

HERA-p longitudinal

M. Hoffmann

Contribution to the HERA Operator school

Hamburg, Germany, Mai 2006

DESY-HERA-06-03

Version 1.00

12. Juni 2006

HERA-p – the proton accelerator ring of the HERA collider at the Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY has been undergone detailed survey to analyze the longitudinal beam dynamics. This paper collects and presents some of these facts about HERA-p.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Vorwort | 1 |
| 2 | Der Protonen-Speicherring HERA-p | 3 |
| 2.1 | Überblick, Historisches | 3 |
| 2.2 | Die Vorbeschleuniger, Füllmuster | 4 |
| 2.3 | Etwas Statistik zum Betrieb | 5 |
| 2.4 | Das doppel-Frequenz HF-System | 6 |
| 2.5 | Bunchlänge und Synchrotronfrequenz | 9 |
| 2.6 | Protonen-Bunchlängen im Detail | 12 |
| 2.7 | Beobachtete Multibunch-Instabilitäten | 18 |
| 2.8 | Wirkung des longitudinalen Multibunch-Feedbacksystems | 22 |
| 3 | Simulationsrechnungen | 24 |
| 3.1 | Protonen-Dynamik | 24 |
| 3.2 | Multibunch-Instabilitäten | 24 |
| 3.3 | Bunchverlängerung und Coasting-Beam durch HF-Rauschen | 26 |
| | Literaturverzeichnis | 30 |

1 Vorwort

Diese Schrift sollte ursprünglich *Fakten über HERA-p* heißen, wurde dann aber umbenannt, als ich bemerkte, daß ich hauptsächlich Fakten zusammengetragen hatte, welche beim Verständnis der longitudinalen Dynamik des größten deutschen Beschleunigerrings HERA-p insbesondere im Zusammenhang mit dem Bau des longitudinalen Multibunch-Feedback-Systems von Bedeutung waren.

Da Faktensammlungen und ganz allgemeine Dokumentation bei DESY oft nur mit Mühe zu finden sind, habe ich mich entschlossen, diese Erkenntnisse, die natürlich bei weitem unvollständig sind, einem breiteren Publikum zur Verfügung zu stellen. Insbesondere soll dies den Einstieg von neuen Kollegen bei HERA erleichtern, kann aber auch der Schichtmannschaft wertvolle Hinweise geben.

Seit Anfang des Jahres 2004 sind die Untergrundprobleme bei den Experimenten bei HERA weitestgehend behoben, und die Maschine kann nun mit den ursprünglich veranschlagten Strömen Luminosität liefern. Eine weitere Steigerung der Luminosität von ca. 5 % konnte nun noch durch die Reduktion der Bunchlänge von vorher typischerweise 1.6 ns auf kleiner 1 ns mit Hilfe des neuen longitudinalen Multibunch-Feedbacks erzielt werden. Da dieser Effekt eigentlich recht klein ist, aber durchaus für den Betrieb von HERA recht wertvoll ist, soll der vorliegende Bericht auch die Unterschiede aufzeigen, die durch den Einbau des longitudinalen Feedbacksystems zu beobachten sind. Anhand dieser kann man dann dessen Performace ein wenig besser einschätzen.

Dieser Bericht berücksichtigt ausschließlich Daten über die longitudinale Dynamik des Beschleunigers aus den Jahren 2003 bis Anfang 2006.

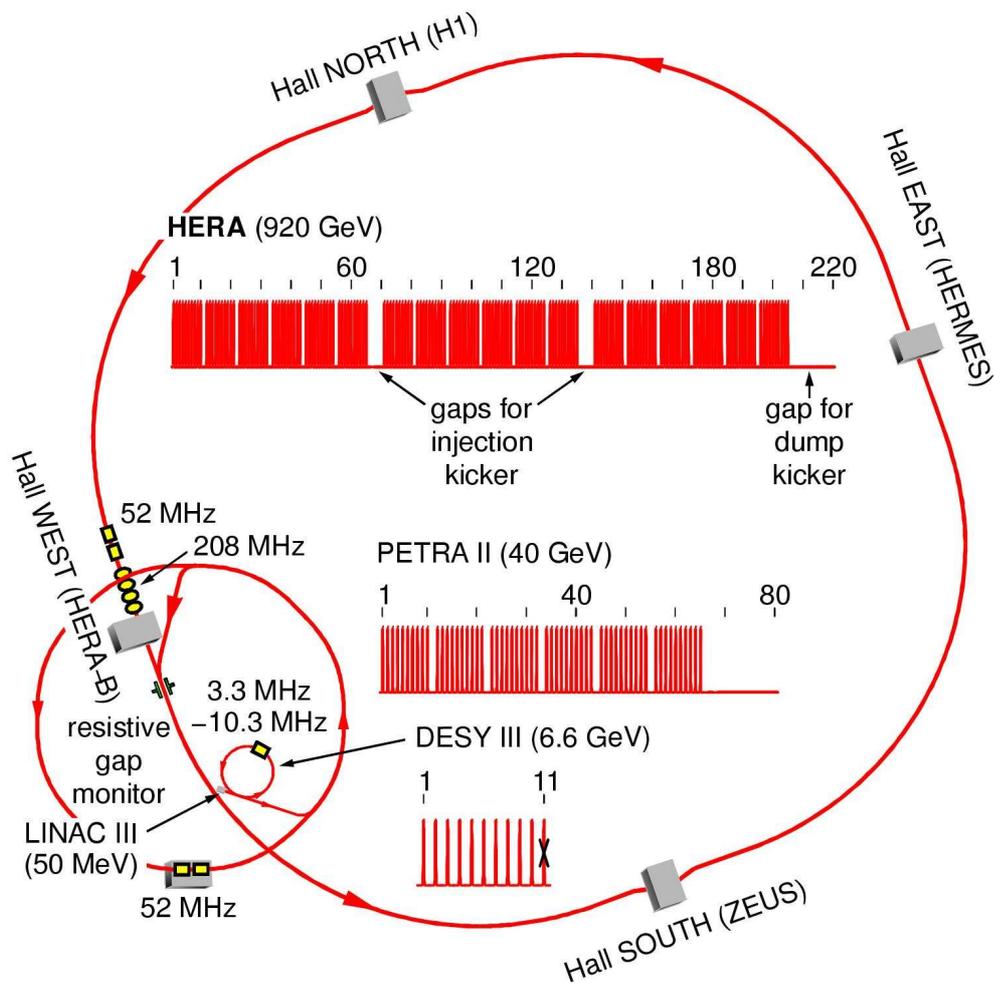


Abbildung 1: Der Protonenspeicherring HERA-p mit seinen Vorbeschleunigern und der jeweiligen Füllstruktur. (Grafik entnommen aus [5].)

2 Der Protonen-Speicherring HERA-p

2.1 Überblick, Historisches

Der Protonen Speicherring HERA-p¹ ist derzeit der größte Protonenbeschleuniger Europas. 1992 wurde er in Betrieb genommen. 12 Meter unter der Erde gelegen hat er einen Umfang von 6336 m und beschleunigt Protonen von 40 GeV bis auf 920 GeV. Um diese hohen Energien zu erreichen, sind die Magnete des Beschleunigers in supraleitender Technologie ausgelegt [1]. Es gibt 224 supraleitende Ablenkdiopole und 422 supraleitende Quadrupole zur Fokussierung des Strahls, sowie eine große Anzahl ebenfalls supraleitender Korrekturmagnete. Die maximale Feldstärke in den Dipolmagneten erreicht 5 Tesla. Die Dipolmagnete sind alle in Serie geschaltet und werden von einem Netzgerät versorgt, welches maximal 8000 A und 500 V liefern kann. Wegen der hohen Induktivität des Magnetkreises ist die Geschwindigkeit, mit der der Strom in

¹HERA=Hadron-Elektron-Ring-Anlage

| | |
|----------------------------------|--|
| Umfang: | 6336 m |
| Teilchenart: | Protonen |
| Impuls: | 40 GeV/c \longrightarrow 920 GeV/c |
| max. Strom: | 120 mA |
| nutzbare Buckets: | 220 |
| max. Anzahl Bunche: | 180 |
| max. Bunchstrom: | $I_b = 0.6$ mA |
| HF ₁ : | 52.034 MHz bis 52.049 MHz |
| HF ₂ : | 208.137 MHz bis 208.195 MHz |
| max. Beschleunigungsspannung: | $U_{52\text{MHz}} = 240$ kV, $U_{208\text{MHz}} = 520$ kV |
| Harmonischenzahl: | $h_{52\text{MHz}} = 1100$, $h_{208\text{MHz}} = 4400$ |
| Umlauffrequenz: | $f_0 = 47.30386$ kHz bis 47.31700 kHz |
| Synchrotronfrequenz: | $f_s = 20$ Hz bis 80 Hz (bei Lumi: 35 Hz) |
| Tune: | $Q_x = 31.297$, $Q_y = 32.295$ |
| Normierte 2σ -Emittanzen: | $\varepsilon_x = 16$ -20 nm rad, $\varepsilon_y = 16$ -20 nm rad |
| Bunchlänge: | 1 bis 2 ns (1.6 ns $\hat{=}$ 20.4 cm) |
| Lebensdauer: | 500h bis >2000h |

Tabelle 1: Einige grundlegende Maschinenparameter für HERA-p

den Magneten geändert werden kann, stark begrenzt. Dies führt zu einer langen Rampzeit von mehr als 20 Minuten.

Da die Protonen auch bei 920 GeV kaum Energie durch Synchrotronlichtabstrahlung verlieren, benötigt man zur Beschleunigung hingegen nur moderate Beschleunigungsspannungen. Die Beschleunigungscavities sind deshalb in normalleitender Technologie ausgeführt. Lediglich im Westen des Beschleunigers gibt es sechs verschiedene Beschleunigungssysteme: zwei mit einer Frequenz von 52 MHz und 4 weitere mit der dritten Harmonischen davon, nämlich 208 MHz, welche aber erst bei hohen Energien langsam zugeschaltet werden.

Einige grundlegende Maschinenparameter sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Derzeit gibt es zwei Hochenergie-Teilchenphysik-Experimente an HERA-p, im Norden H1 und im Süden ZEUS (siehe Abb. 1). Das Experiment HERA-B, welches seinen Detektor im Westen von HERA installiert hatte, hat die Datennahme 2004 beendet und der Detektor wurde im Shutdown 2004 entfernt. Die verbliebenen Experimente sind Kollisionsexperimente, d. h. sie untersuchen die Kollisionsprodukte, die bei der Kollision der Protonen aus HERA-p mit Elektronen (oder Positronen) entstehen, welche in einem separaten Ring im gleichen Tunnel beschleunigt werden (HERA-e). Um eine möglichst hohe Kollisionsrate (Luminosität) zu erreichen, müssen die Protonen-Bunche möglichst kompakt sein, d.h. möglichst kurz und auch transversal wenig ausgedehnt. Das vom Strahl besetzte Phasenraumvolumen (gegeben durch longitudinale und transversale Emittanzen) muß möglichst klein sein und die longitudinale und transversale Fokussierung an den Wechselwirkungspunkten möglichst groß.

2.2 Die Vorbeschleuniger, Füllmuster

Die Vorbeschleunigerkette für HERA-p besteht aus der H^- -Quelle, LINAC-III, dem Stripper, DESY-III und PETRA-II. Die Einzelheiten aller Beschleuniger in dieser Kette hier aufzulisten, würde den Rahmen sprengen. Erwähnenswert ist aber sicherlich, daß die Protonen erst hinter der ersten Beschleunigerstufe, dem LINAC-III erzeugt werden. Aus der Quelle werden nämlich zunächst einmal negativ geladenen Wasserstoff-Ionen extrahiert (H^-). Bei 50 MeV werden die

H^- -Ionen dann durch eine dünne sogenannte Stripping-Folie geschossen, bei der die Ionen ihre Elektronen abstreifen und die Atomkerne – also Protonen – übrigbleiben.

Ein Linac-Strahlpuls füllt genau einen Umfang von DESY-III. Hier wird der zunächst noch ungebunchte Strom durch langsames Einschalten der DESY-III HF (3.3 MHz bis 10.3 MHz) und gleichzeitiges Beschleunigen auf 6.6 GeV in 11 Bunchen eingefangen. Der 11te Bunch wird aber kurz vor dem Transfer nach PETRA durch einen speziellen Kicker eliminiert, so daß schließlich ein 10er Zug mit einer Lücke transferiert wird. Die Lücke ist nötig, damit die Extraktionskicker Zeit haben, um auf volle Spannung zu kommen, ohne einen Protonenbunch zu zerreißen. Sechs dieser Pakete werden in PETRA gefüllt. Auch hier muß eine (größere) Lücke für die Flanken der Extraktionselemente bleiben. Da die PETRA-Beschleunigungscavities mit 52 MHz betrieben werden, ist die Anzahl der theoretischen Buckets 400. Wegen der Vorbeschleuniger-HF (10.4 MHz, entsprechend 96 ns Bunchabstand) kann aber nur in jedem fünften Bucket ein Bunch gefüllt sein. Von den 80 nutzbaren Buckets, werden dann wegen der Kickerlücken nur max. 60 tatsächlich gefüllt. Manchmal kommt es vor, daß noch Überreste der 11ten Bunche vorhanden sind, oder gar sogenannte Nebenbunche (also Bunche in den benachbarten, eigentlich nicht genutzten Buckets) existieren. Dies soll aber normalerweise verhindert werden.

PETRA beschleunigt den Protonenstrahl auf 40 GeV. Endlich werden drei PETRA-Füllungen nach HERA transferiert, so daß dort maximal 180 Bunche gefüllt sein können.

Auf dem Umfang verteilt gibt es bei HERA 220 nutzbare Buckets, in denen sich Strahlpakete befinden können. Aus oben bereits erwähnten technischen Gründen, insbesondere auch wegen der Anstiegsflanke der Dumpkicker bei HERA und der Injektionskicker auch bei den Vorbeschleunigern werden nur 180 dieser Buckets genutzt. Das typische Füllmuster von HERA-p ist zusammen mit einem Überblick über die gesamte Anlage inklusive aller Protonen-Vorbeschleuniger in Abb. 1 gezeigt.

Erreichbare Ströme

Weil man in Protonenbeschleunigern nicht akkumulieren kann – im Gegensatz zu e^+ und e^- -Beschleunigern, wo ein Nachfüllen wegen der Synchrotronstrahlungsdämpfung möglich ist, wird der in HERA erreichbare Strom durch die Vorbeschleuniger bestimmt. Die sogenannten Designströme in den Speicherringen werden durch den Strom definiert, den man erhält, wenn man eine Ladung von 10^{11} Teilchen pro Bunch annimmt. Dies bedeutet für DESY III 165 mA, für PETRA 125 mA und für HERA 135 mA. Die Transferverluste führen allerdings zu ungünstigeren Verhältnissen von erreichbaren und gewünschten Strömen. In HERA konnten im vergangenen Jahr relativ problemlos 90 mA erreicht werden, maximal etwa 110 mA. Dies hat sich in den letzten Jahren auch nicht wesentlich geändert (vergleiche [4]).

2.3 Etwas Statistik zum Betrieb

Wichtige Eckpunkte für den Betrieb des Beschleunigers HERA-p geben auch die operationellen Parameter an. Die größte Steigerungsmöglichkeit der absoluten und akkumulierten Luminosität liegt bei HERA in der Verbesserung der sogenannten *Uptime*, also des Verhältnisses der Zeit, in der Luminosität geliefert (und von den Experimenten auch genutzt) werden kann, zur Gesamtzeit. Hierzu ist wichtig zu betrachten, wie die Betriebszeit zusammengesetzt ist. Entscheidende Parameter sind

1. Die Run-Zeit, also die Zeit in der der Protonenstrahl bei nominal-Energie gespeichert werden kann und für Kollisionen zur Verfügung steht. Da die Strahllebensdauer recht groß ist, werden Protonenfüllungen hauptsächlich durch technische Ausfälle beendet oder durch manuellen Dump, z.B. weil es technische Probleme mit der Elektronenmaschine gibt, der Elektronen-Run zuende ist und die Protonenemittanzen (durch die Kollisionen) bereits so groß geworden sind, daß man eine frische Füllung wünscht.
2. Die Dauer der Beschleunigungsrampe. Diese ist durch die Prozedur festgelegt, die im sogenannten Sequencer implementiert wurde. Hierdurch wird eine Minimalzeit vorgegeben, welche in der Regel nicht unterschritten werden kann, es sei denn, die gesamte Prozedur wird geändert. (Letztlich ist die Zeit limitiert durch die Induktivität der supraleitenden Magnete.)
3. Die Dauer zwischen den Runs, also die Zeit die es benötigt, vom Strahldump eines alten Runs einen neuen zu präparieren, also Massage der Magnete, Aufsetzen der Vorbeschleuniger und die Injektion nach HERA bis zum Beginn einer neuen Rampe.

Diese drei Zeiten sind in einer Statistik in Zeitspektren in Abb. 2 für die Jahre 2004 und 2005 dargestellt. Es scheinen sich trotz recht vielfältiger Gründe für Ausfälle über die Jahre hinweg recht universelle Zusammenhänge zu ergeben. Hier kurz die wichtigsten Zahlen:

Typische Zeit bis neu gefüllt ist: ca. 1 bis 1.5 Stunden. Längere Wiederfüllzeiten kommen aber auch häufig vor. Hierbei fällt die Anzahl mit einer Exponentialfunktion mit einer Zeitkonstanten von 1.5 h ab. Typische Beschleunigungszeit: 28 Minuten 2004 sowie 31 Minuten 2005. Die Runlängen gliedern sich in zwei Bereiche. Erfolgreiche Füllungen im Standard-Lumi-Betrieb halten 15 Stunden plus minus 5. Problematische Runs haben nur eine Länge von kleiner 7 Stunden, wobei dort ein Skalengesetz zu herrschen scheint, d.h. die kürzesten Runs sind die häufigsten, oder: wenn was schief geht, dann passiert es gleich. Es macht hier also Sinn, bei ca. 7 Stunden einen Schnitt zu ziehen, für die Unterscheidung von langen und kurzen Runs.

2.4 Das doppel-Frequenz HF-System

Eine Besonderheit von HERA-p ist, daß zur Beschleunigung (und longitudinalen Fokussierung) der Protonenbunche zwei unterschiedliche Frequenzen verwendet werden. Die Normalfrequenz ist – wie schon bei PETRA – 52 MHz, also das Fünffache der Bunchfrequenz (10.4 MHz)¹. Zwei 52 MHz-Cavity-Systeme (A und B), welche im Westen des Rings platziert sind, liefern zusammen maximal 240 kV Beschleunigungsspannung.

¹Alle Frequenzen sind auch bei HERA-p noch leicht energieabhängig, da ja wegen der Teilchenmasse von 938.272 MeV/c² die Lichtgeschwindigkeit noch nicht vollständig erreicht ist. Es ist sinnvoll, alle Frequenzen auf die sich ändernde Umlauffrequenz zu beziehen. Die Bunchfrequenz ergibt sich aus $f_b = 220 \cdot f_0$, die Frequenzen der Beschleunigungs-Hochfrequenzen aus $f_{\text{HF}} = h_{\text{HF}} \cdot f_0$. Wobei die Harmonischenzahlen h_{HF} für die 52 MHz bzw. 208 MHz Systeme gegeben sind zu $h_{52} = 1100$ und $h_{208} = 4400$.

Für den Alltag sind hier die wichtigsten Zahlen in einer Tabelle zusammengestellt:

| E [GeV] | f_0 [kHz] | f_b [MHz] | f_{52} [MHz] | f_{208} [MHz] |
|---------|-------------|-------------|----------------|-----------------|
| 40 | 47.30386 | 10.4068492 | 52.034246 | 208.136984 |
| 70 | 47.31283 | 10.4088226 | 52.044113 | 208.176452 |
| 150 | 47.31616 | 10.4095552 | 52.047776 | 208.191104 |
| 300 | 47.31685 | 10.409707 | 52.048535 | 208.19414 |
| 920 | 47.31700 | 10.409740 | 52.0487 | 208.1948 |

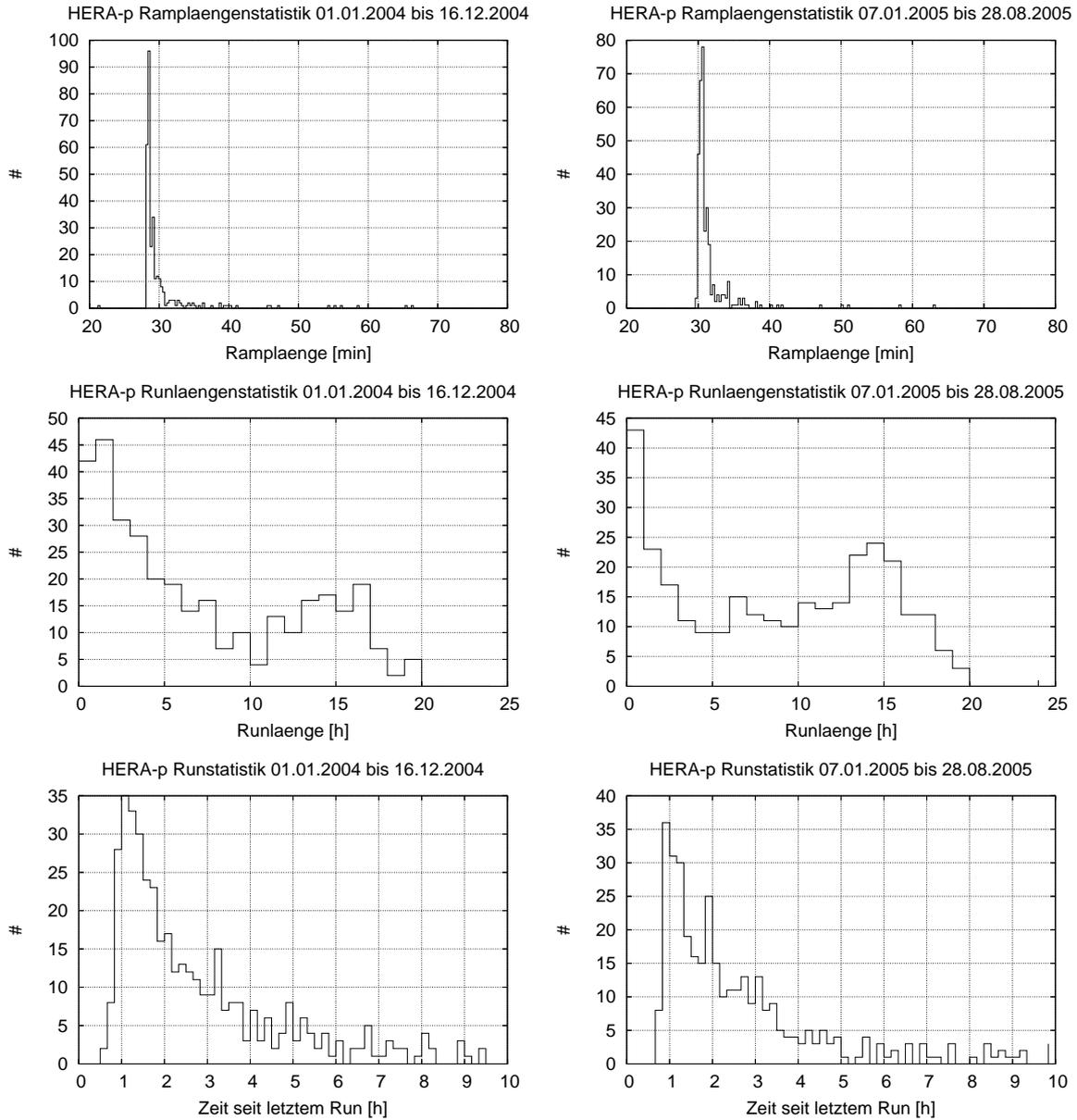


Abbildung 2: Betriebsstatistik bei HERA-p. Dargestellt sind Histogramme der Ramp-Längen, der Runlängen und der Run-Zwischenzeit, der Zeit, die es benötigt, vom Strahldump eines alten Runs einen neuen zu präparieren. Jeder Eintrag ist eine Protonenfüllung mit mindestens 50 mA Strahlstrom.

| E s [GeV] | 52 MHz | | 208 MHz | | | | Summe [kV] |
|--------------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|---------------|
| | A [kV] | B [kV] | A [kV] | B [kV] | C [kV] | D [kV] | |
| 40 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | -280 | 140-70 |
| 50 | 85 | 85 | 70 | 70 | 70 | -280 | 170-70 |
| 60 | 90 | 90 | 70 | 70 | 70 | -280 | 180-70 |
| 70 | 90 | 90 | 70 | 70 | 70 | -220 | 180-10 |
| 80 | 110 | 110 | 70 | 70 | 70 | -170 | 220+40 |
| 90 | 110 | 110 | 70 | 70 | 70 | -170 | 220+40 |
| 100 | 110 | 110 | 75 | 75 | 75 | -50 | 220+175 |
| 200 | 110 | 110 | 75 | 75 | 75 | -50 | 220+175 |
| 300 | 120 | 120 | 120 | 120 | 120 | -50 | 240+310 |
| 800 | 120 | 120 | 120 | 120 | 120 | -50 | 240+310 |
| 820 | 120 | 120 | 190 | 190 | 190 | -50 | 240+520 |
| 920 | 90 | 90 | 130 | 130 | 130 | -30 | 180+360 |

Tabelle 2: Ramptabelle für die HF-Systeme bei HERA-p. Für Energien zwischen den Stützpunkten wird linear interpoliert.

Zusätzlich wird ab einer Energie von etwa 100 GeV eine Gruppe von vier weiteren Cavity-Systemen (A, B, C und D) hinzugenommen, die bei der zweiten Harmonischen der 52 MHz, nämlich bei 208 MHz betrieben werden. Während der Beschleunigungsrampe wird die effektive Gesamtspannung dieser Systeme langsam erhöht, so daß die Bunche effektiv in einem kürzeren Bucket gefangen werden, was dazu führt, daß die Bunchlänge deutlich von ca. 3 ns bei Injektion (und im 52 MHz Bucket) reduziert werden kann auf 1.5 ns (bzw. 1.0 ns bei eingeschaltetem longitudinalen Feedback¹) bei 920 GeV.

Mit dieser Technik wird eine stärkere longitudinale Fokussierung erreicht. Allerdings kann man nicht sofort vom 52 MHz Bucket auf das 208 MHz Bucket übergehen, da die Bunche bei Injektion noch zu lang sind, und 208 MHz-Nebenbunche entstehen würden. Man schaltet deshalb die 208 MHz Systeme adiabatisch während der Beschleunigung zu. Dies führt dazu, daß die Teilchen sich in den neuen Potentialtöpfen sammeln, da durch die Beschleunigung eine Art Dämpfung entsteht, die dazu führt, daß die Bunche von alleine kürzer werden, so daß sie schließlich in ein 208 MHz Bucket passen. Dieser Prozeß des langsamen Zuschaltens der 208 MHz wird in einer Ramp-Tabelle realisiert. Die Ramptabelle der P-HF-Systeme (wie sie derzeit verwendet wird) zeigt Tabelle 2. Durch die unterschiedlichen Spannungen in den einzelnen Systemen durchläuft die effektive Potentialform eine Metamorphose, wie sie in Abb. 3 dargestellt ist. Hierzu gibt es zu sagen, daß die 208 MHz Systeme aus technischen Gründen nie ausgeschaltet werden. Stattdessen wird ihre Wirkung zu Null kompensiert, indem das System D mit der dreifachen Spannung 180 Grad entgegengesetzt zu den Systemen A, B und C wirkt.

Wegen der komplexen Beschleunigungsspannungsschemata ändert sich sowohl die Bunchlänge, als auch die Synchrotronfrequenz mit der Energie. Diese Änderungen sollen nun noch etwas konkreter betrachtet werden.

¹Theoretisch sollte die Bunchlänge bei Nominalmittanz, entsprechend einer Bunchlänge von 2.5 ns bei Injektion, bis auf 0.8 ns schrumpfen können, dies wird aber derzeit noch nicht erreicht. Ursachen für eine Aufweitung der longitudinalen Emittanz, welche eigentlich eine Erhaltungsgröße ist, sind longitudinale (Multibunch-) Instabilitäten und das Amplituden- und besonders Phasenrauschen der HF in den Cavities.

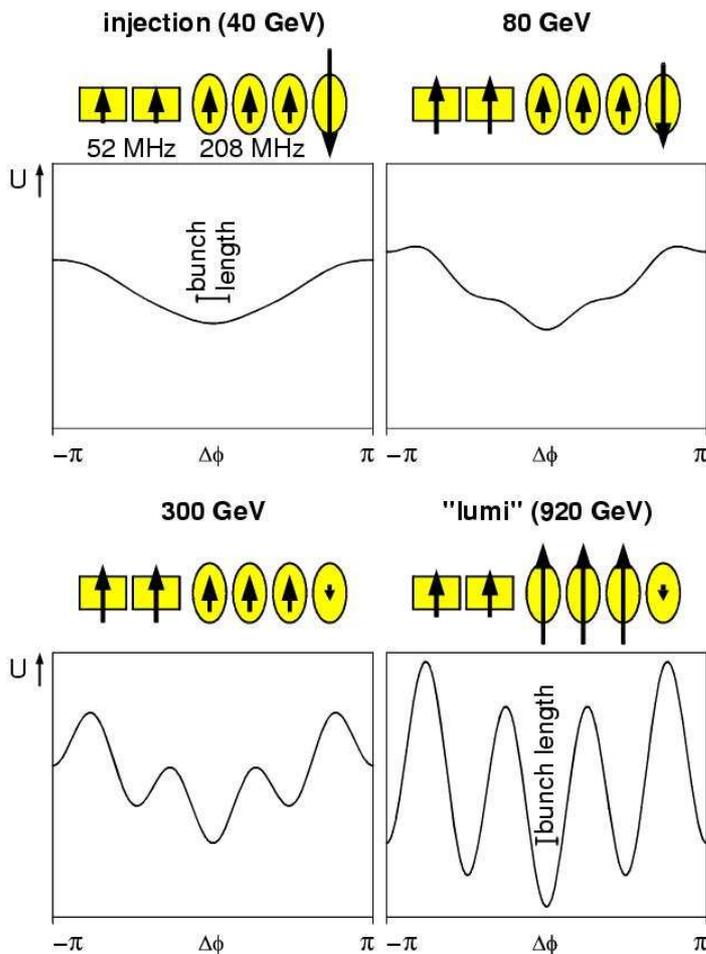


Abbildung 3: Veranschaulichung der Bunchverkürzung während der Rampe aufgrund der adiabatischen Zuschaltung der 208 MHz Systeme. Dargestellt ist jeweils das von den Teilchen im Bunch gesehene Potential und die jeweilige Bunchlänge bei verschiedenen Energien.

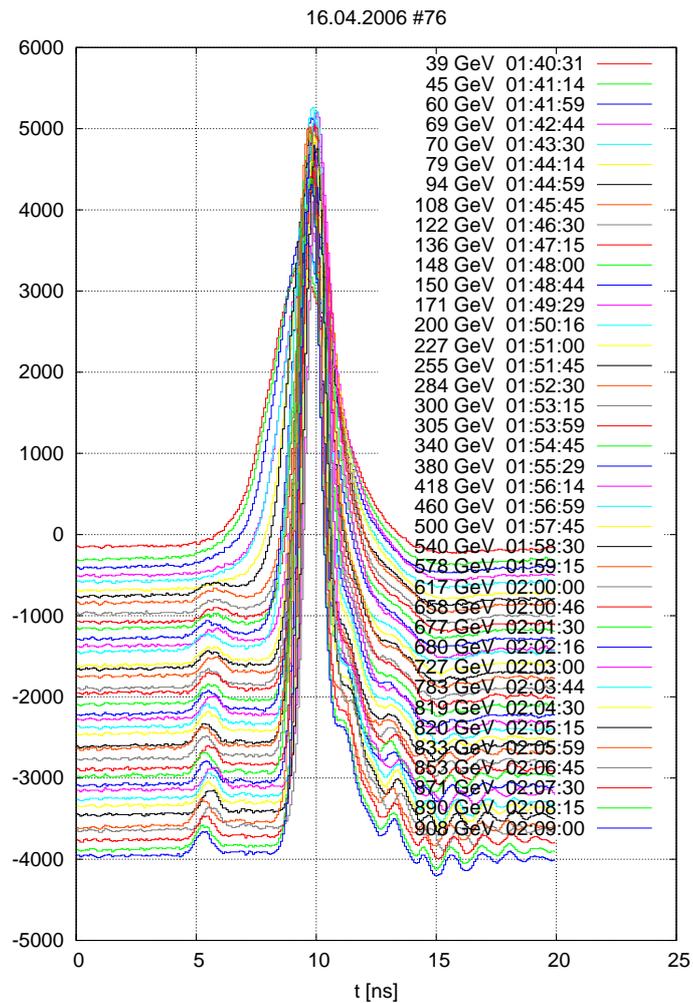
2.5 Bunchlänge und Synchrotronfrequenz

Bezogen auf die longitudinale Strahldynamik bei HERA-p sind drei Parameter von besonderem Interesse: Die *Bunchlänge*, die *Synchrotronfrequenz* und außerdem noch die *Bunchphase*. Alle Größen können für verschiedene Bunche leicht unterschiedlich sein. Dies kommt hauptsächlich vom unterschiedlichen Beamloading in den Beschleunigungscavities, da die Füllstruktur nicht gleichmäßig ist. Die mittleren Größen (und damit die aller Bunche gemeinsam) ändern sich aber mit der Energie und mit der Fokussierungsstärke, also der Beschleunigungsspannung, außerdem mit der Potentialform, welche durch das Verhältnis der beiden Beschleunigungssysteme (52 MHz und 208 MHz) gegeben wird.

Die Bunchlänge wird einmal von der Fokussierung, in diesem Falle der Stärke der HF-Amplitude in den Beschleunigungsstrukturen, und außerdem von der longitudinalen Emittanz bestimmt. Die Fokussierung läßt sich nicht beliebig vergrößern, da sie von der benötigten HF-Spannung limitiert wird. Die Protonen-Emittanz wird bereits von den Vorbeschleunigern vorgegeben und ist erhalten (kann sich also nicht verkleinern, da die Strahldämpfung durch Synchrotronstrahlung auch bei HERA-p noch vernachlässigbar ist). Sie wird im Wesentlichen vom Injektionsprozeß vergrößert und von auf der Rampe auftretenden longitudinalen Instabilitäten, den Multibunch-Moden.

Es gibt unterschiedliche Verfahren zur Messung der Bunchlänge. Eine davon ist die Mes-

Abbildung 4: Änderung der Bunchform und -länge während der Beschleunigung bei HERA-p. Die Messung geschieht mit dem Sogenannten LOPEZ-Monitor. Deutlich zu sehen ist der linke Nebenbunch, welcher entsteht, wenn der Bunch nicht vollständig in das 208 MHz Bucket übernommen wird. Der rechte Nebenbunch wird von der Messung nicht gut aufgelöst.



sung über das Bunchprofil. Es wird am sogenannten LOPEZ-Monitor gemessen und mit einem Oszilloskop ausgelesen, welches auf den richtigen Bunch triggert und dann ausgelesen werden kann. Aus den so gewonnenen Spuren, welche exemplarisch für eine typische Rampe in Abb. 4 dargestellt sind, läßt sich auf direktem Wege die FWHM (Full Width Half Maximum, volle Breite auf halber Höhe) bestimmen.

Eine andere Methode ist die beim FLD (FLD=Fast Longitudinal Diagnostics, „schnelles longitudinales Diagnosesystem“). Für eine ausführliche Beschreibung dieses Systems siehe [5].) verwendete. Hierbei werden die Frequenzkomponenten des Bunch-Signals bei 52 MHz und bei 208 MHz ausgewertet. Ein kürzerer Bunch hat dabei einen höheren 208 MHz-Anteil. Die Einzelheiten dieser Methode sind in [5] beschrieben. Die Bunchlängenmessung kann auf diese Weise für alle Bunche gleichzeitig und mit hoher zeitlicher Auflösung erfolgen. Sogenannte Shape-Schwingungen lassen sich damit beobachten. Allerdings sind die so gewonnen absoluten Werte nicht sehr genau, und es erfordert einen aufwendigen Abgleich und eine Kalibrierung, um unterschiedliche Dämpfungen in den 208 MHz und 52 MHz-Komponenten-Meßzweigen zu berücksichtigen. Außerdem wird hier von einem Gaußförmigen Bunchprofil ausgegangen, was in Wahrheit nur annähernd¹ der Fall ist, wie man deutlich auch in der Abb. 4 erkennen kann.

¹Wegen der Nichtlinearität des longitudinalen Potentials kann das Bunchprofil nicht gaußförmig sein. Es stellt sich eine andere Gleichgewichtsverteilung ein, welche nur in etwa einer Gaußkurve ähnelt. Sie läßt sich nur

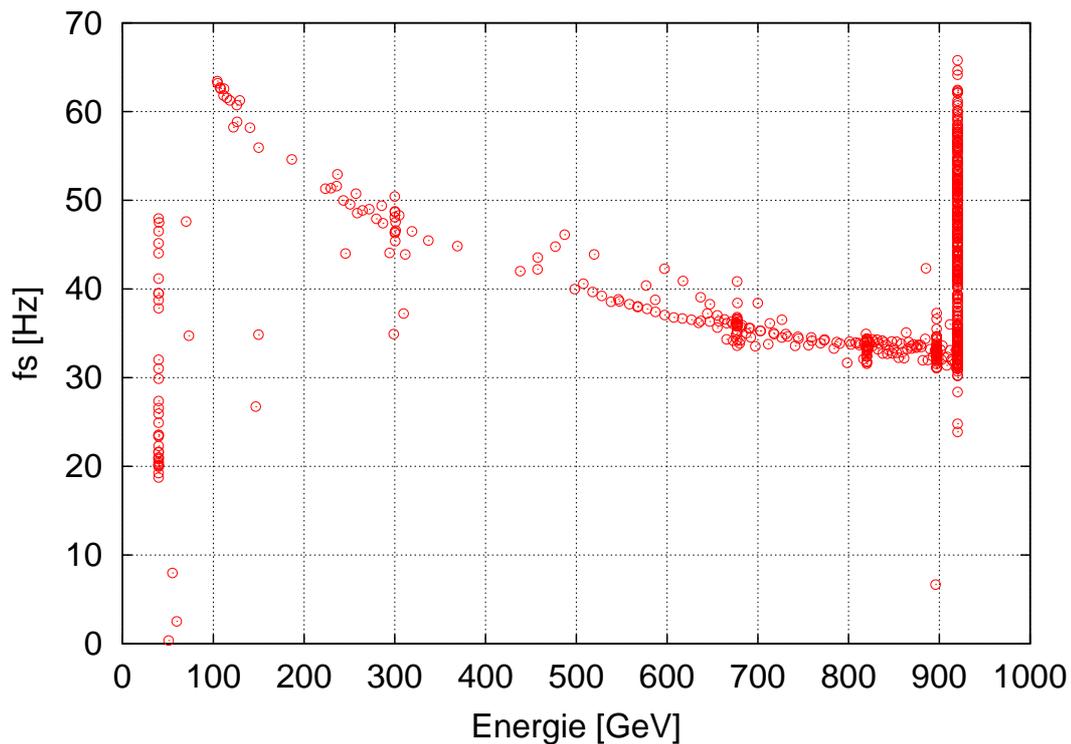


Abbildung 5: Mit dem FLD gemessener Verlauf der Synchrotronfrequenz f_s in Abhängigkeit von der Energie (gewonnen aus einigen typischen Rampen im Dez. 2004).

Synchrotronfrequenz

Durch die unterschiedliche longitudinale Fokussierung während der Beschleunigungsrampe bei HERA-p kommt es zusätzlich auch zu einer Änderung der Synchrotronfrequenz (siehe Abb. 5). Bei Injektion beträgt die Frequenz etwa $f_s = 20 \text{ Hz}$ ¹. Bis 100 GeV steigt sie dann stark an auf über 65 Hz. Danach fällt sie dann langsam auf ca. 35 Hz bei 920 GeV ab. Der Verlauf entspricht in etwa dem berechneten aus [6]. Die sich ändernde Synchrotronfrequenz hat einige Konsequenzen. Zunächst einmal wird die überall vorhandene Netzfrequenz von 50 Hz zweimal gekreuzt. Dies führte zu dem Verdacht, daß Instabilitäten möglicherweise durch den Netzbrumm, welcher sich auch auf den Strahl überträgt, angeregt werden könnten. Dieser Verdacht konnte aber nur in einigen Fällen bestätigt werden. Zum anderen müssen alle longitudinalen Dämpfungssysteme mit der sich um mehr als einen Faktor zwei ändernden Synchrotronfrequenz zurechtkommen.

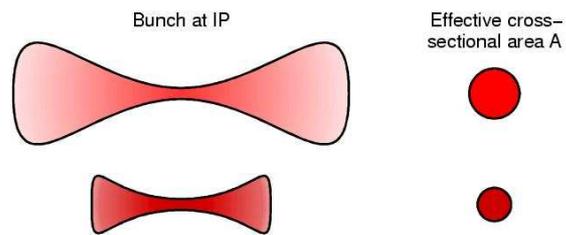
Der Hour-Glass-Effekt bei HERA

Warum ist es nun so entscheidend wichtig, die Bunchlänge der Protonenbunche kurz zu halten?

schwer analytisch beschreiben und wird normalerweise aus numerischen (Tracking-)Rechnungen gewonnen, wie z.B. in [7].

¹Eine genauere Messung hat ergeben, daß die Synchrotronfrequenz bei Injektion bei sogenannten *10er Injektionsbedingungen* (die 208 MHz Systeme werden nicht angesteuert) $f_s = 26 \text{ Hz}$ beträgt und bei *60er Injektionsbedingungen* $f_s = 21.7 \text{ Hz}$. D.h. die Kompensation der 208 MHz-Systeme wie in der Ramptabelle (s.o.) ist eine Überkompensation und könnte neu überdacht werden.

Abbildung 6: Prinzip des Einflusses der Bunchlänge am Wechselwirkungspunkt auf die effektive Strahlbreite



Betrachtet man einen Bunch, welcher sich gerade exakt beim Passieren einer Wechselwirkungszone befindet, so wird die Bunchform transversal extrem fokussiert, so daß der Bunch eine Art Sanduhr-Form (*hour glass*) annimmt (siehe Abb. 6). Der effektive Durchmesser des Bunches, wie er vom kollidierenden Elektronenbunch¹ gesehen wird, ist dabei um so kleiner, je kürzer der Protonenbunch ist. Je kürzer der Bunch, desto mehr Teilchen halten sich zur gleichen Zeit in der engsten Stelle der Wechselwirkungszone auf, wo die Teilchendichte am größten ist. Die Luminosität ist dann überproportional größer. Die genaue Abhängigkeit der Luminosität von der Bunchlänge und der transversalen Fokussierung der Bunche in den Wechselwirkungs-zonen zeigt Abb. 7. Ein Maß für die engste Stelle der Sanduhr ist die sogenannte Betafunktion.

2.6 Protonen-Bunchlängen im Detail

Aufgrund der longitudinalen Strahldynamik (s.o.) und der bei HERA verwendeten doppelten HF-Systeme, die in ihrer Spannung während der Rampe individuell gefahren werden, ändert sich die Bunchlänge. Die Entwicklung der Bunchlänge während einer typischen HERA-p-Füllung über mehrere Stunden zeigt Abb 8. Man erkennt die recht große Bunchlänge bei Injektion. Jeder Transfer einer weiteren PETRA-Füllung vergrößert die Bunchlänge weiter. Während der Rampe verkleinert sich die Bunchlänge bis sie bei verschiedenen Energien sprunghaft größer wird. Während der Speicherzeit des Strahls verlängert sich die Bunchlänge allmählich, je kürzer die Bunche, desto schneller.

Folgende Faktoren bestimmen die Bunchlänge:

1. Die Bunchlänge direkt nach der Injektion von PETRA. Zum Einen kommt hier die longitudinale Emittanz zum Tragen, welche schon von allen vorher durchlaufenen Vorbeschleunigern einschließlich der Protonen²-Quelle gegeben ist; Zweitens kommt es wegen des unterschiedlichen Beamloadings in PETRA und in HERA zu individuellen longitudinalen Injektionsschwingungen, die die Emittanz aufweiten, und letztlich hängt die Bunchlänge bei Injektion von der mehr oder weniger optimalen Einstellung der Injektionsphasen und der Energie beider Maschinen ab.
2. Die Bunchlängenreduzierung mit der Beschleunigung bei HERA. Hierbei ist die longitudinale Emittanz bestenfalls erhalten, mit der Energie nimmt jedoch die longitudinale Fokussierung zu.
3. Das Einschalten der 208 MHz Systeme und die Übernahme der Bunche in kürzere Buckets während der Rampe verringert die Bunchlänge erheblich.

¹Die Elektronenbunche sind mit ca. 81 ps, entsprechend 10.3 mm im Vergleich zu den Protonenbunchen um einiges kürzer.

²Bzw. H⁻-Quelle

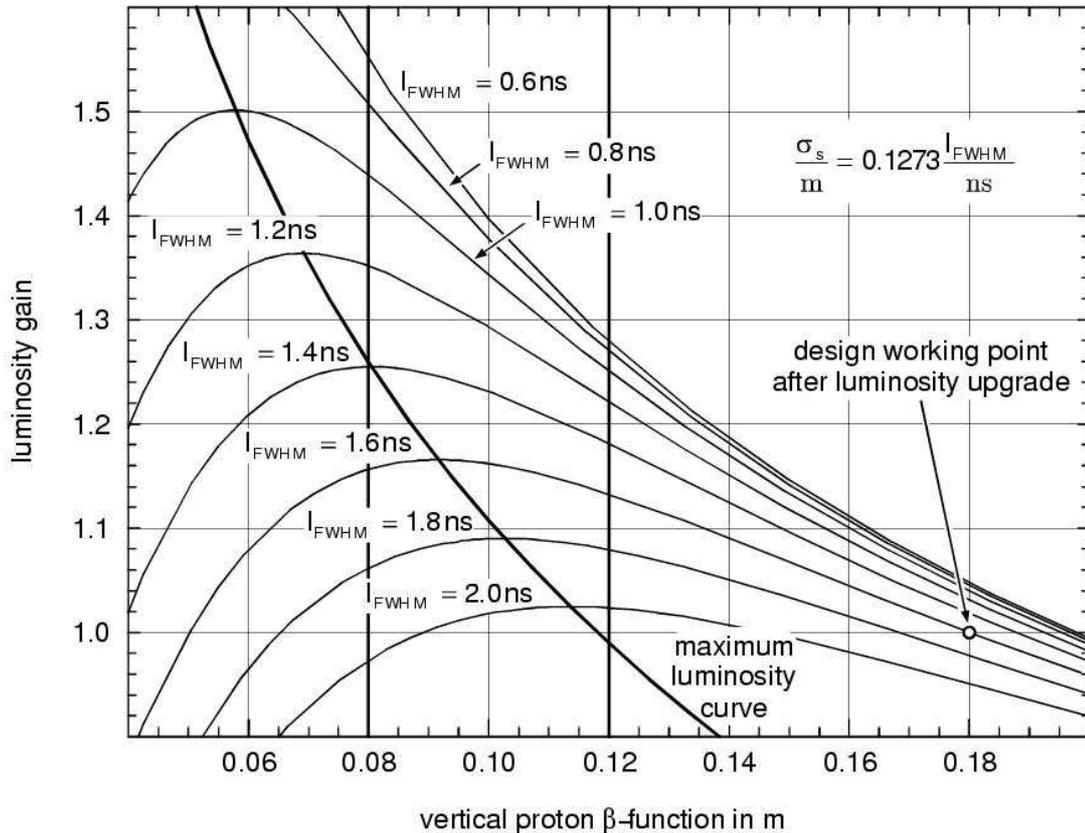


Abbildung 7: Abhängigkeit der Luminosität (hier als relativer Gewinn gegenüber der derzeitigen Situation) bei gegebener Bunchlänge von der vertikalen Fokussierung am Wechselwirkungspunkt. Eine Bunchlänge von 1 ns entspricht einer echten Länge von 12.73 cm (1-Sigma). Die Transversale Ausdehnung ist noch von den Emittanzen abhängig, die ca. 20π mm mrad betragen. Grafik entnommen aus [5].

4. Es kommt zu einer Verlängerung der Bunche durch *Intra-Beam-Scattering*. Hierbei vergrößert sich auch die longitudinale Emittanz. Der Effekt ist bei kleiner Bunchlänge und kleiner Energieakzeptanz besonders stark.
5. Es kommt zu einer unkontrollierten Bunchlängenvergrößerung während der Rampe durch longitudinale Instabilitäten.
6. Schließlich haben sämtliche stochastische Störungen, teilweise auch transversale, einen verlängernden Effekt auf die Bunchlänge. Besonders wirkt sich hierbei HF-Rauschen der Beschleunigungscavities aus.

Einige der oben aufgeführten Effekte sind von der Teilchendichte im Bunch abhängig. Man erwartet daher eine Stromabhängigkeit der Bunchlänge, was auch tatsächlich beobachtet werden kann (siehe Abb. 9). Je weniger Strom, desto kürzer sind die Bunche am Ende der Beschleunigungsprozedur.

Dies ist andererseits aber auch etwas verwunderlich, da sich zwar die Bunch-Zahl, nicht jedoch so sehr die Bunchladung in HERA ändert. Typische Bunch-Füllungen wurden mit 120,

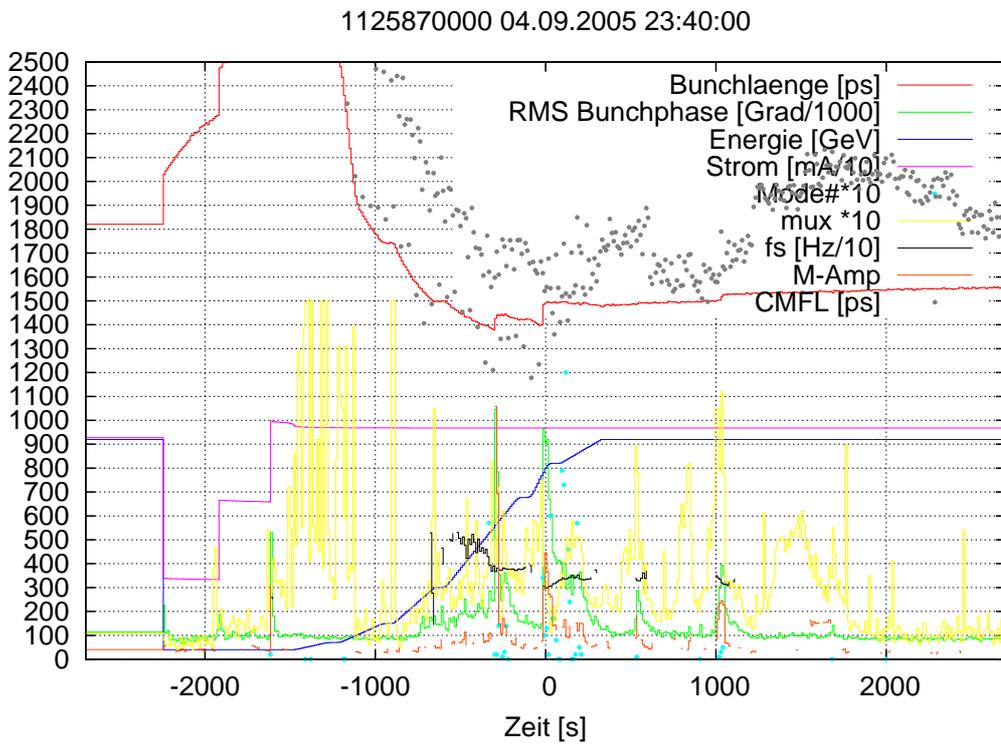
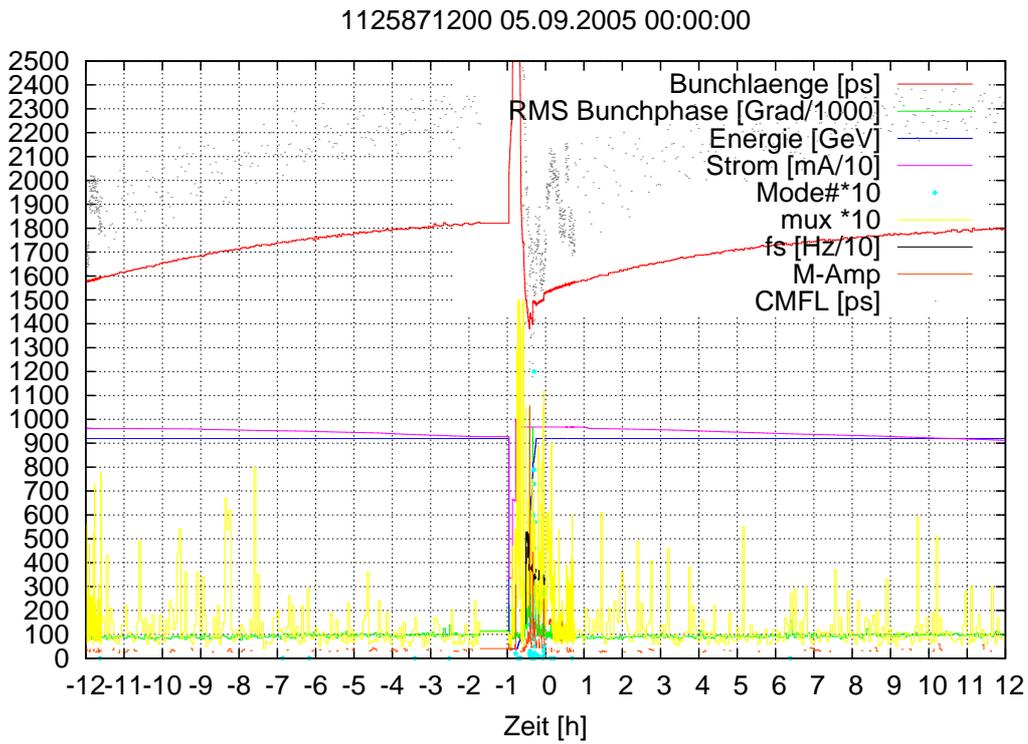


Abbildung 8: Verschiedene Größen wie Energie, Strom, mittlere Bunchlänge sind hier über einen Zeitraum von 24 Stunden (oben), und während der Beschleunigung über einen Zeitraum von ca. 2 Stunden (unten) dargestellt.

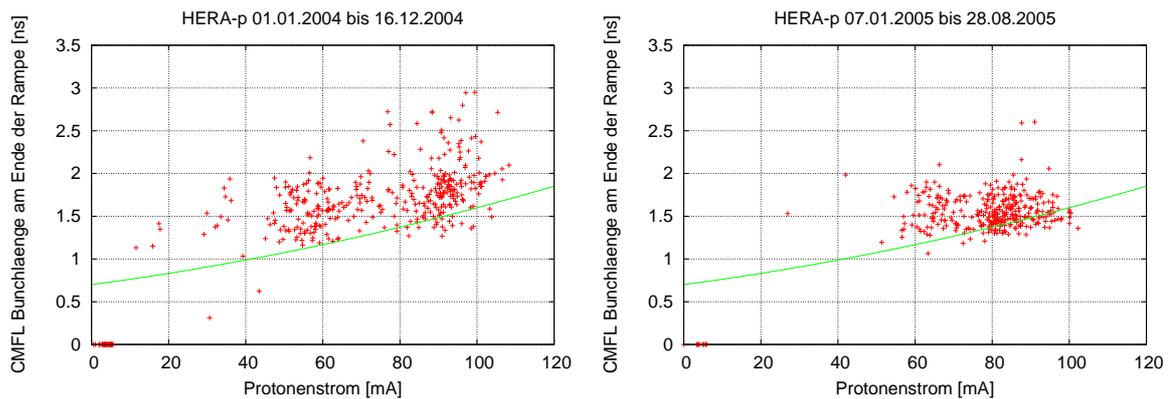


Abbildung 9: Protonen-Bunchlängen nach der Protonen-Rampe in Abhängigkeit vom gefüllten Gesamtstrom in HERA-p für die Jahre 2004 und 2005. Jeder Punkt repräsentiert je einen Run. Da die CMFL Bunchlängenmessung eine Einzelbunch-Messung eines zufällig ausgewählten Bunches ist, gibt die Streuung außerdem noch die Bunchlängenvariation unter den verschiedenen Bunchen einer Füllung wider.

150 oder 180 Bunchen gefahren, entsprechend einem Gesamtstrom von 60, 75 bzw. 90 mA. Andererseits ist die Stärke der Bunch-Kopplung untereinander offenbar vom Gesamtstrom abhängig, was sich dann im Auftreten von Multibunchinstabilitäten und letztlich in der verlängerten Bunchlänge äußert. Innerhalb der Gruppen mit gleicher Bunchzahl sollte dann noch ein Bunchlängenunterschied bedingt durch unterschiedlichen Bunchstrom sichtbar sein. Dies ist aus obigen Daten allerdings nicht eindeutig ablesbar. Über die Emittanz sollte außerdem die Bunchlänge bei Injektion mit der am Ende der Rampe korreliert sein. Dieser Zusammenhang wird allerdings durch die Multibunchinstabilitäten während der Rampe zerstört, bzw. sogar umgekehrt, da die Bunche um so eher und stärker aufplatzen, je kürzer sie vorher gewesen sind (Abb. 10).

Die Häufigkeit der mit dem CMFL (LOPEZ) Monitor gemessenen Protonen-Bunchlängen nach der Injektion (vor der Rampe, oben), nach der Rampe (Mitte) und am Ende des Runs (unten) für verschiedene Jahre zeigt Abb. 11. Hier ist zunächst einmal zu erkennen, daß – abgesehen von den wenigen Runs mit nennenswerten Strömen (es wurden nur Füllungen mit mehr als 55 mA betrachtet.) im Jahre 2003 – die Anzahl der Runs, insbesondere auch die, welche länger als 7 Stunden andauerten, im Laufe der Jahre gestiegen ist, was nicht zuletzt auf den verbesserten Betriebsablauf zurückzuführen ist.

Die Bunchlängen nach der Injektion (vor der Rampe) streuen sehr stark zwischen etwa 2.5 ns und 4.5 ns. Dies hat sich im Laufe der Zeit auch kaum verbessert. Dennoch ist die Streuung nach der Rampe kleiner. Die Verteilung wird also komprimiert. Da es, wie oben schon gesehen, kaum eine Korrelation zwischen der Bunchlänge vor der Rampe und der nach der Rampe gibt, sollte die Verteilung der Bunchlängen nach der Rampe jetzt hauptsächlich durch die Dynamik der Multibunchinstabilitäten während der Rampe bestimmt sein. Die in den Jahren 2003/2004 noch teils erhebliche Streuung der Werte zwischen 1 ns und 2 ns am Anfang der Runs (nach der Rampe) rühren vermutlich hauptsächlich vom noch nicht routinemäßigen Aufsetzen der Maschine her (und den stark unterschiedlichen Strömen). In der Zeit ab Anfang 2004 stabilisierte sich der Betrieb und die Ströme (sowohl Protonen wie auch Positronen) konnten stark gesteigert

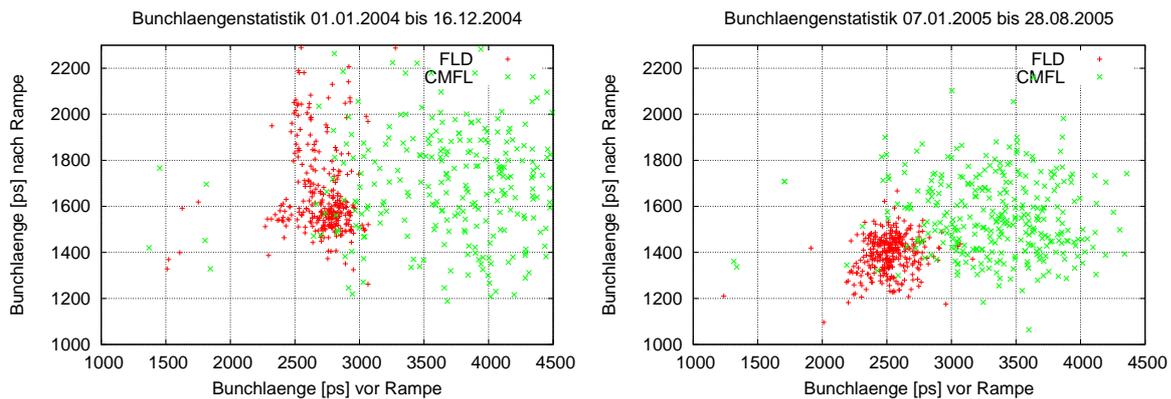


Abbildung 10: Protonen-Bunchlängen vor der Rampe aufgetragen gegen die nach der Beschleunigung bei HERA-p für die Jahre 2004 und 2005. Jeder Punkt repräsentiert je einen Run. Es sind CMFL Einzelbunch-Messungen sowie die mittlere Bunchlänge dargestellt gemessen mit dem FLD. Die Daten sind kaum korreliert.

werden. Begleitet wurde dies aber auch durch die Zunahme der Bunchlängen von 1.5 ns auf über 2 ns. Das Histogramm zeigt eine relativ scharfe Kante bei 1.5 ns, was wir deshalb als Grenze für das Auftreten der Multibunchinstabilitäten ansehen, und was auch zum Verlauf der Bunchlängenentwicklung auf der jeweiligen Rampe paßt. Dieser Trend setzte sich schließlich auch im Jahr 2005 fort. Hier konnte jedoch bereits eine Verschiebung der Bunchlängenverteilung im Schwerpunkt auf die 1.5 ns erreicht werden. Welche Maßnahmen dazu geführt haben mögen, ist unklar. Auffällig ist jedoch, daß im Jahre 2005 auch schon die Anfangsverteilung (also nach der Injektion) deutlich günstiger war. Zusätzlich wurde die HERA-B Vertex-Kammer im Shutdown Ende 2004 entfernt – eine mögliche Quelle für die Multibunchinstabilitäten verstärkende Impedanzen [2, 3].

Auch die mittlere typische Bunchlänge am Ende der Lumi-Runs hat sich im gesamten Zeitbereich kaum geändert. Dies heißt eigentlich nur, daß die Runs so lang sind, daß praktisch immer eine Gleichgewichts-Endbunchlänge erreicht wird. Diese liegt etwa bei 2.2 ns, was auch vom zeitlichen Verlauf (siehe auch z.B. Abb. 8 oben) abzulesen ist.

Feedback-Systeme zur Stabilisierung der longitudinalen Bunchschwingungen

Zur Stabilisierung der longitudinalen Schwingungen gibt es bei HERA derzeit zwei Feedbacksysteme namens Phaseloop-I und Phaseloop-II, die die mittleren Phasenschwingungen der Bunches dämpfen sollen und auf zwei unterschiedliche Weisen funktionieren. Außerdem ist seit Februar 2006 ein longitudinales Multibunch-Feedbacksystem in Betrieb.

Ein Beschreibung der Hardware und der Funktionsweise der Phaseloops findet sich in [5]. Eine ausführliche Beschreibung des longitudinalen Multibunch-Feedback-Systems ist derzeit in Arbeit.

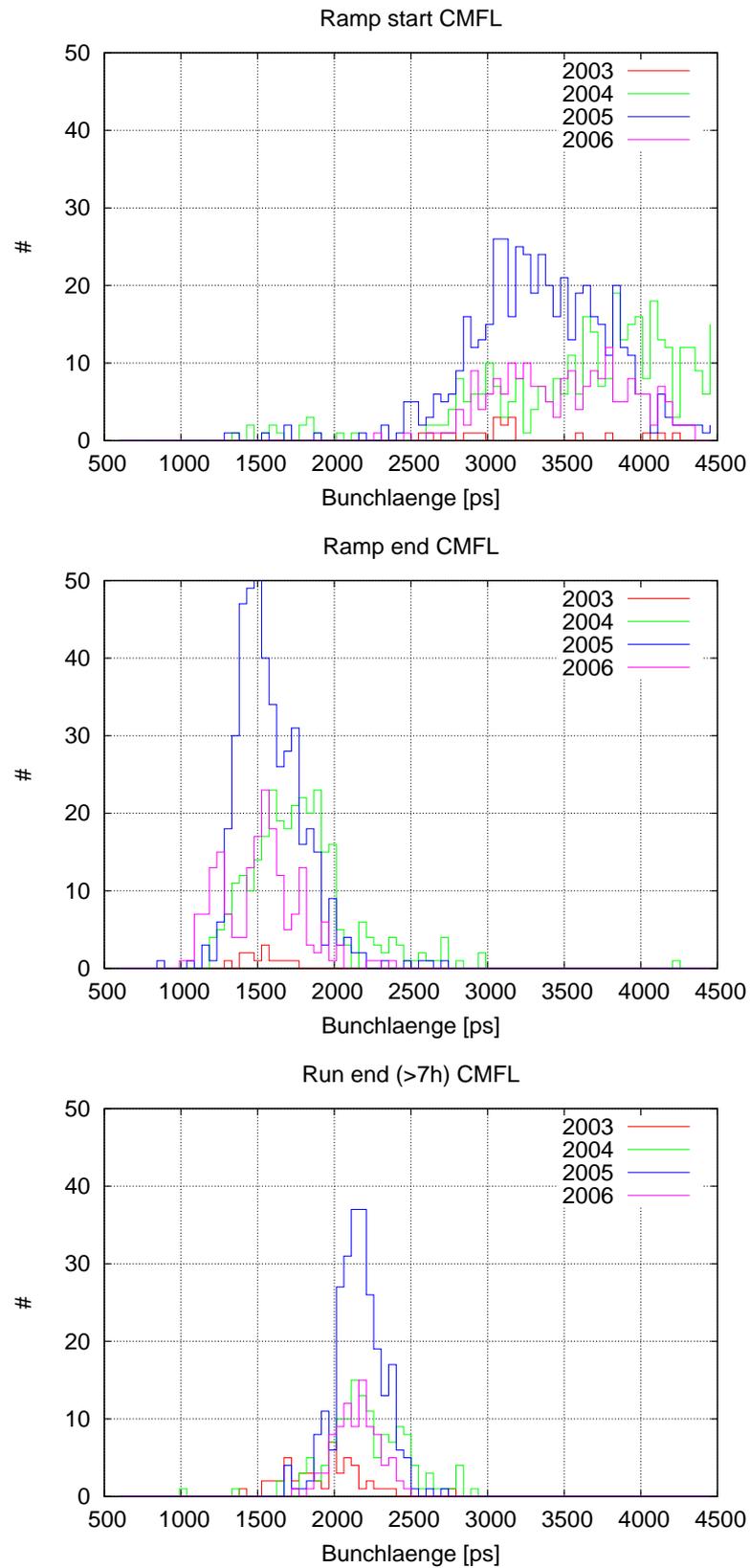


Abbildung 11: Häufigkeit der mit dem CMFL (LOPEZ) Monitor gemessenen Protonen-Bunchlängen nach der Injektion (vor der Rampe, oben), nach der Rampe (Mitte) und am Ende des Runs (unten) für verschiedene Jahre.

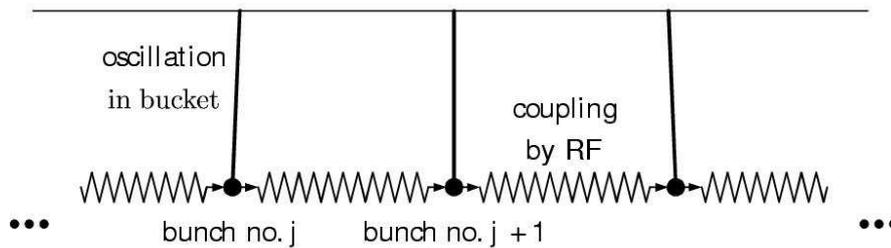


Abbildung 12: Kopplungen der Bunches durch die HF-Wakefelder. Dies geschieht analog zu einer gekoppelten Kette von Pendeln, wobei allerdings die Kopplung nicht nur zum jeweils vorausgehenden und dem folgenden Bunch gegeben ist, sondern zu allen anderen Bunchen. Da die Kette der Bunches ringförmig geschlossen ist, entspricht die Kopplung zum vorausgehenden Bunch der Kopplung zum letzten folgenden. Das Wakefeld eines Bunches kann auch auf sich selbst zurückwirken, sofern es noch vorhanden ist, wenn derselbe Bunch beim nächsten Umlauf wieder vorbeikommt.

2.7 Beobachtete Multibunch-Instabilitäten

2.7.1 FLD-Archiv-Daten

Informationen über die longitudinalen Schwingungen der Bunches in HERA-p für alle Runs seit 2003 gibt uns das FLD. In einem zentralen Archiv wird alle 11 Sekunden ein Datensatz gespeichert, der 512 Momentaufnahmen der Protonen-Bunches, sowie der Cavity-Transienten und noch ein paar zusätzliche Parameter wie Energie, Bunchströme, HF-Frequenz etc. enthält. Der zeitliche Abstand zwischen den Momentaufnahmen kann eingestellt werden und betrug für unsere Studien typischerweise $5/512 \text{ s} \approx 10 \text{ ms}$ oder 450 Umläufe bzw. $2.5/512 \text{ s} \approx 5 \text{ ms}$ oder 220 Umläufe. Zwischen zwei Datensätzen ist das FLD für ca. 5 Sekunden blind, da dann die Datenauslese und -verarbeitung stattfinden muß. Jeder Datensatz enthält dann 512×220 gemessene Phasenablagen, 512×220 Bunchlängen, 220 Bunchströme, sowie Transienten aller Cavities, die aber hier nicht beachtet wurden. Das User-Interface des FLD präsentiert sich mit den 512×220 Phasenablage wie in Abb. 13 in einem Farb-Code-Raster. Eine detaillierte Bedienungsanleitung und Beschreibung der Möglichkeiten der Online-Datenauswertung und -Darstellung findet sich in [6].

Neben der Online-Datenanzeige können sämtliche archivierten Datensätze auch offline analysiert werden. Hier geben sich nun all die Möglichkeiten der Visualisierung, Statistik über Runlängen, Bunchlängen, Instabilitätshäufigkeiten etc.

Abb. 14 und 15 geben einen Überblick über die (bereits vorverarbeiteten) Daten des FLD-Archivs bei einer typischen Protonen-Rampe. Abb. 15 läßt die hohe zeitliche Auflösung der Daten erkennen. Es ist das Anwachsen einer Multibunch-Instabilität innerhalb weniger Sekunden zu erkennen. Aus dem Anwachsverhalten kann die Zeitkonstante bestimmt werden und daraus auf die Stärke der Instabilität geschlossen werden.

2.7.2 Häufigkeiten der Multibunchinstabilitäten

Für die Run-Periode April bis August 2004 wurden die FLD-Daten einer umfangreichen Auswertung unterzogen um herauszufinden, in welchen Moden die Instabilitäten typischerweise

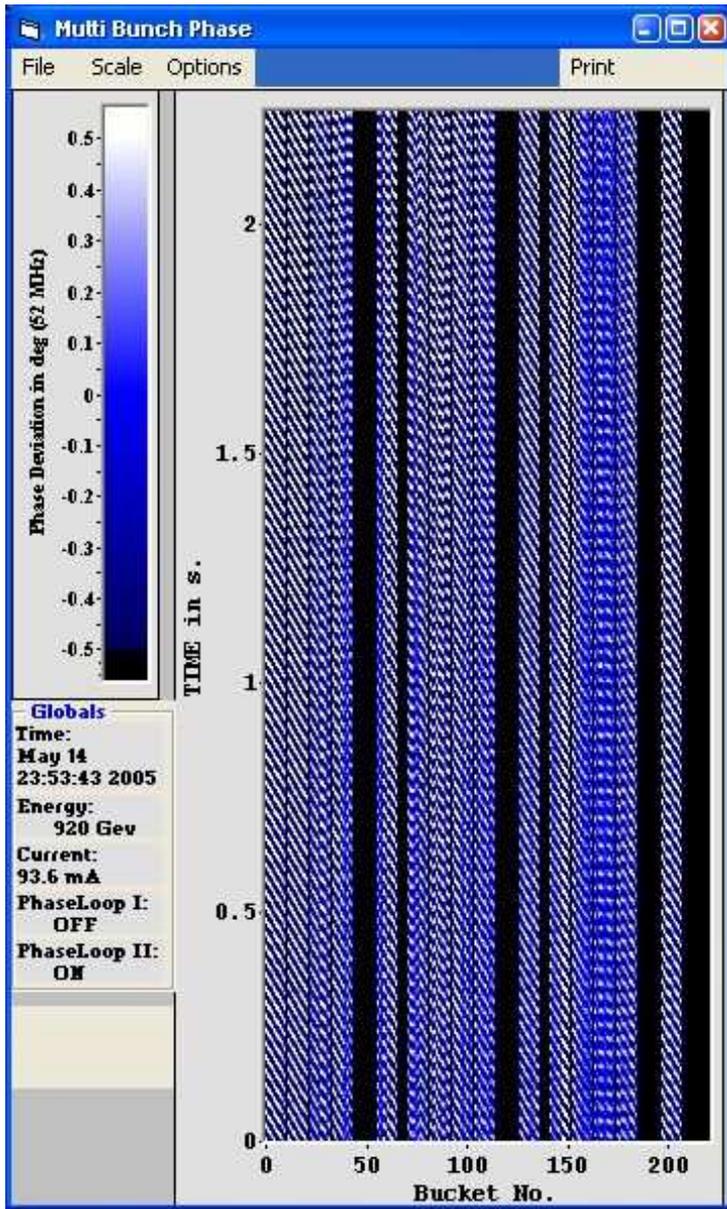


Abbildung 13: Signatur des häufig auftretenden Multibunch-Modes Nr. 164: Das Muster zeigt 512 Momentaufnahmen der Bunchphasen aller 220 Bunche (tatsächlich sind nur 150 gefüllt).

aufzutreten, und mit welcher Stärke sie erscheinen. Dies geschah unter anderem zur Abschätzung der Spezifikationen für ein schnelles longitudinales Feedbacksystem.

Abb. 16 gibt Auskunft über die Häufigkeiten, mit der verschiedene Multibunchmoden beobachtet wurden. Kriterium hierfür war, daß der jeweilige Mode für mindestens 10 Sekunden anhielt und die Bunchlänge sich dabei signifikant vergrößerte. Pro Rampe können mehrere solcher Ereignisse auftreten. Man erkennt, daß der häufigste Mode, welcher zur Bunchverlängerung führt, der Grundmode ist (und das, obwohl der eigentlich durch Phaseloop-II gedämpft werden sollte). Bei der Interpretation ist aber etwas Vorsicht geboten, da alle Ereignisse, wie z.B. starke Kopplung, transversale Anregungen, Single-Bunch-Instabilitäten durch positive Chromatizität etc. sich im Auftreten und Anregen des longitudinalen Grundmodes äußern. Zweithäufig sind die Moden mit niedrigen Modenummern 1 bis 5. Diese treten besonders häufig bei 40 GeV auf. Möglicherweise sind dies dann Injektionsschwingungen, welche durch den Transfer der einzelnen Bunchzüge von PETRA hervorgerufen werden. Ansonsten ist der stärkste Mode auf

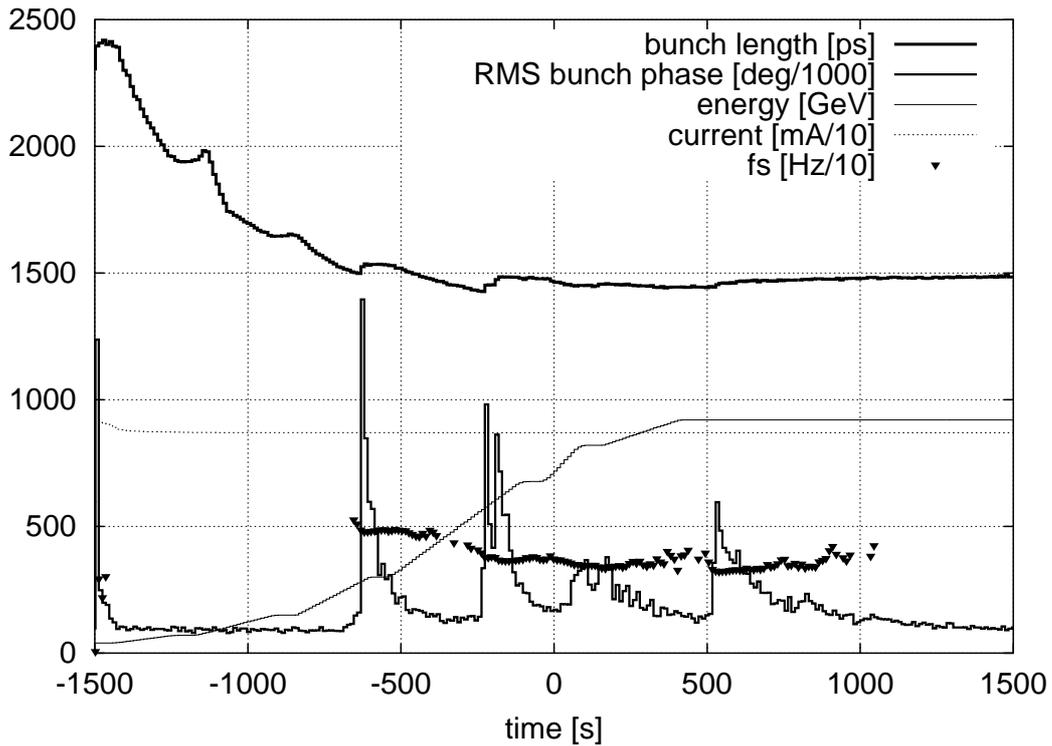


Abbildung 14: Typische Rampe bei HERA-p. Dargestellt ist der zeitliche Verlauf der Daten, die vom FLD archiviert werden. Man erkennt neben Strom und Energie die mittlere Bunchlänge, Synchrotronfrequenz sowie RMS-Schwingungsamplitude.

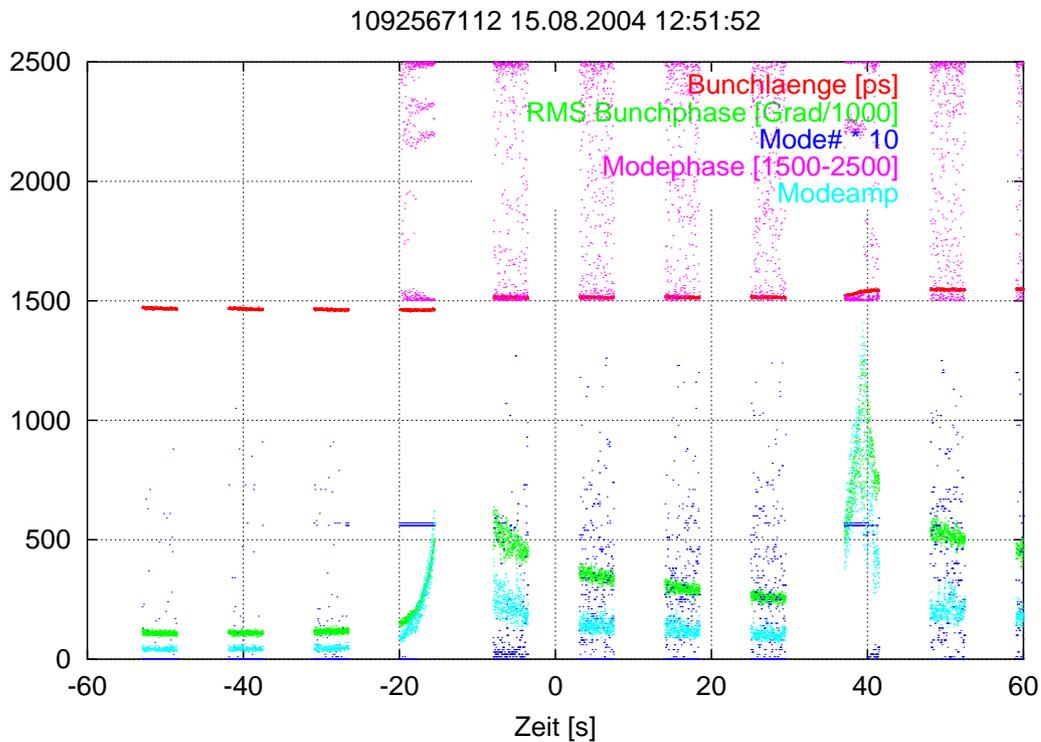


Abbildung 15: Eine Multibunchinstabilität führt zu einer Bunchlängenvergrößerung. Dargestellt sind die Daten, die das FLD archiviert, mit höchster zeitlicher Auflösung: mittlere Bunchlänge, RMS-Schwingungsamplitude, stärkster Mode, Modenamplitude und Modenphase des stärksten Mode.

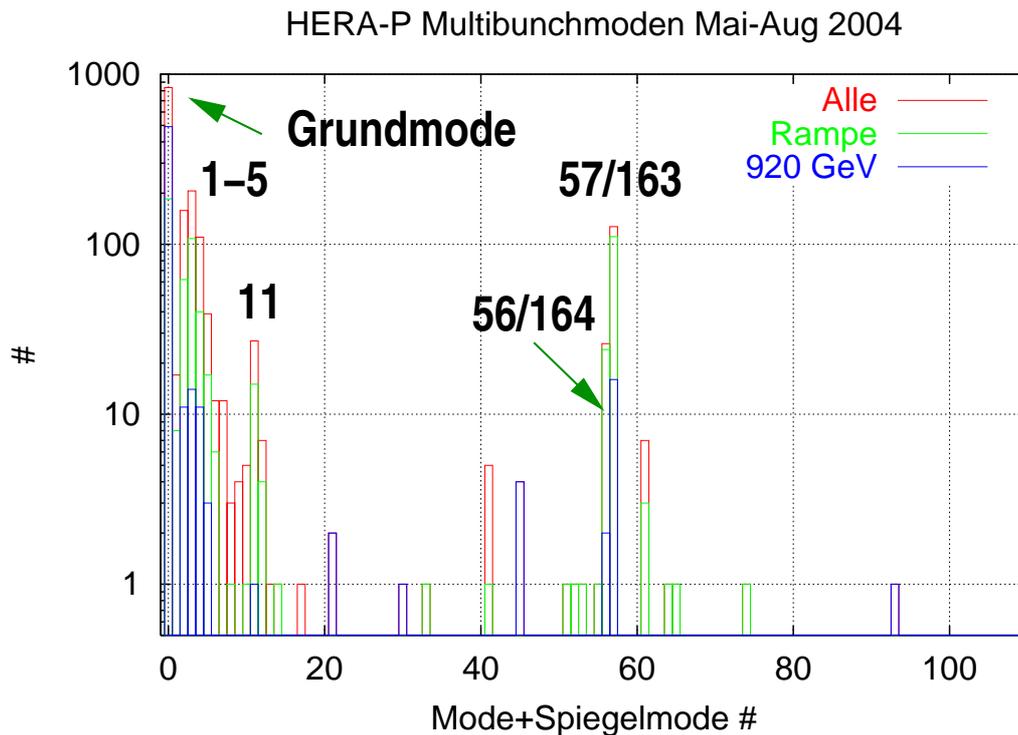


Abbildung 16: Häufigkeit der beobachteten Multibunch-Moden, bei denen die Bunchlänge größer wurde. Zwischen Mode und Spiegelmode wurde hier nicht unterschieden.

der Rampe deutlich sichtbar der Mode 56/57 bzw. 163/164. Dieser ist fast immer begleitet von einem Aufplatzen der Bunchlänge. Seltener tritt der Mode 11 auf. Alle anderen Moden wurden in dem untersuchten Zeitraum quasi nicht beobachtet.

Der Mode 56/57 bzw. 163/164¹ wurde nun näher untersucht. Wichtigster Parameter für eine Instabilität ist die Zeitkonstante τ , mit der die Schwingungsamplitude ansteigt. Der gesamte Zeitraum von Mai bis August 2004 wurde ausgewertet. Abb. 17 zeigt die Häufigkeit der beobachteten Anstiegszeitkonstanten für die Moden 164/56 und 163/57 in diesem Zeitraum. Berücksichtigt man nur die Ereignisse, bei denen ein eindeutiger exponentieller Anstieg in den Daten sichtbar war (grüne Balken), so erkennt man eine Verteilung mit Schwerpunkt bei $\tau = 4$ Sekunden. Die steilsten typischen Anstiegszeiten lagen etwa bei 2 Sekunden. Anstiegszeitkonstanten unter 1 Sekunde wurden gar nicht beobachtet. Diese Statistik erlaubt nun Aussagen über die die Instabilität treibende Impedanz in der Maschine.

Abb. 18 zeigt die Häufigkeit der beobachteten Multibunchmoden 56/57/163/164 in Abhängigkeit von der Energie. Zunächst sieht man hier, daß bei den Energien, bei denen während der Beschleunigungsprozedur längere Zeit verweilt wird (70 GeV, 150 GeV, 300 GeV, 670 GeV und 820 GeV), eine erhöhte Häufigkeit festgestellt wird. Dies ist aber nicht verwunderlich, da in dieser Zeit einfach eine höhere Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer Instabilität besteht, ganz allein aus der Tatsache heraus, daß dafür mehr Zeit zur Verfügung steht. Dies sagt uns aber auch, daß es keine speziellen Energien gibt, die eine Instabilität entstehen lassen, sondern daß

¹Wegen der endlichen Auflösung der Modenanalyse können die benachbarten Moden 56 und 57 bzw. 163 und 164 nicht sauber voneinander unterschieden werden. Im Folgenden werden sie deshalb zusammengefaßt.

Abbildung 17: Häufigkeit der beobachteten Moden-Anstiegszeitkonstanten für die Moden 164/56/163/57.

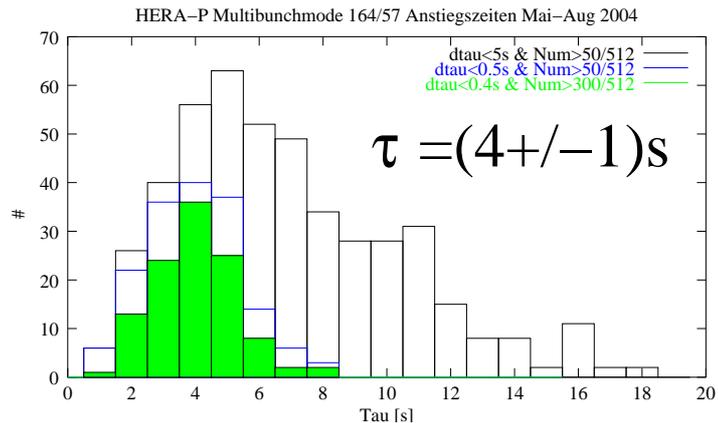
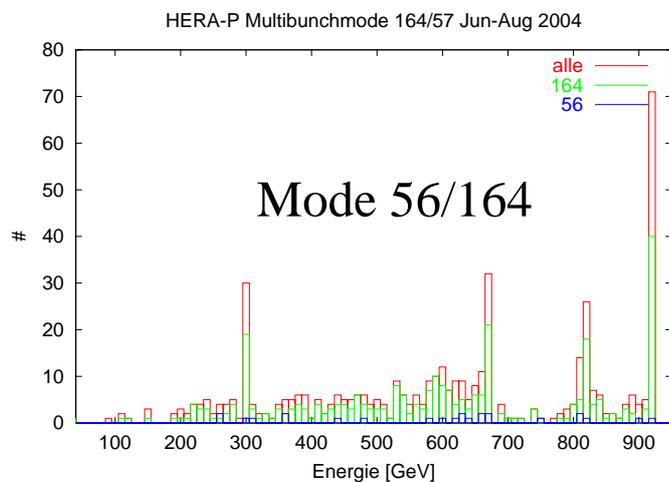


Abbildung 18: Häufigkeit der beobachteten Multibunchmoden 56/57 bzw. 163/164 in Abhängigkeit von der Energie.



das Auftreten der Instabilitäten mehr oder weniger zufällig, möglicherweise angeregt durch eine kleine Störung, erfolgt. Auffällig ist aber der Bereich zwischen 680 GeV und 800 GeV. Hier treten weitaus weniger Instabilitäten auf. Dies kann man möglicherweise damit erklären, daß bis 680 GeV auf jeder Rampe mindestens eine Instabilität stattgefunden hat, und die Bunche bei Energien kleiner 680 GeV immer bereits aufgeplatzt sind, so daß keine weitere Instabilität entsteht, bis die Bunchlänge wieder klein genug geworden ist, was dann bei ca 820 GeV der Fall ist, und wo eine zweite Instabilität entstehen kann.

2.8 Wirkung des longitudinalen Multibunch-Feedbacksystems

Seit Inbetriebnahme des longitudinalen Multibunch-Feedbacksystems konnten bereits etliche Runs mit kleinerer Bunchlänge genutzt werden, da das Feedback erfolgreich jegliche Instabilität während der Rampe und auch danach verhindert. Durch einen technischen Defekt im Feedback-Leistungsverstärker, welcher nach zwei Monaten Betrieb aufgetreten ist, ist das Feedback nicht permanent im Funktion. Hier wird also noch an einer weiteren Verbesserung und Automatisierung gearbeitet, bis das Feedback routinemäßig immer mitläuft und im Verborgenen seine Arbeit verrichtet. Es hat sich dennoch bereits gezeigt, daß nun die Bunch-Verlängerung durch das Intra-Beam-Scattering eine große Rolle spielt, insbesondere, wenn die Bunche bedingt durch das Feedback besonders kurz sind. Obwohl auch so ein Luminositätsgewinn durch kürzere Bunche, auch integriert über einen Luminositätsrun von 10 Stunden, erzielt werden

kann, erhoffen wir uns, weitere Verbesserungen erzielen zu können, welche zu einer weiteren Verkürzung der Bunche führen. Feedback-Rauschen hingegen stellt kein (sichbares) Problem dar, da die Verlängerung der Bunche durch das Feedbacksystem selber gegenüber dem durch Intra-Beam-Scattering oder dem HF-Rauschen der Beschleunigungscavitysysteme nicht wahrnehmbar ist.

3 Simulationsrechnungen

Um viele der beobachteten Phänomene in HERA-p besser zu verstehen, hilft es, das kollektive Verhalten der Bunche oder sogar aller Teilchen in einem Modell nachzubilden und mit Hilfe numerischer Verfahren, sogenannter *Teilchen-Trackings* auszurechnen. Da nicht alle Parameter des Beschleunigers ganz exakt bekannt sind, können diese Rechnungen oder auch Simulationen nur qualitativen Charakter haben. Selten sind tatsächlich exakte, quantitative Aussagen möglich. Trotzdem hilft es für das Verständnis der beobachteten Effekte.

3.1 Protonen-Dynamik

Eine Besonderheit bei HERA-p ist das doppelte HF-System. Es besteht aus einem System mit zwei 52 MHz Cavities und einer Gruppe von vier 208 MHz Systemen, welche beide im Westen lokalisiert sind (siehe Abb. 1).

Die Algorithmen für die Simulation der longitudinalen Protonen-Dynamik können trotzdem recht einfach gehalten werden¹: Je nach gewünschter Rechengeschwindigkeit werden z.B. eine Millionen Teilchen im Bunch getrackt, wobei der kleinste Zeit-Schritt ein Umlauf beträgt. Wegen der langsamen longitudinalen Bewegung hat sich aber auch ein kleinster Schritt von 100 Umläufen bewährt.

Ein schnelles Teilchentracking für typischerweise 100000 Teilchen, erlaubt die Verfolgung der Phasenraumverteilung Umlauf für Umlauf und außerdem über lange Zeiträume bis zu einigen Stunden Echtzeit. So können Phasenschwingungen der Bunche, Schottky-Spektren, Energieverteilung und longitudinale Bunchprofile in ihrer Entwicklung unter verschiedenen Einflüssen wie HF-Amplituden- oder Phasenrauschen, modulierter HF-Ansteuersignale oder sonstiger longitudinaler Anregungen verfolgt werden. Die Entstehung von Nebenbunchen und *coasting beam* (=ungebunchter Strahl) kann in ihrem zeitlichen Verlauf qualitativ und meist auch quantitativ bestimmt werden (siehe Abb. 19).

3.2 Multibunch-Instabilitäten

Für die Simulation der Multibunchinstabilitäten wird das einfache Ein-Bunch-Tracking auf 220 Bunche erweitert. Zusätzlich zum HF-Beschleunigungspotential (und evtl. simuliertem Rauschen) werden die Wake-Felder aller Bunche addiert und ergeben eine zusätzliche Spannung auf die Teilchen eines Bunches. Die Wakefelder (welche die Kopplung zwischen den Bunchen vermitteln) werden in Form einer Wake-Funktion κ_n (auch Koppelfunktion) implementiert. Praktisch gesehen gibt es 220 Werte, welche bestimmen, wie dieses zusätzliche Potential, welches von einem Bunch Nr. i erzeugt wird, auf den Bunch Nr. j wirkt. Die Kopplung ist nur vom Abstand der Bunche abhängig. Wakefelder, welche über mehr als einen Umlauf anhalten, werden in den 220 Koppelwerten aufsummiert (gewrapt).

Um das vorherrschende Potential für einen Bunch zu bestimmen, werden die Schwerpunkte aller 220 Bunche bestimmt und mit dem Koppefaktor κ_{i-j} sowie mit der Bunchladung multipliziert und dann aufsummiert. Bei jedem Zeitschritt werden dann die Bunch-Schwerpunktsphasen sowie die Bunchlängen aus den Teilchenverteilungen berechnet. Eine Momentanaufnahme der

¹Raumladungseffekte brauchen wegen der hohen Energie nicht berücksichtigt zu werden, und die Beam-Beam-Wechselwirkungen sollen für unsere Untersuchungen außer Acht gelassen werden.

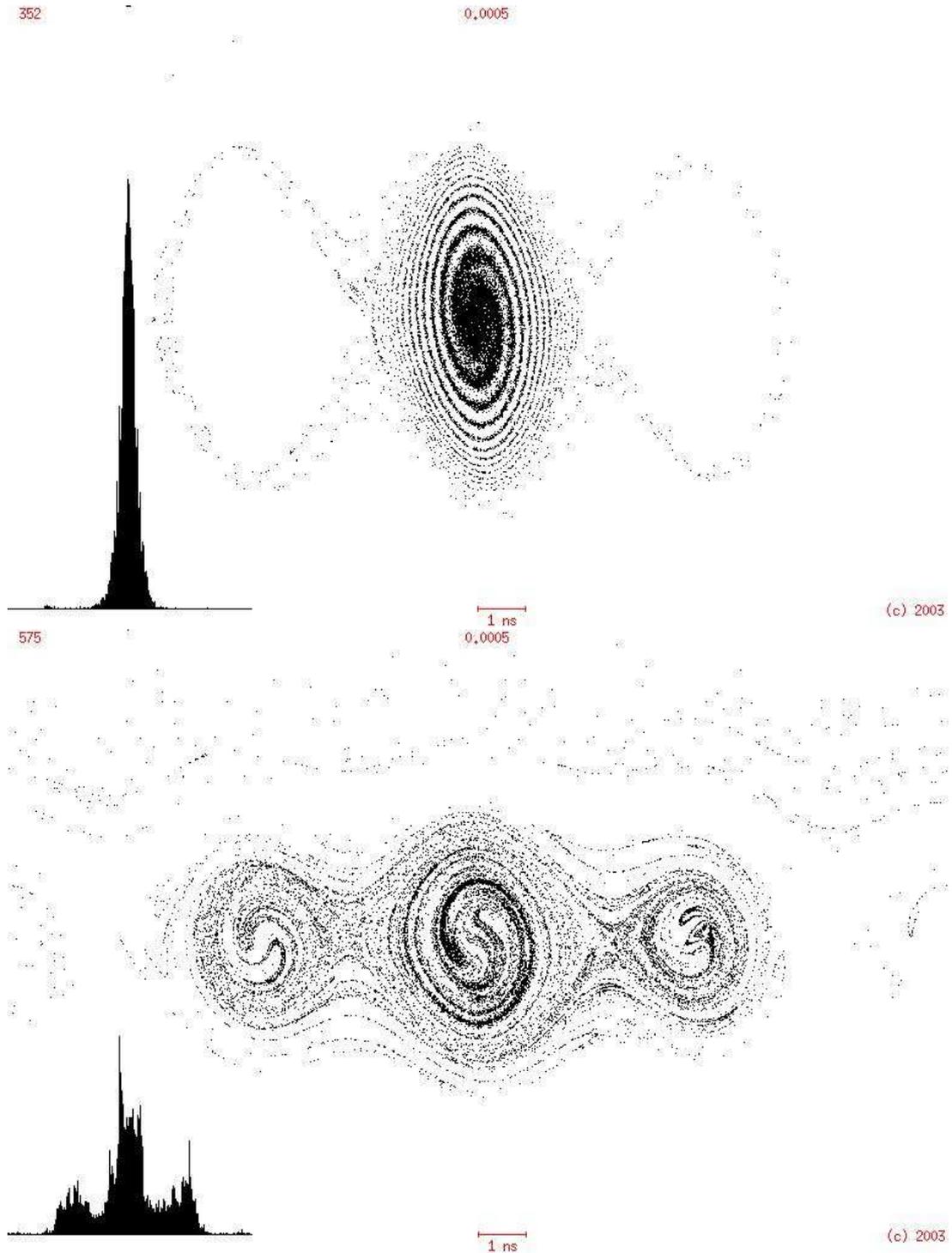


Abbildung 19: Teilchentracking mit dem Doppel-HF-System von HERA-p. Dargestellt ist einerseits der longitudinale Phasenraum mit ca. 1000 simulierten Teilchen. Die Anfangsverteilung hat sich bereits durch Filamentierung der Gleichgewichtsverteilung angenähert (oben). Einige Teilchen sind in die sogenannten Nebenbuckets gelangt und werden dort gefangen. Links sieht man das longitudinale Bunchprofil, ähnlich, wie es auch vom LOPEZ-Monitor in HERA gemessen werden kann. Unten sind durch eine starke Störung der HF deutliche Nebenbunche entstanden, und einige Teilchen haben das gesamte 52 MHz Bucket verlassen (coasting beam).

Bunchphasen ist in Abb. 20 dargestellt. Verfolgt man diese mit der Zeit, so läßt sich die Entwicklung z.B. der mittleren Bunchlänge und der RMS-Phasenabweichung (als ein Maß für die Schwingungsamplituden der Bunche) verfolgen wie z.B. in Abb. 21.

Man erkennt, daß ausgehend von einer Anfangsverteilung mit sehr kleinen Bunchlängen ein schnelles und zunächst exponentielles Anwachsen der Schwingungsamplituden in einem Multibunch-Mode, welcher durch die Koppelfunktion bestimmt wird, beobachtet wird. Gleichzeitig verlängert sich die mittlere Bunchlänge, und es kommt vorübergehend zu einem dynamischen Prozeß, welcher als sogenanntes *beating* bekannt ist. Schließlich ist die Bunchlänge so groß geworden, daß die Landau-Dämpfung so groß wird, daß der Mode langsam wieder ausstirbt. Dies ist ein typisches Verhalten. Man kann außerdem verifizieren, daß die Bunchlänge nach der Instabilität um so größer ist, je kleiner sie vorher war, und daß das Anwachsen um so schneller geschieht, je höher die Bunchladung ist und natürlich je stärker die Kopplung bzw. die Wake-Felder.

3.2.1 Zeitkonstanten

Mit den oben vorgestellten Algorithmen lassen sich nun im Prinzip neben den qualitativen Aussagen auch detailliertere Simulationen machen, um z.B. aus den Zeitkonstanten der Anstiegszeiten der Multibunch-Instabilitäten Impedanzen, Frequenzverschiebung, etc. zu bestimmen. Dieser Ansatz wurde begonnen, hat jedoch bislang nicht zu brauchbaren Ergebnissen geführt, da es sich herausgestellt hatte, daß die Eingangsgrößen vielfach nicht genau genug bekannt sind. So ist z.B. allein die Kalibration der HF-Spannungen unsicher. Kopplungsfaktoren für die Kopplung der Bunche untereinander können kaum sinnvoll angenommen werden, da die Impedanzen in der Maschine so gut wie unbekannt sind. Aus der Statistik der beobachteten Instabilitäten kann einzig die Größendordnung bestimmt werden. Simulationen helfen hier vorerst also nicht weiter.

3.3 Bunchverlängerung und Coasting-Beam durch HF-Rauschen

Weiterhin war es zeitweise von Interesse, die Coasting-Beam-Entstehungsrate abzuschätzen. Als es damit bei HERA massive Probleme gab, stellte es sich heraus, daß ein HF-System Phasen- und Amplitudenrauschen zeigte mit RMS-Spannungsabweichungen von bis zu 7 kV. In diesem Zustand wurde innerhalb einiger Minuten 10% der ganzen Füllung zu coasting beam. Verschiedene Störeinflüsse auf den Ansteuerungssignalen sowie der Verstärker des Hochfrequenzsystems haben zu stark erhöhten coasting-beam-Raten geführt, die starke Einschränkungen für den Lumi-Betrieb bedeutet haben. Mit dem FLD war es möglich, Multibunchschwingungen, Strahlanregungen sowie Rauschen auf den Cavity-Transienten und die resultierende bzw. zugehörige Bunchlängenvergrößerung direkt zu beobachten. Außerdem erlaubt dieses System die Bestimmung der individuellen Bunchlängen und deren zeitliche Entwicklung über einen Run und für verschiedene Runs im Laufe von Monaten und Jahren.

Zum Verständnis der Dynamik im Protonen-Ring unter dem Einfluß der doppelten HF bei verschiedenen Phasen- und Amplituden-Störungen, wurde der longitudinale Phasenraum bei HERA-p simuliert. Deshalb entstand die Idee, die longitudinalen Simulationsprogramme dazu zu verwenden, auszurechnen, wieviele Nebenbunche und wieviel coasting beam durch verschiedene Effekte, z.B. Phasenrauschen oder Amplitudenrauschen der HF-Systeme innerhalb welcher Zeit entsteht.

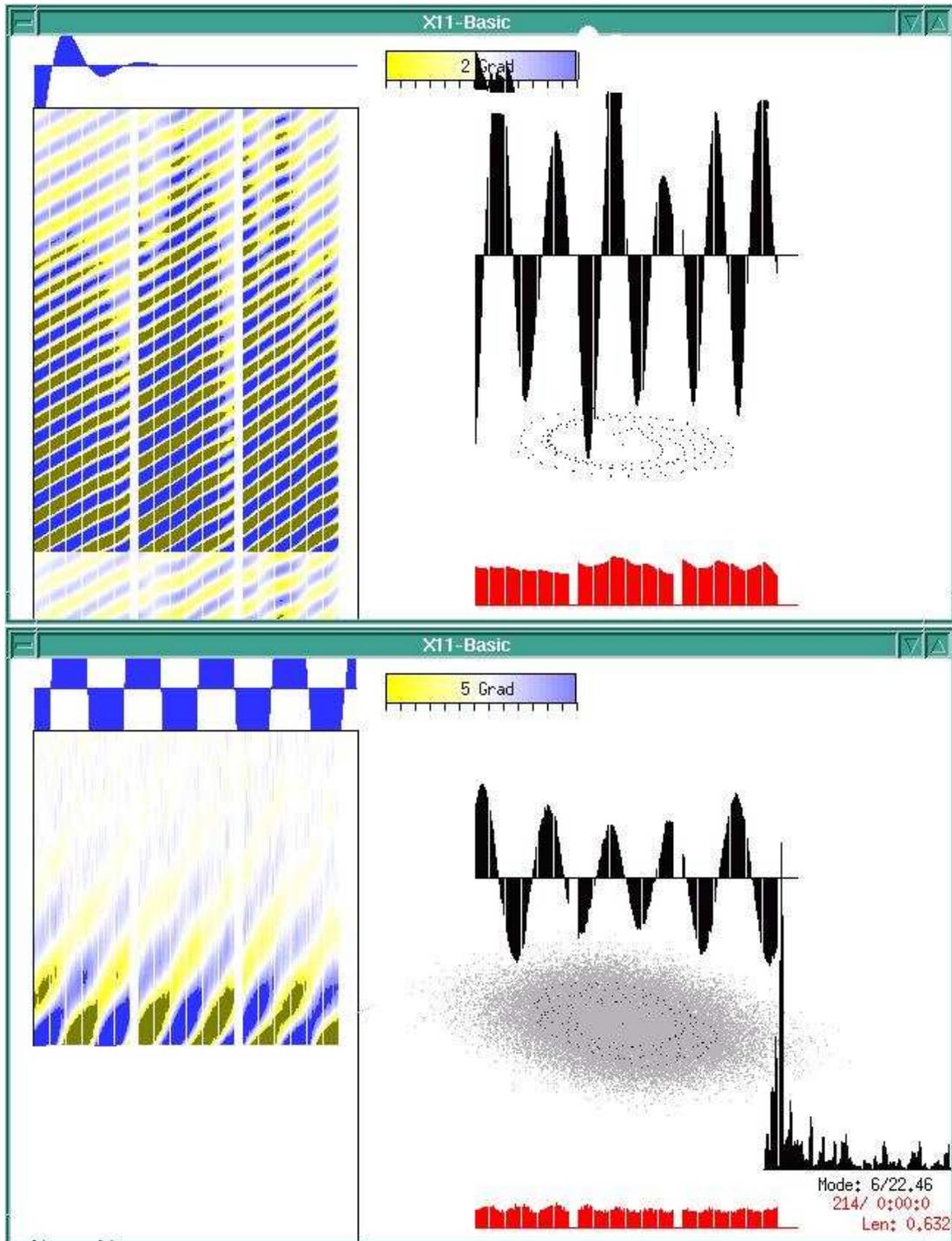


Abbildung 20: Teilcentracking zur Simulation der Entstehung einer Multibunch-Instabilität bei gegebener Koppelfunktion bei HERA-p. Dargestellt ist einerseits der longitudinale Phasenraum mit 220 Makroteilchen (oben) bzw. ca. 1000 Simulierten Einzeileilchen (unten). Es wurde ein typisches Füllmuster mit 180 Bunchen angenommen. Die Bunchlängen sind dargestellt (rot), sowie die Phasenablagen aller Bunch (schwarz). Der zeitliche Verlauf ist in einem Farbcode dargestellt, ähnlich wie beim FLD. Außerdem: Koppelfunktion (blau) und das Modenspektrum (unten rechts).

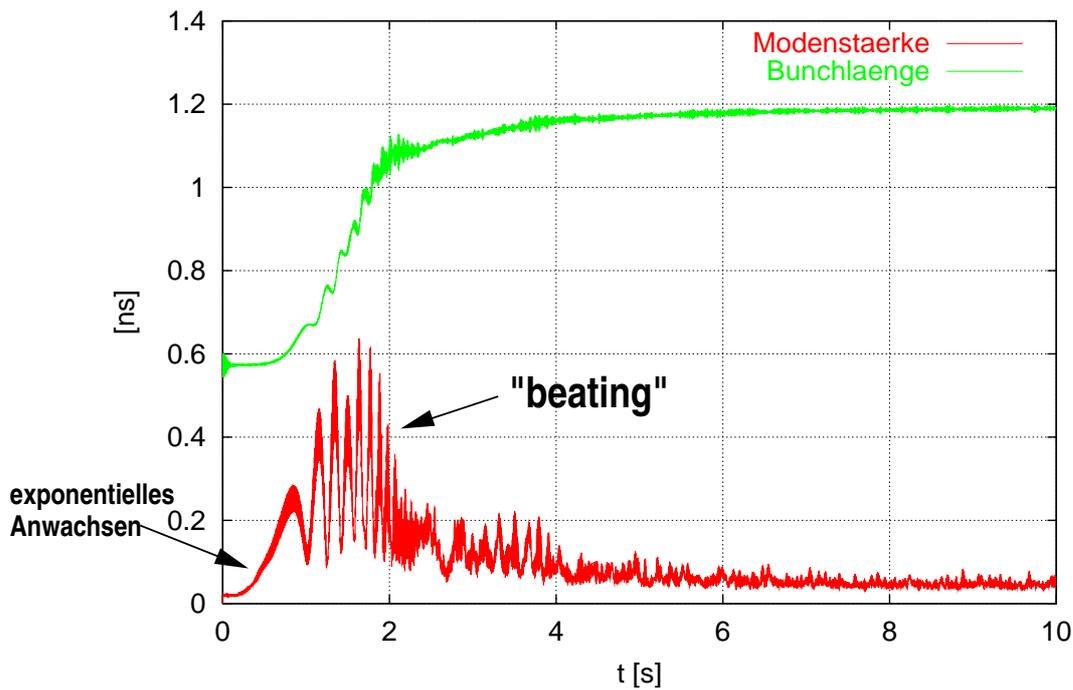


Abbildung 21: Simulation einer Multibunch-Instabilität.

Um hier genaue Aussagen machen zu können, muß ein relativ langer Zeitraum (von mehreren Minuten) durch das Tracking simuliert werden, was bei derzeitig verwendeten Computern mehrere Tage beanspruchte. Deshalb wurden teilweise Kompromisse an die Anzahl der zu trackenden Teilchen gestellt, oder der Simulationszeitraum auf wenige Minuten beschränkt, um dann durch Extrapolation auf längere Zeiträume zu schließen. Auch die Abhängigkeit von der Stärke des HF-Rauschens kann dabei simuliert werden. Außerdem ist vorgesehen, neben den durch HF-Rauschen bedingten Diffusionen der Teilchen im longitudinalen Phasenraum auch noch einen Streuprozeß nachzubilden, nämlich das sogenannte Intra-Beam-Scattering. Tatsächlich wurden diese Rechnungen aber noch nicht in der Vollständigkeit durchgeführt. Hier werden deshalb nur exemplarisch einige Beispiele dargestellt mit dem Hinweis, daß entsprechende Rechnungen bei wiederaufflammendem Interessen neu erstellt, bzw. die alten Resultate ausgebaut werden können.

Abb. 22 zeigt exemplarisch die typische Entwicklung von Bunchlänge, Nebenbunchanteil und Coasting-Beam-Anteil unter dem Einfluß von stochastischen Anregungen der Teilchen, bzw. der Bunche. In diesem speziellen Fall wurde ein (relativ starkes) Phasenrauschen der HF simuliert. Qualitativ wird dieser Verlauf aber auch für andere Diffusionsprozesse – ausgelöst z.B. auch durch Intra-Beam-Scattering – erwartet, lediglich mit einer anderen Zeitkonstante. Den qualitativen Verlauf kann man wie folgt erklären: Zunächst wächst die Länge der Bunche so stark an, bis die ersten Teilchen das innere (208 MHz-)Bucket verlassen. Dabei steigt dann auch der Nebenbunchanteil an, bis die ersten Teilchen dann in den coasting-beam übergehen. Für eine Weile bleibt der Nebenbunchanteil konstant, bis der Anteil der Teilchen, welche sich noch in dem inneren Bucket befinden, soweit abgesunken ist, daß der Nachschub ausbleibt. Dann sinkt auch der Nebenbunchanteil gleichmäßig mit dem noch gebunchten Anteil ab. Die Bunchlänge hat derweil einen Gleichgewichtszustand angenommen, der das ganze innere Bucket ausfüllt.

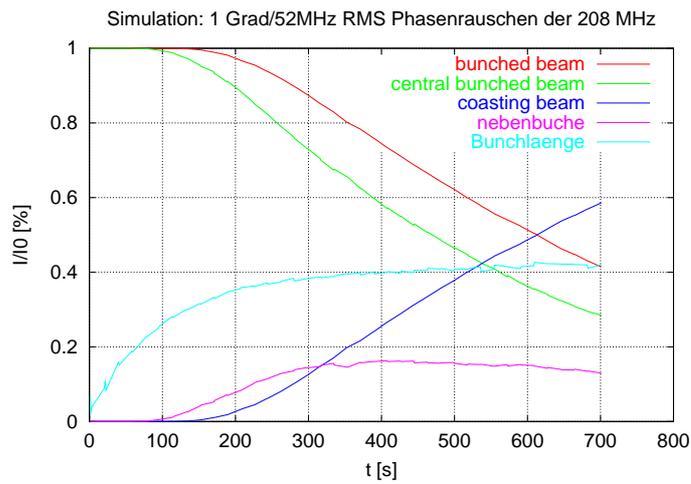


Abbildung 22: Typische Entwicklung von Bunchlänge, Nebenbunchanteil und coasting beam bei einem Phasenrauschen der 208-MHz-Systeme von 0.25 Grad RMS.

Nach langer Zeit wird fast der ganze Strahl aus den Buckets herausdiffundiert sein.

Literatur

- [1] J.L. Augneres et al. , *HERA, A Proposal for a large Electron-Proton Colliding Beam Facility at DESY*, DESY-HERA-81/10, July 1981
- [2] F. Klefenz, R. Wanzenberg, M. Wendt, *First Results from Measurements of Modes in the HERA-B Vertex Chamber excited by the Proton Beam* , Interner Report, DESY-M-97-01
- [3] F. Klefenz, *Die Hochfrequenz-Abschirmung des HERA-B Vertexdetektors* , Interner Report, DESY-M-98-01
- [4] C.-M. Kleffner, *Protonenintensität in HERA – Begrenzungen und Verbesserungen*, DESY Beschleuniger-Betriebsseminar Grömitz, 3. – 7. Mai 1999, DESY-HERA 99-04, Sept. 1999, S. 336 ff.
- [5] E. Vogel, *Fast Longitudinal Diagnostics for the HERA Proton Ring*, Dissertation 2002, DESY-THESIS-2002-010
- [6] E. Vogel, *Status of the Longitudinal Emittance Preservation at the HERA Proton Ring in Spring 2003*, Internal Report, DESY-HERA-2003-03, June 2003
- [7] G. Bassi, *Analytical and numerical studies of stochastic effects in beam dynamics*, Tesi di Dottorato in Fisica, Universita di Bologna, Dissertation 2002
- [8] M. Hoffmann, *A longitudinal coupled bunch feedback for HERA-p*, ICFA Beam Dynamics Newsletter No 37, Aug. 2005, p. 109 ff.
- [9] M. Hoffmann, *Ein Breitbandiges longitudinales Dämpfungssystem fuer HERA-p*, HERA Betriebsseminar, Grömitz, Nov. 2005
- [10] F. Eints et al., *Control Path of Multibunch Feedback System at HERA-p*, HERA Betriebsseminar, Grömitz, Nov. 2005
- [11] J. Randhahn et al., *Kicker Cavity for Multibunch-Feedback-System at HERA-p*, HERA Betriebsseminar, Grömitz, Nov. 2005