

# Speicherringanlage HERA

## Übersicht über das Betriebsjahr

Die guten Ergebnisse des Elektron-Proton Kollisionsbetriebes von HERA in 2005 wurden zu Anfang des Betriebsjahres 2006 noch übertroffen. In der Winterbetriebspause 2005/2006 wurden noch eine Reihe von Verbesserungsmaßnahmen durchgeführt. Der Betrieb wurde am 14. Februar wiederaufgenommen. Unmittelbar nach dem Wiederanlauf wurden sofort Spitzenwerte sowohl der Luminosität als auch der Effizienz und Zuverlässigkeit des Betriebes erzielt. Der Elektron-Proton Kollisionsbetrieb wurde am 23. Juni 2006 beendet. Insgesamt wurde im Zeitraum von Mitte Februar bis Ende Juni 2006 eine Luminosität von  $90 \text{ pb}^{-1}$  bereitgestellt.

Zwischen Ende Juni und Mitte Juli 2006 wurde HERA wieder auf Kollisionsbetrieb von Positronen mit Protonen umgestellt und bis zum Jahresende in diesem Modus betrieben. Dabei wurde für die Experimente ZEUS und H1 eine Luminosität von jeweils ca.  $118 \text{ pb}^{-1}$  erzeugt. Die hohe Spitzenluminosität des Elektron-Proton Betriebes wurde mit Positronen nicht ganz erreicht. Zum Ausgleich ergaben sich für alle Experimente im Allgemeinen sehr gute Bedingungen für die Datennahme mit guten Untergrundbedingungen und hoher Betriebseffizienz. Die Betriebszeiten in 2006 sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

## Betriebspause

### November 2005 – Februar 2006

Die Betriebspause im Winter 2005/2006 war notwendig, um die vorgeschriebenen Prüfungen der Personenschutzanlagen am Gesamtbeschleunigerkomplex von DESY durchzuführen. Diese Zeit wurde für eine Reihe von Verbesserungsmaßnahmen bei HERA genutzt, in deren Zentrum, wie berichtet, der Austausch aller noch verbliebenen Magnetspulen des Typs BU stand. Ferner wurde ein longitudinales Strahldämpfungssystem (siehe hierzu den Bericht der Gruppe MSK) für Protonen installiert, welches während des Wiederanlaufs mit Strahl im Februar 2006 erfolgreich in Betrieb genommen wurde.

## Ergebnis des Elektron-Proton Luminositätsbetriebs

Der Kollisionsbetrieb mit Elektronen zeichnete sich wie im Vorjahr, durch eine hohe, die Erwartung übersteigende, spezifische Luminosität von  $\mathcal{L}_{\text{sp}} > 2 \cdot 10^{30} \text{ mA}^{-2} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  aus. Somit konnten hohe absolute Werte der Luminosität von  $\mathcal{L} > 4 \cdot 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  trotz

1. Jan. – 10. Feb.	Winterbetriebspause mit Verbesserungsarbeiten und Wartung in HERA
10. Feb. – 18. Feb.	Wiederaufnahme des Strahlbetriebs und Beschleunigerstudien
18. Feb. – 26. Jun.	Elektron-Proton Kollisionsbetrieb für H1 und ZEUS, Elektronenbetrieb für HERMES
26. Jun. – 3. Jul.	Reparaturen am HERMES- und H1-Detektor, Umstellung auf Positron-Proton Betrieb
3. Jul. – 10. Jul.	Aufsetzen des Positron-Proton Runs
10. Jul. – 31. Dez.	Positron-Proton Kollisionsbetrieb für H1 und ZEUS, Positronenbetrieb für HERMES

Tabelle 5: Übersicht über das HERA Betriebsjahr 2006.

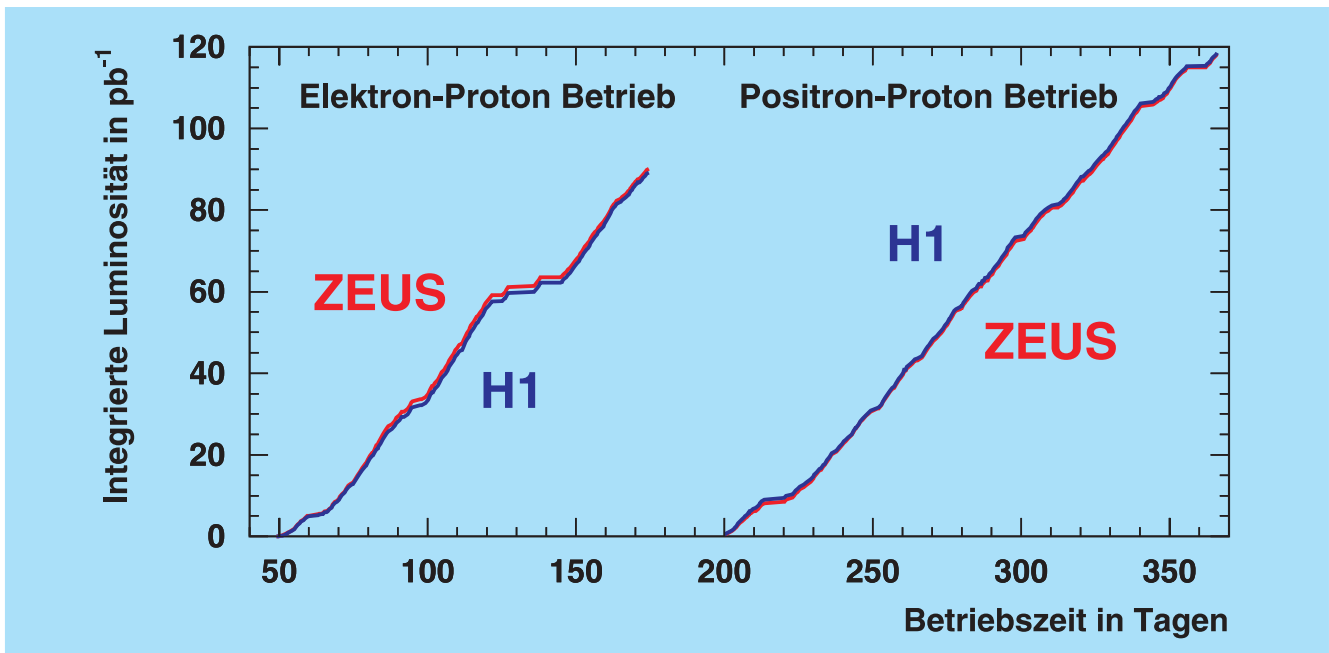


Abbildung 97: Die integrierte Luminosität von HERA in 2006 für Elektron-Proton und Positron-Proton Betrieb.

der Tatsache erreicht werden, dass sich die Elektronenströme nicht wesentlich über 40 mA steigern ließen. Die hohe spezifische Luminosität wird durch eine zusätzliche Verdichtung des Elektronenstrahlkerns an den Wechselwirkungspunkten durch die Wechselwirkung mit dem Protonenstrahl (dynamische Beta-Funktionen) erklärt.

Der größte Teil des Betriebes wurde mit relativ kleinen Elektronenstrahlströmen mit Anfangselektronenströmen von weniger als 40 mA durchgeführt. Zwar ließ sich der Elektronstrom durch regelmäßiges Konditionieren der Beschleunigungsstrukturen mit gepulster Hochfrequenz steigern, jedoch blieben die Ströme deutlich unter den angestrebten Werten von  $> 45$  mA. Die Protonenströme jedoch erreichten neue Rekordwerte von 108 mA dank der guten Optimierung der Proton-Beschleunigungskette. Ab Mitte März wurde die Zahl der Protonenpakete von 150 auf 180 erhöht bei gleichbleibender Luminosität.

Die Kehrseite der hohen Luminosität im Elektron-Proton Kollisionsbetrieb waren im Allgemeinen kritische Untergrundverhältnisse für die Experimente H1

und ZEUS durch den Halo des Protonenstrahls. Dies erforderte kontinuierliches Optimieren während des Betriebes. Die Ausbildung des Protonenhalos wird durch die Fehlanpassung der Strahlprofile durch den oben erwähnten Effekt der Strahl-Strahlwechselwirkung erklärt. Die Toleranz gegenüber Störungen wie Restwelligkeit der Netzgeräte ist im Elektron-Protonbetrieb sehr klein.

Die Betriebseffizienz in der ersten Jahreshälfte von 2006 war mit Werten von 53% gut. Der positive Trend seit dem Wiederanlauf nach der HERA Luminositäts-Erhöhung setzt sich damit auch weiterhin fort. Somit konnte den Experimenten eine integrierte Luminosität von bis zu  $8.5 \text{ pb}^{-1}$  pro Woche geliefert werden. Allerdings litt die zweite Hälfte des Elektron-Proton Runs unter dem Versagen der neuen HERMES Targetkammer. Dies führte zu längeren Unterbrechungen des Betriebes und zusätzlichen Begrenzungen des Elektronenstrahlstroms.

Das Luminositätsergebnis der ersten Jahreshälfte betrug  $90 \text{ pb}^{-1}$  für die Experimente H1 und ZEUS (siehe Abbildung 97).

	Elektron-Proton	Positron-Proton
Proton / Elektron Strahlenergie	920 GeV / 27.6 GeV	920 GeV / 27.6 GeV
Proton / Elektron Strahlströme (Maximalwerte)	108 mA / 41 mA	110 mA / 44 mA
Proton / Elektron horizontale Emittanz	4.1 nm / 27 nm	4.1 nm / 27 nm
Proton / Elektron vertikale Emittanz	4.2 nm / 3 nm	4.2 nm / 3 nm
Spitzenluminosität	$4.9 \cdot 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$4.0 \cdot 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Spezifische Luminosität	$2.4 \cdot 10^{30} \text{ mA}^{-2} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$1.7 \cdot 10^{30} \text{ mA}^{-2} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Integrierte Luminosität	89.2 pb <sup>-1</sup> (H1) 90.1 pb <sup>-1</sup> (ZEUS)	118 pb <sup>-1</sup> (H1, ZEUS)
Angesetzte Betriebszeit (BZ)	3072 h	3747 h
Luminositätsproduktionszeit (ZL)	1638 h	2030 h
Anzahl der Luminositätsläufe	178	216
Betriebseffizienz ZL/BZ	53%	54.2%
Maximaler Longitudinaler Polarisationsgrad	45%	45%

Tabelle 6: Der Luminositätsbetrieb 2006 in Zahlen.

Das größte technische Problem des Beschleunigers in diesem Zeitraum war ein Vakuumleck in einer Kammer des Elektronen-Spinrotators.

Nach Beendigung des Runs mit Elektronen wurde wieder eine Beschädigung einer Photon Auslasskammer in der Wechselwirkungszone Nord festgestellt. Aus diesem Grund wurden der Photonabsorber NR6m wieder in seinen Originalzustand gemäß dem Design des HERA Luminositäts-Erhöhung versetzt<sup>1</sup>, um weitere Beschädigungen in der Zukunft auszuschließen.

## Ergebnis des Positron-Proton Luminositätsbetriebs

Ab 23. Juni 2006 wurde der HERA Betrieb auf Positron-Proton Kollisionen umgestellt. Die eigentliche Umstellung erforderte wie geplant nur wenige Tage. Die Betriebspause für Reparaturarbeiten an den Detektoren H1 und HERMES konnte genutzt werden um eine beschädigte Vakuumkammer des Quadrupol-Magneten

GI-NR7 auszutauschen. Der Anlauf mit Strahl verzögerte sich um weitere vier Tage durch einen Kurzschluss in einer Quadrupolspule am QC28 OL119m. Das Einrichten der Betriebszustände mit Positronen verlief erwartungsgemäß. Für die Strahloptiken von Positronen und Protonen wurde ein Arbeitspunkt der Betastrahlungsfrequenzen unterhalb der ganzen Zahl gewählt, um die Defokussierung des Positronenstrahls durch den Protonenstrahl zu reduzieren. Am 18. Juli konnte der Kollisionsbetrieb wieder aufgenommen werden.

Im Betrieb mit Positron-Proton Kollisionen konnte die gute Luminosität des Elektron-Proton Betriebes nicht ganz erreicht werden (siehe Tabelle 6). Die spezifische Luminosität war gegenüber dem Betrieb mit Elektronen um (15–20)% reduziert. Zwar wurden mit Positronen Strahlströme von 40 mA relativ mühelos erreicht. Eine deutliche Steigerung darüber hinaus ließ sich jedoch aufgrund von Problemen der Hochfrequenzanlagen, zumeist Vakuumproblemen in den Hochfrequenzresonatoren, nicht realisieren.

Zum Ausgleich zeichnete sich der Betrieb mit Positronen durch eine sehr hohe Stabilität und hervorragende Untergrundbedingungen für die Experimente H1 und ZEUS aus, die dadurch die Effizienz ihrer Datennahme bis auf Werte > 90% steigern konnten.

<sup>1</sup>Die Apertur dieser Absorber wurde im Jahre 2002 um mehrere Millimeter vergrößert, da der Verdacht bestand, dass Photonen von diesem Absorber in den Detektor zurückgestreut werden.

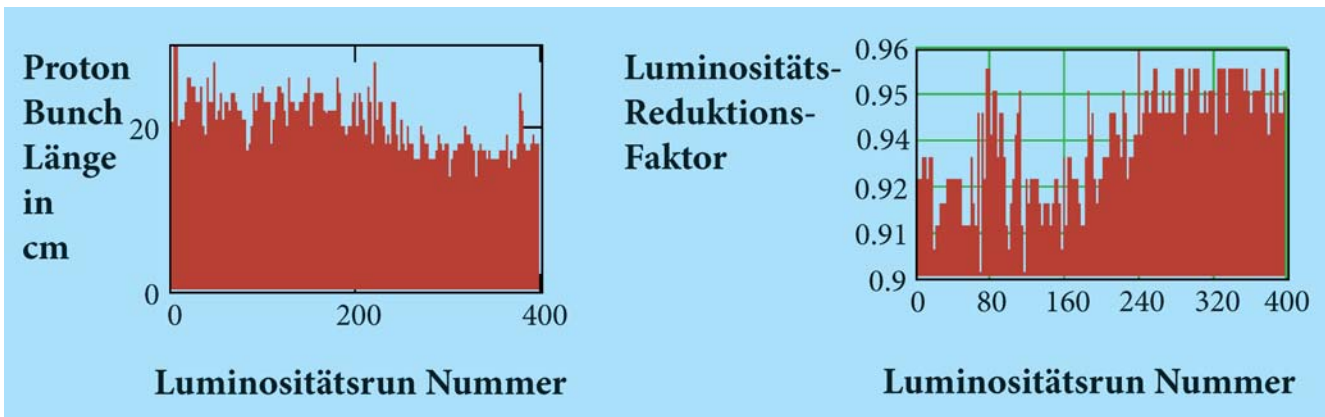


Abbildung 98: Proton-Bunchlänge und die entsprechende (berechnete) Vergrößerung der Luminosität für alle Läufe in 2006.

## Polarisationsbetrieb 2006

Wie in den Vorjahren wurden für den HERA Luminositätsbetrieb longitudinale spin-polarisierte Leptonenstrahlen an den Wechselwirkungspunkten Nord, Süd und Ost bereitgestellt. Sowohl im Elektron-Proton Betrieb als auch im Positron-Proton Betrieb steht hohe Luminosität in Konkurrenz mit maximaler Spinpolarisation. Trotzdem erreichte die Polarisation typischerweise Werte von über 40%.

## HERA Beschleunigerphysik- und Verbesserungsprogramm

### Verkürzung der Proton-Bunchlängen auf die Designwerte

Das in der Winterpause 2005/2006 installierte longitudinale Dämpfungssystem für den Protonenstrahl (siehe Jahresbericht 2005 und den Bericht der Gruppen) wurde während des Wiederanlaufs mit Strahl im Februar 2006 erfolgreich in Betrieb genommen. Mit diesem System konnten die ursprünglich für den HERA Protonenstrahl geplanten Proton-Bunchlängen auf Anrieb erzielt werden. Dieses System, welches zum erfolgreichen Bedämpfen von gekoppelten Bunchschwingungen über den gesamten Strahl-Energiebereich von 40 GeV

bis 920 GeV für jede Energie sorgfältig angepasste Parameter benötigt, wurde mit Hilfe einer intelligenten Steuerung in den komplexen Beschleunigungsprozess des HERA Protonenstrahl integriert und stand etwa ab Mitte des Jahres 2006 im Routinebetrieb zur Verfügung. Es sorgte im Verlaufe des Betriebsjahres für immer kürzere Protonenstrahlpakete. Schließlich wurde eine Verkürzung der RMS-Paketlängen (*half bunch length*) um ca. 30% erreicht. Dadurch wurde nicht nur eine weitere Steigerung der Spitzenluminosität um ca. 4% erzielt, sondern auch die Entstehung von Protonengleichstrom im Luminositätsbetrieb unterdrückt und damit bessere Untergrundbedingungen für die HERA-Experimente H1 und ZEUS geschaffen sowie günstigere Triggerbedingungen herbeigeführt. Die Abbildung 98 zeigt eine Übersicht der anfänglichen Proton-Bunchlängen für alle Protonfüllungen in 2006.

### Strahlparameter für den Luminositätsbetrieb mit Positronen

Die Lepton-Proton Strahl-Strahl-Wechselwirkung, welche zu einer Erhöhung der Dichte des Elektronenstrahls an den Wechselwirkungspunkten führt, bewirkt für vergleichbare Strahlparameter eine Aufweitung des Positronenstrahls am Wechselwirkungspunkt.

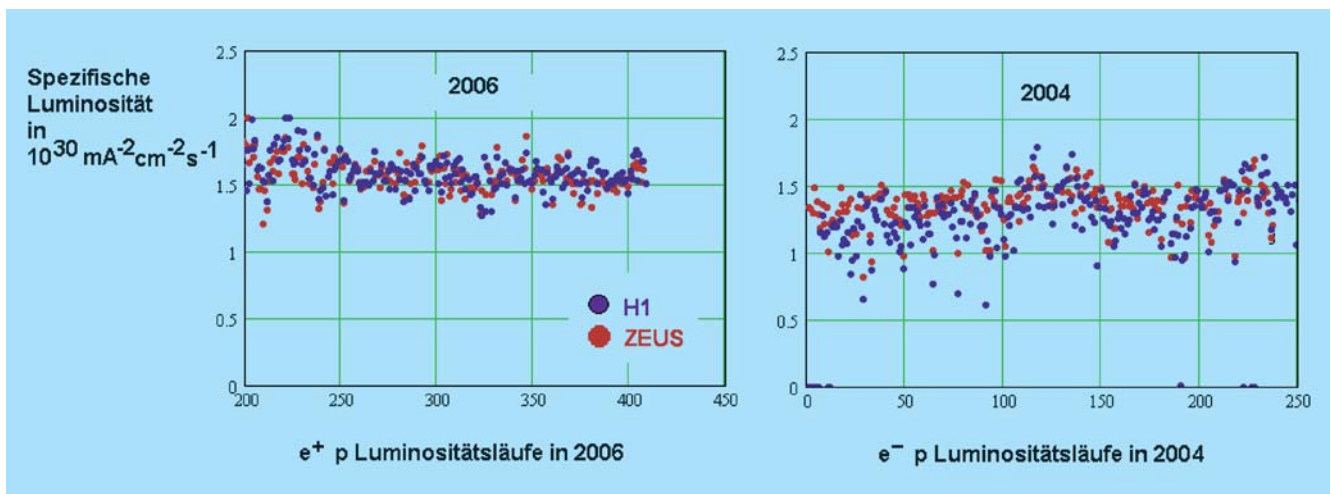


Abbildung 99: Vergleich der Spezifischen Luminositäten für Positron-Proton Kollisionen in HERA der Betriebsjahre 2004 und 2006.

Aus diesem Grund wurden im Betriebsjahr 2004 mit Positronen spezifische Luminositäten von nur  $1.4 \cdot 10^{30} \text{ mA}^{-2} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  erzielt. Im Betrieb mit Positronen im Jahre 2006 wurden deshalb die Arbeitspunkte der vertikalen und horizontalen Betatron-Schwingungen der Teilchen, (betatron tunes  $Q_{x,y}$ ) zwischen 0.5 und 1 gewählt. Damit ergibt sich in linearer Näherung trotz der defokussierenden Wirkung des Protonenstrahls gemäß  $\Delta\beta\nu\beta = 2\pi g \cdot \xi_{x,y} \cdot \cot(2\pi \cdot Q_{x,y})$  ( $\xi$  ist die Strahl-Strahl Betatron Frequenzverschiebung,  $\beta$  ist die Amplitudenfunktion am Wechselwirkungspunkt) eine Verkleinerung der horizontalen und vertikalen Strahlgrößen an den Wechselwirkungspunkten. Damit ließen sich zwar (wegen Effekten höherer Ordnung) nicht die gleichen spezifischen Luminositäten wie mit Elektronen erzielen, jedoch eine deutliche Verbesserung der spezifischen Luminosität von 15% gegenüber den Werten von 2004. Abbildung 99 zeigt den Vergleich der spezifischen Luminosität von Positron-Proton Kollisionen von 2006 mit den Daten von 2004.

## Verbesserungen an den Spinrotatoren

An den drei Lepton-Spinrotatorenpaaren von HERA traten in den Vorjahren, aber auch in 2006, wiederholt schwere Vakuumlecks auf, welche insgesamt einen

erheblichen Beitrag zu dem Verlust von Betriebszeit durch technische Defekte ausmachten. Aus diesem Grund wurde die Synchrotronstrahlungsbelastung des Rotator-Vakuumsystems für alle Bedingungen welche im Luminositätsbetrieb auftreten können neu berechnet. Dabei traten erhebliche Designschwächen zum Vorschein, welche als Ursache für das Auftreten von Vakuumlecks angesehen werden müssen.

Die Synchrotronstrahlungsabsorber vor den Schiebbestücken schützen die Komponenten des Rotatorvakuumsystems nur in unzureichender Weise. Bereits bei kleinen Orbitablagen von einigen Millimetern werden die Schiebbestücke aus Edelstahl von Synchrotronstrahlung extremer Dichte direkt getroffen. Dies führt nicht nur zu einer Beschädigung der Schiebbestücke sondern auch zu extremen Temperaturgradienten von lokal  $> 1000^\circ\text{C}$ , welches hohe mechanische Spannungen im Bereich der Vakuumschweißnähte und das Entstehen von Lecks bewirkt.

Die mit eingelöteten Hochfrequenzschirmungen versehenen Pumpstützen des Vakuumsystems im Rotatorbereich werden durch sogenannte Stichabsorber, welche in die Vakuumkammer eingelötet sind geschützt. Diese besitzen jedoch keine eigene Wasserkühlung sondern werden nur über die Vakuumkammer gekühlt. Wie



die Analyse zeigt beträgt die Belastung der Absorber ca. 800 W und die damit verbundenen Temperaturen steigen mit der vorhandenen Kühlung weit über 500°C. Dies führt ebenfalls zu starken mechanischen Spannungen in der Lötnaht, insbesondere im Falle von plötzlicher Änderung der Belastung (z. B. durch Strahlverlust).

Die folgenden Maßnahmen wurden im Berichtszeitraum realisiert, um die Wahrscheinlichkeit von weiteren Vakuumleckagen im Rotatorbereich zu reduzieren:

- Die Rotatormagnete werden in der vertikalen Ebene um bis zu 5 mm mechanisch fehl-aufgestellt, um die Wahrscheinlichkeit, dass das Synchrotronlicht die vorgesehenen Absorber verfehlt, zu reduzieren.
- Die Stichabsorber vor den Pumpstützen erhielten eine eigene Wasserkühlung, die ausreicht, um eine Überhitzung zu vermeiden.
- Der Leptonenstrahl wird vor dem Dump auf 23 GeV entschleunigt, um schnelle zeitliche Änderungen der Synchrotronstrahlungslast und damit verbundene starke mechanische Spannungen zu vermeiden.

### Schnelle Orbitregelung

Im Berichtszeitraum wurde eine schnelle Strahlregelung eingerichtet und erfolgreich getestet. Der geschlossene Orbit des HERA Leptonenstrahls leidet insbesondere in der horizontalen Ebene unter Schwankungen von bis zu 300  $\mu\text{m}$  (gemessen im Bogen). Dies entspricht ca. 30% der Strahlbreite. Eine Fourieranalyse der gemessenen Orbitwerte zeigt, dass der größte Teil der Schwingungen sich auf Frequenzen unterhalb von 20 Hz beschränkt und oberhalb dieses Bereichs nur kleinere Amplituden um 50 Hz und 100 Hz sichtbar sind. Diese Schwingungen führen zu einer Reduktion der Luminosität und zu verstärkter Halobildung des Protonstrahls durch die mit den Orbitenschwankungen am Wechselwirkungspunkt verbundene Modulation der Betatron Frequenzen. Aus diesem Grunde wurde eine

schnelle Lageregelung entwickelt, um die Schwingungen im Frequenzbereich bis ca. 20 Hz zu dämpfen. Die Elemente dieses Systems umfassen:

- 16 Luftspulen, welche um die kupfernen, mit massiven Wasserkühlkanälen versehenen Vakuumkammern installiert wurden,
- 16 Strahllagemonitore, welche über einen schnellen Datenbus (4 kHz Datenfrequenz) ausgelesen werden, so dass alle 16 Lagemonitorwerte mit einer Rate von ca. 800 Hz zur Verfügung stehen,
- Ansteuereinheiten für die Luftspulen mit einer maximalen Spannung von 10 V und einem Maximalstrom von 3 A bei einer Bandbreite von 50 Hz,
- ein PC gestütztes Datenverarbeitungssystem, welches die Datenaquisition steuert und das digitale Filtersystem beinhaltet.

Dieses System erlaubt sowohl globale Orbitkorrekturen als auch lokale Orbitstabilisierung an den Wechselwirkungspunkten. Das System wurde im Spätherbst 2006 erfolgreich getestet. Die Abbildungen 100 und 101 zeigen den zeitlichen Verlauf der Orbitenschwingungen an einem der Wechselwirkungspunkte und die entsprechende schnelle Fourier-Transformation der Daten ohne (Abbildung 100) und mit Strahlstabilisierung (Abbildung 101). Die Schwingungen im Bereich unter 20 Hz werden um den Faktor drei unterdrückt. Es ist geplant, das System im Betriebsjahr 2007 routinemäßig zum Einsatz zu bringen.

### Betriebseffizienz 2006

Im Berichtszeitraum wurden keine neuen größeren Maßnahmen zur Verbesserung der Betriebseffizienz getroffen. Die in den vergangenen Jahren eingeführten Prozeduren und Methoden wurden jedoch weitergeführt und teilweise verfeinert. Insbesondere wurde

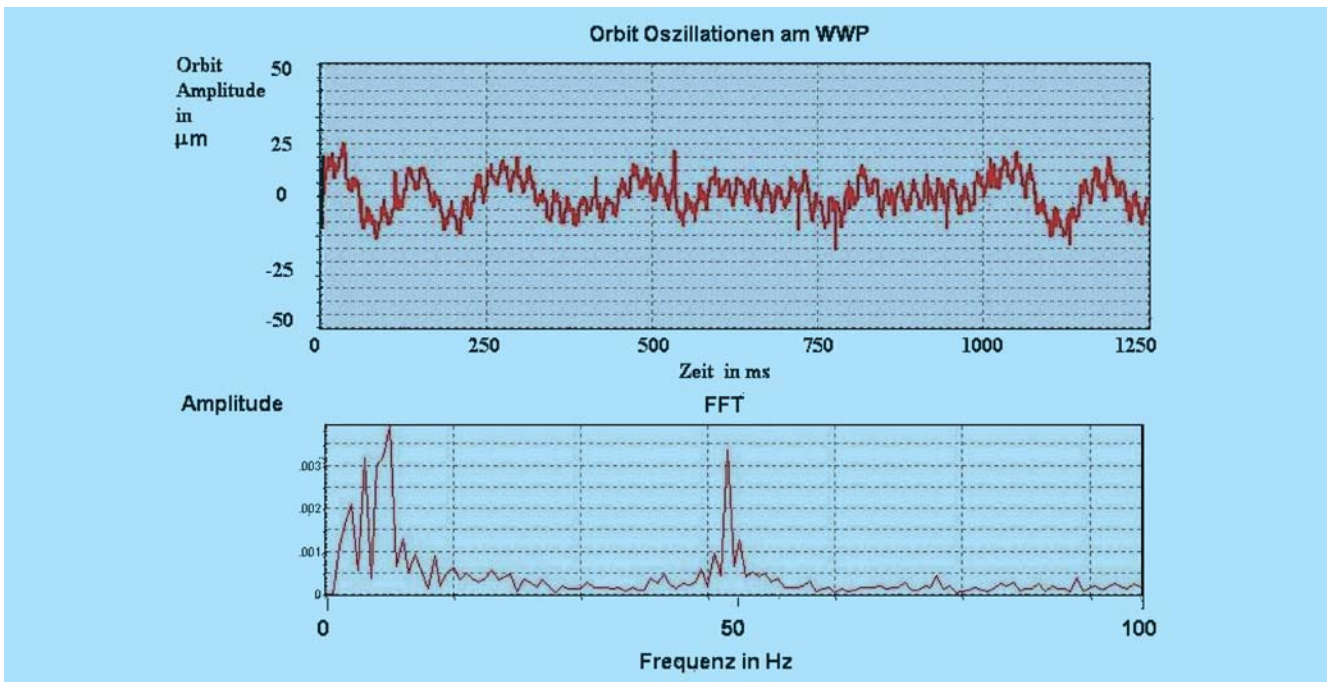


Abbildung 100: *Orbitschwingungen am Wechselwirkungspunkt (WWP) Süd und die Fourier-Transformation (FFT) der Messwerte ohne Lageregelung.*

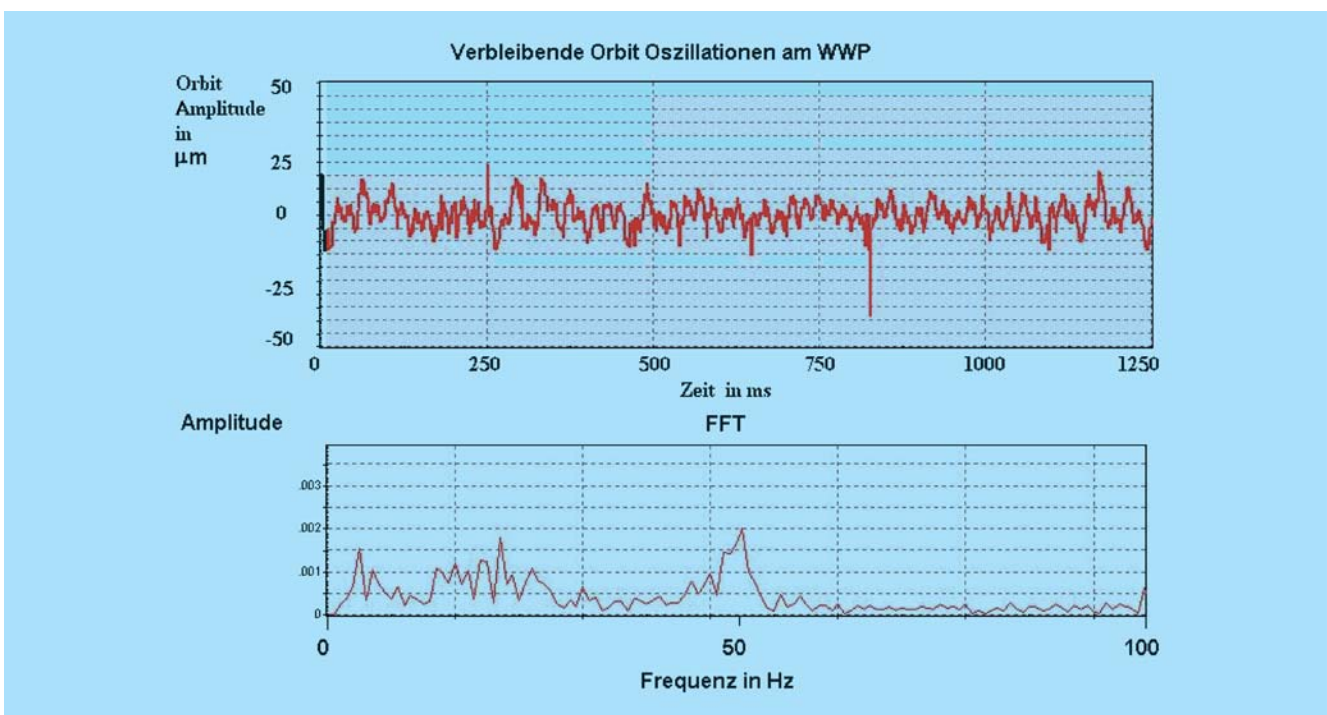


Abbildung 101: *Orbitschwingungen am WWP und zugehörige FFT mit eingeschalteter Lageregelung.*

das System der Stromversorgungsgeräte weiterhin einer regelmäßigen Überprüfung unterzogen.

Dies führte zu einer ausgezeichneten Verfügbarkeit der HERA-Anlage. Der Anteil der Zeit mit Luminositätsproduktion war mit 43.2% nur geringfügig größer als im vergangenen Jahr, bedingt durch den Zeitaufwand für den Anlauf nach den Betriebspausen und die Zeit für die Umstellung von Elektron-Proton auf Positron-Proton Betrieb. Dies erforderte einen Anteil von 7% der Zeit in 2006. Der Anteil von technischen Ausfällen an der Gesamtzeit ging etwa um den gleichen Betrag zurück. Fernerhin wurden die erforderlichen Zeiten für Injektion, Beschleunigung und Einstellung guter Luminositätsbedingungen noch um einige Prozentpunkte verringert. Die Effizienz des Betriebes, die Zeit im Luminositätslauf dividiert durch die insgesamt dafür angesetzte Zeit (inklusive Injektion, Beschleunigung und Einstellung) betrug 2006 zum ersten Mal seit dem Jahr 2000 mit 53% wieder mehr als 50%. Die Abbildung 102 zeigt die Verteilung der Zeit auf die einzelnen Betriebszustände.

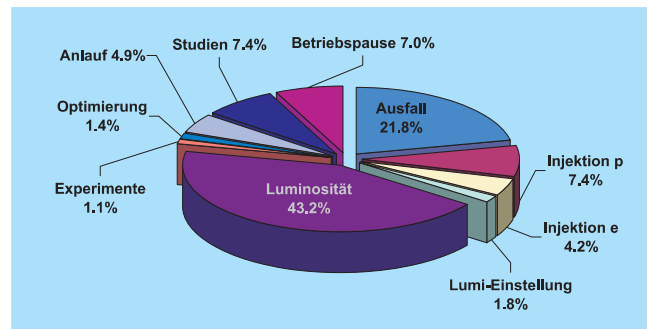


Abbildung 102: HERA Betriebsstatistik 2006: Die Zeit mit Kollisionen der beiden Strahlen nimmt den größten Raum ein (43.2%) gefolgt von Betriebsunterbrechungen durch technische Fehler, deren Beseitigung und dem darauf folgenden Wiederanlauf des Betriebs (21.8%). Die notwendigen Zeiten für Injektion und Beschleunigung und Einstellen der Luminosität der Strahlen hat sich weiter verringert (11.6%). Für Anlauf und Maschinenentwicklung wurden 12.3% der Zeit eingesetzt. Die Experimente benötigten 1.1% der Betriebszeit für Kalibration und Behebung von Problemen. Für Wartungsarbeiten wurden 7% benötigt.