

Speicherringanlage HERA

Übersicht über das Betriebsjahr 2005

Die Betriebsergebnisse von HERA konnten im Betriebsjahr 2005 wiederum deutlich gegenüber dem Vorjahr gesteigert werden. Dies ist insbesondere bemerkenswert, da in diesem Jahr zum ersten Mal seit 1999 wieder Elektronen und Protonen kollidiert wurden. Angesichts der Schwierigkeiten mit Elektronenstrahlen in der Vergangenheit wurde eher mit einem Rückgang der Betriebsergebnisse gerechnet. Dennoch betrug die akkumulierte Luminosität der Elektron-Proton Kollisionen für die Experimente H1 und ZEUS jeweils 213 pb^{-1} und 203 pb^{-1} . Die Protonenstrahlenergie betrug wie in den Vorjahren 920 GeV und die Elektronenstrahlenenergie war mit 27.5 GeV ebenfalls unverändert. Der Luminositätsbetrieb erstreckte sich von Januar bis Mitte November und war mit insgesamt 314 Tagen deutlich länger als im Vorjahr (siehe Tabelle 5). Der Anlauf mit Elektronen erfolgte bereits im Dezember 2004, so dass die Berichtszeit voll für den Luminositätsbetrieb zur Verfügung stand. Die Zeit für Beschleunigerentwicklung und Pflege der Betriebszustände wurde zugunsten eines kontinuierlichen Luminositätsbetriebs auf ein Minimum begrenzt. Der Luminositätsbetrieb wurde nur durch die monatlichen Wartungstage und durch nicht geplante Pausen aus technischen Gründen unterbrochen. Die Luminositätsausbeute konnte während des Betriebsjahres kontinuierlich gesteigert werden. Das Betriebsjahr ging nach einer kurzen Beschleunigerentwicklungszeit Mitte No-

vember zu Ende. Die Betriebspause bis Ende Januar 2006 wird für den Austausch defekter Komponenten und die Installation von einigen Verbesserungen sowie für die alljährliche Sicherheitsprüfung genutzt.

Ergebnis des Elektron-Proton Luminositätsbetriebs

Zu Beginn des Luminositätsbetriebs, im Januar 2005, waren die Strahlintensitäten noch durch die Untergrundbedingungen für den H1 Detektor begrenzt. In der Herbstpause 2004 war das Vakuumsystem der Wechselwirkungszone Nord belüftet worden, um Arbeiten am Detektor und am Vakuumsystem durchführen zu können. Nach der Inbetriebnahme im Dezember 2004 mit 60 kollidierenden Protonenpaketen konnte die Zahl der Protonenpakete im Januar 2005 auf 120 gesteigert werden. Die Strahlintensität der Elektronen wurde bis Mitte Februar schnell von 20 mA auf ca. 35 mA gesteigert. Danach war nur noch eine kleine Steigerungsrate möglich, so dass am Ende des Betriebsjahres lediglich Werte von 40 mA erreicht wurden. Ab Mitte Februar wurden die beiden Ringe mit 150 Strahlpaketen betrieben. Die maximal möglichen 180 Strahlpakete waren wegen der Begrenzungen im Elektronengesamtstrom nicht sinnvoll. Die Protonenintensität, die Zahl der Protonen pro Teilchenpaket, konnte jedoch gegenüber dem Vorjahr gesteigert werden. Sie erreichte mit Werten von $8.8 \cdot 10^{10}$ etwa 88% des ursprünglichen

1. Januar – 10. November	Luminositätsbetrieb mit Protonen und Elektronen
10. – 14. November	Beschleuniger Studien
14. November – 31. Januar	Betriebspause für Reparaturen und Verbesserungen

Tabelle 5: Übersicht über das HERA Betriebsjahr 2005.

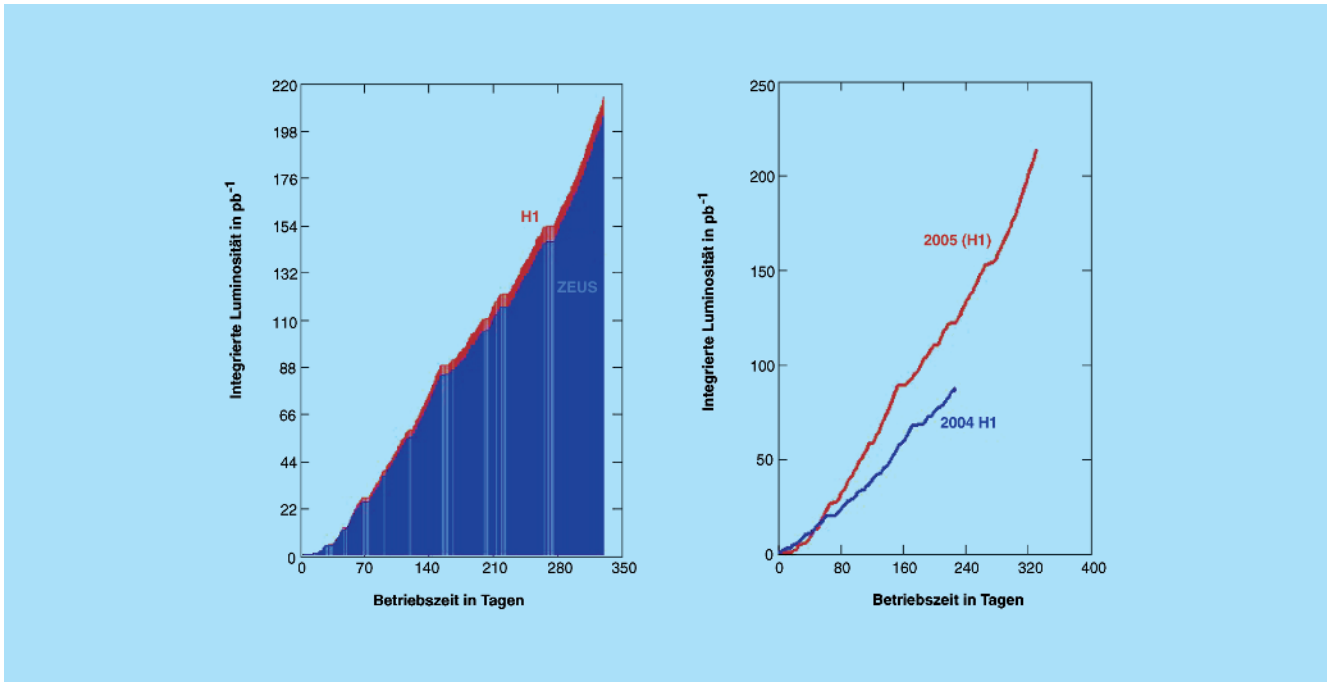


Abbildung 91: Die integrierte Luminosität von HERA in 2005 und der Vergleich mit dem Ergebnis von 2004.

Designwertes (von 1981). Das stellt gegenüber dem Vorjahr eine Steigerung von 20% dar. Diese Steigerung wurde durch Verbesserung des Protonentransfers von PETRA nach HERA ermöglicht. Die Spitzenluminosität am Anfang eines Luminositätslaufes betrug maximal $L_{\text{peak}} = 5.1 \cdot 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Sie überstieg damit deutlich die ursprünglichen Abschätzungen, die auf dem erwarteten reduzierten Strahlstrom der Elektronen beruhte, und erreichte die Werte, die mit dem HERA Luminositäts-Verbesserungsprogramm von 2000/2001 anvisiert wurden. Diese Steigerung wurde durch die höhere Protonintensität und den günstigen Einfluss der Fokussierung der Strahl-Strahlkraft im Elektron-Proton Fall ermöglicht, welche bei den konservativen Abschätzungen der Elektron-Proton Luminosität nicht berücksichtigt worden waren. Damit wurde das Ziel des HERA Luminositäts-Verbesserungsprogramms im Jahre 2005 erreicht. Die integrierte Luminosität (gemessen vom Experiment H1, siehe Abbildung 91) erreichte $\int L dt = 213 \text{ pb}^{-1}$ und entspricht damit den Abschätzungen, die am Anfang des HERA II Betriebs gemacht wurden.

Die Produktionsrate der Luminosität ließ sich innerhalb der ersten Betriebswochen auf einen Wert von ca. 0.6 pb^{-1} pro Tag steigern. Nach Überwindung einiger technischer Probleme in den Sommermonaten waren schließlich Produktionsraten von $0.9 \text{ pb}^{-1} \text{ d}^{-1}$ im Wochenmittel möglich. Die höchsten Tagesproduktionen ergaben bis zu $1.8 \text{ pb}^{-1} \text{ d}^{-1}$. Sie liegen damit um etwa einen Faktor vier höher als die Bestergebnisse von HERA vor dem Ausbau (HERA I). Im Jahresmittel wurden schließlich $0.7 \text{ pb}^{-1} \text{ d}^{-1}$ erreicht. Insgesamt wurden die Strahlen 391 Mal für Luminosität zur Kollision gebracht. Die mittlere Laufzeit betrug 7.3 h bei einer nominalen geplanten Laufzeit von im Mittel 14 h. Die Luminositätslebensdauer war erwartungsgemäß durch die geringere Elektronenstrahllebensdauer (verglichen mit Positronen) geringer und betrug am Anfang eines Luminositätslaufes jeweils ca. 8–10 h. Insgesamt wurden 633 Mal Protonen injiziert und beschleunigt. Die Zahl der Elektronenzyklen betrug 617.

Die Elektronenstrahlen in HERA sind wie die Positronenstrahlen in allen drei Experimenten longitudinal

Proton / Elektron Strahlenergie	920 GeV / 27.6 GeV
Proton / Elektron Strahlströme (Maximalwerte)	102 mA / 41 mA
Proton / Elektron horizontale Emittanz	4.1 nm / 27 nm
Proton / Elektron vertikale Emittanz	4.2 nm / 3 nm
Spitzenluminosität	$5.1 \cdot 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Spezifische Luminosität	$2.2 \cdot 10^{30} \text{ mA}^{-2} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Integrierte Luminosität	$213 \text{ pb}^{-1} \text{ (H1)}$
Angesetzte Betriebszeit (BZ)	7056 h
Luminositätproduktionszeit (ZL)	3396 h
Anzahl der Luminositätsläufe	391
Betriebseffizienz ZL/BZ	48%
Maximaler Longitudinaler Polarisationsgrad	45%

Tabelle 6: Der Proton-Elektron-Luminositätsbetrieb 2005 in Zahlen.

polarisiert. Der Polarisationsgrad erreichte jedoch lediglich 45%. Dieser eher niedrige Wert, im Vergleich zum Betrieb mit Positronen, wurde zudem erst nach einem allmählichen Anstieg über einen Luminositätslauf mit dem Zerfall der spezifischen Luminosität erreicht (siehe Abbildung 92). Dies beruht auf der stärkeren Strahl-Strahl Wechselwirkung der Elektron-Proton Kollisionen. Ein Testbetrieb mit einem alternativen Ar-

beitspunkt der Strahlschwingungsfrequenzen (*Mirror Tunes*) schien die Situation für die Polarisation zu verbessern, jedoch nur auf Kosten der Luminosität. Aus diesem Grund wurde der alternative Arbeitspunkt nicht weiter benutzt.

Die Untergrundbedingen für die Experimente waren auch in 2005 kritisch. Besondere Probleme bereiteten kurzzeitige (ms Zeitskala) Untergrundserhöhungen um mehrere Größenordnungen. Diese so genannten Spikes führten immer wieder zu Notabschaltungen der Detektor-Systeme und beeinflussten die Effizienz der Datennahme.

Als ein wesentlicher Grund für die Spikes konnte eine defekte Magnetspule identifiziert werden, die in einer Betriebsunterbrechung von einer Woche ausgetauscht wurde (siehe unten).

Größere Probleme bereitete auch die Stabilität eines Stromversorgungsgerätes für einen Wechselwirkungszonenmagneten. Die Ursache, ein falsch eingelöteter Widerstand, wurde erst nach vielen Tagen dedizierter Suche mit Unterbrechung des Betriebes gefunden. Nach Beseitigung dieser Probleme war der Untergrund für die Experimente immer noch kritisch aber beherrschbar.

Eine Zusammenfassung der Betriebsdaten findet sich in Tabelle 6.

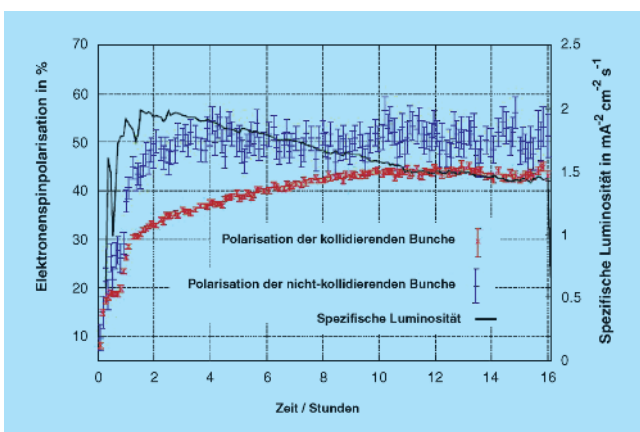


Abbildung 92: Typischer Verlauf der Elektronenpolarisation im Betriebsjahr 2005. Die Polarisation steigt während eines Luminositätslaufs langsam an und erreicht Werte bis ca. 45%. Die Elektronenpakete, welche nicht kollidieren, zeigen eine normale Anstiegszeit und erreichen Werte um 50%. Der Anstieg korreliert gut mit dem Zerfall der spezifischen Luminosität.

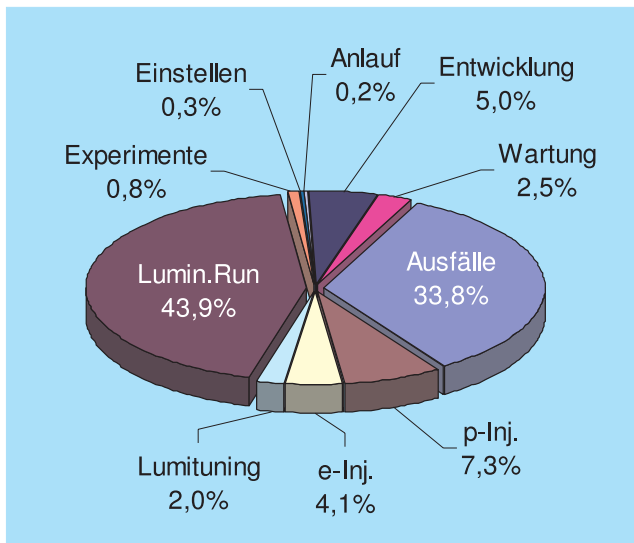


Abbildung 93: HERA Betriebsstatistik 2005. Die Zeit mit Kollisionen der beiden Strahlen nimmt den größten Raum ein (43.9%) gefolgt von Betriebsunterbrechungen durch technische Fehler, deren Beseitigung und dem darauf folgenden Wiederanlauf des Betriebs (33.8%). Die notwendigen Zeiten für Injektion und Beschleunigung und Einstellen der Luminosität der Strahlen haben sich weiter verringert (13.7%). Die Zeit für Anlauf und Maschinenentwicklung betrug 5.2% der Zeit. Die Experimente benötigten 0.8% der Betriebszeit für Kalibration und Behebung von Problemen. Für Wartungsarbeiten wurden 2.5% benutzt.

Beschleunigerphysikalische Gesichtspunkte

Die spezifische Luminosität des Elektron-Proton Betriebs erreichte durch die zusätzliche Fokussierung des Elektronenstrahls durch die Strahl-Strahl Kraft der Protonen Werte, die deutlich über den Entwurfswerten liegen. Damit konnte das Luminositätsziel des HERA Luminositäts-Verbesserungsprogramms trotz reduzierter Strahlströme erreicht werden. Die Strahl-Strahl Fokussierungseffekte führen einerseits zu einer Verkleinerung der Elektronstrahlgröße (*dynamic beta-function*) und zusätzlich zu einer Verschiebung der Arbeitspunkte zu größeren Schwingungsfrequenzen innerhalb des engen, durch starke Resonanzen begrenzten Arbeitsraums.

Betriebsstatistik, technische Probleme und Verbesserungsmaßnahmen

Die Betriebsstatistik ist in Abbildung 93 dargestellt. Wie im Vorjahr hat auch in 2005 eine Reihe von technischen Problemen die Datenproduktion bei HERA behindert und sich nachteilig auf die Betriebseffizienz ausgewirkt. Verbesserungen an diesen Systemen wurden zum Teil noch im Berichtszeitraum geplant, durchgeführt und getestet. Insgesamt hat sich die Betriebseffizienz von HERA in 2005 gegenüber dem Vorjahr verbessert. Einige technische Systeme, die in den vergangenen Jahren noch sehr auffällig waren, sind in der Fehlerstatistik des Jahres 2005 unauffällig. Dazu gehören insbesondere die Hochfrequenzsysteme. Die größeren Betriebsunterbrechungen in 2005 machten einen Betriebszeitverlust von 45 Tagen aus und bewirkten 42% der Betriebszeitverluste durch technische Ausfälle. Diese sind:

- Austausch eines normalleitenden Magneten nach Überhitzung der Spule. Die Ursache war ein Fehler im Magnetschutzsystem. Der Zeitaufwand betrug 8 Tage. Als Gegen-Maßnahme wurde die Temperaturüberwachung verbessert. Dies wurde im Berichtszeitraum durchgeführt.
- Ausfall der Kälteanlage durch einen Defekt an einem Kompressor. Ein Teil der Leistungsreserven der Anlage wurde durch die gleichzeitige Versorgung des VUV-FEL Linacs in Anspruch genommen, dadurch kam es zur Erwärmung der supraleitenden Magnete. Der Zeitverlust betrug 8 Tage. Im Berichtszeitraum wurde die Leistung der Kompressoren erhöht, so dass in Zukunft ähnlich lange Ausfallzeiten vermieden werden.
- Reparatur einer defekten Magnetspule, die den Luminositätsbetrieb stark beeinträchtigt hat. Alle Spulen dieses Typs wurden im Berichtszeitraum erneuert. Der Zeitaufwand für die Reparatur während der geplanten Betriebszeit betrug 5 Tage.
- Vakuumleck an einem Flansch der Wechselwirkungszone Nord. Reparatur und Erholungszeit

benötigten 8.5 Tage. Die Temperaturüberwachung an dieser Stelle wurde verbessert.

- Fehlersuche an einem defekten Stromversorgungsgerät, welches für schlechte Untergrundbedingungen bei den Experimenten verantwortlich war. Ein Zeitverlust von 8 Tagen musste hingenommen werden. Der Fehler wurde gefunden und an allen betroffenen Geräten beseitigt.
- Fensterbruch bei einem supraleitenden HF-Resonator. Der Ausbau des Resonators unterbrach den Betrieb für 7 Tage. Der Resonator wurde inzwischen repariert und wieder eingebaut. Die technischen Überwachungssysteme wurden verbessert.
- Vakuumlecks im Bereich der Spin-Rotatoren durch eine Designschwäche. Die Reparatur und die Erholungszeit betragen insgesamt 9 Tage. Die entsprechenden Vakuumteile wurden alle überarbeitet und technisch verbessert.

HERA Verbesserungsprogramm

Um eine möglichst große Verfügbarkeit von HERA in den kommenden Betriebsjahren sicherzustellen, wurde im Berichtszeitraum eine Reihe von Maßnahmen getroffen. Sie zielen darauf ab, Komponenten, welche eine große Ausfallwahrscheinlichkeit besitzen, auszutauschen oder durch verbesserte Auslegung Fehlfunktionen zu verhindern (siehe dazu auch die Berichte der Gruppen).

Die Magnete vom Typ BU sind vertikale normaleitende Ablenkmagnete von 5 m Länge und einem Feld von 1 Tesla im Protonenring. An allen Spulen der insgesamt 18 Magnete von diesem Typ traten Wasserlecks aufgrund defekter Lötstellen auf. Aus diesem Grund wurden inzwischen alle 36 Halbspulen dieser Magnete ausgetauscht.

Im Berichtszeitraum traten 3 Vakuumlecks an den Schiebestücken der Rotatormagnete in den geraden Stücken Nord, Süd, und Ost im HERA Elektronenring auf. Der Grund sind schwache Schweißnähte, welche

mechanischen Kräften aufgrund thermischer Spannungen ausgesetzt sind. Alle Schiebestücke wurden im Berichtszeitraum mit massiven Stütznähten versehen.

Im Rahmen der Reparatur eines Einkoppelfensters an einem supraleitenden Hochfrequenzresonator wurde ein Teststand zum Kalttest von supraleitenden 500 MHz HF-Resonatoren wiederhergestellt und steht jetzt für Eventualfälle zur Verfügung.

Der Klystronschutz der HERA Hochfrequenzanlagen wurde verbessert. Durch eine verbesserte Logik und verbesserte Sensorik wird die Schutzfunktion für die HF-Generatoren erhöht und gleichzeitig das Risiko von Fehlabschaltungen minimiert.

Die Betriebserfahrungen der letzten beiden Jahre haben gezeigt, dass sich die Luminosität von HERA noch steigern lässt. Die folgenden Verbesserungs- und Entwicklungsprogramme zur Steigerung der Luminosität und Erhöhung der Strahlqualität wurden im Berichtszeitraum entwickelt und vorbereitet:

Ein zentrales Projekt ist die Entwicklung und der Einbau eines breit-bandigen Dämpfungssystems zur Bekämpfung von longitudinalen Schwingungen der Protonenbunche (siehe unten). Es wird erwartet, dass mit diesem System die starke Vergrößerung der effektiven longitudinalen Emittanz durch Auftreten von longitudinalen Instabilitäten während der Protonenrampe verhindert werden kann. Dies wird die Energiebreite des Protonenstrahls erheblich verringern und sollte sich günstig auf den Untergrund der Experimente auswirken. Außerdem wird durch Verkürzung der Protonenpakete eine effektive Verkleinerung des Strahlquerschnittes von bis zu fünf Prozent erzielt. Das Projekt wurde im Jahr 2005 als Gemeinschaftsprojekt der Gruppen MHF-p, MVP, MSK, MPY und MHF-e entwickelt und aufgebaut. Die wesentlichen Komponenten sind neben einem neuen breitbandigen Kicker-Resonator, der von einem 1 kW Leistungssender mit HF versorgt wird, eine Analog-Elektronik mit einem Modulator für 104 MHz, schnelle digitale Feedback-Elektronik basierend auf einem FPGA (Field Programmable Gate Array) sowie eine Bedienungsfläche und Diagnose. Die Phasenlage jedes einzelnen der maximal 220 Bunche in HERA wird aus den Signalen eines I/Q Detektors gewonnen,

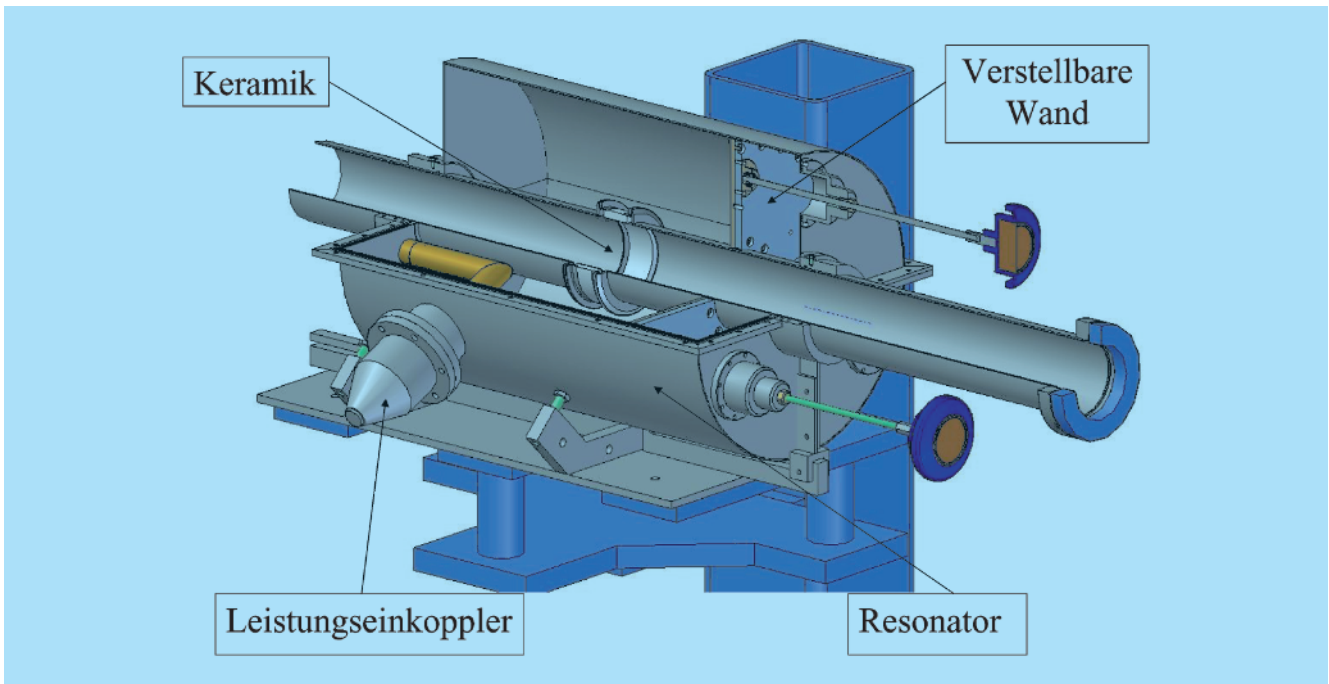


Abbildung 94: Der 104 MHz Kicker Resonator für das longitudinale Protonen Feedback. Durch die Verwendung einer Keramik im Beschleunigungsspalt kann der Resonator unter Normaldruck gehalten werden.

welcher das Signal von einem breitbandigen Widerstandsmonitor mit einer 52 MHz Referenzfrequenz vergleicht. Die I- und Q-Signale werden mit 10.4 MHz abgetastet und in 14-bit A/D-Wandlern digitalisiert. Eine schnelle Digitalelektronik errechnet daraus für jeden Bunch separat die Bunch-Phase bezüglich der Hochfrequenz, korrigiert die Abweichung, detektiert die Synchrotronschwingung und berechnet die Korrektursignale zur Modulation der 104 MHz Trägerfrequenz. Der verwendete Algorithmus behandelt alle Bunche als unabhängige Oszillatoren, welche zu dämpfen sind. Der 104 MHz Kicker Resonator wurde innerhalb eines Jahres von MHF-e entworfen, von MVP konstruiert und unter der Leitung von MHF-p in Betrieb genommen. Er ist in Abbildung 94 gezeigt. Durch die Verwendung einer Keramik im Beschleunigungsspalt kann der Resonator unter Normaldruck gehalten werden. Der Resonator und der Hochfrequenzgenerator sowie die Verkabelung wurde in der Wartungsperiode 2005/6 in HERA installiert. Die Inbetriebnahme mit Strahl ist für Anfang 2006 vorgesehen.

Eine Kombination von stärkerer externer Fokussierung und gleichzeitiger Nutzung der dynamischen Fokussierung des Elektronenstrahles durch den Strahl-Strahl Effekt ist eine weitere Möglichkeit die Luminosität um 10–20% zu erhöhen. Diese Möglichkeit wurde im Berichtszeitraum mit Strahl erfolgreich getestet.

Die Stabilität des Dipolkorrekturspulensystems des HERA Elektronrings wurde so spezifiziert, dass Strahlorbitbewegungen von bis zu 150 μm möglich sind. Diese Strahlorbitbewegungen werden zusätzlich noch durch mechanische Bewegungen der Magnetbrücken in den Wechselwirkungszonen verstärkt. Das bestehende Lageregelungssystem besitzt nicht die erforderliche Dynamik, um die Orbitbewegungen mit Frequenzkomponenten bis zu 100 Hz zu kontrollieren. Aus diesem Grund wurde im Berichtszeitraum ein schnelles Lageregelungssystem für HERA-e konzipiert, welches in den kommenden Monaten implementiert werden wird.