

Speicherringanlage HERA

Das Jahr 2007 war das letzte Betriebsjahr des HERA Speicherrings nach insgesamt 16 Jahren Protonen/Elektronen bzw. Protonen/Positronen Kollisionen. Im Bewusstsein der begrenzten verbleibenden Zeit wurde daher das Hauptaugenmerk des Betriebes auf zwei wesentliche Punkte gerichtet: maximale Effizienz und Stabilität des HERA Betriebes sowie auf Wunsch der Experimente Strahlkollisionen bei niedrigeren Protonen Energien, um für die Detektoren H1 und ZEUS neue kinematische Bereiche der Lepton/Protonen Kollisionen zugänglich zu machen.

In Tabelle 4 sind die Betriebsarten der HERA Anlage im Jahr 2007 zusammengefasst.

Die in der Vergangenheit etablierten Maßnahmen zur Verbesserung der Betriebseffizienz, die in einzelnen Maschinenstudien getestet und verbessert worden waren, waren daher vor allem im Jahr 2007 wesentlich und konnten erfolgreich im Routinebetrieb umgesetzt werden (vgl. auch Jahresbericht DESY 2006).

Dazu gehörten Systeme zur Stabilisierung schneller Strahllageschwingungen in HERA-e, das longitudinale Multibunch Feedback der Protonen, das auch bei hoher Intensität der Protonenbunche deren Strahlqualität erhält, sowie vor allem ein System zur Stabilisierung des Protonen Arbeitspunktes (*Tune Controller*), das sowohl bei der Beschleunigung als auch im Luminositäts-Betrieb eingesetzt wurde. Die Bedingungen des

HERA Betriebes konnten insgesamt soweit verbessert werden, dass nach einer kontinuierlichen Steigerung der Protonenintensität im April 2007 mit einer Gesamtintensität von 116 mA ein neuer Bestwert für den gespeicherten Protonenstrom erreicht werden konnte. Vom 1. Januar 2007 bis 21. März konnte daher innerhalb von achtzig Tagen eine Luminosität von 62 pb^{-1} pro Wechselwirkungszone akkumuliert werden.

HERA Betrieb bei 460 und 575 GeV

Auf Wunsch der Experimente ZEUS und H1 wurde am 21.3.2007 der 920 GeV Betrieb HERAs beendet, um Untersuchungen in einem neuen kinematischen Bereich mit einer Protonen Energie von 460 GeV zu ermöglichen. Dieser sogenannte *Low Energy Run* stellte die in diesem Runjahr größte Herausforderung für die HERA Betriebsmannschaft dar. In beiden HERA Speicherringen wurden entsprechend der geänderten Strahlenergie die Strahloptiken neu gerechnet und an die zu erwartende Protonen-Emittanz angepasst. Erste Tests mit Einzelstrahlen geringer Intensität wurden im Lauf von Maschinenstudien am 6./7. Dezember 2006 und am 1./2. Februar 2007 durchgeführt.

Nach einer Woche Maschinenstudien-Zeit, in der die neuen Strahloptiken bei voller Intensität eingestellt und

23. Dez. 2006 – 27. Dez. 2006	Betriebsunterbrechung
27. Dez. 2006 – 21. März 2007	920 GeV Protonen / 27.5 GeV Positronen
21. März 2006 – 1. Juni 2007	460 GeV Protonen / 27.5 GeV Positronen
1. Juni 2007 – 30. Juni 2007	575 GeV Protonen / 27.5 GeV Positronen
seit 1. Juli 2007	Ende des HERA Betriebs

Tabelle 4: Betriebsdaten der HERA Anlage im Jahr 2007.

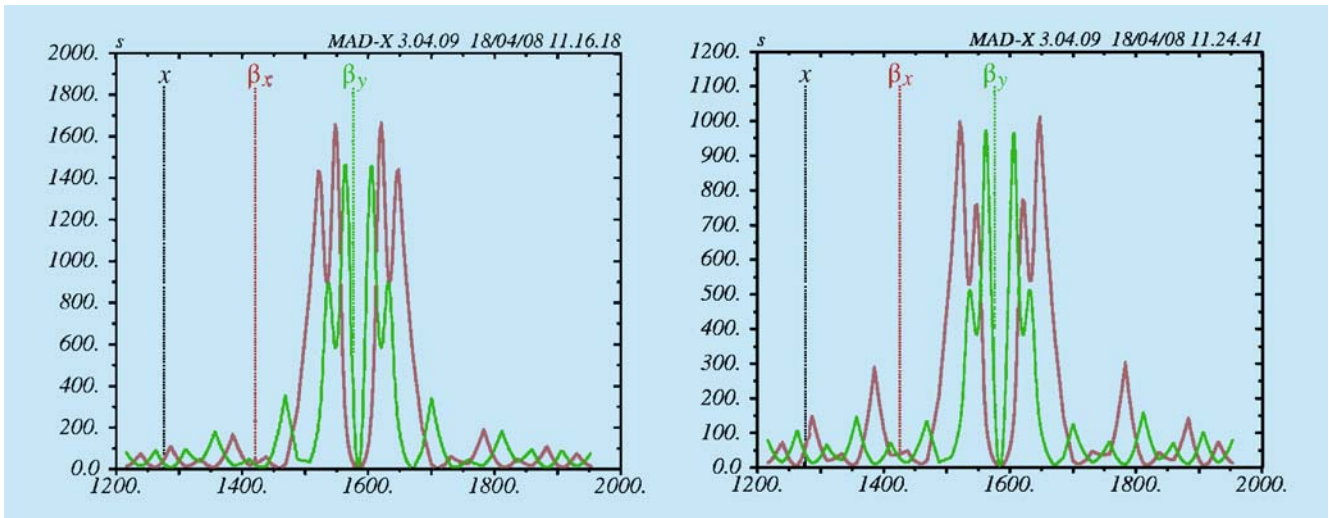


Abbildung 121: Protonen-Strahloptiken für den 920 GeV Standard Betrieb (links) und im Vergleich dazu für den low energy run bei einer Energie von 460 GeV (rechts).

die Untergrund Bedingungen für die drei Experimente H1, ZEUS und HERMES optimiert wurden, konnte Kollisionsbetrieb ab 27. März 2007 zur Verfügung gestellt werden.

In der Abbildung 121 sind die beiden Strahloptiken des Protonenspeicherrings für diese Energien gegenübergestellt: Im linken Teil der Abbildung ist die HERA Standard Optik des Protonenstrahls gezeigt: Aufgrund der kleinen Strahlemittanz bei hoher Energie können Betafunktionen von bis zu 1600 m im Bereich der Wechselwirkungszone toleriert werden.

Bei 460 GeV ist die Strahlemittanz im Vergleich dazu doppelt so groß und sowohl Orbit als auch Strahlfokussierung müssen diesen Gegebenheiten neu angepasst werden. Eine maximale Betatronfunktion von 1000 m wurde in den Quadrupollinsen der Wechselwirkungszone als tolerierbare Grenze angesehen.

Die Skalierung der Strahlparameter in beiden HERA Speicherringen wurde so durchgeführt, dass in jedem Fall optimal auf einander angepasste Strahlquerschnitte am Wechselwirkungs-Punkt erzielt werden konnten.

Dabei wurde – analog zum physikalisch bedingten Verhalten der Protonen – auch im Fall des Leptonenstrahls sowohl die Betafunktion als auch die Strahlemittanz modifiziert.

Eine Übersicht der für die im Jahr 2007 damit etablierten Strahlparameter ist in Tabelle 5 gezeigt.

Im HERA-e Speicherring wurde dabei die Betafunktion am Kollisionspunkt durch geänderte Fokussierung der Mini Beta Quadrupole erzielt, die Strahlemittanz wurde modifiziert durch Änderung des Phasenvorschubs in den Bögen ($72^\circ \rightarrow 60^\circ$) und Feinabstimmung der 500 MHz Hochfrequenz.

Die erreichbare Luminosität eines Protonenstrahls hängt deutlich von der Strahlenergie ab. Sie ist bedingt durch die effektive Strahlgröße σ_x und σ_y in der horizontalen bzw. vertikalen Ebene gemäß:

$$L \propto \frac{I_p \cdot I_e}{\sigma_x \cdot \sigma_y}.$$

Dabei ist im einfachsten Fall die transversale Strahlgröße bestimmt durch

$$\sigma = \sqrt{\epsilon \cdot \beta}.$$

Da beide die Strahlgröße bestimmenden Faktoren umgekehrt proportional zur Strahlenergie sind, ist beim Betrieb mit kleinerer Protonenenergie eine quadratische Reduktion der Luminosität zu erwarten.

$$\epsilon \propto \frac{1}{\gamma} \quad ; \quad \beta \propto \frac{1}{\gamma} \quad ; \quad L \propto \frac{1}{\gamma^2}.$$

Protonen Strahl	920 GeV	460 GeV	575 GeV
β_x	2.45 m	4.9 m	3.7 m
β_y	0.18 m	0.36 m	0.27 m
$\varepsilon_x = \varepsilon_y$	$5.1 \cdot 10^{-9}$ rad m	$10.2 \cdot 10^{-9}$ rad m	$8.2 \cdot 10^{-9}$ rad m
σ_x	112 μm	224 μm	174 μm
σ_y	30 μm	60 μm	52 μm
Positronen Strahl	27.5 GeV	27.5 GeV	27.5 GeV
β_x	0.6 m	1.28 m	1.02 m
β_y	0.26 m	0.51 m	0.42 m
ε_x	$21 \cdot 10^{-9}$ rad m	$39 \cdot 10^{-9}$ rad m	$30 \cdot 10^{-9}$ rad m
ε_y	$3.5 \cdot 10^{-9}$ rad m	$7 \cdot 10^{-9}$ rad m	$5.7 \cdot 10^{-9}$ rad m
σ_x	112 μm	224 μm	174 μm
σ_y	30 μm	60 μm	52 μm

Tabelle 5: Strahlparameter in den beiden HERA Speicherringen für die drei im Jahr 2007 optimierten Protonen Energien.

Am 27. März 2007 konnte dann nach nur einer Woche Maschinenstudien die neue Einstellung für 460 GeV Betrieb aufgesetzt und die kollidierenden Strahlen den Experimenten zur Datennahme zur Verfügung gestellt werden. Die in diesem Zustand erzeugte spezifische Luminosität lag mit $L_{\text{sp}} = 4.4 \dots 4.9 \cdot 10^{29} \text{cm}^{-2} \text{mA}^{-2} \text{s}^{-1}$ sogar etwas über dem erwarteten Wert und die Pola-

risation des Positronenstrahls überstieg nach nur einer Woche Optimierung wieder die wichtige Schwelle von 50%. Nach wie vor konnten die Untergrundraten für alle drei HERA Experimente auch in dieser neuen Betriebsart auf niedrigem Niveau gehalten werden, so dass die Datennahme-Effizienz mit dem 920 GeV Betrieb vergleichbar gute Werte erreicht und mit 93%

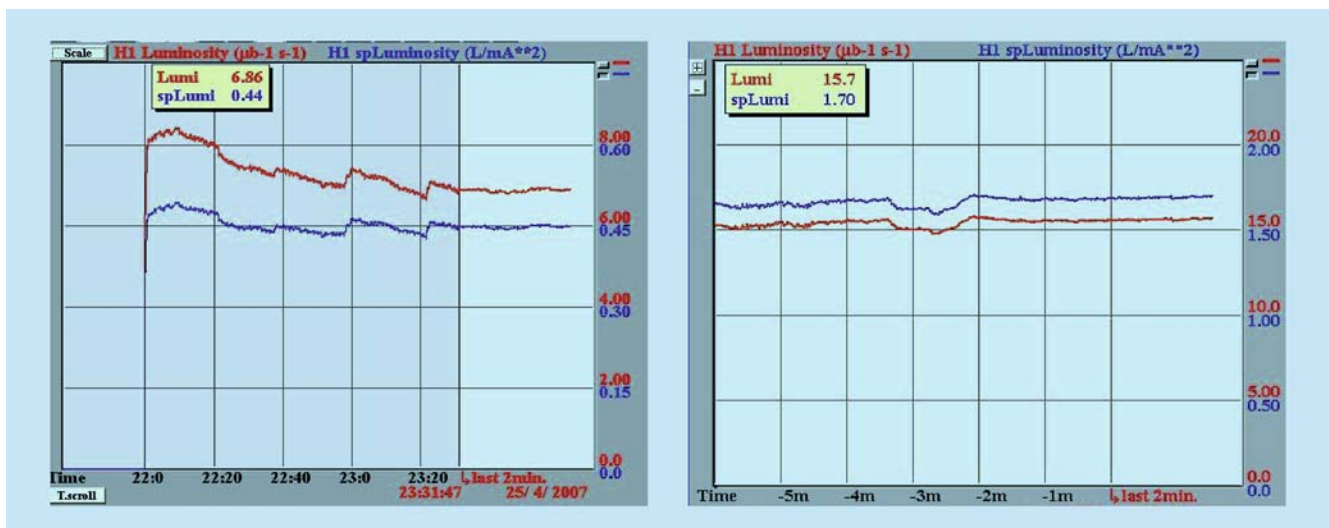


Abbildung 122: HI Messung der spezifischen Luminosität. Erzielt wurden typische Werte von $L_{\text{spez}} \approx 4.4 \cdot 10^{29} \text{cm}^{-2} \text{mA}^{-2} \text{s}^{-1}$ im 460 GeV Betrieb im Vergleich zu $L_{\text{spez}} \approx 1.7 \cdot 10^{30} \text{cm}^{-2} \text{mA}^{-2} \text{s}^{-1}$ im Standard Betrieb bei 920 GeV.

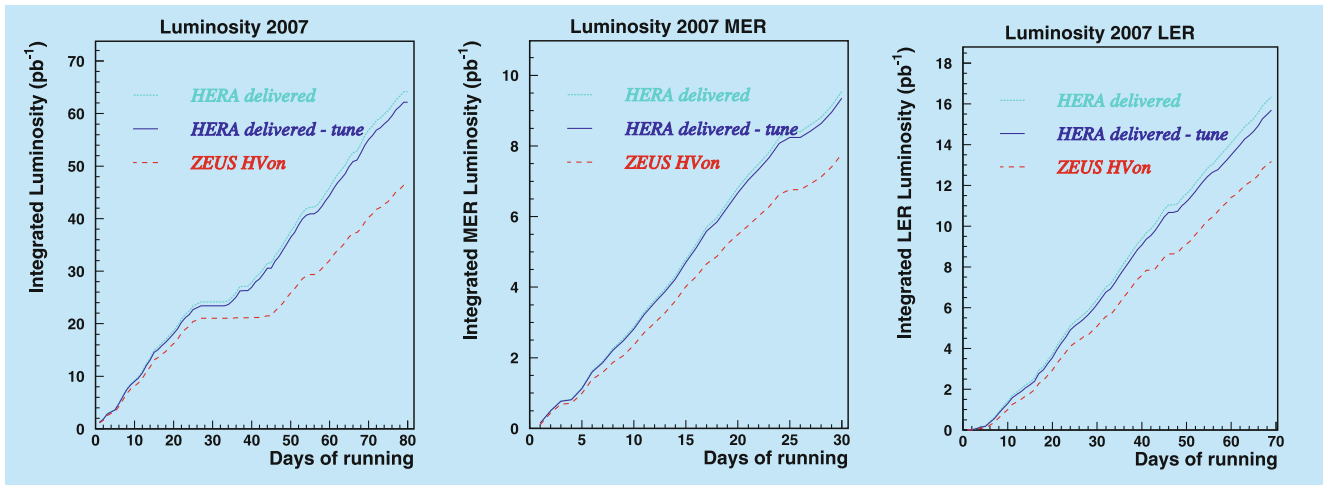


Abbildung 123: HERA Betrieb bei 920 GeV (links), 575 GeV (mitte) und 460 (rechts). Gezeigt ist hier jeweils die in dieser Betriebsart integrierte Luminosität.

Effizienz im Experiment H1 ein neuer Bestwert erzielt werden konnte.

Die bei dieser Betriebsart gemessene und im Vergleich dazu die mit 920 GeV Strahlen erzielte Luminosität sind basierend auf einer Messung von H1 in Abbildung 122 dargestellt.

Insgesamt wurde in dieser neuen Betriebsart (460 GeV Protonen / 27.5 GeV Positronen) eine Luminosität von 16.8 pb^{-1} akkumuliert (siehe Abbildung 123) – ein Wert, der das ursprünglich angestrebte Ziel von 10 pb^{-1} deutlich übersteigt.

Daher wurde der Luminositäts-Betrieb HERAs ein weiteres Mal modifiziert. Am 1. Juni 2007 wurde die Strahlenergie der Protonen auf 575 GeV umgestellt. Wie bereits im Niederenergie Run mussten dazu in beiden Speicherringen die Strahloptiken neu berechnet und für die bei dieser Energie gegebene Strahlemittanz angepasst werden. Nach nur einem Tag Optimierung mit Strahlen geringer Intensität konnte die Anlage bereits wieder für die Datennahme der Experimente bei voller Intensität zur Verfügung gestellt werden: Wiederum lag die spezifische Luminosität exakt auf dem vorausberechneten Wert von $\text{ca. } 6.7 \cdot 10^{29} \text{ cm}^{-2} \text{ mA}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Die Polarisation wurde bereits im ersten Run bei dieser neuen Energie auf Werte über 53% gesteigert.

Technische Probleme und Betriebseffizienz

Besonderes Augenmerk wurde unter den gegebenen Bedingungen auf eine hohe Betriebseffizienz gelegt. Bei der begrenzten verbleibenden Betriebsdauer war eine hohe Effizienz des Betriebes Voraussetzung für die Umstellung der Anlage auf diese neuen Maschineneinstellungen und das Erreichen der erwarteten integrierten Luminosität. Trotz einiger Unterbrechungen aufgrund technischer Ausfälle konnte die HERA Effizienz im Jahr 2007 einschließlich des Nieder- und Mittelenergie Betriebs (460 GeV / 575 GeV Run) auf 63% gesteigert werden. Abbildung 124 zeigt die Verteilung der Zeit auf die einzelnen Betriebszustände.

Technische Probleme, die merkbare Auswirkungen auf die Betriebseffizienz hatten, waren vergleichbar zum Vorjahreszeitraum:

- die Vakuum Systeme der Wechselwirkungszonen, die nach wie vor unter starker Belastung durch die Synchrotronstrahlungsfächer standen
- Netzgeräte und Kühlwasser Probleme
- sowie technische Probleme in der Vorbeschleunigerkette.

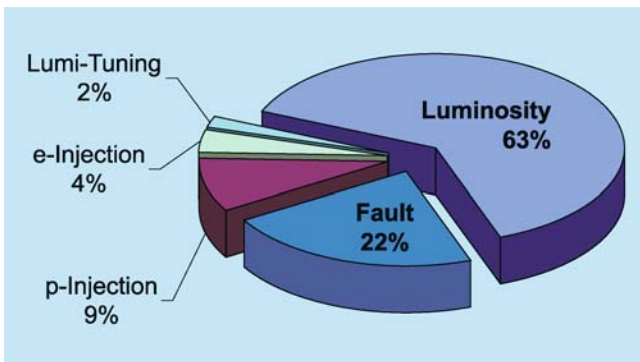


Abbildung 124: HERA Betriebsstatistik 2007: Die Zeit mit Kollisionen der beiden Strahlen nimmt den größten Raum ein (63%) gefolgt von Betriebsunterbrechungen durch technische Fehler, deren Beseitigung und dem darauf folgenden Wiederanlauf des Betriebs (22%). Die restlichen 15% der Zeit entfallen auf Injektion, Beschleunigung und Einstellen der Luminosität.

Wie bereits in den Vorjahren war die Wärmebelastung der Flansche im Bereich der Wechselwirkungszonen hoch und Vakuumlecks vor allem am Hauptabsorber 4 nicht immer vermeidbar.

Eine Verbesserung dieser Situation wurde dadurch erreicht, dass zum einen die Strahlintensität im Luminositätsbetrieb auf ca. 40 mA begrenzt wurde. Darüber hinaus wurde ein neues Verfahren etabliert, bei dem vor dem Dump eines Strahls am Ende des Luminositätsruns

die Energie der Positronen von 27.5 GeV auf 23 GeV reduziert wurde: Durch diese Entschleunigung des HERA Strahls wurden abrupte Änderungen der Synchrotronstrahlungslast, wie im Moment des Strahldumps bei hoher Energie auftraten, vermieden.

Resume des HERA Betriebes

Am 30. Juni 2007 gegen 23:30 endete der Betrieb von HERA, der mit den ersten Teilchen-Kollisionen am 19. Oktober 1991 begonnen hatte. Tabelle 6 zeigt die im Laufe des Betriebes erreichten Strahlparameter im Vergleich zu den Designparametern. Zwar wurden die angestrebten Strahlströme nicht erreicht, dafür wurden aber durch verbesserte Strahloptiken die Strahldimensionen am Wechselwirkungspunkt (IP) so weit verkleinert, dass die angestrebte Luminosität deutlich überschritten wurde. Damit wurde es möglich, in 16 Jahren Kollisionsbetrieb mit ständigen Verbesserungen an Technik, Strahlparametern und Bedienung der Maschine eine integrierte Luminosität von jeweils 800 pb^{-1} in den Wechselwirkungszonen von H1 und ZEUS zu produzieren. Dabei erreichte die longitudinale Spinpolarisation der Leptonen mit Spinrotatoren an einer Wechselwirkungszone Werte von etwa 60% und mit Spinrotatoren an drei Wechselwirkungszonen etwa 50%.

	Design	Erreichte Spitzenwerte
Bunchzahl	210	180
Strahlenergie Leptonen	30 GeV	27.5 GeV
Strahlenergie Protonen	820 GeV	920 GeV
Strahlstrom Leptonen	58 mA	50 mA
Strahlstrom Protonen	130 mA	110 mA
Strahlgröße am IP (σ_x/σ_y)	0.29/0.07 mm	0.11/0.03 mm
Luminosität per IP	$1.5 \cdot 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$5.12 \cdot 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Tabelle 6: Strahlparameter von HERA im Design und erreichte Spitzenwerte.