

Beschleuniger-Betriebsseminar, Grömitz, 28. November 2005

---

# HERA Betrieb 2005

---

Joachim Keil, DESY (MPY)



# Inhalt

---

- Unterschied zwischen  $e^+/e^-$ -Betrieb
- Chronologie des Runs 2005
- Strahlströme  $p$  und  $e^-$
- Spezifische und integrierte Luminosität
- Bedingungen für Experimente
- Elektronen-Polarisation
- Elektronen-Lebensdauer
- Betriebseffizienz und Fehlerstatistik
- Elektronen-Transfer-Effizienz
- Zusammenfassung

# Unterschiede zwischen $e^+$ und $e^-$ -Betrieb

---

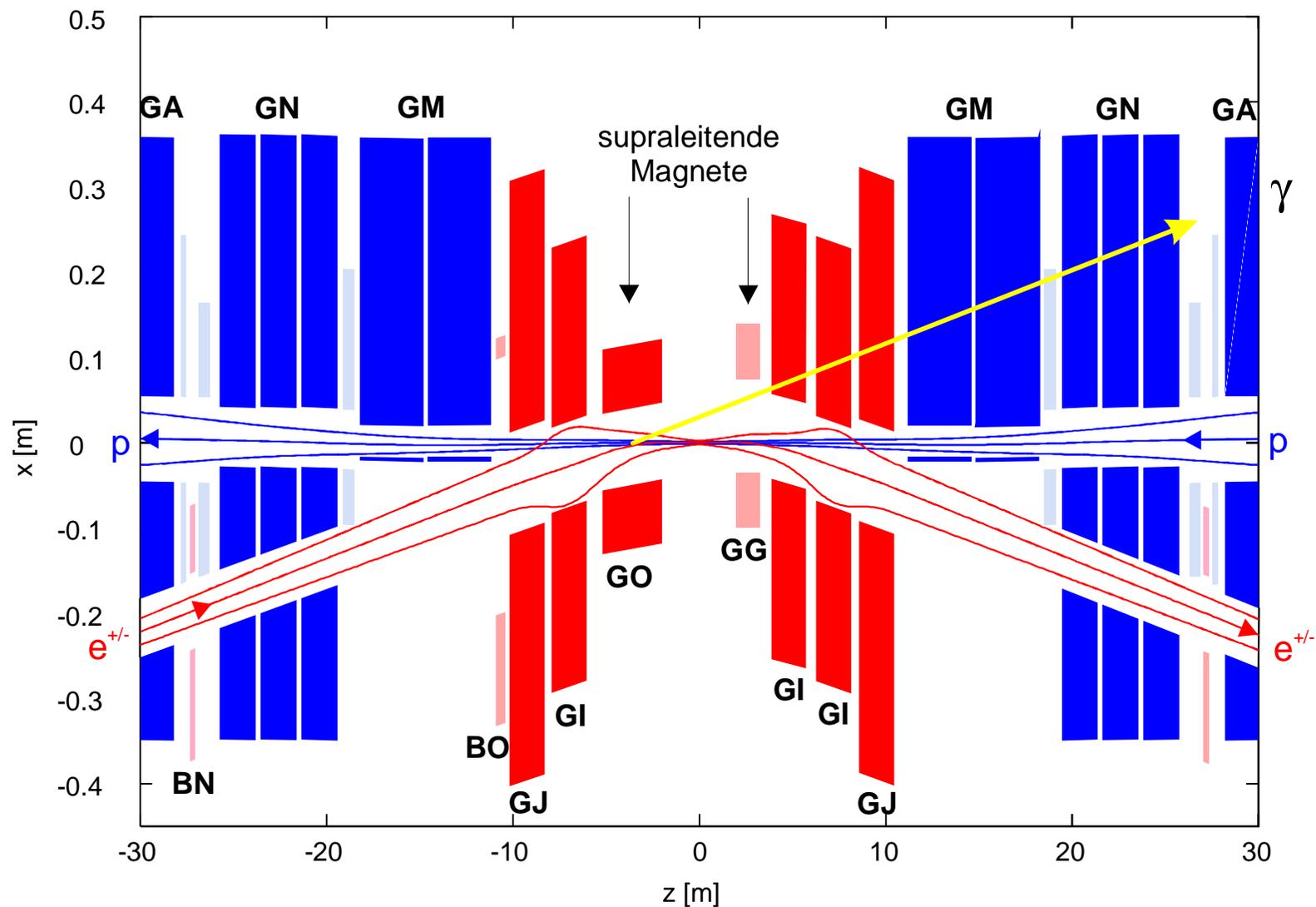
## 1. Orbits in den Wechselwirkungszonen verschieden

- IPs um 7.5 mm radial nach außen verschoben
- Elektronen-Quadrupole auf anderen Positionen
  - ⇒ Wiederinbetriebnahme notwendig (Okt./Nov. '04)
- Mehr und härtere Synchrotronstrahlung (SR) für  $e^-$ -Fall
  - ⇒ Größere Wärmebelastung von Absorbern und Kammern
  - ⇒ Mehr Temperaturalarme
  - ⇒ Höherer SR-Untergrund bei den Experimenten

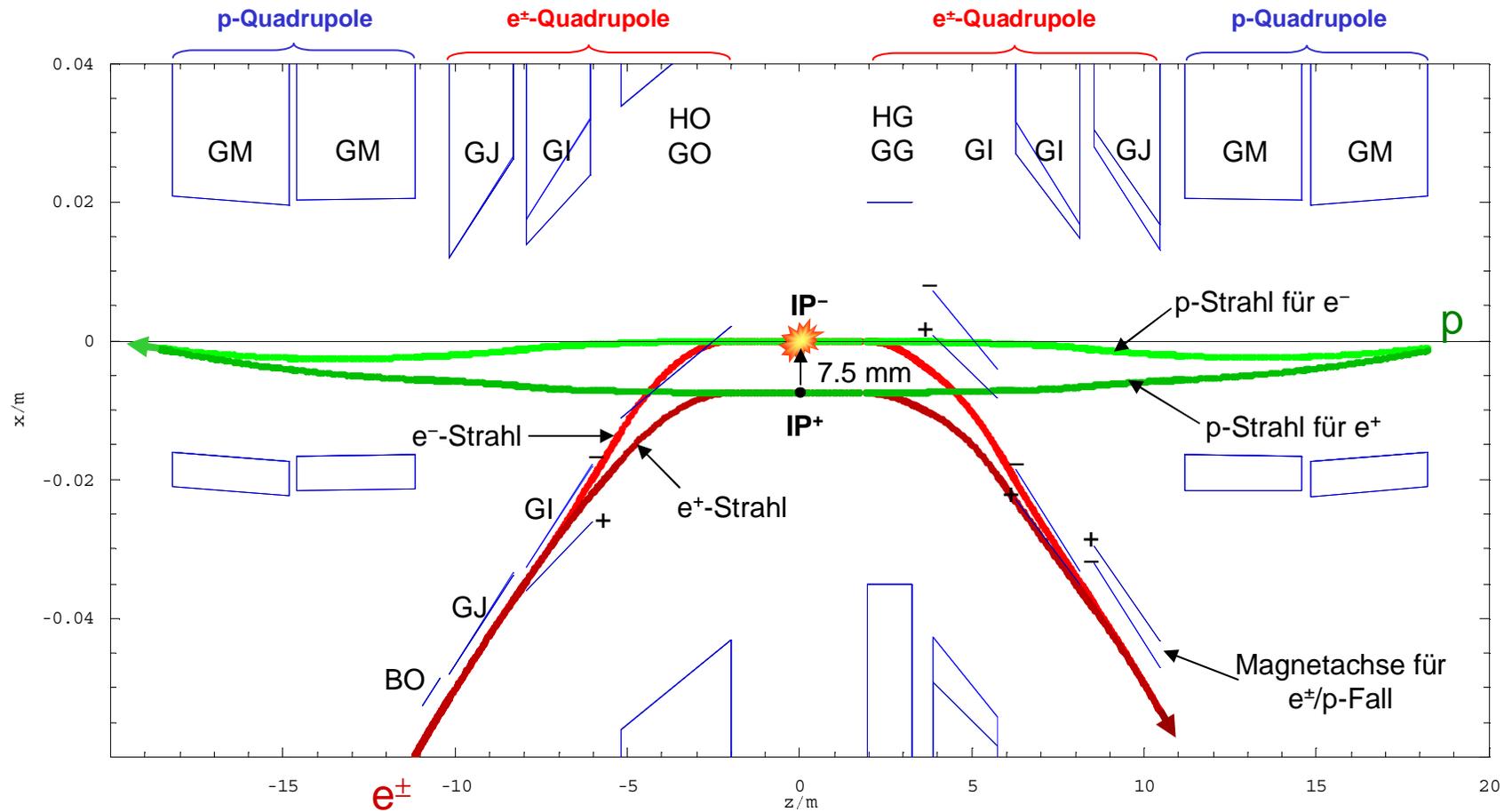
## 2. Einfang von pos. geladenen Staubteilchen bei $e^-$ -Betrieb möglich

- Reduzierte Elektronen-Lebensdauer
- Höherer Elektronen-Background bei den Experimenten

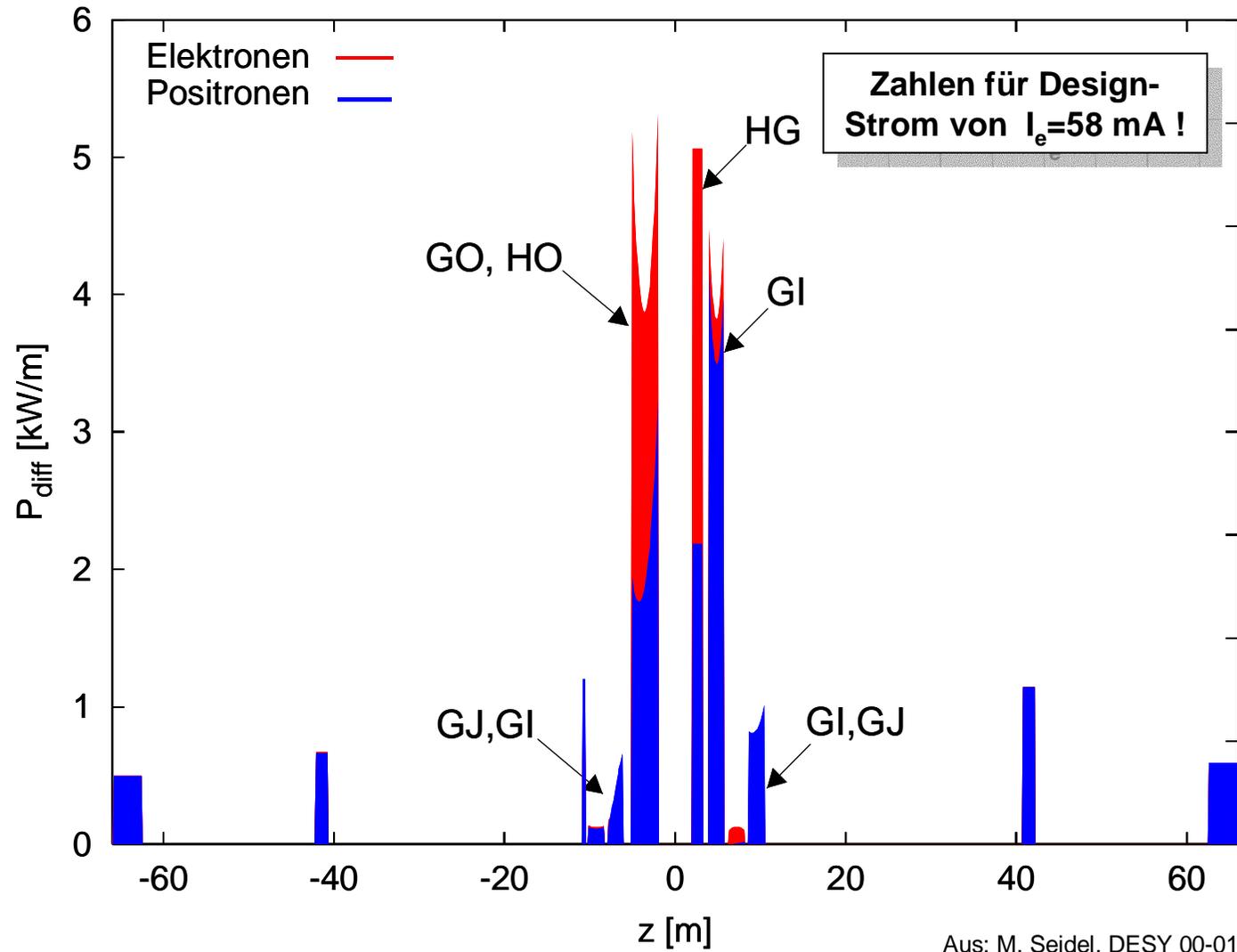
# Geometrie der HERA-Wechselwirkungszone



# Orbits für $e^+/p$ und $e^-/p$ in der Wechselwirkungszone



# Synchrotronstrahlung in der Wechselwirkungszone für $e^+/e^-$



# Parameter des HERA-Betriebs 2005

Parameter	Elektronen	Protonen
Energie E / GeV	27.5	920
Max. Strom I / mA (Designwerte für $n_b=180$ )	58 / 41	140 / 102
Zahl der Bunche $n_b$	180 / 63 – 126 – 153	180 / 60 – 120 – 150
Zahl der kollidierenden Bunche $n_c$	174 / 57 – 114 – 147	
Horizontale Emittanz $\varepsilon_x / \pi \cdot \text{nm} \cdot \text{rad}$	20 / < 26	5.1 / 4.7
Vertikale Emittanz $\varepsilon_y / \pi \cdot \text{nm} \cdot \text{rad}$	3.4 / 3.0	5.1 / 4.7
Horizontale Beta-Funktion am IP $\beta_x^* / \text{m}$	0.63	2.45
Vertikale Beta-Funktion am IP $\beta_y^* / \text{m}$	0.26	0.18
Bunchlänge $\sigma_p / \text{m}$	0.0103	0.191 / 0.21
Hourglass-Faktor R	0.924 / 0.913	
Spezifische Luminosität $L_s / 10^{30} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{mA}^{-2}$	1.79 / 1.9 – 2.2	
Luminosität $L / 10^{31} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	7.44 / 2.5 – 5.1	

 Design
 2005 mit e <sup>-</sup>

**Beschränkungen:**  
 Für e<sup>-</sup>: Vakuum, HF  
 Für p : Vorbeschleuniger

Für e<sup>-</sup>: ohne dynamisches  
 Beam-Beam Beta-Beating  
 ⇨ E. Kot

Für p: Bunch-Verlängerung  
 aufgrund einer longitudinalen  
 Multi-Bunch-Instabilität  
 ⇨ E. Kot

# HERA e-/p-Betrieb 2005

---

## ■ Chronologie

- Wiederinbetriebnahme HERA mit Strahl: 22. Okt. '04
  - WWZ-Magnete auf e<sup>-</sup>-Position: 4. Nov. '04
  - Start des Luminositätsbetriebs: 17. Dez.'04
  - Betrieb mit **Spiegel-Tunes**: 25. Mai '05
  - Zurück zu **normalen Tunes**: 30. Jun. '05
  - Beginn des Shutdowns: 14. Nov. '05
  - Gesamte Betriebszeit 04/05: 333 Tage
- } ⇒ M. Vogt

## ■ Sommer-Shutdown '05 verschoben auf Winter '05/'06

- Ersetzen der Spulen der BU-Magnete
- Einbau des Protonen Multi-Bunch-Feedback-Cavities
- Modifikation von Bälgen in Rotatorstrecken
- Kein Shutdown bis zum Ende der Laufzeit von HERA (Mitte '07)

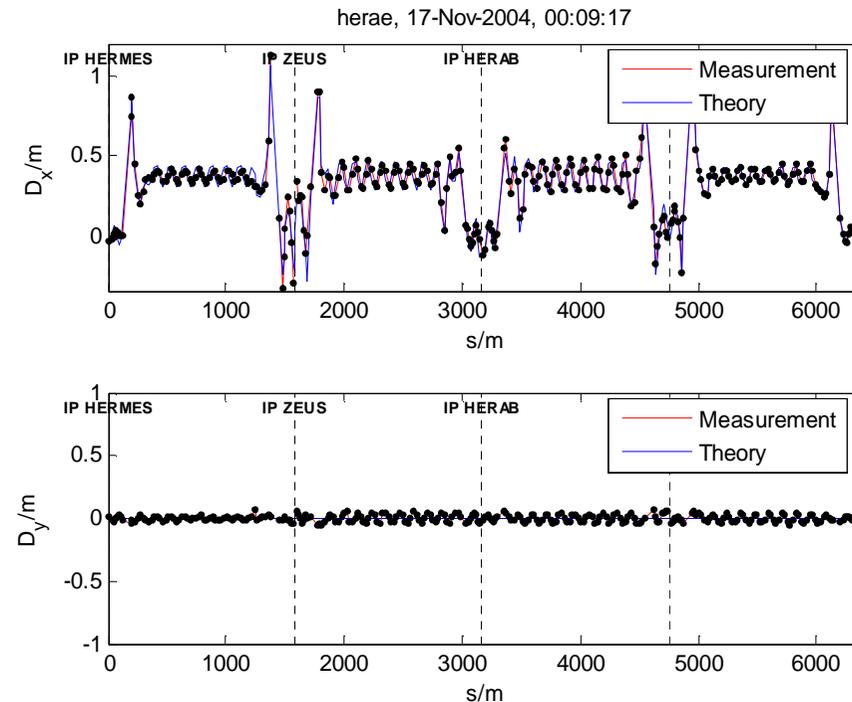
# Maschinenschichten 2004/05

---

- **Nov. 2004**
  - Nichtlineare Tabelle beim Rampen der GI-Magnete
  - Zwischenoptik bei 23 GeV
  - Optik-, Orbit- und Dispersionskorrektur
  - Beam-Based-Alignment in der Wechselwirkungszone
  - Messung der Response-Matrix des EI-Wegs
- **Dez. 2004**
  - Optikmessung HERA-p
  - Beam-Based-Alignment in der Wechselwirkungszone
- **Mai 2005**
  - Untersuchung eines alternativen Arbeitspunkts (Mirror-Tune)
  - Optik-, Orbit- und Dispersionskorrektur
- **Okt.-Nov. 2005**
  - Test des (Wavelet-)Tune-Controllers (für Rampe und Lumi-Run)
- **Nov. 2005**
  - Messungen zur Orbit-Stabilisierung der Elektronen am IP
  - Injektion bei 7 GeV
  - Messung der Abgeschlossenheit der e-Dump-Beule
  - Untersuchung einer Optik mit kleinerem  $\beta_z^*$  für Protonen

# Optik- und Orbitmessung/Korrektur

- Bei Inbetriebnahme 11/04, bei der Umstellung auf Spiegel-Tunes und Helizitätswechsel der  $e^-$ :
  - Messung der Optik von HERA-e und HERA-p (ORM) und empirische Korrektur der Fehler
    - ⇒ Rest-Beating  $\Delta\beta/\beta < 10\%$
  - Messung von Orbit und Dispersion und gleichzeitige Korrektur
  - Erreicht wurden (Sep. 2005):  
 $x_{\text{rms}} = 0.77 \text{ mm}$ ,  $y_{\text{rms}} = 0.54 \text{ mm}$   
 $D_{x,\text{rms}} = 22 \text{ mm}$ ,  $D_{y,\text{rms}} = 12 \text{ mm}$
- Außerdem bei Inbetriebnahme 11/04:
  - Beam-Based-Alignment in den Wechselwirkungszonen



Dispensionsmessung in der Zwischenoptik HEZWIE bei 23 GeV

# Technische Probleme 2004/05

2004	Nov. 2004	Überhitzte Spule von Protonen-Quadrupol 'GN NL 20'
	Nov. 2004	Erdschluß am Protonen-Quadrupol 'QQ17 OL' innerhalb Cryostat
	Dez. 2004	Vakuumleck in Elektronen-Quadrupol 'GI NR 7' (Durchführung NEG-Pumpe)
2005	Jan. 2005	Erdschluß von Protonen-Quadrupol 'GN NL 23'
	Feb. 2005	Ausfall Kompressorstraße für Südring ⇒ Erwärmung des p-Rings
	Apr. 2005	Kurzschluß in Spule von BU-Magnet SR
	Mai 2005	Vakuumleck in Protonen-Quadrupol 'GM NR 14'
	Jun. 2005	Elektronik-Problem des Netzgerätes von Quadrupol 'GA08 N'
	Jul. 2005	Vakuumleck am Einkoppler an s.l. Cavity ⇒ Ausbau Kryostat
	Sep. 2005	Vakuumleck im Rotator OR (Kühlungsproblem eines Absorbers)
	Sep. 2005	Vakuumleck am Elektronenflansch SR 11 (Dump von 40 mA)
	Okt. 2005	Mehrere Vakuumlecks in den Rotatorstrecken an Bälgen

# GN Magnet-Probleme

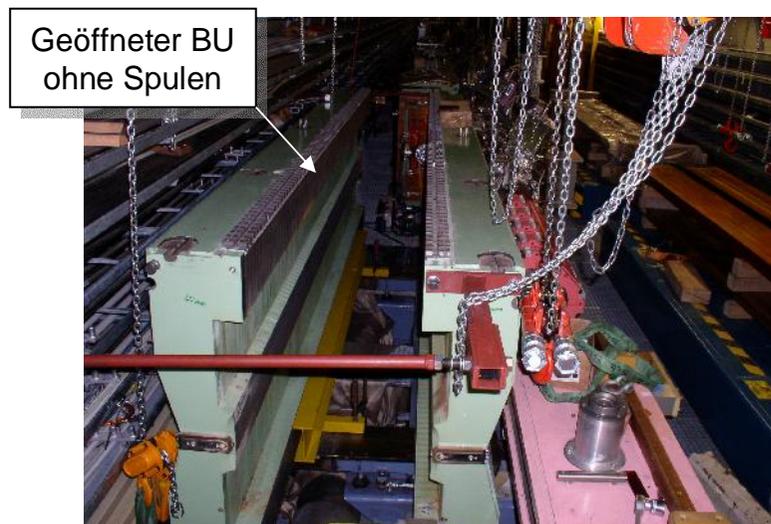
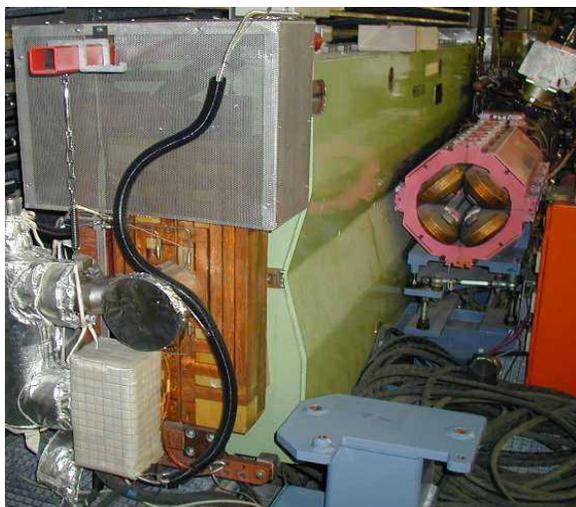
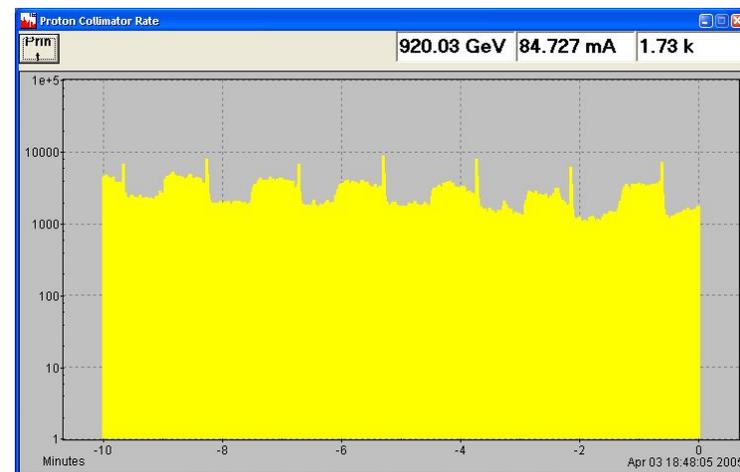
- Nov. 04: Kühlungsproblem bei 'GN NL 20'; Spule überhitzt
- GN-Magnet: vertikal fokussierender low- $\beta$ -Quadrupole (12 Magnete)
- Magnet mußte getauscht werden (6 Tage); Kammer von NL 26 m bis NR 26 m belüftet  
⇒ schlechtes Vakuum bei H1
  
- Jan. 05: Erdschluß von Magnet 'GN NL 23'; alle vier Spulen wurden getauscht (7 Tage)
- Möglicher Grund: Magnet wurde bei Magnetstromtests im Okt. 2004 mit 1638 A betrieben; die Grenze beträgt 1600 A
- Maximaler Strom jetzt auf 1470 A beschränkt



# BU-Magnet-Problem

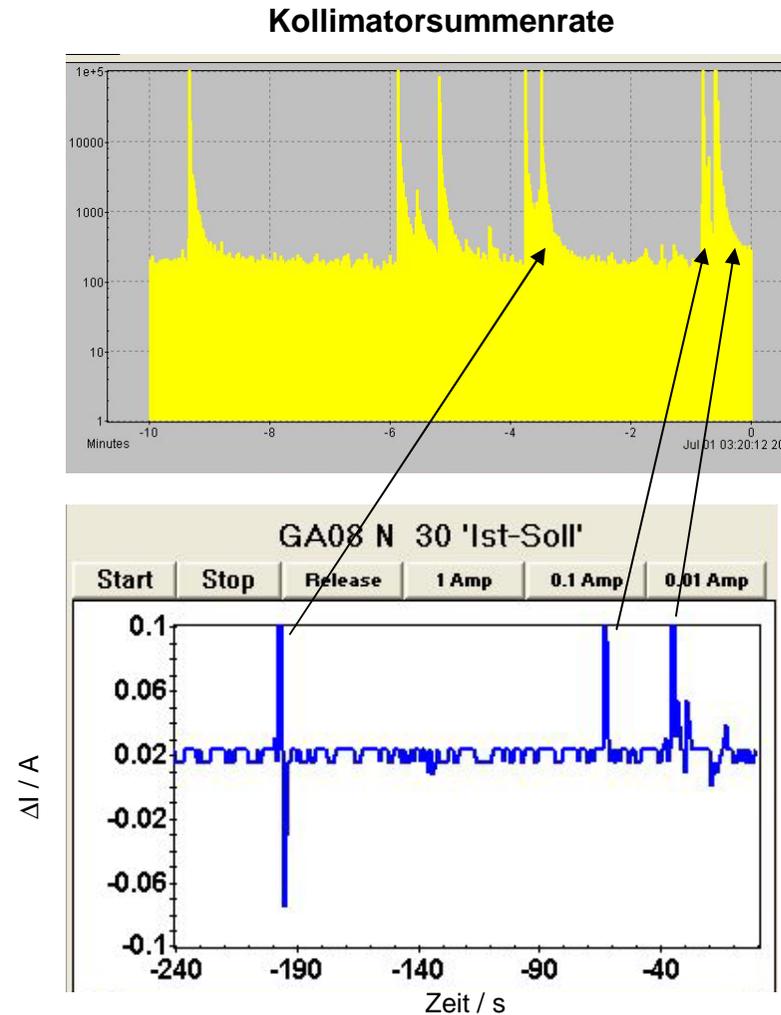
- Jan.-Apr. 05: Immer wieder periodische Änderungen des p-Backgrounds mit Spikes (“Sieben Zwerge”)
- Kleine vertikale Orbitschwankungen im gleichen Rhythmus
- Kurzschluß in Spule BU-Magnet SR
- April 05: 2 Spulen des BU-Magnet SR getauscht

Kollimatorraten



# GA08 N-Problem

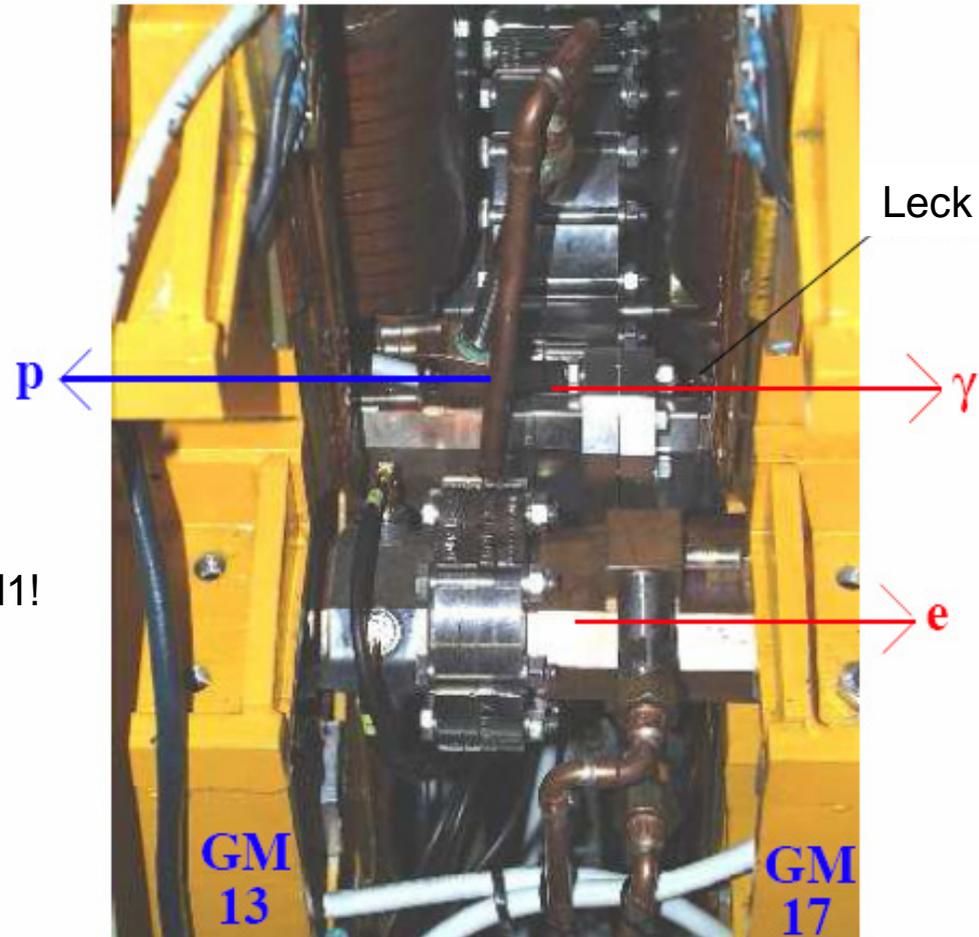
- Dez. 04: Erste Protonen-Background-Spikes treten auf, die mit Soll-/Ist-Abweichungen von Quadrupolkreis 'GA08 N' korreliert sind
- Juni 04: Die Spikes werden so häufig, so daß H1 und ZEUS nicht mehr messen können
- Lange Suche nach der Ursache: Hat einer der 6 Magnete am GA08N-Kreis ein Problem oder das Netzgerät?
- Zwei längere Betriebsunterbrechungen; Tests ohne Strahl an PS und Last
- Ursache war Wackelkontakt im Netzgerät; falsch eingelöteter Widerstand



HERA-Logbuch, 1.Juni 2005

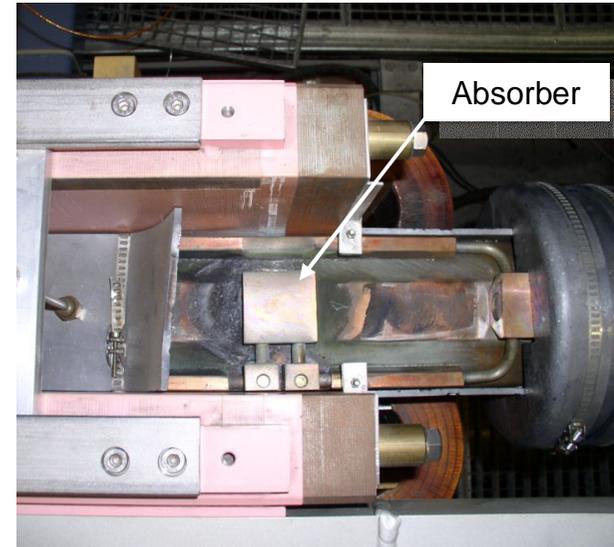
# Vakuumleck NR 15

- 18.Mai 05: Vakuumleck zwischen den GM-Magneten bei NR 15 m
- Ursache: Dump von 39 mA  $e^-$  (Temperaturalarm SR11)
- Leck am Übergang zur p-Kammer aus Edelstahl
- Klebung war nicht erfolgreich
- Magnet wurde geöffnet, Kammer ausgebaut, neu gelötet  
⇒ erneut schlechtes Vakuum bei H1!
- Ursache: kleine Deformation der Innenseite der p-Kammer, die von Synchrotronstrahlung getroffen wurde?

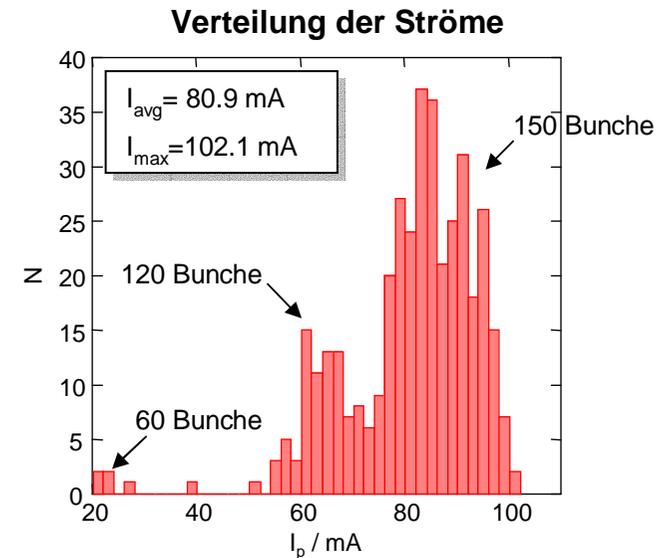
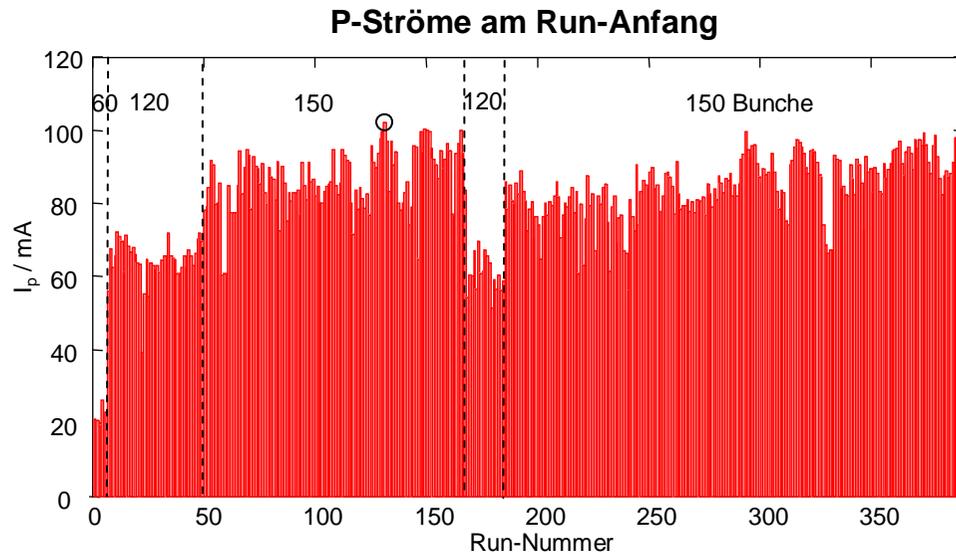


# Vakuumlecks im Rotatorbereich

- 11.9.05 : Vakuumleck am Absorber des vertikal ablenkenden Rotatormagneten bei OR 142 m
  - Kammer abgesägt, neues Stück angeschweißt
  - Ursache: Absorber zu heiß geworden; schlechter thermischer Kontakt?
- 
- 8.5.05, 16.9.05, 12.10.05, 18.10.05: Vakuumlecks an Schiebbestücken im Rotatorbereich (SR, 3×NR)
  - Häufig nach Strahldump oder Strahlverlust
  - Ursache: Fehlende Stütznaht; wird in diesem Shutdown behoben

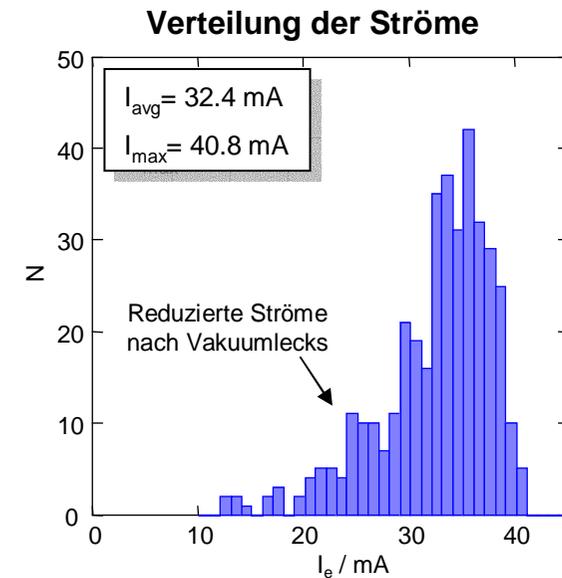
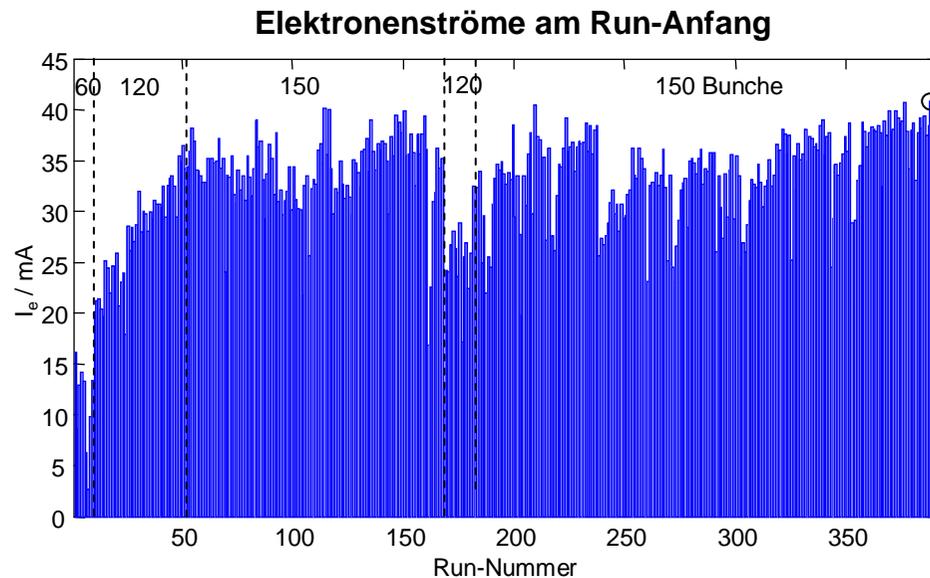


# Protonenströme 2005



- Bei Wiederinbetriebnahme: hoher Druck bei H1  $\Rightarrow$  60 Bunche
- Dann Bunchzahl schrittweise bis 150 erhöht (im Mai: GM-Leck; erneut 120)
- Protonenstrom hängt von der Performance der Vorbeschleuniger ab
- Hoher Einzelbunch-Strom ( $\max(I_{pb}) = 0.68 \text{ mA}$ ); nicht weit weg von Designstrom  $I_{max}$  würde 123 mA bei 180 Bunchen entsprechen!

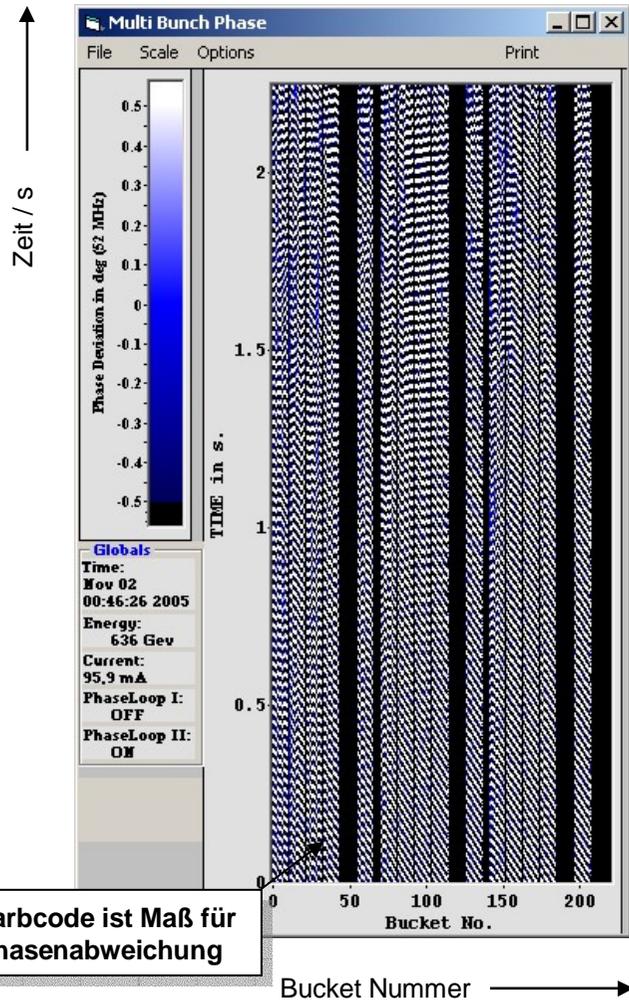
# Elektronenströme 2005



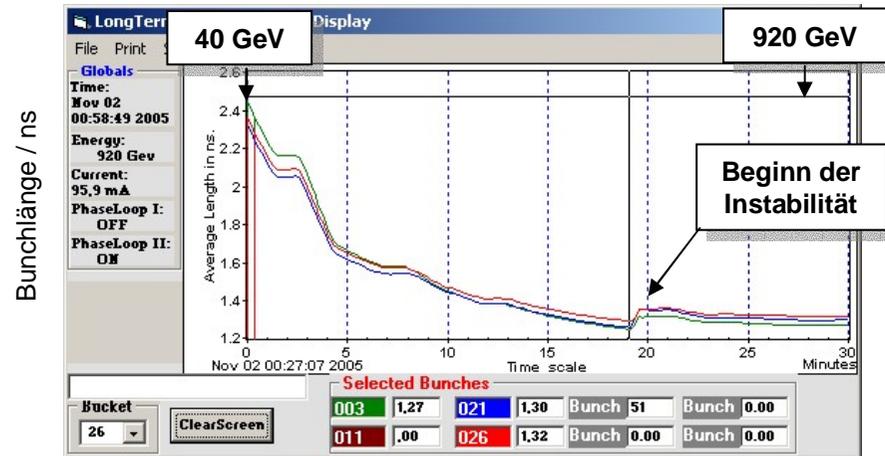
- Viele Vakuumlecks im e-Ring (WWZ bei H1 und ZEUS, Rotatorbereiche,...) verhinderten die kontinuierliche Steigerung des Stroms
- Nur eine langsame Steigerung war möglich (Sonst: Senderausfall wegen Druckanstieg an Cavities  $\Rightarrow$  Strahlverlust)
- Typische Elektronenlebensdauer  $\tau = 10\text{-}15 \text{ h}$  bei Kollisionen
- Manchmal Lebensdauern  $\tau < 4 \text{ h}$  nach Einfang eines Staubteilchens
- Run-Ende 1 h nachdem 13 mA erreicht wurde (HERMES High-Density-Run)

# Protonen-Bunchverlängerung auf der Rampe

Multi-Bunch-Oszillationen auf der Rampe



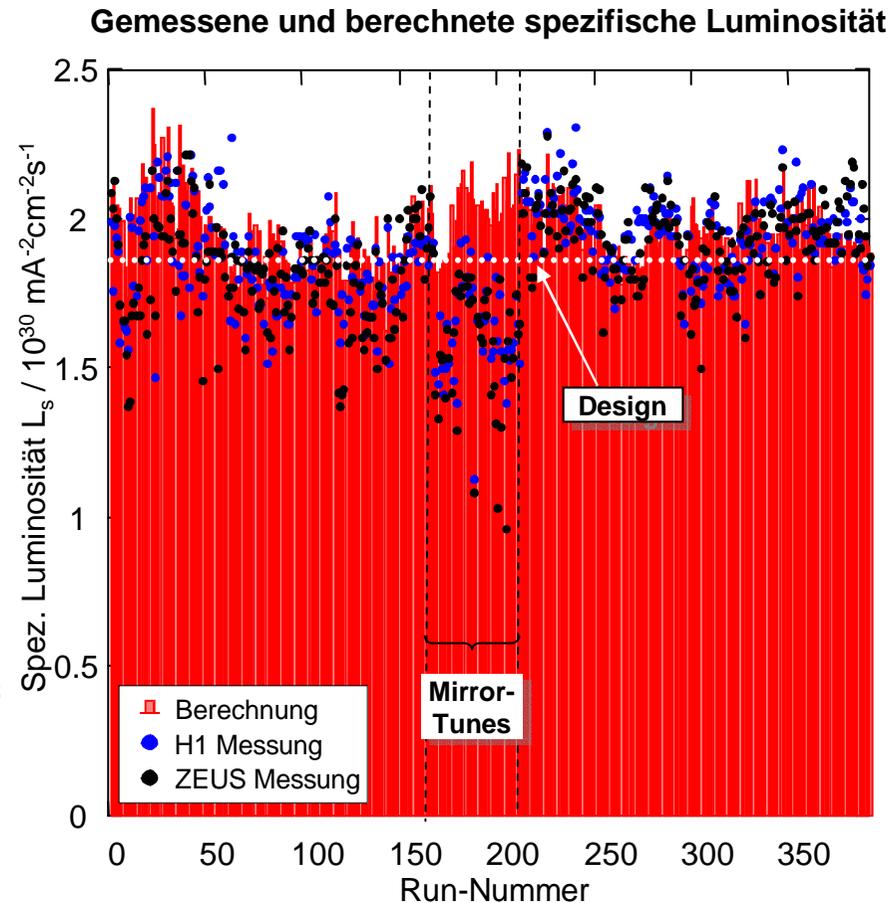
Bunchlänge auf der Rampe



- Verlängerung der p-Bunche während der Rampe aufgrund einer **Multibunch-Instabilität**
- Länge bei 920 GeV ist 1.4–1.8 ns FWHM; **Hourglass-Faktor: ~0.91**
- Mit einem **long. Feedback** sollte eine kleinere Bunchlänge zu erreichen sein (5% mehr Lumi)
- Bei kleinerer Bunchlänge liefert eine **Optik mit kleinerem  $\beta_z^*$**  deutlich mehr Luminosität  $\Rightarrow$  E. Kot
- Feedback-System  $\Rightarrow$  M. Hoffmann

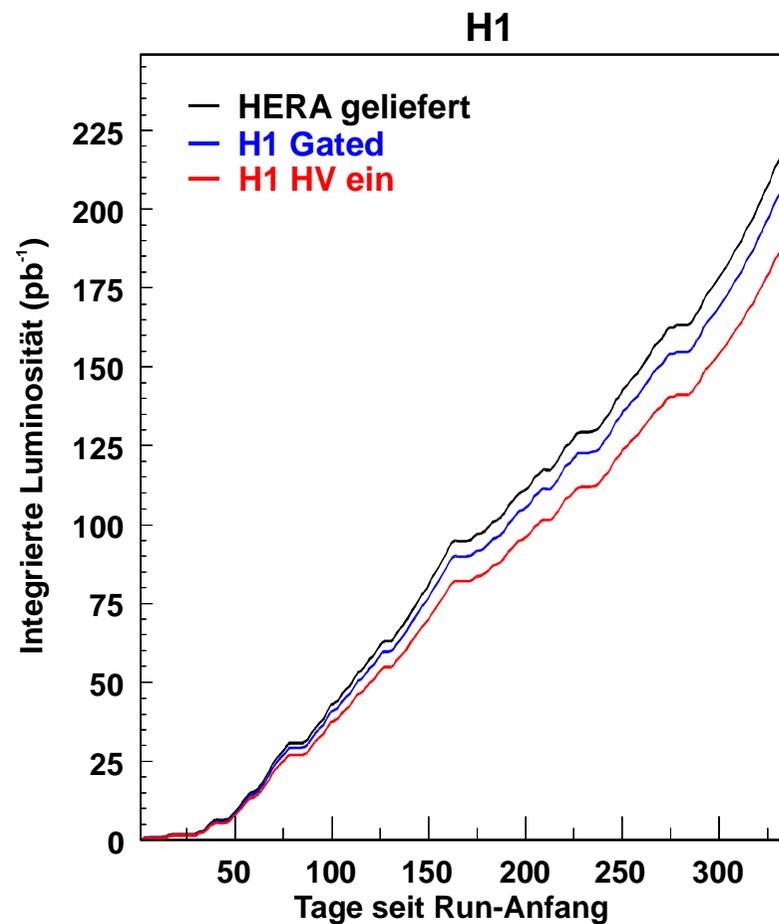
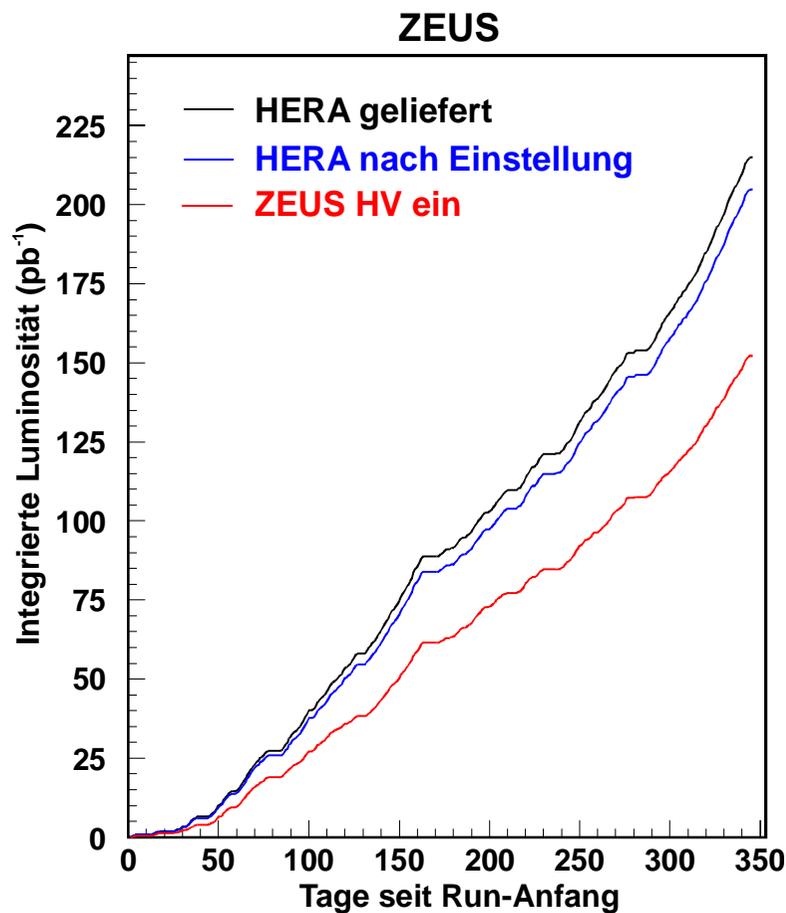
# Spezifische Luminosität 2005

- Hohe spezifische Luminosität mit Elektronen im Jahr 2005:  
 $1.8 - 2.3 \times 10^{30} \text{ cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{mA}^{-2}$
- Typische Werte für  $e^+$  in 2004:  
 $1.2 - 1.6 \times 10^{30} \text{ cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{mA}^{-2}$
- Design-Wert für Lumi-Upgrade:  
 $1.84 \times 10^{30} \text{ cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{mA}^{-2}$
- Grund: **Dynamisches Beta-Beating** bei  $e^-$  Betrieb erzeugt kleineres  $\beta^*$  im Vergleich zum  $e^+$ -Betrieb; **Protonen Emittanz** kleiner als letztes Jahr
- Berechnete spez. Lumi basierend auf gemessenen Strahlparametern kann gemessene Lumi für **Standard-Tunes** relativ gut beschreiben



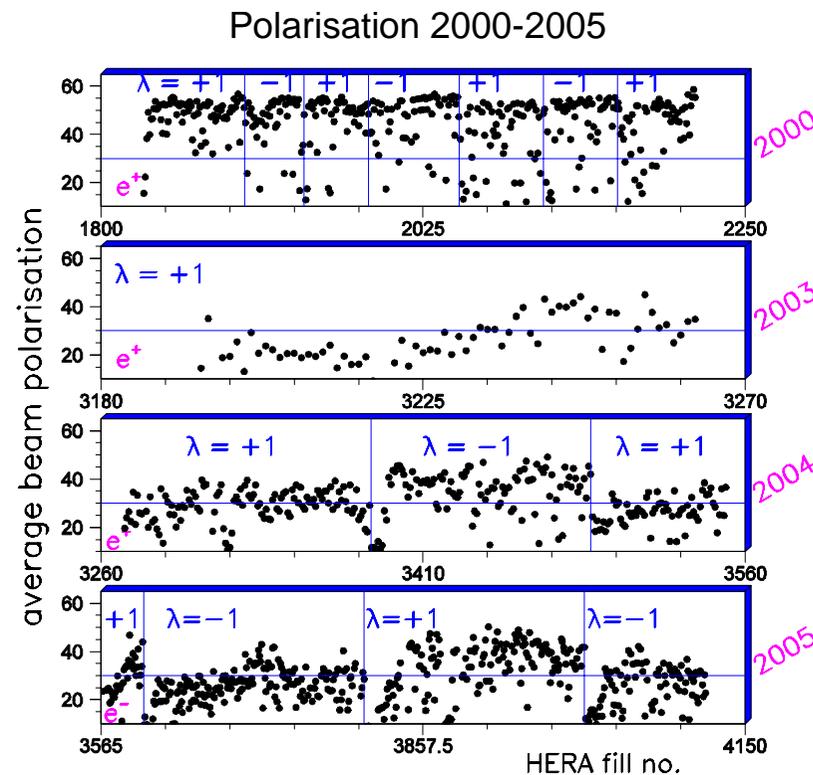
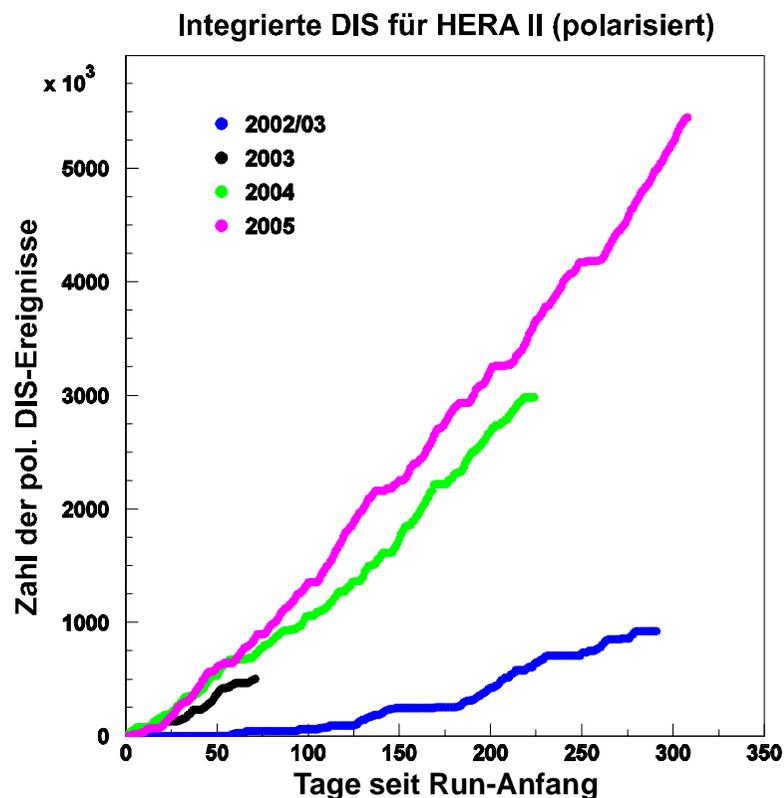


# Integrierte Luminosität ZEUS und H1



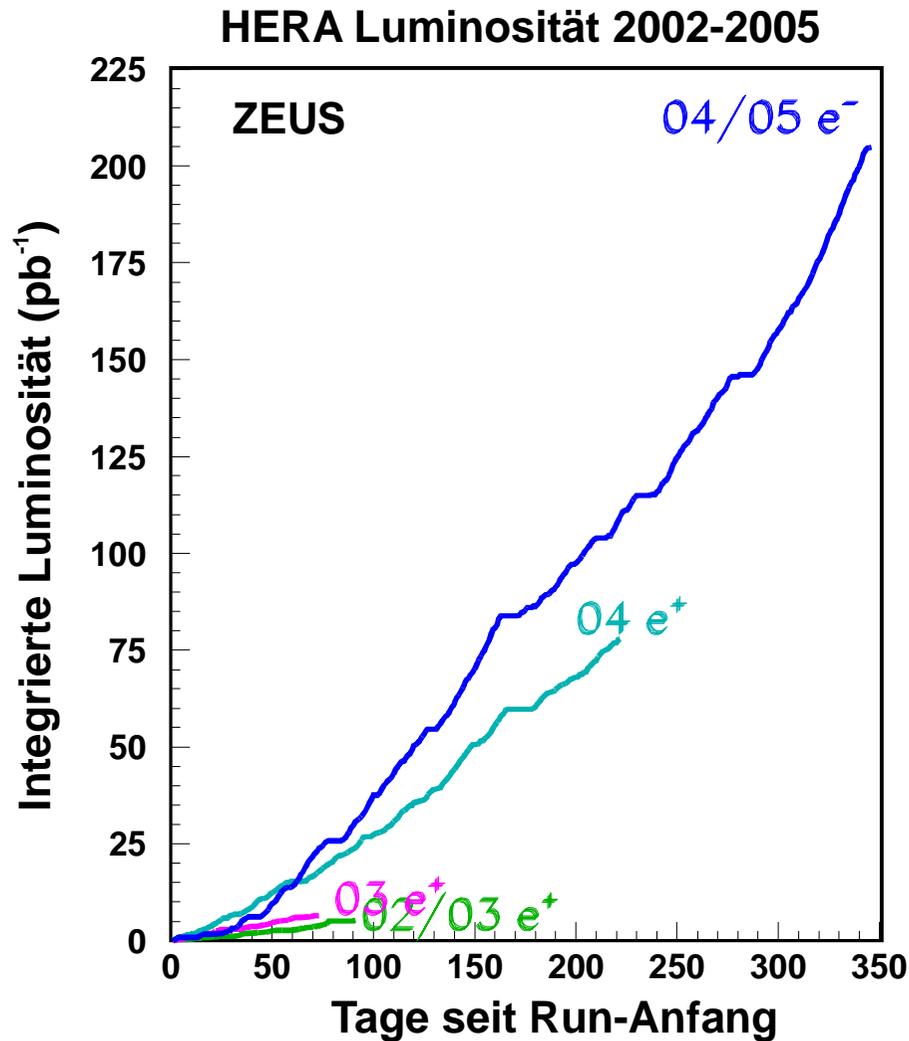
Die Luminosität **mit** eingeschalteter Hochspannung der Spurkammern ist deutlich niedriger als die von HERA gelieferte Luminosität wegen **Druck bei H1** und **Protonen-Spikes!**

# HERMES



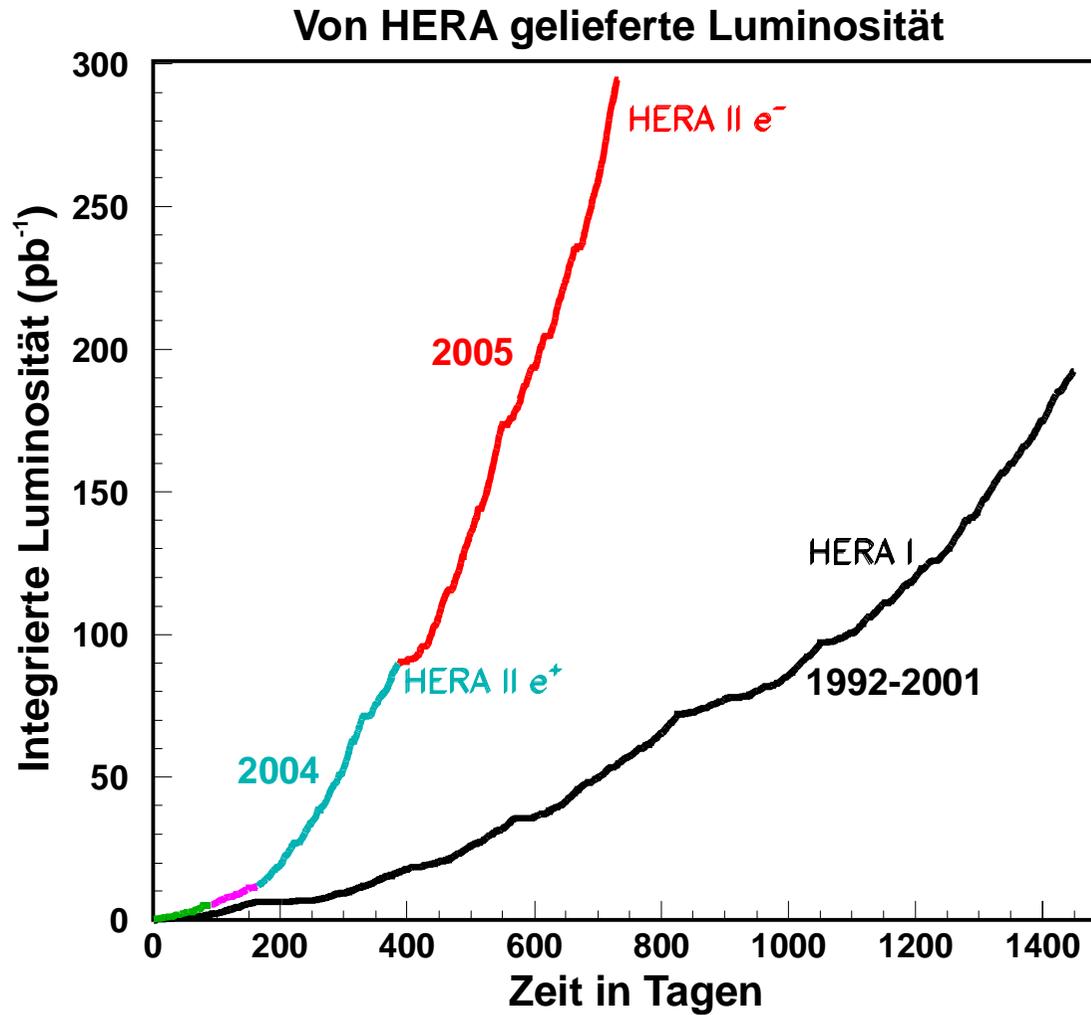
- Bedingungen für HERMES gut; Datennahmeeffizienz  $\sim 98\%$
- Targetpolarisation  $|P_T| = 85\%$ , Strahl-Polarisation ist HERMES zu niedrig;  
 $P_B^{\lambda=+1} \sim 40\% - 50\%$ ,  $P_B^{\lambda=-1} \sim 30\% - 40\%$

# HERA Luminosität 2002-2005



- Mehr integrierte Luminosität im Jahr 2005 mit Elektronen im Vergleich zu 2004 mit Positronen: **Höhere spezifische Luminosität und längere Laufzeit**
- Performance von HERA für die letzten 1½ Jahre bestimmt die gesamte von HERA II gelieferte Luminosität!

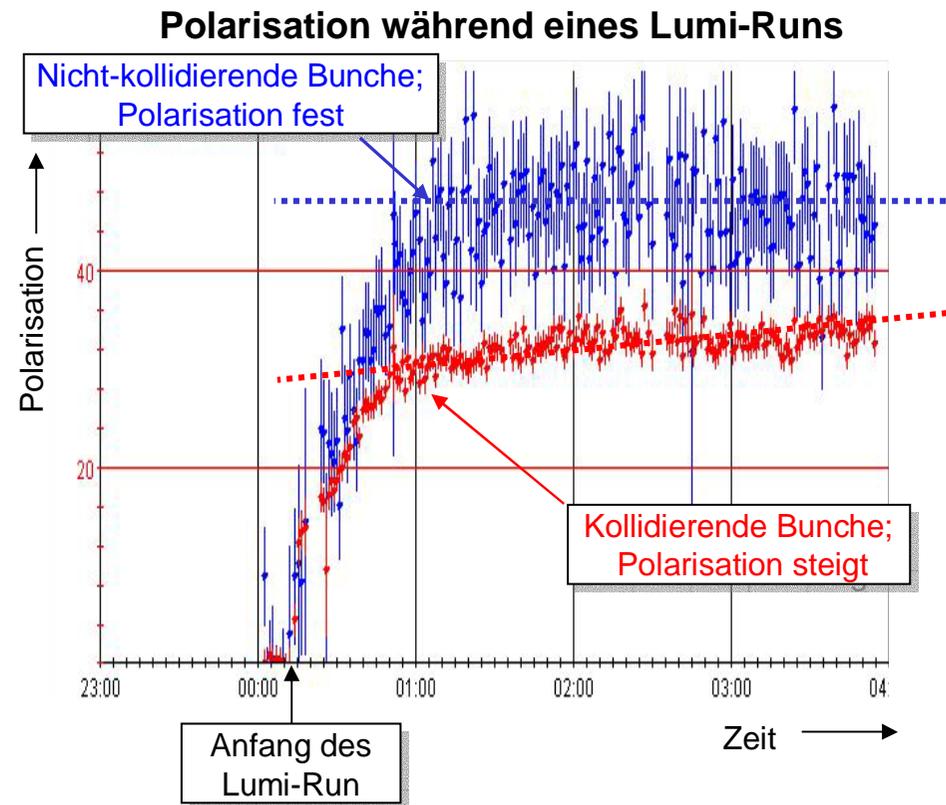
# Vergleich e<sup>+</sup>/e<sup>-</sup>-Daten



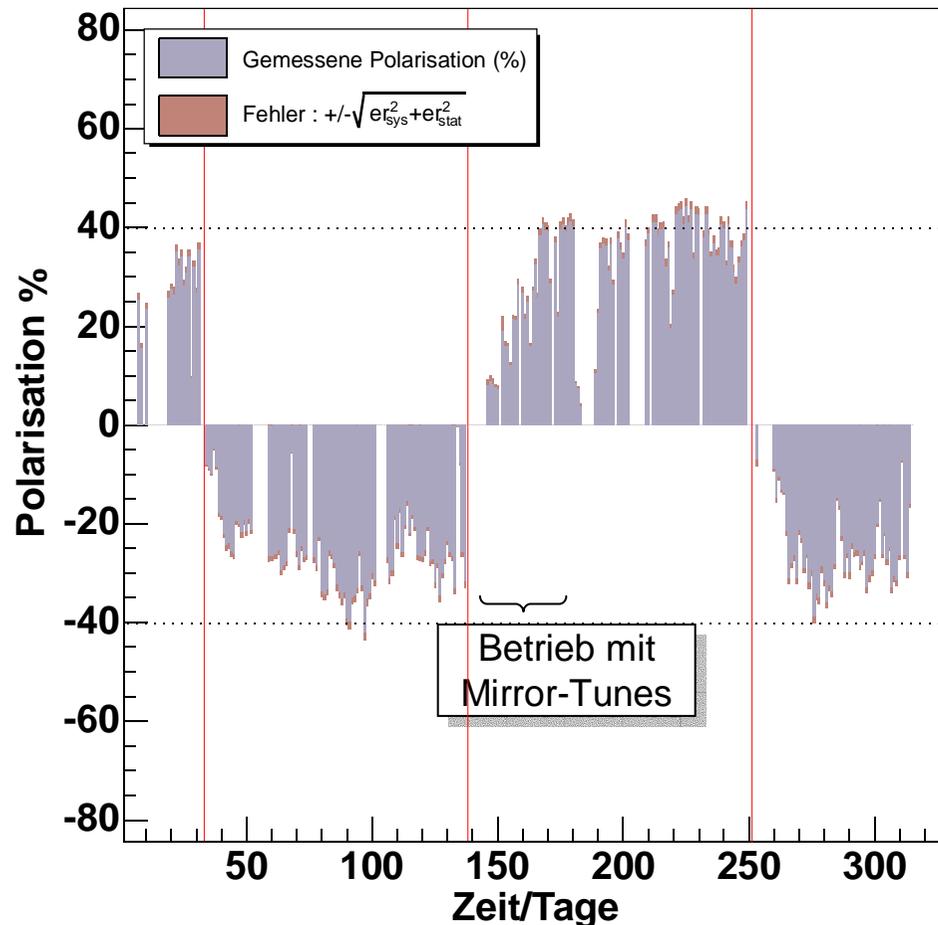
Im Jahr 2005 wurde sowie integrierte Luminosität aufgesammelt, wie während der gesamten Laufzeit von HERA II!

# Polarisation 2005

- Polarisation war 2005 niedriger als 2004:
  - kollidierende Bunche  $P \leq 45\%$
  - nicht-koll. Bunche  $P \approx 50-55\%$ !
- Ursache: **Strahl-Strahl-Wechselwirkung** verschiebt Tunes der koll. Bunche weg von ganzer Zahl (wenn Tunecontroller an)
- Emittanz der Protonen wächst mit der Zeit  
⇒ Polarisation der koll. Bunche steigt
- **Standard-Tunes** bei  $e^-$ -Betrieb sind **gut für hohe Luminosität**, aber **nicht gut für hohe Polarisation!**
- Alternative Tunes („**Mirror tunes**“) wurden getestet, aber spezifische Luminosität war signifikant kleiner  
⇒ nach 1 Monat zurück zu alten Tunes



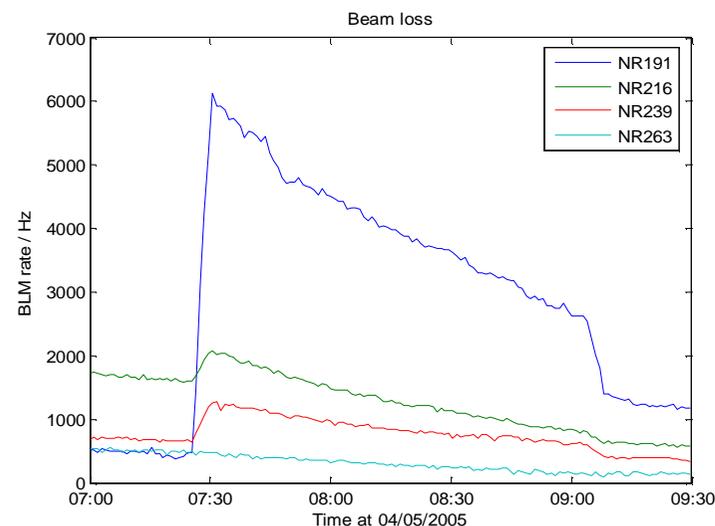
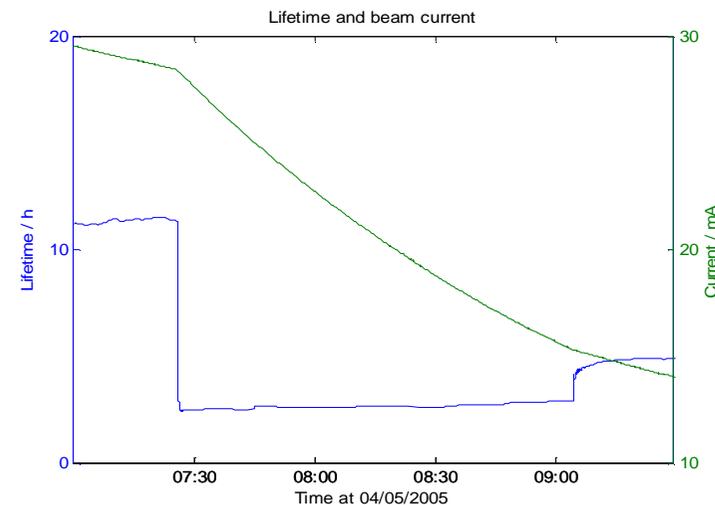
# Polarisation 2005



- Drei Helizitätswechsel (rote Linien)
- Maximal 45% Polarisation für kollidierende Bunche am Ende des Runs erreicht
- Hängt maximal erreichbare Polarisation von der Stellung der Spinrotatoren ab?
- Mehr über Polarisation:  $\Rightarrow$  M. Vogt

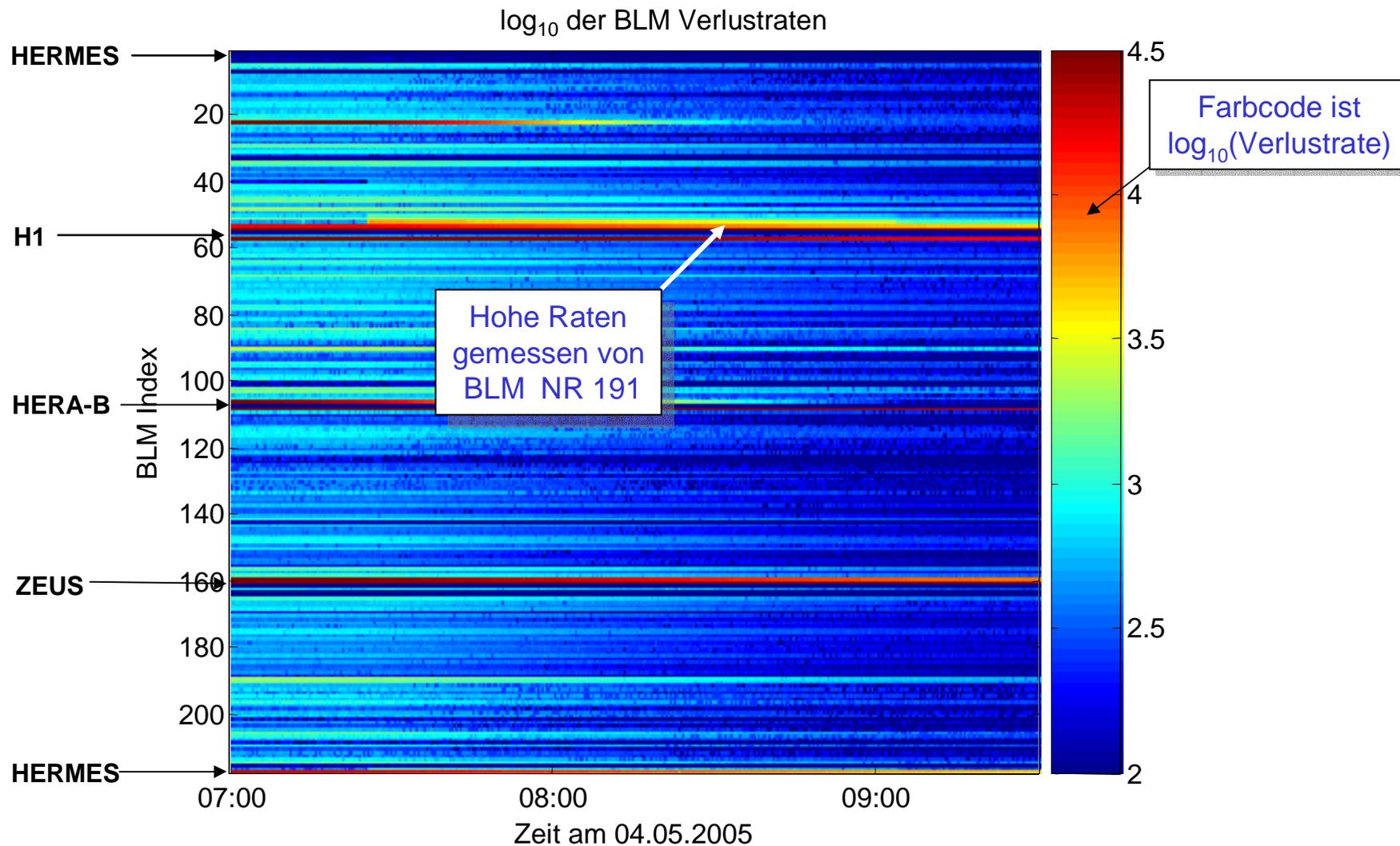
# Lebensdauer im Elektronenbetrieb

- Plötzliche **Einbrüche der Lebensdauer** beim Betrieb von HERA mit  $e^-$ ; Rückkehr der Lebensdauer in **Schritten**
- Gleichzeitig werden **erhöhte Strahlverluste** gemessen
- Beobachtet für  $I > 30$  mA seit Jan. '05; die Zahl der starken und lang-dauernden Lebensdauereinbrüche ist aber **glücklicherweise klein**
- Theorie: Einfang von positiv geladenen Staubteilchen durch den negativ geladenen Elektronenstrahl
- Quelle des Staubs: Ionen-Getter-Pumpen (Pumpen in den Dipolen wurden im Shutdown 1997/98 durch NEG-Pumpen ersetzt)
- Mehr dazu  $\Rightarrow$  A. Kling

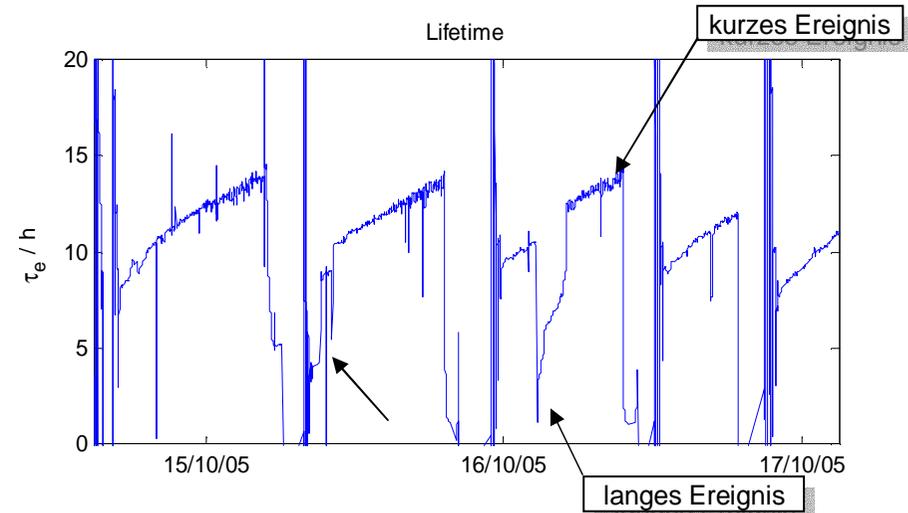
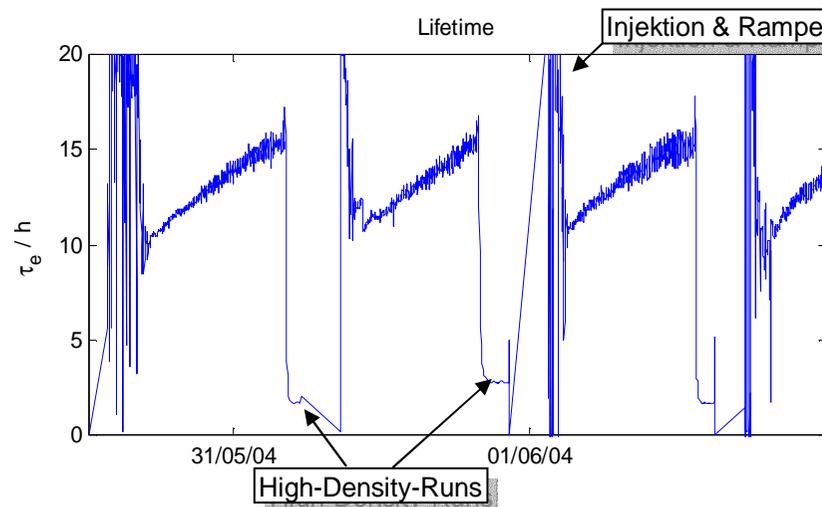


Lebensdauer-Einbruch 4.5.2005

# Raten der Strahlverlustmonitore



# Vergleich der Lebensdauern $e^+/e^-$



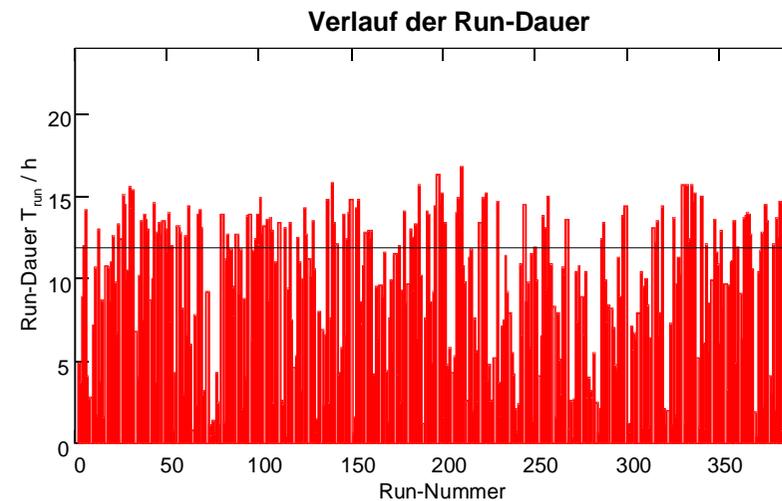
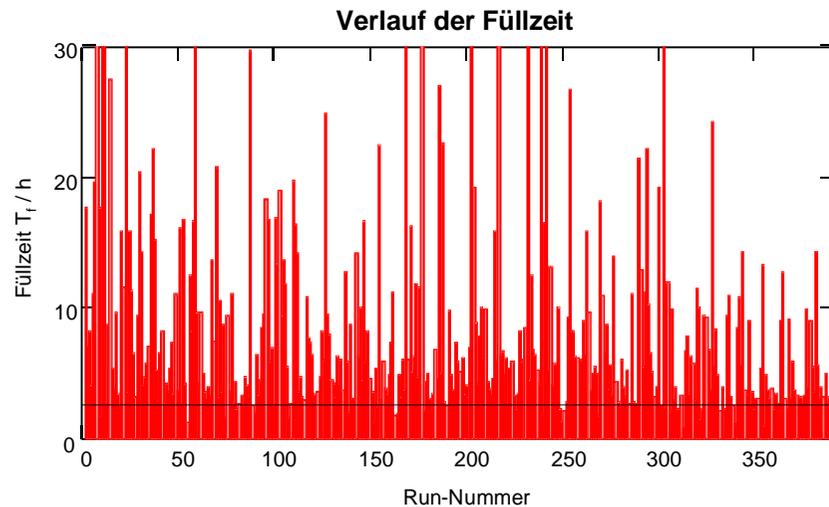
## Lebensdauer mit **Positronen 2004:**

- **Stetiges Anwachsen** der Lebensdauer mit abfallendem Strom (weniger SR  $\Rightarrow$  Druck kleiner)
- Am Ende des Runs **niedrige Lebensdauer** aufgrund Injektion eines **Gases mit hoher Dichte** für ~1 h von HERMES

## Lebensdauer mit **Elektronen 2005:**

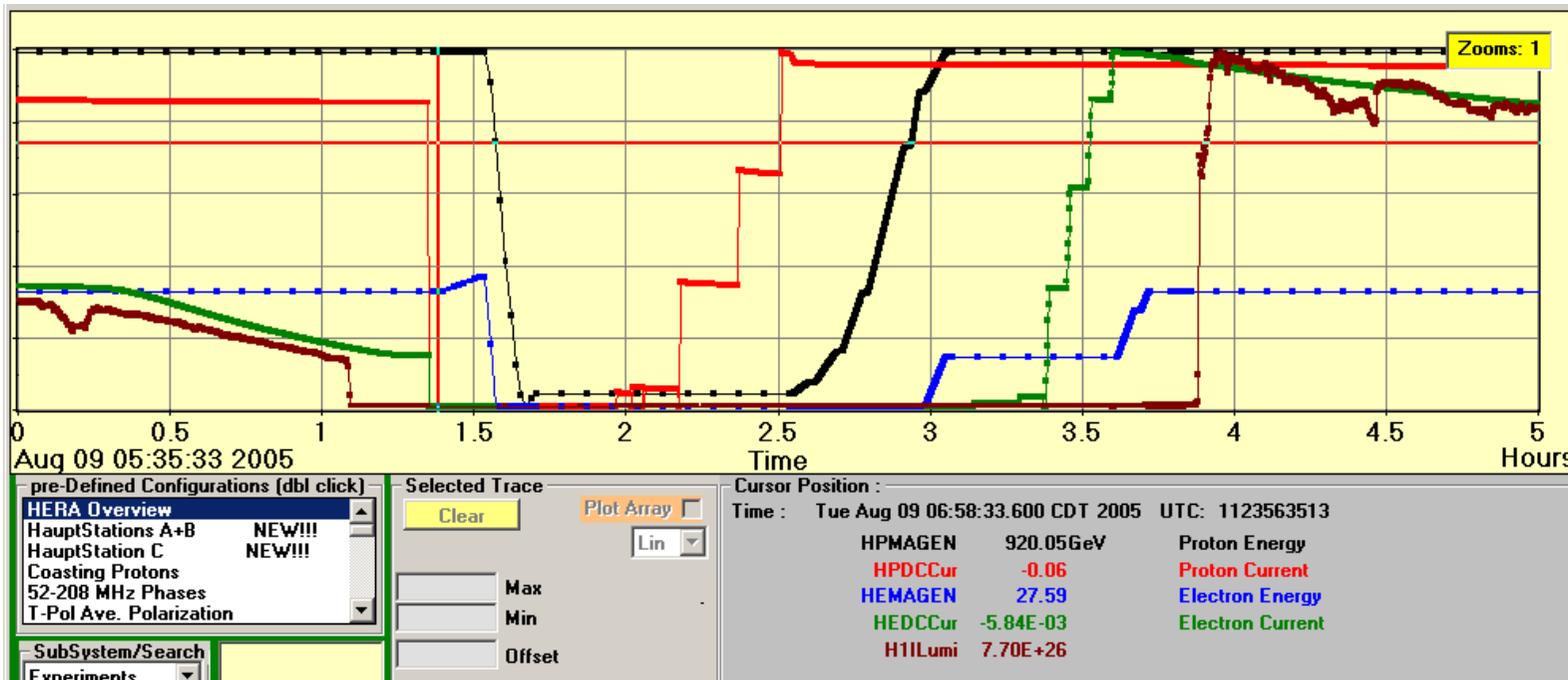
- Ebenfalls Anstieg der Lebensdauer bei abfallendem Strom
- Aber: Viele **kurze Spikes** in der Lebensdauer; häufig **reduzierte Lebensdauer** über mehrere Minuten oder Stunden
- Nicht jeder Lebensdauereinbruch ist Staub!

# Füllzeiten und Run-Zeiten 2005



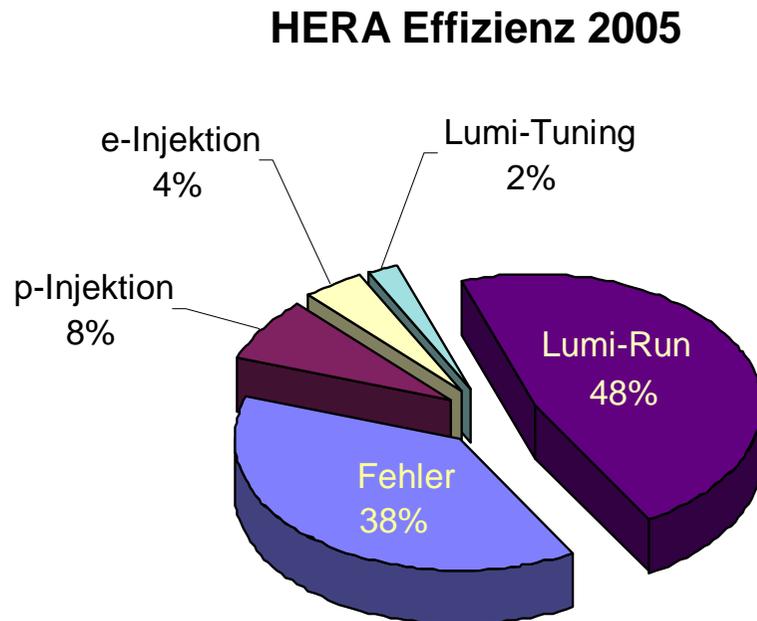
- Die theoretische Füllzeit (=Zeit zwischen Dump und nächstem Lumi-Run) beträgt  $\sim 2\frac{1}{2}$  Stunden:
  - Massage: 30 Min.
  - P-Injektion + p-Rampe: 30+30 Min.
  - E-Injektion + e-Rampe: 20+20 Min.
  - Lumi-File anfahren: 20 Min.
- Nur wenige Runs erreichen diese minimale Dauer!
- Die optimale Run-Dauer sollte 12 h betragen (40 mA  $\rightarrow$  13 mA + High-Density-Run)
- Viele Runs enden vorzeitig
- Ursachen für kurze Run-Dauer: Entweder Ende durch Ausfall einer Komponente oder niedrige Lebensdauer!

# Minimale Zeit zwischen Dump und Lumi-Run



2.5 Stunden Minimalzeit

# Effizienz des Betriebs 2005

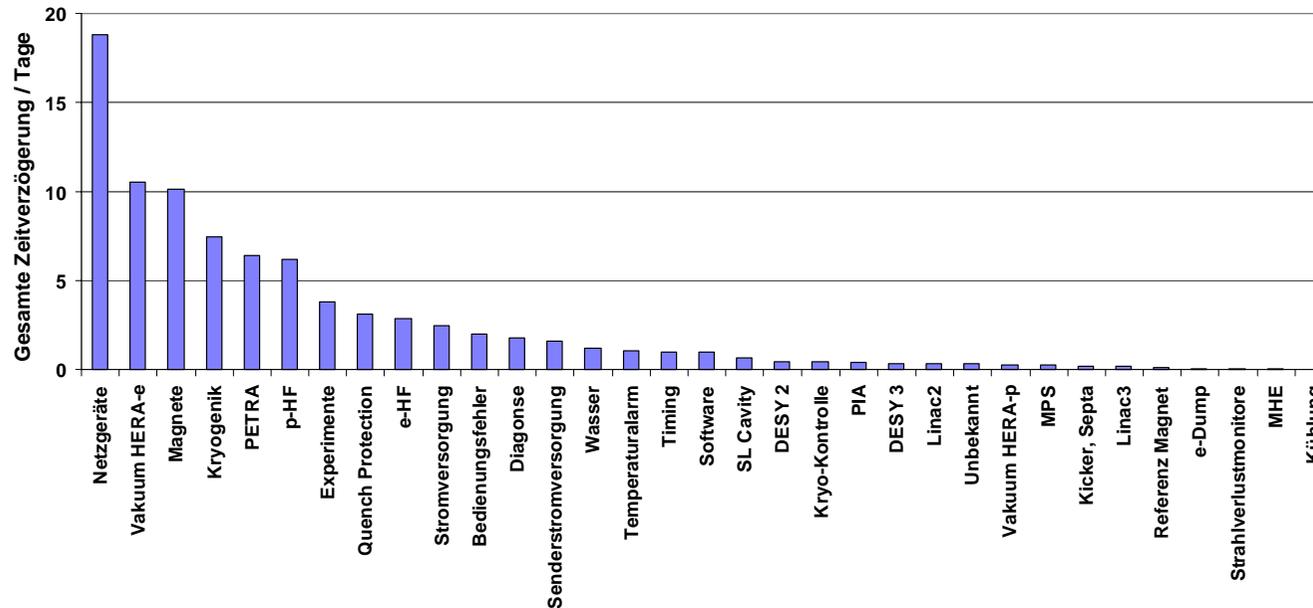


Maschinenschichten, Kalibration der Experimente und Wartungstage wurden nicht gezählt

## Zahlen für 2005:

- Zeitverlust pro Fehler : 2.4 h
- Zahl der Fehler/Tag : 2.8
- Zahl der Fehler/Run : 2.4
- Verlorene Zeit/Tag : 6.8 h
- Zahl der e-Injektionen/Run : 1.6
- Zahl der p-Injektionen/Run : 1.6
- Dauer der p-Injektion : 1.4 h
- Dauer der e-Injektion : 0.82 h
- Dauer eines Lumi-Runs : 8.65 h
- Vom Dump zum Lumi-Run : 9.2 h

# Verteilung der Fehler 2005

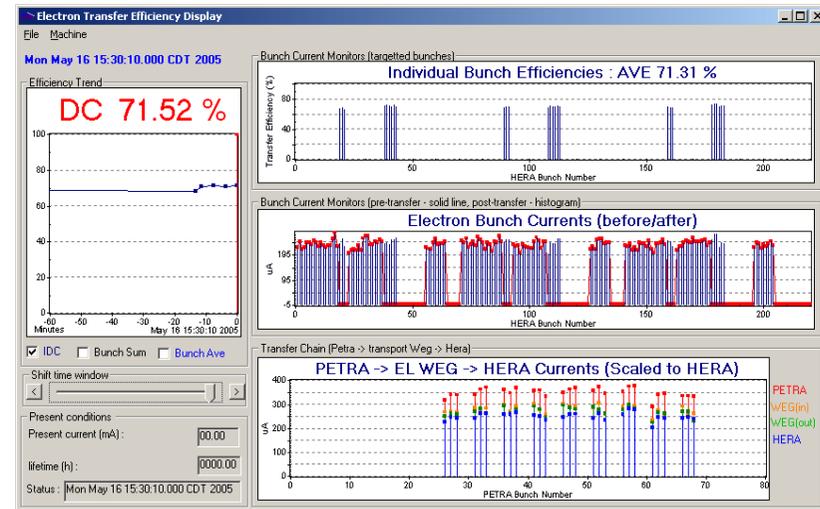


## Verlorene Zeit wird dominiert von...

1. Netzgeräten ⇨ 'GA08 N' etc.
2. Vakuumlecks ⇨ 'GN NR13', Rotatorsektionen,...
3. Kälteanlage ⇨ p-Ring wurde aufgewärmt
4. Magnete ⇨ Spulen 'GN NL20', 'GN NL23', 'BU SR'
5. PETRA ⇨ Strahlverluste & Aufplatzen der Emittanz

# Verbesserte e-Transfer-Effizienz

- Transfer-Effizienz des EI-Wegs betrug 2004 manchmal nur **30-40%** und war **nicht-reproduzierbar!**
- Verbesserungsmaßnahmen:
  - Neue **angepasste EI-Weg-Optik**
  - Sechs BPMs** eingebaut (2004)
  - Vermessung des EI-Weg**  
⇒ keine groben Fehler
  - Messung der Response Matrix  
⇒ **große Abweichung der Optik**
  - Magnetfeldmessung des EI-Weg-Quadrupols  
⇒ **Kalibrationsfehler von 2%**



Jetzt:

- Typische Transfer-Effizienz **70–80 %** und **stabiler** als vorher
- Daher: **schnellere Füllung** und **weniger Strahlung** während Injektion
- Fehlende 20%: PETRA-Extraktion

# Zusammenfassung

---

- Das Jahr 2005 war ein **Rekordjahr** für HERA: Die **integrierte Luminosität** mit Elektronen von  $214 \text{ pb}^{-1}$  ist mehr als ein **Faktor zwei größer als im Vorjahr** mit  $92 \text{ pb}^{-1}$
- Der Elektronenstrom erreichte in 2005 nur etwa 40 mA. **Vakuump Probleme** und **technische Ausfälle** verhinderten die kontinuierliche Erhöhung
- Die **Polarisation** der kollidierenden Bunche betrug  $\leq 45\%$  am Run-Ende (Beam-Beam-Effekt)
- Die alternativen Tunes im Mai/Juni ergaben **höhere Polarisation** aber **niedrigerer spezifische Luminosität**; die Experimente bevorzugten die alten Tunes
- **p-Background** und **p-Spikes** waren problematisch, bis ihre Ursachen behoben wurden. Dies kostete einen relativ großen Anteil an für die Experimente verwendbare Luminosität
- Die **Elektronen-Lebensdauer-Probleme** sind in der Häufigkeit, mit der sie zur Zeit auftreten störend, aber unkritisch für den Betrieb