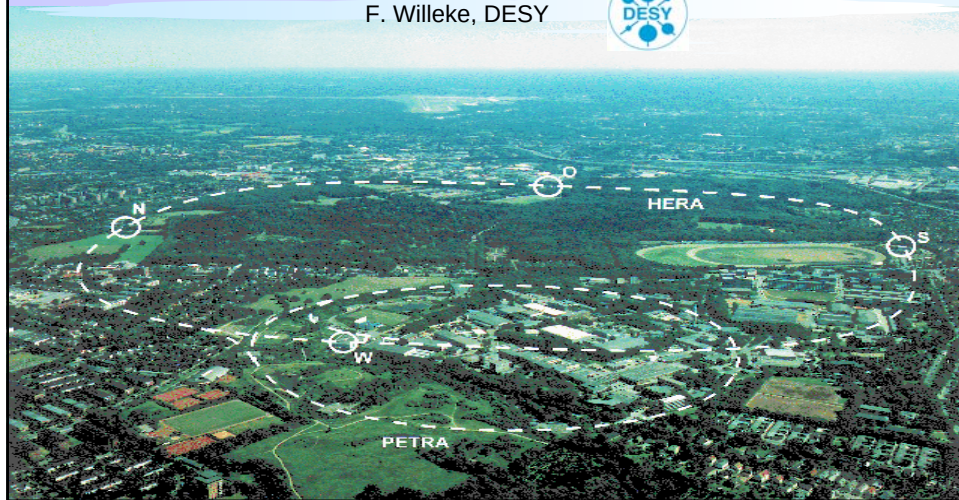


DER Lepton-Proton Collider HERA

Technisches Seminar Zeuthen 8. Februar 2005

F. Willeke, DESY

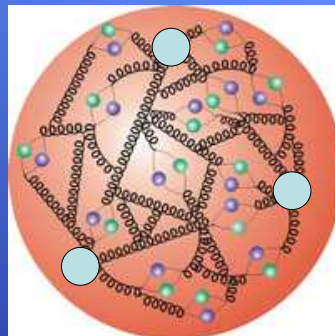
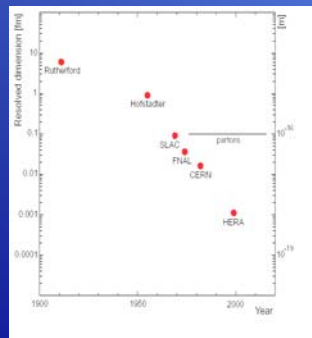


Warum wurde HERA gebaut?

Im Zentrum des HERA Physikprogramms steht die Erforschung der Struktur des Protons.

Damit steht HERA am Ende einer langen Kette von **Streuexperimenten**, in denen hochenergetische Elektronen an Protonen gestreut wurden um herauszufinden aus welchen Teilchen sich das Proton zusammensetzt und wie diese Teilchen räumlich und energetisch verteilt sind.

Mit einem **Collider** erzielt man vom Proton aus gesehen sehr kurze Wellenlängen des e-Strahls mit dem man **Strukturen bis 10^{-18}m** auflösen kann



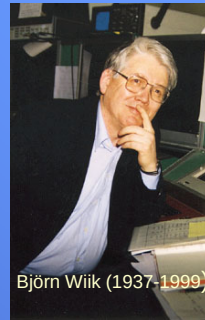
→ Ein Lepton-Proton Collider mit
320 GeV Schwerpunktsenergie

HERA Doppel Ring Collider

820 GeV Protonen (gesteigert auf 920 GeV)

30 GeV Leptonen e^+ / e^- (erreicht 27.5 GeV)

→ kleinste detektierbare Abmessung 10^{-18}m



Björn Wiik (1937-1999)



Supraleitende Ablenk- und
Fokussiermagnete im Protonenring ...



...Supraleitende Hochfrequenzresonatoren
im Elektronenring

Erster Großbeschleuniger, der in internationaler Kollaboration
gebaut wurde



HERA wurde durch großzügige Beiträge von außerhalb Deutschlands ermöglicht :

Die Hälfte der supraleitenden Magnete, Beschleunigungssysteme für Protonen, Injektionssysteme, supraleitende Stromzuführungen, etc. außerdem Mitwirkungen zahlreicher Kollegen aus anderen Instituten

→ 1/3 der Investitionen wurden von ausserhalb Deutschland
beigetragen (Gebäude nicht eingerechnet)

→ HERA Modell

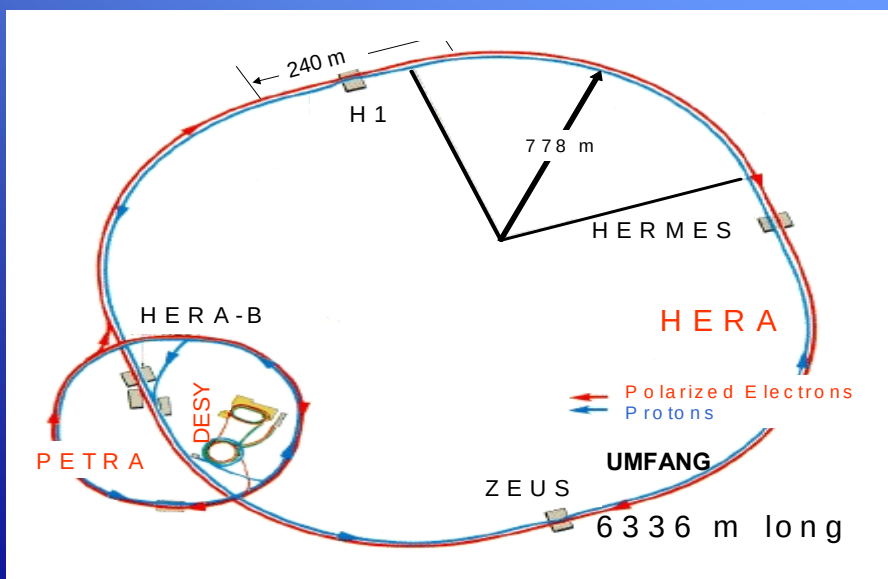
Was haben wir aus dieser Zusammenarbeit gelernt?:

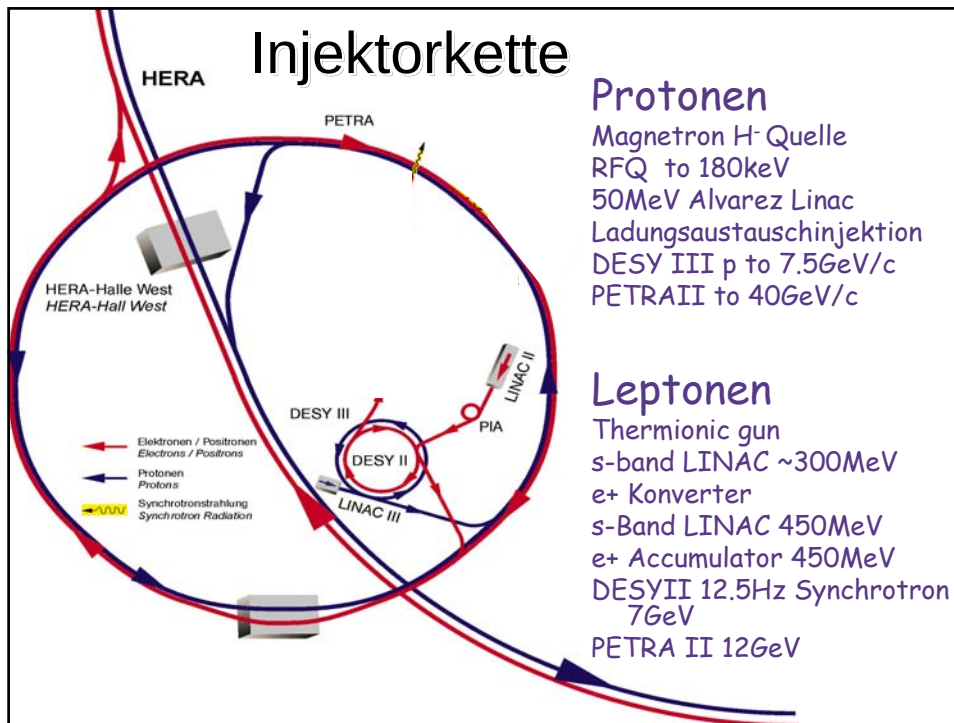
- Das HERA Modell war erfolgreich besonders dort, wo die externen Beiträge durch interne Expertise ergänzt wurden
- Dies war nicht bei allen Systemen der Fall, dies führte zu langjährigen mühsamen Lernprozessen mit nicht idealer Effizienz der entsprechenden Komponenten

Wichtige HERA Parameter

	e	p
Strahl Energien	27.5 GeV	(820→920) GeV
Strahlströme	60 mA	180×10^{11}
Magn. Ablenkfelder	0.15 T	5 T
Beschleunigungsspannung	130 MV	2 MV
Umfang	6355 m	
Luminosität	$(1.5 \rightarrow 7) 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ $@ (70 \rightarrow 300) \text{ pb}^{-1} \text{ y}^{-1}$	
e-Spin Polarisation	(50-70)%	

Übersicht





Auslegung der Ringe

Jeweils 4 Ablenkbo $\ddot{g}$ en von je 1340m L $\ddot{a}$ nge und mit insgesamt 416 10m langen Ablenkmagneten

4 Gerade St $\ddot{u}$ cke 240m insgesamt mit 3 Low- β insertons

Fokussierung $\ddot{u}$ berwiegend FODO mit einer Zellenl $\ddot{a}$ nge von 50m (p) / 25m (e) und einem Betatron Phasenvorschub von 90 $^{\circ}$ (p) bzw. (60-90) $^{\circ}$

Supraleitende
 Dipol- und
 Quadrupol
 Kryostate p Ring

NOrmaleitende
 Dipol- und
 Quadrupol-
 Magnete e Ring



**Beschleuniger-
 tunnel**

6.3 km lang

5m Durchm.

15-20m unter
 der Oberfl $\ddot{a}$ che

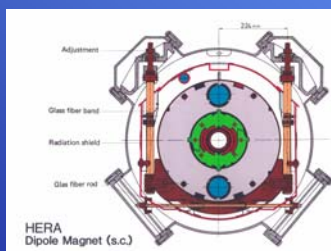
Hochfrequenzsystem HERA-e

Energieverlust der Elektronen durch
Synchrotronstrahlung $\sim E^4$
86MeV / Umlauf bei 27.5GeV

- 60mA x 86MV = 5.2 MW
Hochfrequenzleistung
- 4 Doppel-Klystrons 500 MHz mit je 1.5 MW
- 86 Normaleitende 5(7)-Zellige 500MHz
Resonatoren
- 16 4-zellige supraleitende 500MHz
Resonatoren



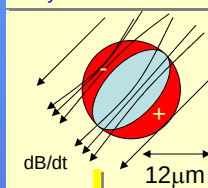
Die technisch aufwendigste Komponente von HERA: das supraleitende Magnetsystem 5.6 T (@1TeV)



Rutherford type S.C. Cable 6kA, NbTi, Cu/NbTi=1.8



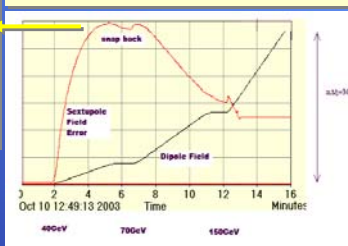
Induced persistent eddy currents



S.C. Reference Magnets



Persistent Current Sextupole Field Error



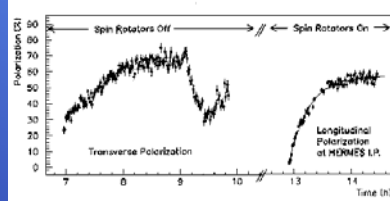
Longitudinale Elektron Spin Polarisation



Need longitudinally polarized Leptons

→ use radiative self polarization of high energy electron in a magnetic field

HERA 1994: First Longitudinal Spin Polarization



Tools: Harmonic Spin Matching, Harmonic Closed Orbit Bumps, spin transparent orbit corrections, beam based monitor calibration

Obtain 50-60% Polarization in Colliding beam Operation (1 pair of Rotators)

Kritische Design Entscheidungen

PETRA als p-Injector → Niedrige Proton Injektionsenergie in HERA 40 GeV = $\frac{1}{20} E_{max}$, Langsame Beschl.
Probleme kleine Dynamische Apertur durch statische & dynamische Wirbelströme der S.L. Magnete

HERA D. A. ausreichend, Injektion empfindlich → automatische Optimierung ☺

DESY → Proton Injektor DESYIII

Raumladungsbegrenzung der Protonendichte, jedoch DESYIII überschreitet Design Werte ($\times 2$) ☹

Vermeiden der Übergangsenergie durch spezielle Strahloptik (high γ , LATTICE)

→ Erhaltung der großen Longitudinalen Strahl-Dichte

Jedoch; kleine D.A und kleine Lebensdauer in PETRA bei Injektion (Strahlverluste) ☹

Benutzung der PETRA HF Systeme in HERA e: Grosse Kostenersparnis, jedoch

HF Resonatoren nicht ideal für großen Strahlstrom, Grosse Impedanz → Dämpfungssysteme h/v/L ☹

Kritische HF Vakuumbedingungen → häufige Ausfälle ☹

Alte HF controls → Sensorik ungenügend, inflexible Interlocks → häufige Ausfälle ☹

HF PS auf dem DESY Gelände, lange HV Kabel → häufige Ausfälle ☹

Knappe Aperturen in den HERA Injektionswegen

Transfereffizienz sehr kritisch, schlecht Reproduzierbarkeit, lange Injektionszeiten ☹

Benutzung des PETRA Kontrollsystems:

Inadequate, unnötige Verlangsamung der Inbetriebnahme ☹ → neues Kontrollsystem

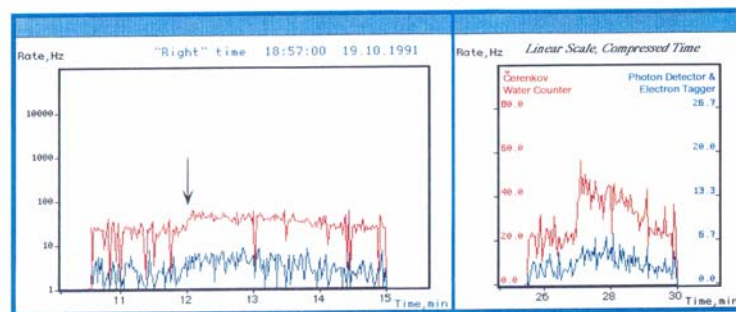
Head-On Collisions...

Meilensteine

- 1981 Proposal
- 1984 Beginn der Bauarbeiten
- 1991 Beide Ringe betriebsbereit, erste ep Kollisionen
- 1992 Start Kollisionsbetrieb für H1 and ZEUS,
Erste aufregende Physikresultate schon mit kleiner Luminosität
- 1994 Einbau der Spin Rotatoren HERA Ost →
- 1995 longitudinal polarisierte Positronen für das Experiment HERMES
- 1996 Installation einer 4 Wechselwirkungszone für das Experiment HERA-B
- 1998 Umstellen des e-Vakuumsystems auf NEG Pumpen vermeiden
erhebliche Investitionen in mehr Zuverlässigkeit
- 1999 Erfolgreicher Luminositätsrun mit Elektronen und Protonen
- 2000 Sehr effiziente Luminositätsproduktion: $100\text{pb}^{-1}\text{y}^{-1}$ Ende HERA RUN I
- 2001 HERA Luminosity Upgrade, Spin Rotatoren für H1 and ZEUS
- 2001/2 Wiederinbetriebnahme , HERA-B Datennahme
- 2003 Erste longitudinal polarisierte Positronen in Hochenergie ep Kollisionen
- 2003/4 Start HERA II Run

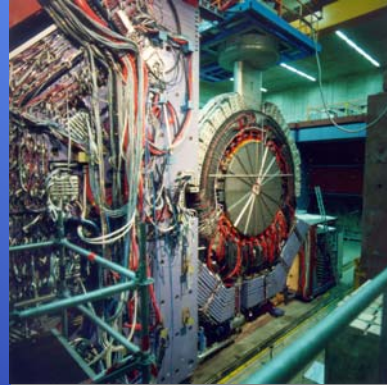
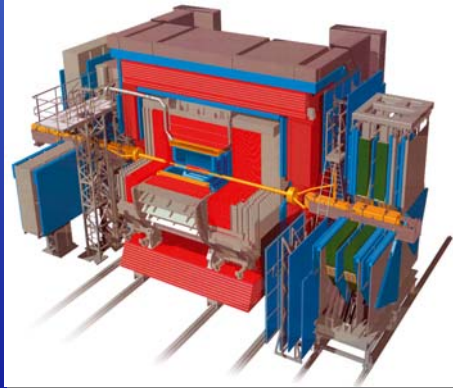
FIRST HERA e-p COLLISIONS

AS OBSERVED BY THE H1 LUMINOSITY-DETECTOR MONITORING SYSTEM
SATURDAY 19 OCTOBER 1991, 18:54



Electron Energy	12 GeV
Proton Energy	480 GeV
Expected Luminosity	$0.95 \times 10^{26} \pm 30\% \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Measured Luminosity	$1.03 \times 10^{26} \pm 13\% \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

ZEUS und H1



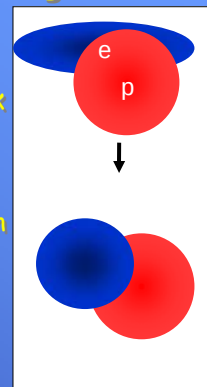
HERA Beschleunigerphysik-Erfahrungen

- Gleiche Elektron- und Proton Querschnitte am WWP
- Grosser Umfang → überraschende Beschleunigerphysik HERA e
- PS Restwelligkeit beeinflusst Stabilität der Protonen
- Head-tail Instabilität der Protonen durch x-y Kopplung
- Einfluss der x-y Kopplung auf Stabilität der Protonen in Kollision

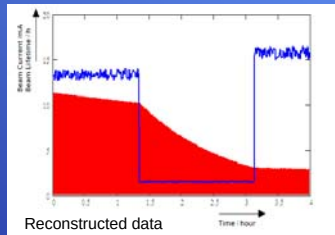
...

HERA wurde schnell verbessert und die Luminosität erhöhte sich um Faktor 5 / a

jedoch...



Probleme mit Elektronen durch Staub



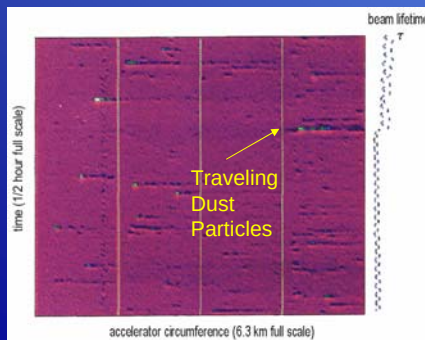
Plötzlicher irreversibler Lebensdauereinbruch durch eingefangenes Staubeilchen $\varnothing \sim 1 \mu\text{m}$ bei $>10 \text{ mA}$ Strahlstrom

Emittiert durch Geladene Platten der Integrierten Ionenpumpen

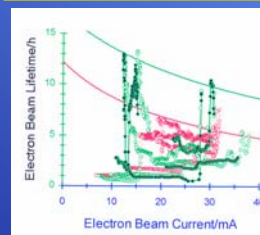
Alle IP in 1997/8 durch NEG's ersetzt

→ e^+ Betrieb 1994-1997

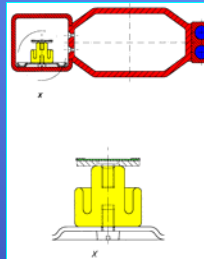
HERA electron losses in space and time



Experiments confirms the ion pumps as major source



Replace Ion Pumps by NEG Pumps
WS 1997/1998



Successful operation with electrons in 1999

p-Stabilität: Protonenstrahlen besitzen so gut wie keine Dämpfungs-Mechanismen aufgrund von Synchrotronstrahlen → große Störanfälligkeit

Druckwellen durch Flugverkehr



Erschütterung durch Straßenverkehr
60Hz, $\sim 1 \mu\text{m}$ Orbitschwankung

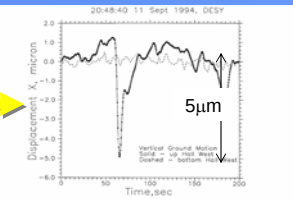
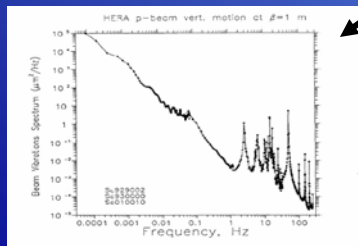


Figure 34: a) Vertical ground motion about 0.5 km beneath flying airplane; solid line - on the surface, dashed line - on the horizon of HERA. b) Fig. 35

Brinkmann et al '95



Wichtiger: Vibrationen von Pumpen, turbulenter Kühlwasserfluss, Restwelligkeit PS, TML Modi

Mit Strahl-Strahl Wechselwirkung ergibt

Chaotische Proton Orbits → Diffusion, Halo,

→ Untergrund für die Experimente

→ Tune Modulation Feedback

→ Verbesserungen an PS

→ Sorgfältige Kontrolle der Strahlparameter

Brinkmann et al '95

$\Delta Q < 0.001$

Wie HERA ein erfolgreicher Beschleuniger wird

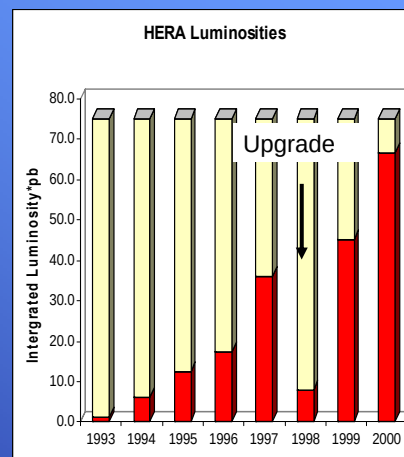
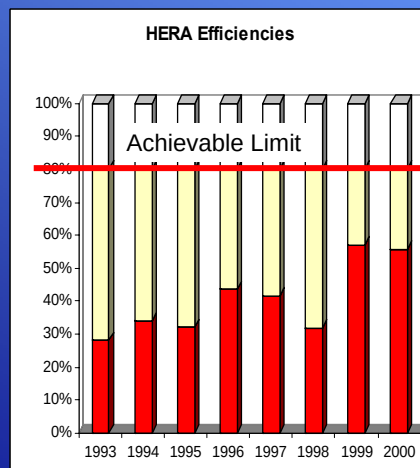
Design Spitzenluminosität erreicht in 1997 ($L_{\text{peak}} = 1.4 \cdot 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
durch Ausnutzen der Aperturreserve in der WWZ

Aber die Betriebseffizienz lässt noch zu wünschen übrig
($T_{\text{Lumi}}/T_{\text{total}} = 45\%$)

→ Verbesserungsprogramm in 1997/8

- NEG-Pumpen im e-Ring installiert
- HF Leistungsreserve durch 14% (addl. 1.5MW 500MHz Klystron)
- Neues 8kA PS p-Ring
- Alle Spulen der n.l. low β Quadrupolmagnete ersetzt
- Bias DC Hochspannung am Einganskoppler der s.l. Resonatoren
- p-Transportweg DESY → PETRA mehr Apertur
- Rigoroses Verbesserungsprogramm der Magnetstromversorgungsgeräte
→ MTBF = 40 000h
- Neues Kontrollsystem
- Verbesserung der Protoneninjektion in HERA

Resultat der Investition in mehr Zuverlässigkeit

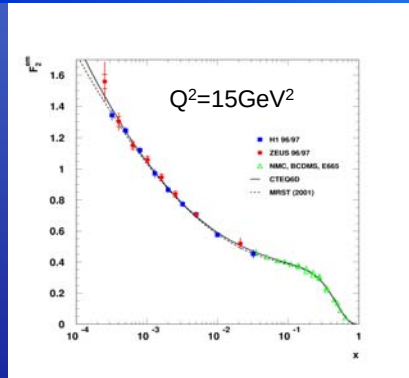


Bessere Nutzung der Betriebszeit für Luminosität

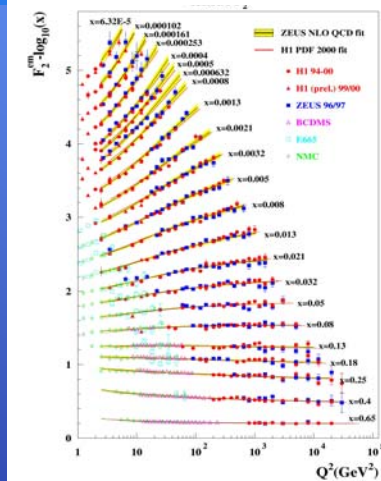
Mittlere Spitzenluminosität erhöht, Rekord $2 \cdot 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$
durch zuverlässig größere Elektronen- und Positronenströme

Resultat: Genaue Vermessung der Protonenstruktur mit sehr guter Statistik

➔ Ein völlig neues Bild des Protons mit einer unerwartet reichen inneren Struktur



The more precisely one is looking into the proton, the richer the structure uncovered



HERA Luminosität 1993-2000

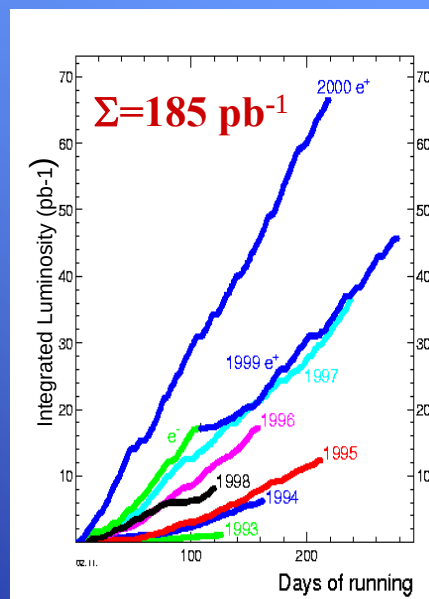
Designluminosität überschritten
 $2 \times 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$

Luminositätsproduktion erreicht in
 2000
 $100 \text{ pb}^{-1}/\text{year}$

aber das vollständige
 HERA Physikprogramm
 erfordert

1 fb^{-1}

➔ Luminosity Upgrade



HERA Luminosität: Randbedingungen & Grenzen

$$L = \frac{N_p \cdot I_e \cdot \gamma_p}{2\pi e \cdot \epsilon_N \sqrt{\beta_{yp}^* \cdot \beta_{xp}^*}}$$

'Randbedingungen:

$$\theta < 1 \text{ mr}$$

$$\sigma_{x,yp} \approx \sigma_{x,ye}$$

$$\Delta v_{ey} < 0.045$$

Begrenzungen

LIMITED BY

N_p / ϵ_N p-beam brightness = $1 \times 10^{11} / 4\mu\text{m}$ injector, ibs, bb-e

I_e total lepton beam current = 60mA RF power, bb-p

$\beta_{x,y p}^*$ Beta functions at the IP IR layout and σ_p

UPGRADE $\beta_x^* = 7\text{m} \rightarrow 2.45\text{m}$ $\beta_y^* = 50\text{cm} \rightarrow 18\text{cm}$

HERA II Luminositäts-Parameter

$$L = \frac{N_p \cdot I_e}{4\pi e \cdot \epsilon_N \sqrt{\beta_{xp} \beta_{yp}}}$$

UPGRADE

number of protons per bunch
normalized emittance

$$N_p = 1 \times 10^{11}$$

$$\epsilon_N = 20 \mu\text{m}$$

Proton beta functions

$$\beta_{y,x}^* = 18\text{cm}, 2.45\text{m}$$

leptons current

$$I_e = 58\text{mA}$$

lepton emittance

$$\epsilon_e = 20\text{nm}$$

number of coll. bunches

$$n_b = 174$$

lepton vert. b.-b. tune shift par.

$$\Delta v_{y,x e} = 0.045, 0.025$$

hor./vert. beam size at IP

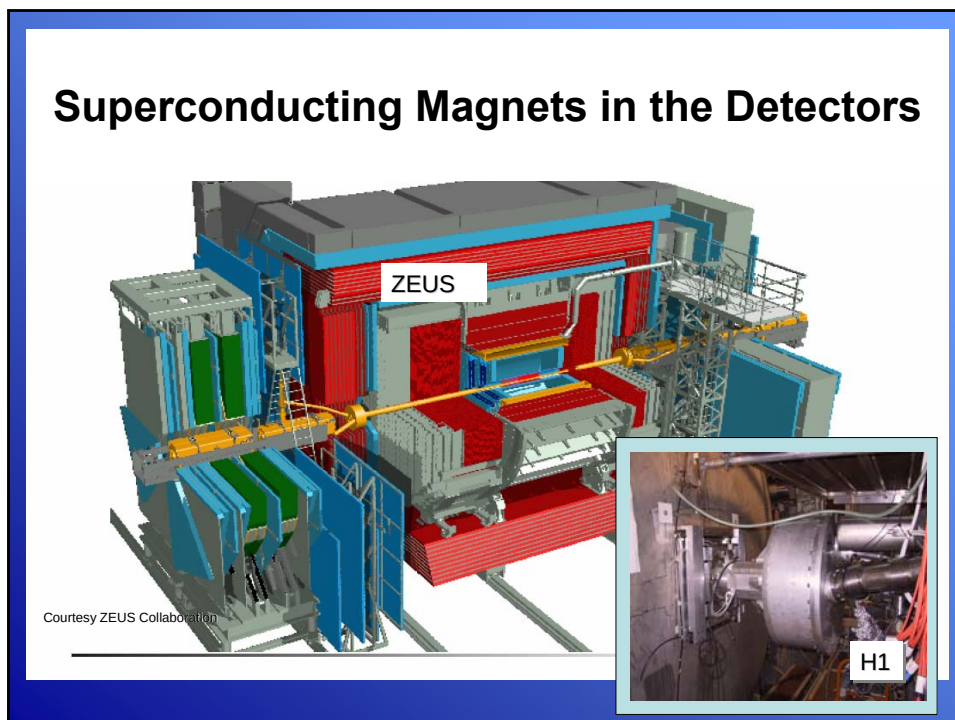
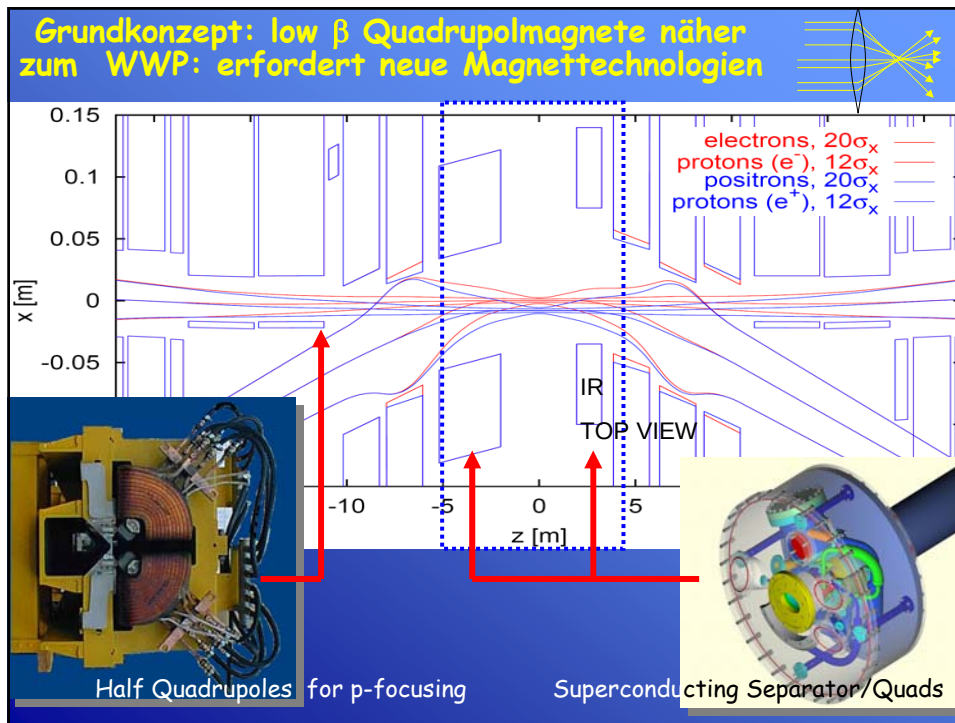
$$\sigma_{x,y,p,e} = 114\mu\text{m} / 30\mu\text{m}$$

luminosity

$$L = 7 \times 10^{31} \text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$$

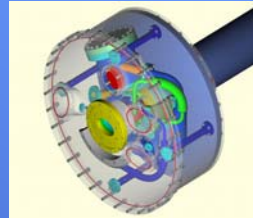
VERY AMBITIOUS & CHALLENGING !!

Factor of 3-5

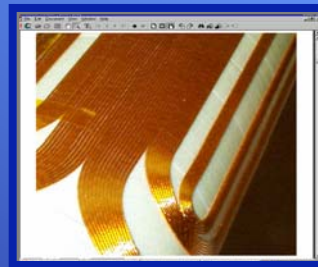
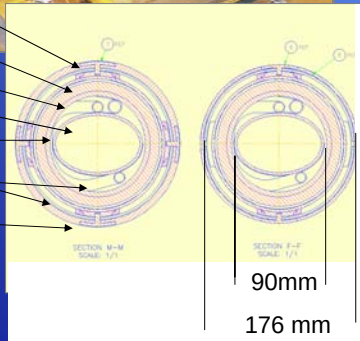


Supraleitende Magnete GO/GG

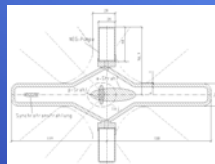
Designed and built in collaboration with BNL



- cryostat-wall
- He-vessel
- coil
- Beam pipe
- support tube
- insulating vacuum
- He-supply



Stört die Detektoren: Synchrotron Strahlung durch die Strahlseparation



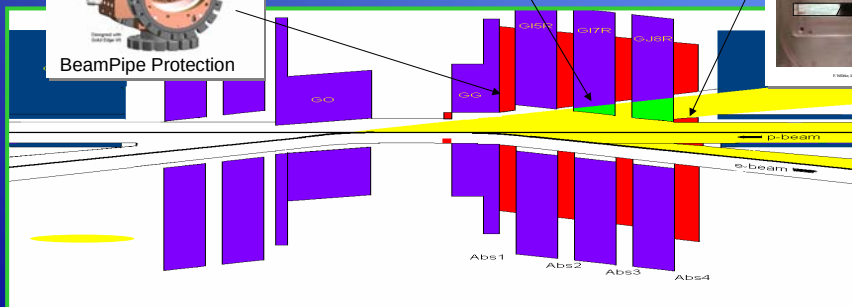
V-shaped 'crotch' absorber



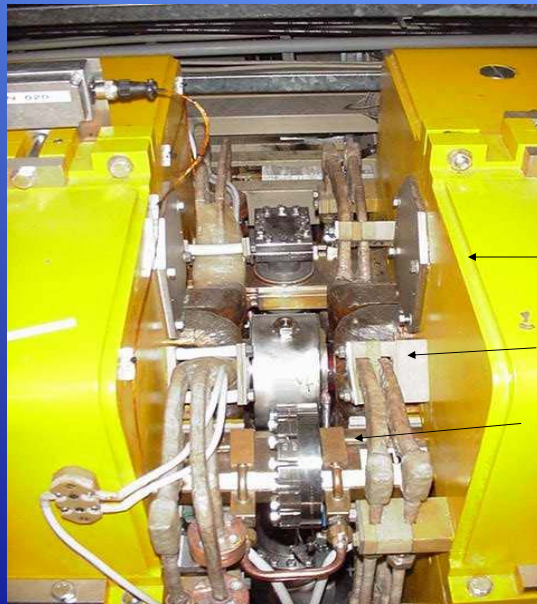
BeamPipe Protection



One Pipe - Three Beams



30kW SR Power from beam separation, E_{crit} 120keV (e⁺p Operation)



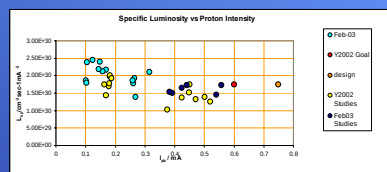
3 Strahlrohre
gehen durch den low- β
Quadrupol-magneten
GN

← Photonen

← Protonen

← Elektronen

Wiederinbetriebnahme Hohe Luminosität sehr bald demonstriert



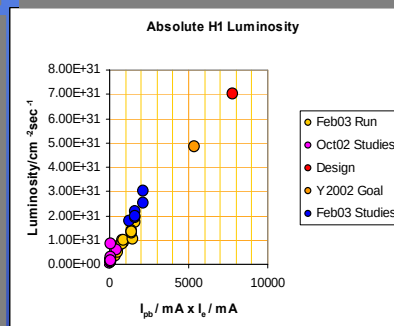
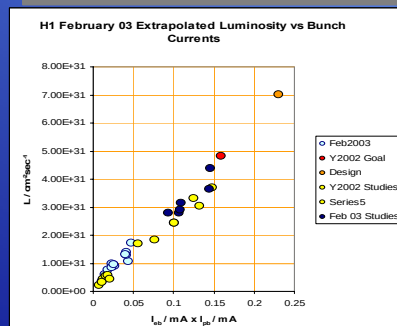
Record Luminosity

120 Bunches

$I_p < 70$ mA

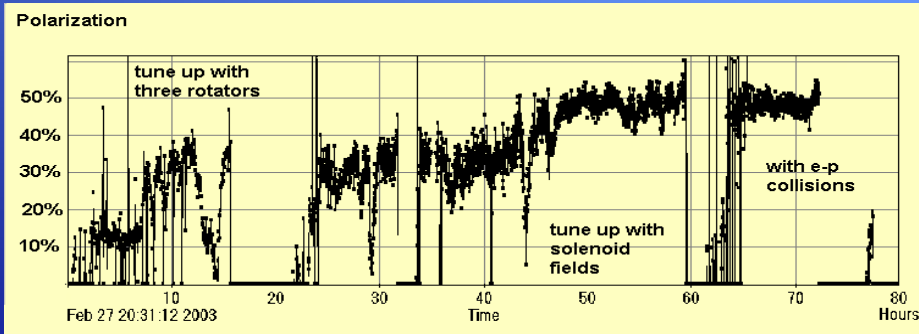
$I_e < 35$ mA

$L_{peak} > 2.7 \times 10^{31} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$



Conclusion: HERA would be able to deliver luminosity as advertised
BUT ...

Weltneuheit Februar 2003 longitudinal polarisierte Positronen collidieren mit einem hochenergetischen Protonstrahl



➔ This opens up an exciting part of the HERA physics program starting in 2003

Unerwarteter Untergrund: Experimente können nicht einschalten

•Direkte Synchrotronstrahlung (SR)
Kollimatoren und Strahlsteuerung OK

•Rückgetreute SR,

Absorber und Kollimatoren, musste verbessert werden

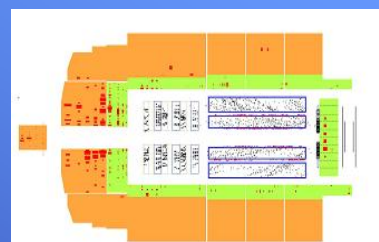
•e-Gas induzierter Untergrund by the
Vakuumbedingungen! OK

•Proton Halo-

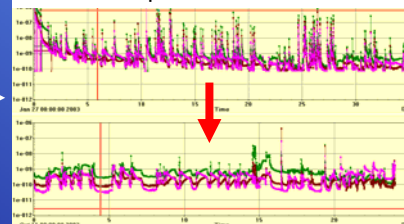
Kontrolle der Strahlparameter OK

•Protonen die am SR desorbierten Gas
streuen innerhalb 10m vom WWP
unerwartet, limitierte $I_p \times I_e < 1000 \text{ mA}^2$,
Erforderte verbesserte Kollimatoren und
optimale Vakuumbedingungen

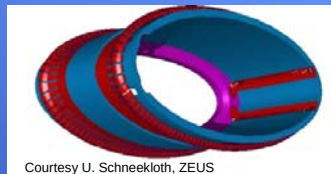
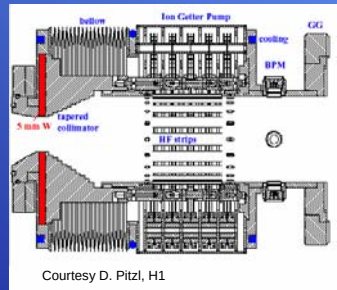
Langes Konditionieren mit Strahl



IR Vacuum pressure over 35d

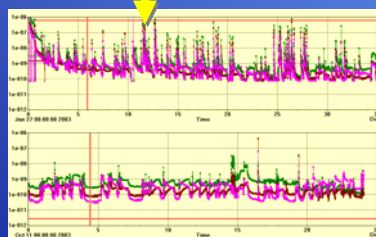


Shutdown 2003: Verbesserte SR Kollimatoren

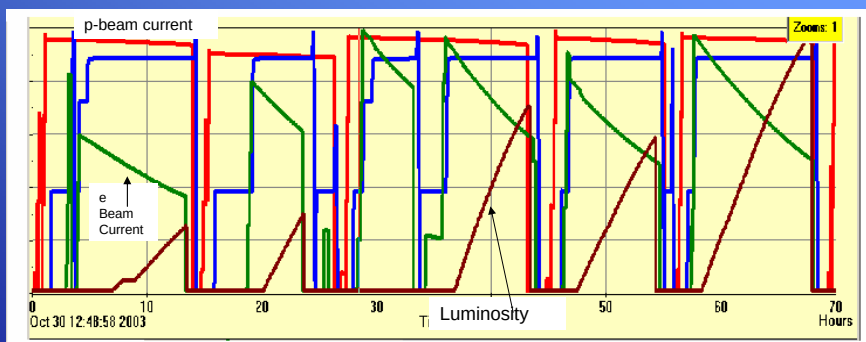


before

after



HERA Betrieb 2004



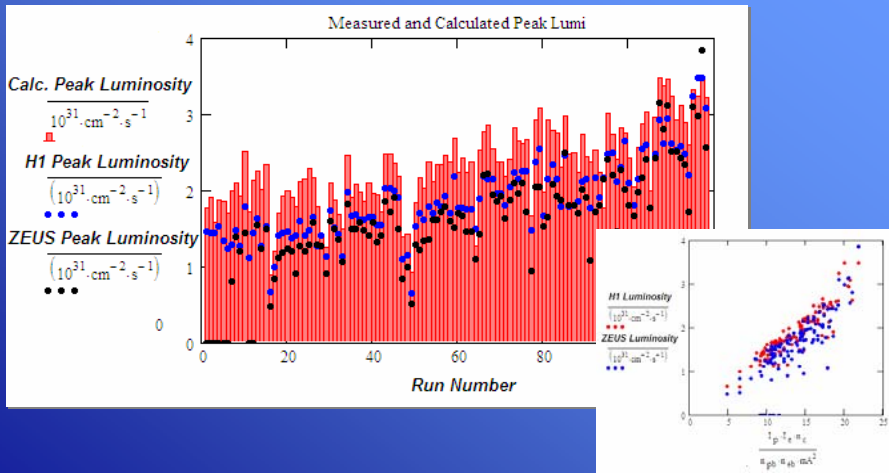
Vielversprechender Run mit bis zu $3.8 \cdot 10^{31} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ Luminosität

Bis zu 0.8 pb^{-1} pro Tag akkumuliert

Jedoch: Betriebseffizienz noch nicht gut genug

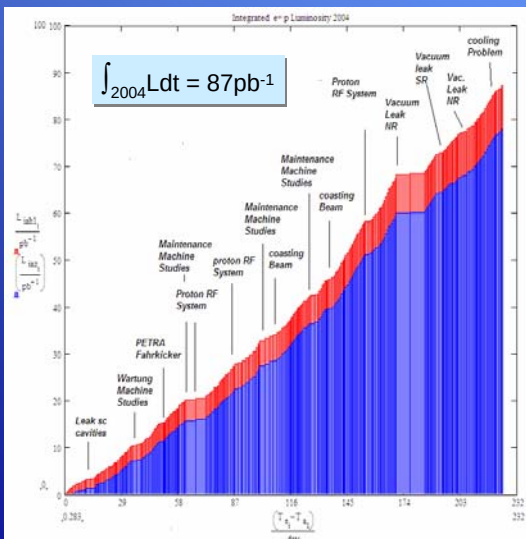
Einige Vakuum Komponenten muessen verbessert werden (häufige Lecks)

HERA Luminosity 2004: Steady increase of of Luminosity with increasing lepton beam currents



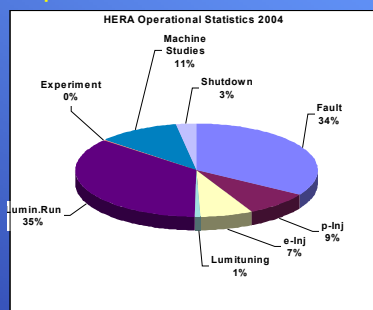
➔ Expect to approach HERA II peak Luminosity goal of $4.5 \cdot 10^{31} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ within the next few months as soon as 50mA of positrons can be stored

2004 Luminosity Accumulation

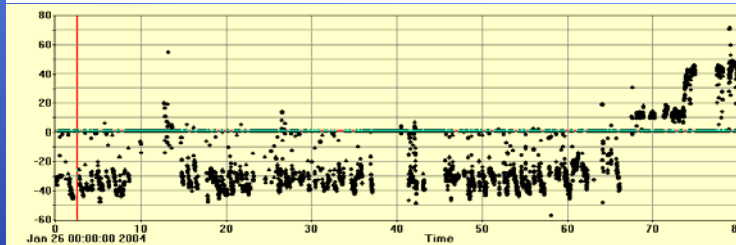


Peak luminosity→	1.2 pb ⁻¹ d ⁻¹
Best week	0.9 pb ⁻¹ d ⁻¹
2004 Average	0.4 pb ⁻¹ d ⁻¹

-50 days of operations lost
Due to major technical failures →
Operational efficiency needs to be improved



HERA Longitudinal Polarization



Polarization in collisions: 30-40%
Polarization without collisions up to 50%

Further improvement plans:

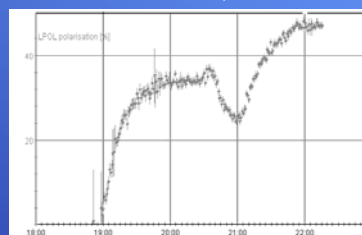
Dedicated 2 Polarization Studies

Beam Based alignment
(suffers from lack of resources)

Need better polarization measurement for fast tuning!!

Regular Rotator Flip

Polarization after p-Beam
Loss on Feb. 12, 2004



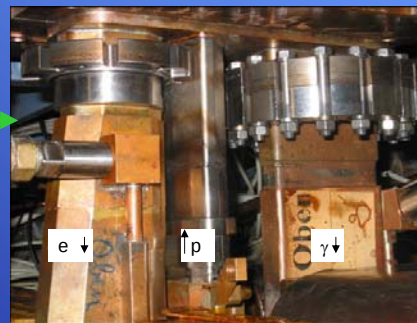
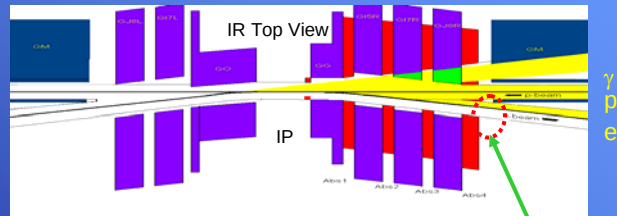
Shutdown 2004: Coil Refurbishing Vertical n.c. BU Dipole Magnet in HERA p

- Needed to bend proton beam upwards at both ends of the IR
- There are 3 Magnets on both sides of the IP in the three IR-s
- = 18Magnets
- Magnets develop ground faults because of water leaks of the brazed Cu conductor
- All coils tested so far ~8 have leaks
- ➔
- Refurbishing program
- This shutdown: 6 Half coils NL replaced
- 8 more coils ordered for later replacements

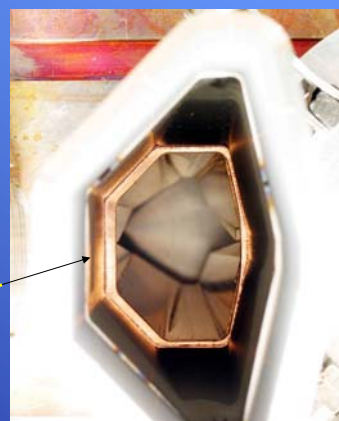
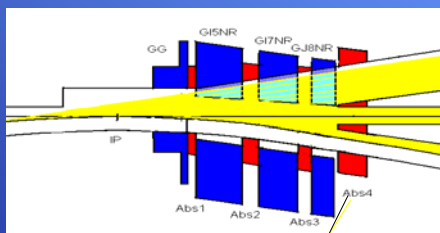


Improving Design Weakness:

Troublesome Flange Connection NR Replaced by Welded Connection

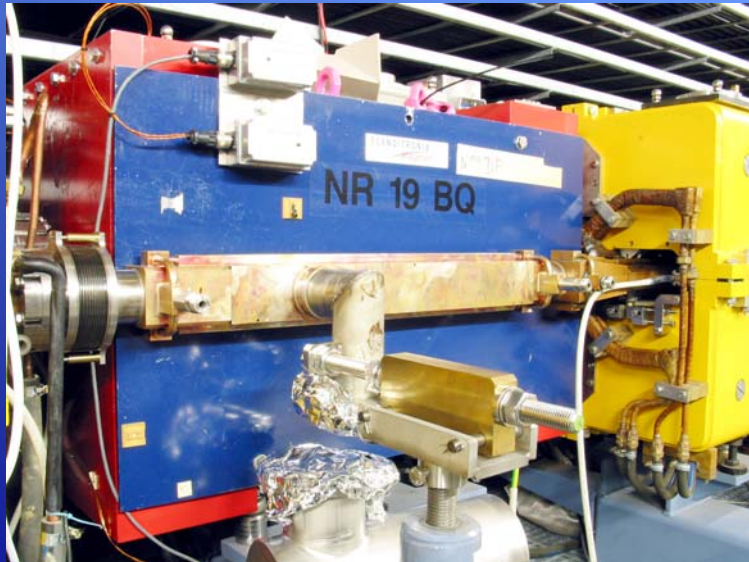


Improved Absorber 4 NR11m:

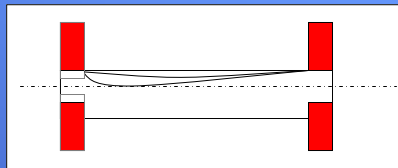
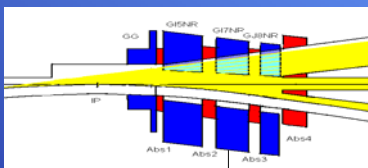


Status: eingebaut

Improved cooling NR19m eRing



Pipe of GI NR7m hit by direct Synchrotron Radiation

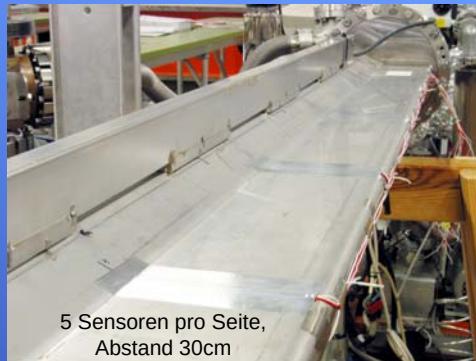


Measures:

Restoration of absorbers 2
→ planned to be installed 2005

Improved Temperature survey
→ implemented

Improved
Temperature survey



Seit Dezember 2004: HERA liefert Kollisionen mit
Elektronen und Protonen, zum ersten Mal seit 1999

Luminosität: Sehr gut,
bis zu $3.6 \cdot 10^{31} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

trotz zur Zeit noch gedrosselter Intensitäten (H1 Vakuum)

Elektronen Lebensdauerereffekte
bis zu e-Strömen von 34mA: keine

Untergrund: Noch kritisch, verbessert sich
langsam

Schlussbemerkung

- HERA has always been a challenging project which required the full attention of the DESY laboratory. Thanks to the support in the 90-ties, HERA I running was turned into a respectable success and delivered the data for important physics results
- After the luminosity upgrade the background conditions were intolerable, but HERA has now overcome these problems and performed a promising luminosity run in 2004
- The peak luminosity in 2004 was twice as large as in Y 2000
- Longitudinal polarized positrons are delivered routinely to the experiments in 3 IPs
- The challenge is to achieve the Y1999/2000 operational efficiency
- There are good chances that HERA can reach its luminosity goal of 1fb^{-1}
However this requires increased efforts and continuous support of the HERA program by qualified personnel and by the implementation of an ongoing maintenance and improvement program

Elektron-Proton
Luminosität in 2005

