

# Speicherringanlage HERA

## Übersicht über das HERA Betriebsjahr 2004

Das HERA Betriebsjahr 2004 war das Jahr mit den bisher besten Betriebsergebnissen. Die akkumulierte Luminosität der Proton-Positron Kollisionen für die Experimente H1 und ZEUS mit der Protonenenergie von 920 GeV und der Positronenenergie von 27.5 GeV betrug  $92 \text{ pb}^{-1}$  (siehe Abbildung 110). Der Luminositätsbetrieb erstreckte sich von Januar bis Anfang August (siehe Tab. 2). Nach einer kurzen Beschleunigerstudienzeit schloss sich eine zweimonatige Betriebsunterbrechung an, welche genutzt wurde, defekte Magnetspulen im HERA Protonenring auszutauschen und um die obligatorische jährliche Prüfung des Personensicherheitssystems durchzuführen.

Ab Mitte Oktober wurde der Strahlbetrieb parallel zur technischen Inbetriebnahme wieder aufgenommen. Anschließend, ab 2. November, wurden die Strahlführungselemente auf Protonen-Elektronen Betrieb umgestellt. Dies erforderte eine Verschiebung der Magnete in den Wechselwirkungszonen um mehrere Millimeter. Während einer

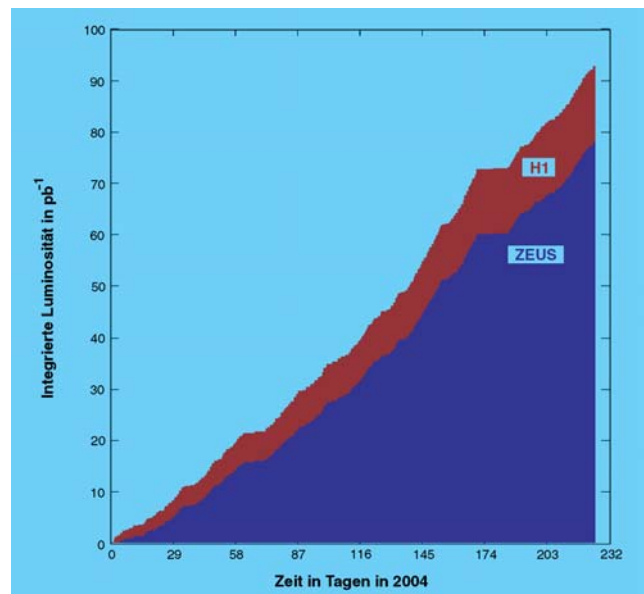


Abbildung 110: Die integrierte Luminosität von HERA in 2004.

dreiwöchigen Beschleunigerstudienperiode wurde HERA in der Proton-Elektron Konfiguration auf den Luminositätsbetrieb vorbereitet. Der Luminositätsbetrieb wurde am 1. Dezember wieder aufgenommen.

01. Januar	– 16. August	Luminositätsbetrieb mit Protonen und Positronen
16. August	– 15. Oktober	Betriebspause, Reparaturen und Tests
15. Oktober	– 31. Oktober	Wiederinbetriebnahme
02. November	– 30. November	Umstellung auf Proton-Elektronenbetrieb
01. Dezember	– 22. Dezember	Luminositätsbetrieb mit Protonen und Elektronen
23. Dezember	– 27. Dezember	Betriebspause
27. Dezember	– 31. Dezember	Luminositätsbetrieb mit Protonen und Elektronen

Tabelle 2: Übersicht über das HERA Betriebsjahr 2004.

## Ergebnis des Positronen-Protonen Luminositätsbetriebs

Am Anfang des Luminositätsbetriebs, im Januar 2004, waren die Strahlintensitäten noch durch die Untergrundbedingungen für den H1 Detektor begrenzt. Die beiden Ringe wurden deshalb im Januar noch mit 120 Protonen-Teilchenpaketen und 126 Positron-Teilchenpaketen betrieben. Ab Februar jedoch stellte dies keine Begrenzung mehr dar. Der Luminositätsbetrieb wurde mit 180 Teilchenpaketen fortgesetzt. Die Protonenintensität betrug etwa 100 mA im Berichtszeitraum. Das entspricht  $7.3 \cdot 10^{10}$  Protonen pro Teilchenpaket und entspricht den von den Vorbeschleunigern gelieferten Maximalstromstärken. Die Intensität der Positronen konnte bis Mitte Juni auf 48 mA ( $3.5 \cdot 10^{10}$  Positronen pro Teilchenpaket) gesteigert werden und erreichte damit die Werte, die als Ziel in 2004 gesteckt waren. Mit den in 2004 benötigten Hochfrequenzparametern, der erforderlichen Beschleunigungsspannung von 130 MV und der maximal zur Verfügung stehenden Hochfrequenzleistung von 12 MW (nominal) beträgt die maximale Stromstärke, die noch zuverlässig bei 27.5 GeV gespeichert werden kann, ca. 58 mA. Die Spitzenluminosität am Anfang eines Luminositätslaufes betrug maximal  $L_{\text{peak}} = 3.8 \cdot 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Die integrierte Luminosität (gemessen vom Experiment H1) erreichte  $\int L dt = 92 \text{ pb}^{-1}$ . Sie blieb damit wegen einer Leckage des Vakuumsystems am Experiment NR am 16. Juni etwas hinter den Erwartungen zurück. Nach diesem Ereignis konnten die Spitzenstrahlströme wegen Begrenzungen durch die Untergrundzählrate in H1 nicht mehr erreicht werden.

Die Produktionsrate der Luminosität betrug in der ersten Junihälfte  $0.8 \text{ pb}^{-1}$  pro Tag. Im Jahresmittel wurden jedoch lediglich  $0.4 \text{ pb}^{-1}$  pro Tag erreicht. Dies lag an der relativ geringen Verfügbarkeit der Beschleunigerkomponenten von nur ca. 78%. Die dadurch verursachten häufigen Strahlverluste ergaben nur eine Effizienz des Luminositätsbetriebs von 40% (siehe Abbildung 111). In den vergangenen Jahren wurden bis zu 60% erreicht. Insgesamt wurden 235-mal Strahlen für Luminosität zur Kollision gebracht. Die mittlere Laufzeit betrug 7.5 h bei einer nominalen geplanten Laufzeit von im Mittel 15 h. Insgesamt wurden 446-mal Protonen injiziert und beschleunigt. Die Zahl der Positronenzyklen betrug 388.

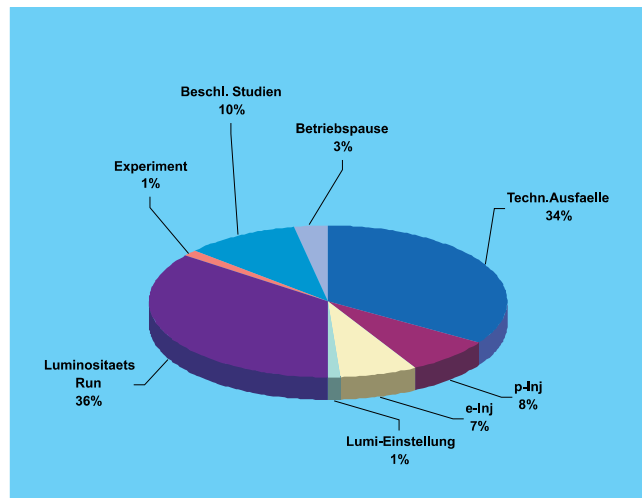


Abbildung 111: HERA Betriebsstatistik 2004.

Die Positronenstrahlen in HERA sind longitudinal polarisiert in allen drei Experimenten. Der Polarisationsgrad erreichte 50% und liegt damit erwartungsgemäß etwas unter den Werten, die vor dem Einbau der beiden zusätzlichen Rotatorpaare erreicht wurden. Die Polarisationsrichtung in den Wechselwirkungszonen wurde insgesamt dreimal gewechselt. In der Polarisationsrichtung mit positiver Helizität wurden nur Polarisationswerte von 40% erreicht (Abbildung 112). Die Daten dieses Kapitels sind in Tab. 3 zusammengefasst.

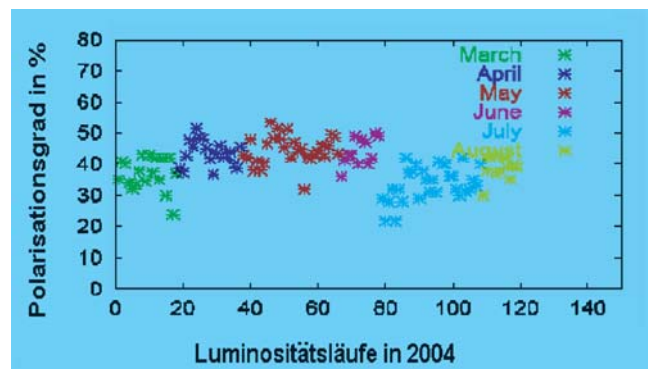


Abbildung 112: Maximal erreichter Polarisationsgrad für die Proton-Positron Luminositätsläufe in 2004. In den Monaten Januar bis März sowie Juni, Juli und August war die Helizität positiv, in den Monaten April und Mai war die Helizität negativ.

Proton / Positron Strahlenergie	920 GeV / 27.6 GeV
Proton / Positron Strahlströme (Maximalwerte)	106 mA / 48 mA
Proton / Positron horizontale Emittanz	5.6 nm / 27 nm
Proton / Positron vertikale Emittanz	5.6 nm / 3 nm
Spitzenluminosität	$3.8 \cdot 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Spezifische Luminosität	$1.5 \cdot 10^{30} \text{ mA}^{-2} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Integrierte Luminosität	92.7 pb <sup>-1</sup> (H1)
Angesetzte Betriebszeit (BZ)	4058 h
Luminositätsproduktionszeit (ZL)	1703 h
Anzahl der Luminositätsläufe	235
Betriebseffizienz ZL/BZ	42%
Maximaler Longitudinaler Polarisationsgrad	50%

Tabelle 3: Der Proton-Positron Luminositätsbetrieb 2004 in Zahlen.

## Beschleunigerphysikalische Gesichtspunkte und Begrenzungen

Die spezifische Luminosität des Proton-Positronenbetriebs wurde durch eine Reihe von Maßnahmen, wie dezidierte Strahl-optikverbesserungen und Kompensation von Störungen optimiert. Die dazu notwendigen Verfahren wurden weiter entwickelt und verfeinert. Die spezifische Luminosität blieb mit etwa  $L_{\text{spec}} = 1.5 \cdot 10^{30} \text{ mA}^{-2} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  um ca. 22% hinter den Idealwerten von  $L_{\text{spec}} = 1.9 \cdot 10^{30} \text{ mA}^{-2} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  zurück. Die Reduktion der spezifischen Luminosität ist auf eine Reihe von Effekten zurück zu führen, die alle recht gut verstanden und quantifiziert worden sind und für die teilweise Abhilfe in die Wege geleitet wurde. Die wichtigsten Effekte sind:

- Aufweitung der Protonenstrahlemittanz durch starke Strahl-Strahlwechselwirkung mit den Positronen.
- Reduktion der effektiven Amplitudenfunktion am Wechselwirkungspunkt durch lange Protonenpakete („hour glass effect“). Dies ist auf gekoppelte longitudinale selbstgetriebene Schwingungen der Protonenpakete (multibunch instabilities) zurück zu führen. Abhilfe wird ein longitudinales Dämpfungssystem schaffen.
- Reststörung der Positronen Strahl-optik durch Strahl-Strahl Fokussierung. Dieser Effekt ist in linearer Näherung kompensiert. Es bleibt eine Störung höherer Ordnung (beam beam beta beat).

- Aufweitung der Positronenstrahlemittanz durch starke Strahl-Strahlwechselwirkung mit den Protonen sowie durch eine Verschiebung der erforderlichen Hochfrequenz gegenüber dem Betriebswert um 70 Hz. Abhilfe: alternativer Arbeitspunkt, Optimierung der Hochfrequenzparameter.

Die Abbildung 113 verdeutlicht die Größe der Effekte. Dargestellt ist ein Vergleich der gemessenen spezifischen Luminosität für alle Luminositätsläufe in 2004 (schwarze Balken) mit der aus den gemessenen Strahl-

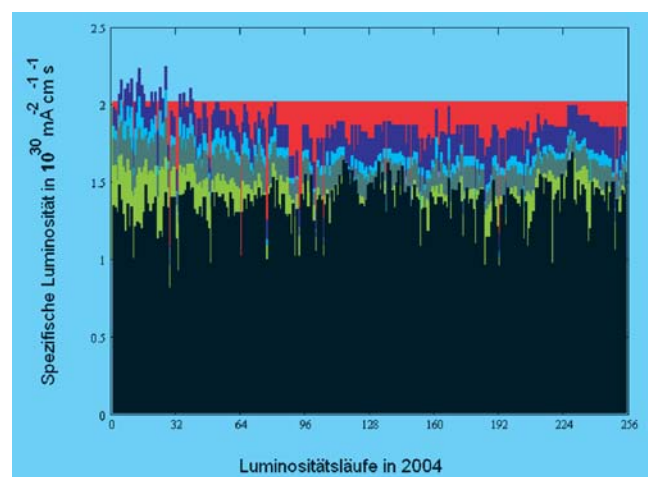


Abbildung 113: Vergleich von gemessener spezifischer Luminosität (schwarze Balken) mit der Berechnung aus den gemessenen Strahlparametern unter Berücksichtigung verschiedener Effekte (siehe Text).

parametern berechneten spezifischen Luminosität unter Berücksichtigung der oben angeführten Effekte. Ausgehend von einer idealen spezifischen Luminosität werden dabei nach und nach die Aufweitung der Proton Emittanz, der hour-glass Effekt, die Reststörung der Optik durch Strahl-Strahlwechselwirkung sowie das Aufweiten der Positronenemittanz durch Strahl-Strahlwechselwirkung berücksichtigt. Werden alle Effekte berücksichtigt, ist der Unterschied zur gemessenen spezifischen Luminosität sehr klein. Man erkennt, wie sich im Laufe der Anfangszeit die spezifische Luminosität verbessert hat und sich gleichzeitig das Modell an die Messwerte angenähert hat. Die Schlussfolgerung ist, dass die spezifische Luminosität sehr gut verstanden ist und damit weitere Steigerungen möglich sind.

Die relative Bedeutung dieser Effekte für alle Positron-Proton Luminositätsläufe in 2004 ist in Abbildung 113 dargestellt. Es ist erkennbar, dass das Modell unter Berücksichtigung aller bekannten Effekte sehr gut durch die Messung von H1 bestätigt wird.

## Technische Probleme und Verbesserungsmaßnahmen

Eine Reihe von technischen Problemen hatte die Datenproduktion in HERA teilweise verhindert und sich nachteilig auf die Betriebseffizienz ausgewirkt. Verbesserungen an diesen Systemen wurden zum Teil noch im Berichtszeitraum geplant, durchgeführt und getestet.

Dazu gehört in erster Line eine Modifikation des Vakuumsystems in der Wechselwirkungszone Nord. Hier wurden kritische Flanschverbindungen der Vakuumkammer durch geschweißte Verbindungen ersetzt, nachdem es wiederholt zu Vakuumleckagen in diesem Bereich gekommen war. Diese haben einen großen Anteil am Verlust von Betriebszeit und Betriebseffizienz und bewirkten eine Limitierung der Strahlintensitäten. Die Synchrotronstrahlungsabsorber im Oktanten NR bei 11 m wurden verbessert, um die nachfolgenden Strahlrohre besser vor Erwärmung zu schützen. An einigen Strahlrohrabschnitten wurde die Kühlung verbessert. Außerdem wurden Strahlrohrsysteme in der Wechselwirkungszone, bei denen es zu starken Erwärmungen durch Synchrotronstrahlung gekommen war, durch ein Temperaturinterlocksystem geschützt. (Siehe dazu auch Bericht der Gruppe MVA)

Das Protonenhochfrequenzsystem ist ein weiteres System, welches zu Verlusten von Betriebszeiten und schlechten Bedingungen für die Datennahme geführt hat. Ein defektes Kabel blieb für einen längeren Zeitraum unentdeckt. Dies führte zu einem erhöhten Hochfrequenzrauschniveau. Die Folge davon war ein großer Anteil von Protonengleichstrom, welcher zu sehr schlechten Untergrundbedingungen für die Experimente führt. Um solchen Problemen besser vorbeugen zu können, wurde die verantwortliche Gruppe personell unterstützt.

Ein nicht unwesentlicher Faktor in der Betriebseffizienz ist die Bedienung der Maschine. Am Anfang des Betriebsjahrs ging noch viel Betriebszeit aufgrund von Bedienungsfehlern verloren. Deshalb wurde die Information und Schulung der Betriebsmannschaft intensiviert. Die Rechnerprogramme für die Beschleunigerbedienung werden laufend verbessert. Insbesondere wird die Automation der Bedienung kontinuierlich vorangetrieben. Siehe dazu auch den Bericht der Gruppe MST.

Zur Verbesserung der longitudinalen Stabilität des Protonenstrahls in HERA wurden die existierenden Dämpfungssysteme optimiert und verbessert. Außerdem wurde das Projekt eines breitbandigen longitudinalen Dämpfungssystems für den Protonenstrahl auf den Weg gebracht.

An den 500 MHz Senderanlagen wurde an der Verbesserung des Senderschutzes gearbeitet, um fehlerhaften Abschaltungen durch Fehlmessungen besser vorzubeugen. (Siehe dazu auch den Bericht der Gruppen MKK und MHF-e).

Ein aufwendiges Programm zum Austausch aller Magnetspulen vom Typ BU wurde im Berichtszeitraum in Angriff genommen. Die Magnete vom Typ BU sind normaleitende vertikal ablenkende Dipolmagnete des Protonenrings. Die Magnete sind 5 m lang. Die Spulen sind aus Kupfer und sind mit Wasser gekühlt. Eine Dipolspulenhälfte hat ein Gewicht von 2 T. Alle bisher untersuchten Spulen dieses Typs haben Wasserlecks entwickelt. Es wird davon ausgegangen, dass alle Spulen ausgetauscht werden müssen. Sechs dieser Spulen wurden in der Betriebspause im Herbst 2004 ausgewechselt. Bis Ende 2005 sollen alle 36 Magnetspulen ausgewechselt sein.

## Elektronenbetrieb

Nach der Betriebspause im Herbst 2004 wurde der Betrieb von Proton-Positron auf Proton-Elektron Kollisionen umgestellt. Das Aufsetzen des Elektronbetriebes erfolgte in drei Stufen:

- Wiederaufnahme des Betriebes nach der Betriebspause mit Positronen.
- Umkehren aller Magnetpolaritäten und Injektion von Elektronen.
- Rekonfiguration der Wechselwirkungszonen für Proton-Elektron Kollisionen mit Verschiebung der Wechselwirkungszonen-Magnete um bis zu 8 mm.

Diese stufenweise Umstellung erwies sich als sehr effizient und erfolgreich, besonders im Hinblick auf die zahlreich aufgetretenen typischen Wiederanlaufprobleme, die erst einmal in der vertrauten Positronenkonfiguration gelöst werden konnten.

Eine mehrwöchige Beschleunigerstudienzeit im Monat November 2004 war erforderlich, um die Feineinstellung der Speicherringe für einen effizienten Elektron-Proton Kollisionsbetrieb zu bewerkstelligen. Insbesondere wurde die Magnetaufstellung durch Analyse des Strahlverhaltens überprüft und feinjustiert („beam based alignment“).

Ab Anfang Dezember wurde zum ersten Mal seit 1999 der Proton-Elektron Kollisionsbetrieb wieder aufgenommen. Wegen der Belüftung des Vakuumsystems in der Wechselwirkungszone HERA Nord waren die Strahlvakuumdrücke in den entsprechenden Abschnitten noch sehr hoch. Aus diesem Grund wurde die Strahlintensität auf etwa ein Drittel des erreichbaren Maximalwertes begrenzt, um Strahlenschäden am H1 Detektor zu vermeiden.

Im Elektron-Proton Luminositätsbetrieb im Dezember wurde erwartungsgemäß eine höhere spezifische Luminosität erzielt als im Proton-Positron Betrieb. Dies ist auf das umgekehrte Vorzeichen der Strahl-Strahlwechselwirkung für die Elektronen-Proton Kollisionen zurück zu führen. Dadurch werden sowohl die Störungen der linearen Optik als auch die dynamischen Effekte der Strahl-Strahlwechselwirkung reduziert. Durch die etwas kleinere Amplitudenfunktion und die kleineren Strahlemittanzen ergeben sich kleinere Strahlquerschnitte an den Wechselwirkungspunkten. Außerdem wurde die Emittanz des Elektronenstrahls durch eine Korrektur der Hochfrequenz um 70 Hz weiter reduziert. Damit ergeben sich spezifische Luminositäten von  $L_{\text{spec}} = (1.6 - 2) \cdot 10^{30} \text{ mA}^{-2} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Bis zum Jahresende wurde eine Luminosität von ca.  $2 \text{ pb}^{-1}$  akkumuliert.