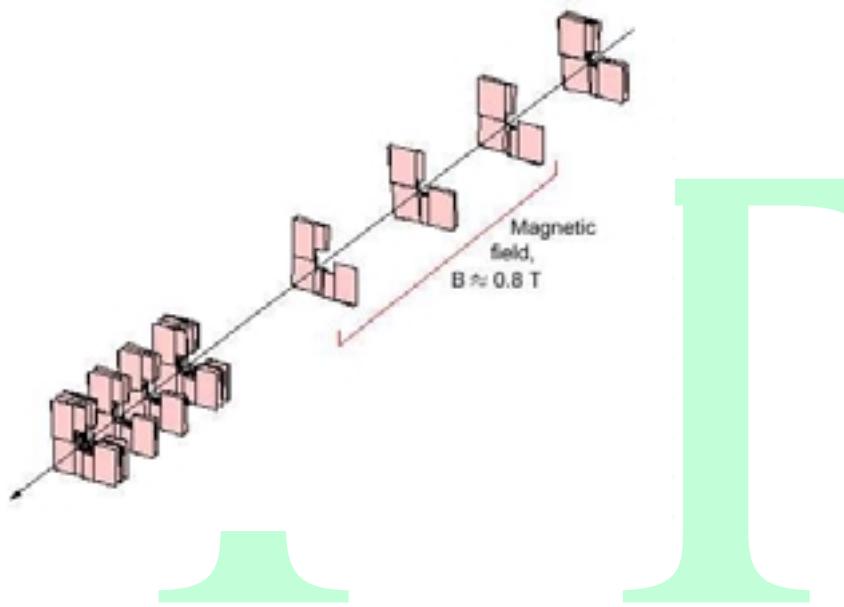
Externe beam tests
20 MeV Protonen
(original HERA-B module)

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



Inner Tracker

Uni-HD, Uni-Siegen, Uni-Zürich



- 184 individuellen Detektoren
- $27 \times 27 \text{ cm}^2$ Detektorgröße
- 18 m^2 Gesamtfläche
- 140 000 Auslesekanäle (ADC)

Konstruktive Details

- zweistufige Gasverstärkung
- **Micro Strip Gas Chambers (MSGC)**
- **Gas Electron Multiplier**
- 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 !

- 1995
- 1) Borosilikatglas ist *prinzipiell* nicht Langzeitstabil unter starker Bestrahlung (Änderung der elektrischen Eigenschaften)
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, Zersetzung der Elektrodenstruktur innerhalb Tagen..)

Bestrahlungstests mit Röntgen- oder Elektronenstrahlen (Labor) sind nicht representativ 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)



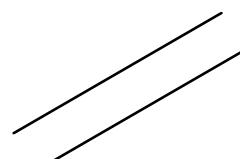
lösbar durch ändern der Feldgeometrie

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

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



lösbar durch Ar-CO₂, aber deutlich reduzierte
Spannungsfestigkeit und höhere Neigung zu
Überschägen.



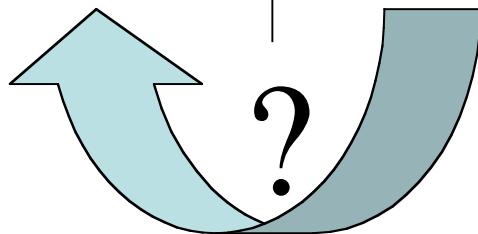
Alterungsphänomene : Langzeitstabilität unter Bestrahlung

Reale Anwendung

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

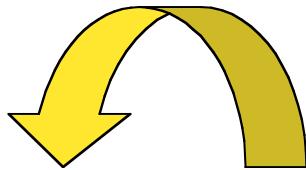
“klassischer” Labortest

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

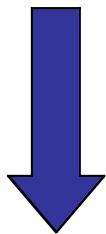


Modellannahmen über ‘Alterungsmechanismen’ !

mikroskopisch



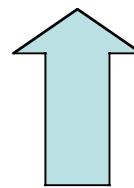
- Elektronendichte
- Photonendichte
- Ionendichte
- Radikale
- stabile Gaskomponenten/Fragmente
- Feldverteilung
- Temperaturverteilung
-



Schädigung (aging)

makroskopisch

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

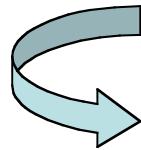


steuerbare Parameter

*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

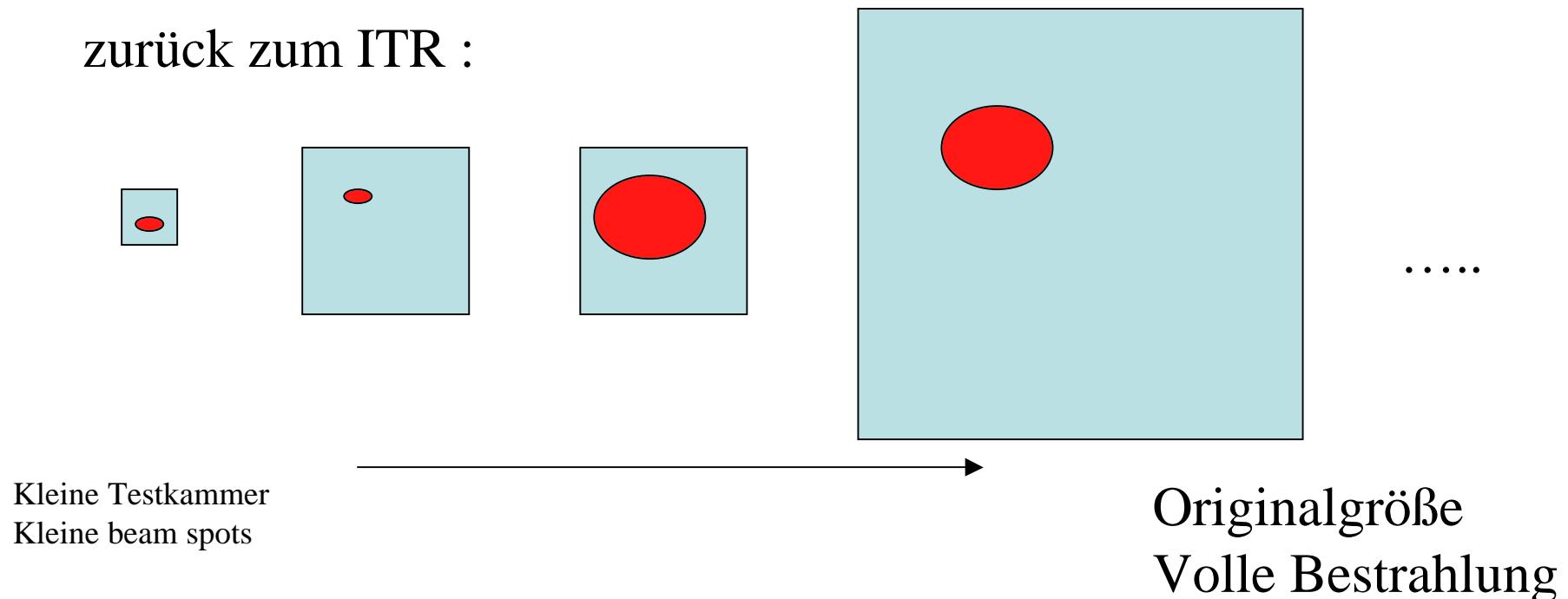


- integraler Schaden (aging) \sim akkumulierte Ladung
- unabhängig von bestrahlter Fläche
- unabhängig von Strahlungsintensität (in Grenzen)
- keine nichtlokalen Phänomene

Viele Evidenzen zeigen mittlerweile :

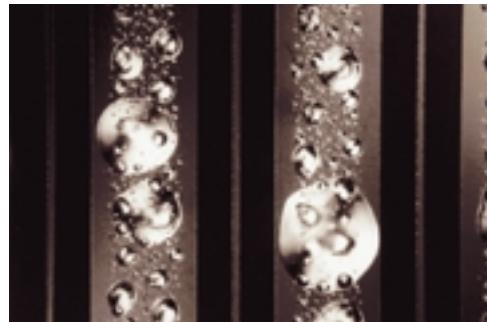
für Detektoren bei LHC -Raten nicht erfüllt...

zurück zum ITR :

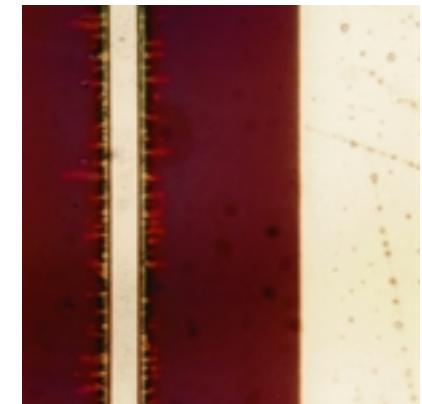
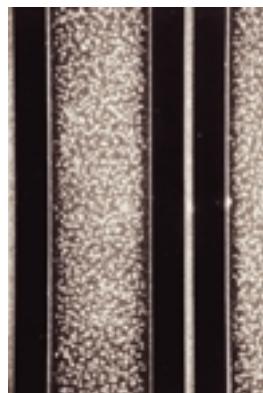
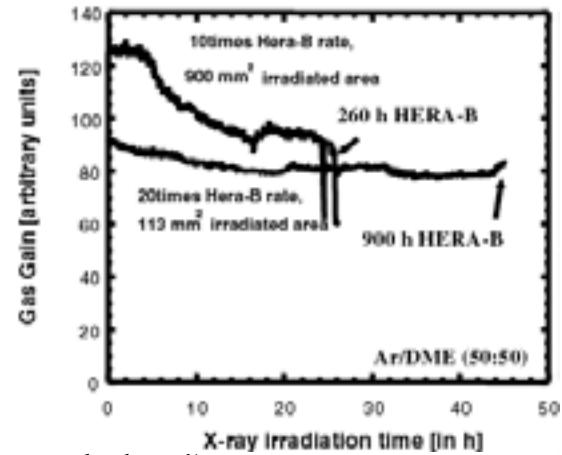


Röntgenstrahlung - α -Strahlung - π/p beam (PSI)

*Jeder Entwicklungsschritt
zeigte NEUE Schadensphänomene !*



- Schädigungsrate \swarrow 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 (27x27cm²) **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 (27x27cm²) **GEM Folien** durch CERN-EST-DEM ständig optimiert



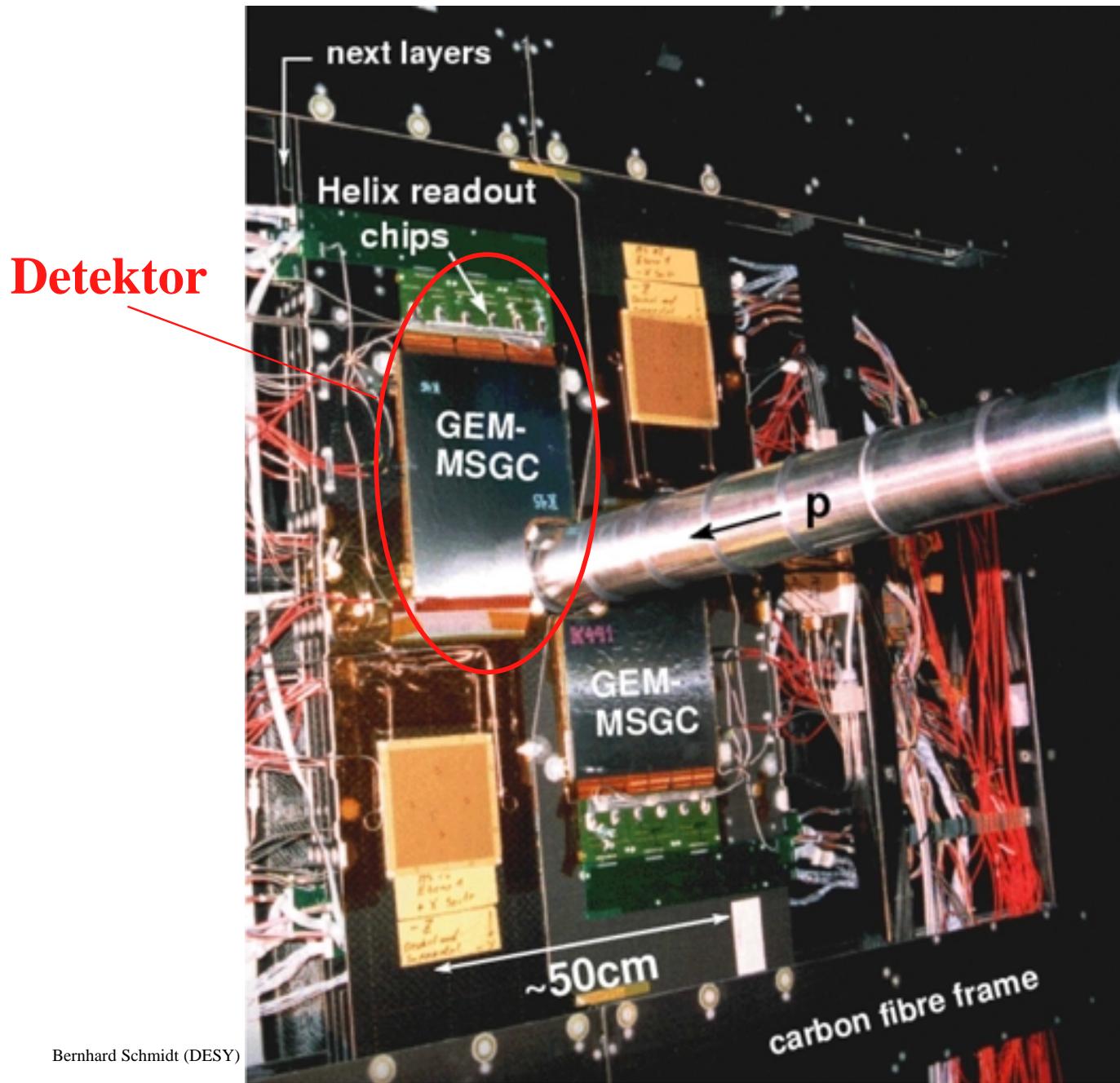
Produktion von ~200 GEMs ohne Kurzschlüsse

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

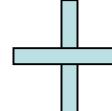


Ende 1999 ITR zu 90 % installiert.



Bernhard Schmidt (DESY)

Erfahrungen im ‘Commissioning Run’ 2000 :

- keine Routineoperation bisher
 - Kammern benötigen langwieriges und sorgsames HVTraining im beam
- 
- individuelle Gainanpassung notwenig (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.

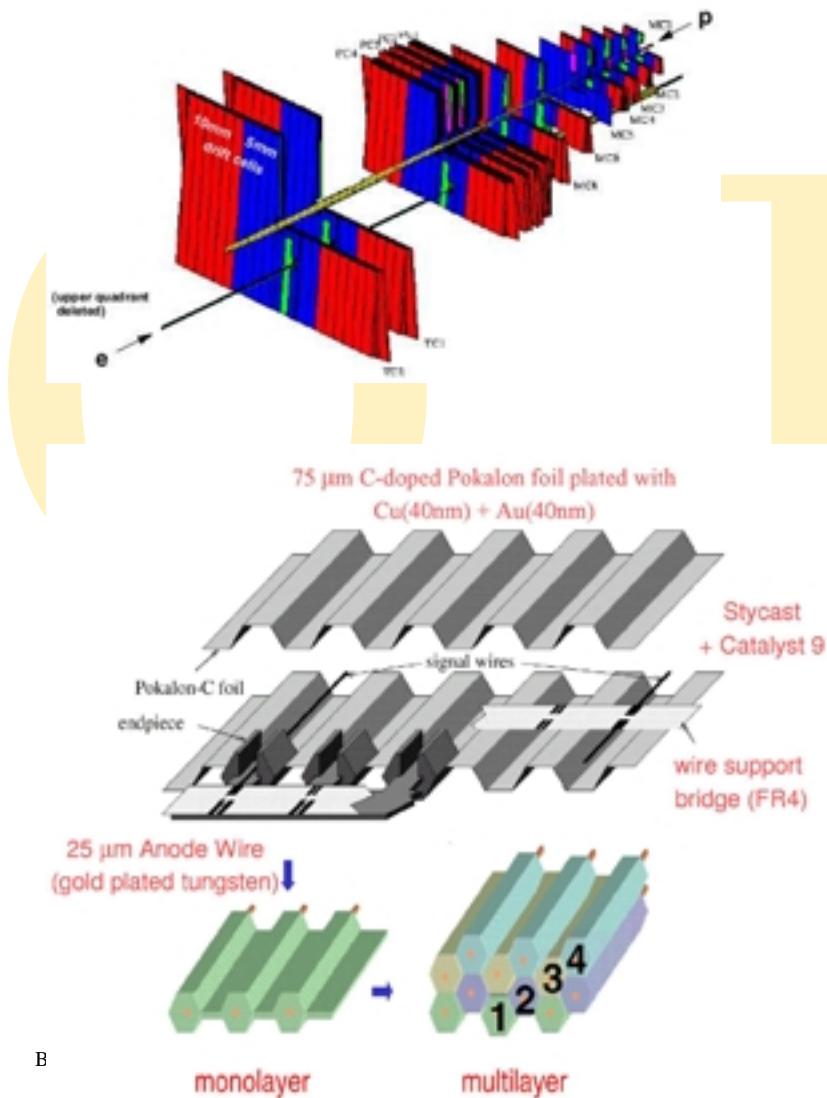
Haben wir was gelernt ?

- ‘konventionelle’ MSGC sind untauglich für LHC-aktige 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 m² Kathodenfläche
- 115 000 Auslesekanäle (TDC)

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

Dünne (X_0) Konstruktion, wenig Masse
Selbsttragend
massenproduktionsfähig
bezahlbar

Konstruktion der OTR Module

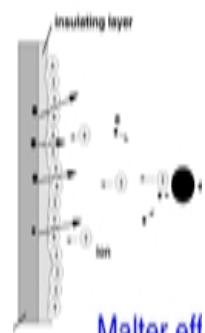
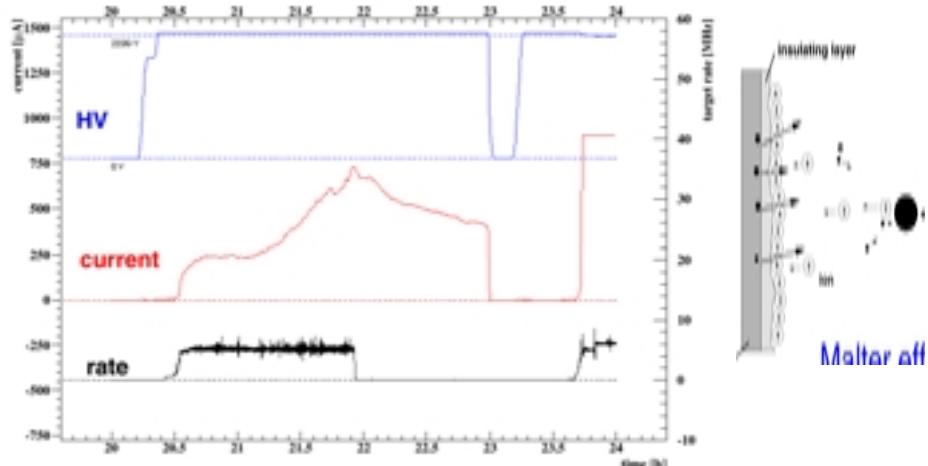
- offene Honeycomb Geometrie
- Kathoden aus Kohlenstoff 'gedopten' Polycarbonat Folien (Pokalon-C, faltbar, leitfähig)
- 5 mm and 10 mm Zellen
- lagenweise Produktion
- Drähte von GFK Streifen gehalten
- offener Gasaustausch, kein erzwungener Fluss

Strahlungsresistenz zunächst (1996) “verifiziert” :

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

- kleine (cm) Testkammern
- kleinflächige Bestrahlung
- Röntgenröhre
- Ar-CH₄-CF₄ Gasmischung

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



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

(unzureichende
Oberflächenleitfähigkeit der
Kathodenfolie)

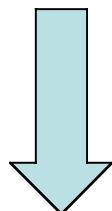
Intensives R&D Programm (statt Massenproduktion)



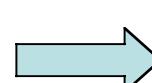
Malter Effekt nur bei grossflächiger, hadronischer Bestrahlung initiierbar

> 1 Jahr beam tests mit 100 MeV
 α -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 m² !)

Malter



~~CH₄ im Gas,~~
~~(Ar-CO₂-CF₄)~~
Überprüfung aller
Strukturmaterialen

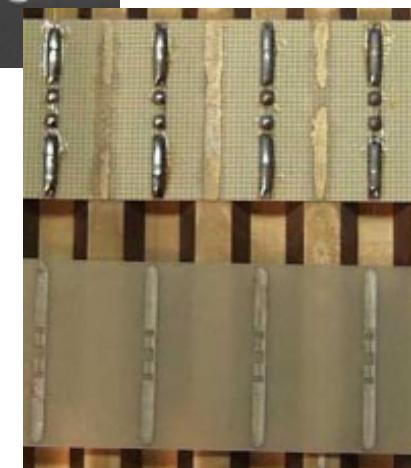
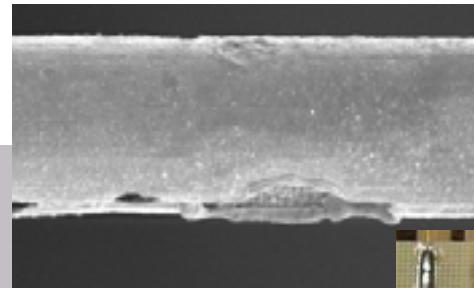
ausreichend (HERA-B) stabile Lösung gefunden



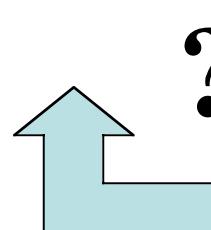
Massenproduktion

Offene Fragen :

- Agressivität des 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**

DPG-Tagung Leipzig, 2002

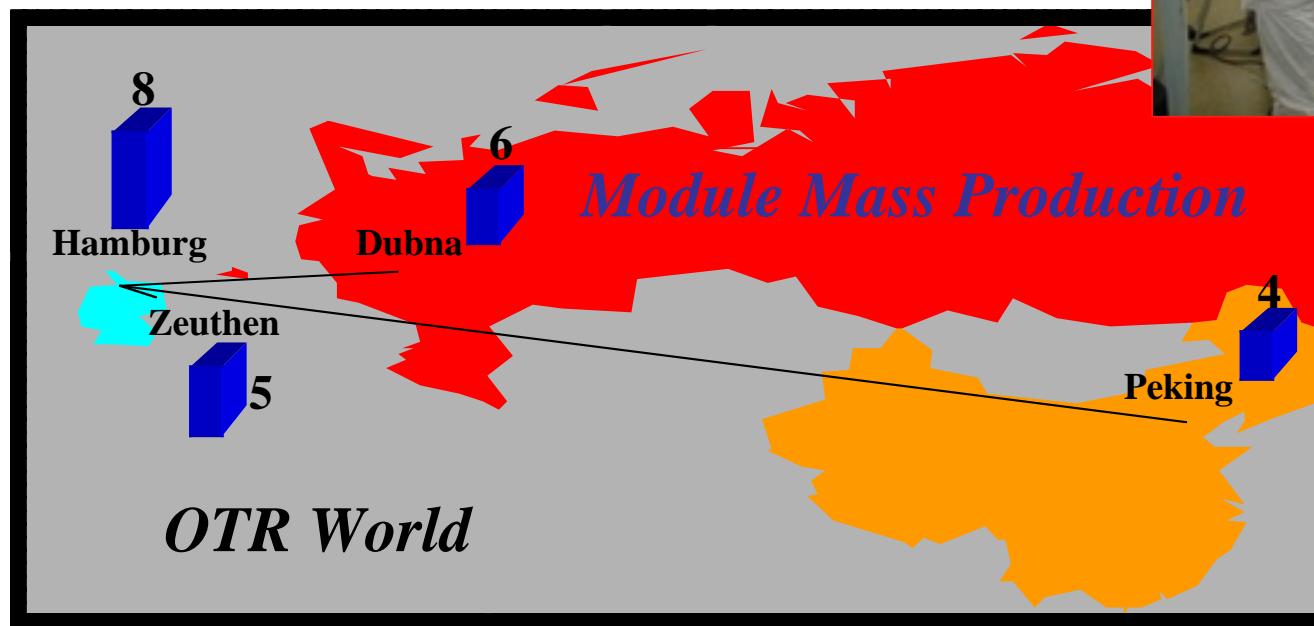
Produktion des OTR

1000 Detektormodule
in 9 Monaten !

8000 m² Kathodenfolie
115 000 Drähte
~1.5 Millionen Lötstellen
.....

> 100 Physiker und Techniker
Parallel an 4 Produktionsstätten

~ 0.7%
tote Kanäle



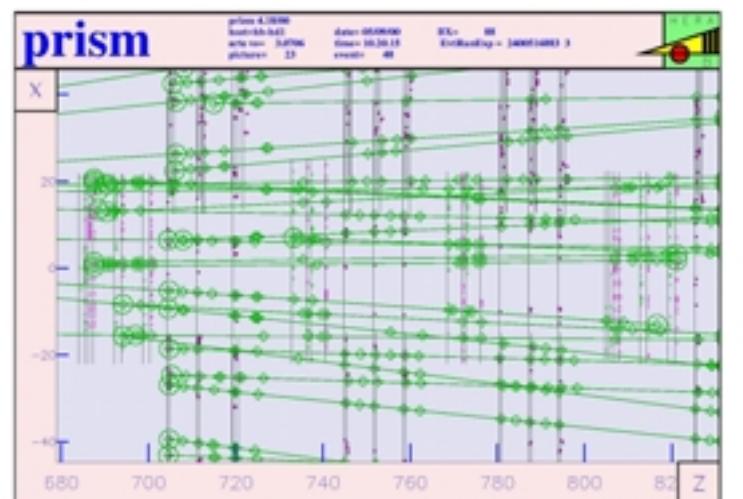
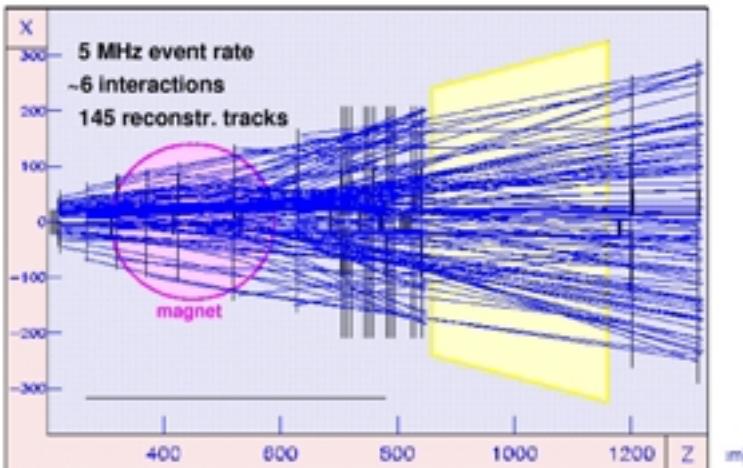
Installation aller 'Superlagen' Ende 1999 abgeschlossen



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 µm (200 µm design)

→ Trigger !

Ausblick auf 2002/2003 :

- HV Probleme drastisch reduziert

(16 000 Kondensatoren getauscht, mechanische Versteifung)

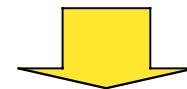


~1% tote Kanäle
nominale Verstärkung

- noise Problem behoben



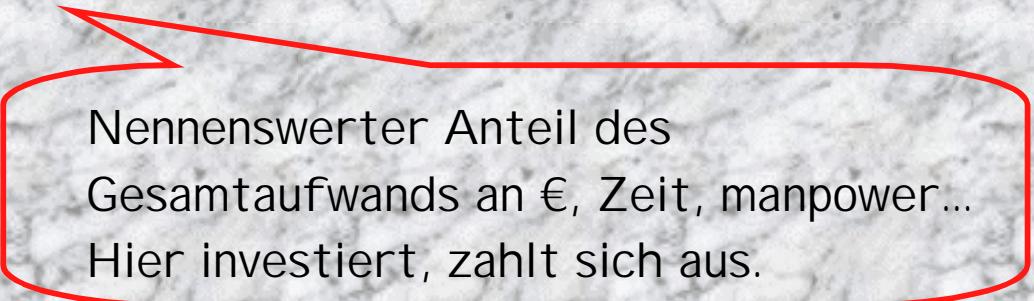
Alle Schwellen nominal



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 !

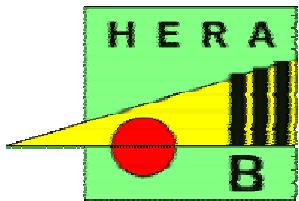
- kein Parameter sollte mehr als einen Faktor 10 zum Experiment extrapoliert werden.

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. Sözür	T604