Ratenmessungen am HERA-B Drahttarget mit Szintillationshodoskopen

März 1998

Diplomarbeit

vorgelegt von

Jochen Klenner

Lehrstuhl für
experimentelle Physik V
Fachbereich Physik
Universität Dortmund

Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Die CP-Verletzung

Die CP-Verletzung gehört zur Zeit zu den interessantesten Forschungsgebieten der Teilchenphysik. Entdeckt wurde sie 1964 beim Zerfall des K^0-Mesons. Damals wurde festgestellt, daß das K^0_L-Meson nicht nur in drei Pionen, die einen CP-Eigenwert von -1 haben, sondern mit einer Wahrscheinlichkeit von ca. 10^{-3} auch in zwei Pionen mit einem CP-Eigenwert von 1 zerfällt [1]. Bis heute ist dies das einzige System, in dem CP-Verletzung beobachtet wurde. Das Standardmodell erklärt diesen Effekt mit Hilfe der Cabibbo-Kobayashi-Maskawa-Matrix V , die die Übergangswahrscheinlichkeiten der sechs Quarkarten bei schwachen Zerfällen beschreibt.

$$V = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$

Diese Matrix ist unitär und enthält vier reelle Parameter. Sie läßt sich durch die *Wolfenstein-Parametrisierung* [2] angenähert ausdrücken.

$$V \approx \begin{pmatrix} 1 - \frac{1}{2}\lambda & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \frac{1}{2}\lambda & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix}$$

Wenn die Phase η nicht Null ist, ist V nicht reell. Ersetzt man in einer Reaktion Teilchen durch Antiteilchen, kehrt sich das Vorzeichen der Phase η in der Streuamplitude um [3]. Dies trifft nicht für eine CP-Transformation zu. Wenn η also nicht Null ist, beschreibt die CP-transormierte Amplitude also *nicht* die Reaktion der Antiteilchen, d. h. es liegt keine CP-Invarianz vor.

Theoretische Modelle sagen für den Zerfall des B^0 Mesons einen erheblich größeren CP-verletzenden Effekt als im K^0-System voraus [4]. Daher bietet das B^0-System eine ausgezeichnete Möglichkeit zur Überprüfung des Standardmodells und zur Bestimmung der Phase η. Weltweit sind mehrere Experimente mit diesem Ziel im Aufbau, zum Beispiel Babar[5], BELLE[6] und HERA-B [10], das an der Hadron-Elektron-Ringanlage (HERA) am Deutschen Elektronen-Synchrotron (DESY) aufgebaut wird.

1.2 Der Speicherring HERA

Im Jahr 1992 nahm der HERA den Betrieb auf. Es handelt sich um einen Ringbeschleuniger mit einem Umfang von 6,3 km, bei dem in getrennten Strahlrohren Protonen mit einer Energie von 821 GeV, bzw. Positronen mit 27 GeV umlaufen [9] (siehe Abb. 1.1).

Abbildung 1.1: Der HERA Ringbeschleuniger am DESY in Hamburg. HERA-B wird in der Experimentierhalle West aufgebaut.

In zwei Wechselwirkungspunkten, die in den Experimentierhallen Nord und Süd liegen, werden die Strahlen zur Kollision gebracht. Dort befinden sich die beiden Detektoren H1 und ZEUS. Das Experiment HERMES in der Halle Ost untersucht Wechselwirkungen des Positronenstrahls mit einem Gastarget. Das HERA-B Experiment in der Halle West des DESY-Geländes untergebracht.

1.2.1 Injektionsprozedur

Die zeitliche Folge der Protonenpakete ("Bunche") im HERA Speicherring besitzt eine komplexe Struktur. Diese entsteht durch die Injektionsprozedur, die im folgenden beschrieben wird. Die Teilchen durchlaufen dabei eine Kette von Vorbeschleunigern, bei denen es sich teilweise um ältere, zu diesem Zweck umgebaute Anlagen handelt.

Zunächst werden in einer Ionenquelle negativ geladene Wasserstoffionen erzeugt und im H^--Linac (siehe Abbildung 1.1 auf 50 MeV vorbeschleunigt. Danach werden die Elektronen abgestreift und die somit erhaltenen Protonen in den Ringbeschleuniger DESY III eingeschossen. Dort werden sie zu zehn Bunchen gebündelt und auf eine Energie von 7,5 GeV gebracht. Diese Bunchzüge werden in den Speicherring PETRA II injeziert, was sich sechs mal wiederholt. Eine solche PETRA-Füllung wird auf 40 GeV beschleunigt und in den HERA-Ring überführt. Dieses Verfahren wird 3 mal ausgeführt, so daß schließlich 180 Bunche in HERA gespeichert sind. Anschließend wird die Energie der Protonen auf die Sollenergie von 821 GeV erhöht und die Bunchlänge auf 10 cm verkürzt. Danach werden die Positronen injeziert. Das kann nicht gleichzeitig mit den der Injektion der Protonen geschehen, weil der PETRA-Beschleuniger für beide Füllungen benutzt wird. Die gesamte Injektionsprozedur nimmt ungefähr 3 Stunden in Anspruch.

Es ergibt sich folgende Bunchstruktur: Die Teilchenpakete folgen alle 96 ns aufeinander. Nach zehn Bunchen folgt jeweils eine Lücke von einem Bunch. Nach 60 bzw. 120 Paketen existieren Lücken von jeweils fünf Bunchen. Nach dem letzten Bunch kommt eine Lücke von 15 Bunchen oder 1,44 μs, deren Zweck darin besteht, Zeit für das Einschalten der Kickermagnete bei der Vernichtung des Strahls bereitzustellen. Ein HERA-Umlauf dauert somit 21,12 μs. Die Frequenz mit der die Protonpakete mit dem Target wechselwirken, die sogenannte Bunchcrossingrate beträgt 8,5 MHz. Die ersten letzten von jeweils 60 Protonenpakete kollidieren nicht mit Positronen.

1.3 Das HERA-B Experiment

Am Forschungsinstitut DESY in Hamburg entsteht zur Zeit das HERA-B Experiment. Es handelt sich um das vierte Experiment am e-p Speicherring HERA, dessen Protonstrahl es zur Produktion von B^0-Mesonen benutzt.

Zum Nachweis der CP-Verletzung soll der sogenannte goldene Zerfall dienen:

$$\mathrm{B}^0 \to \mathrm{J}/\Psi\ \mathrm{K}^0_\mathrm{S} \to \mathrm{l}^+\mathrm{l}^-\pi^+\pi^-$$

$$\overline{\mathrm{B}^0} \to \mathrm{J}/\Psi\ \mathrm{K}^0_\mathrm{S} \to \mathrm{l}^+\mathrm{l}^-\pi^+\pi^-$$

l^+ und l^- sind Elektronen oder Myonen. Da die Zerfallsprodukte J/Ψ und K^0_S einen CP-Eigenzustand bilden, kann mit der flugzeitabhängigen Asymmetrie die Größe der CP-Verletzung bestimmt werden[8]:

$$A(t) = \frac{\Gamma(\mathrm{B}^0 \to \mathrm{J}/\Psi\ \mathrm{K}^0_\mathrm{S}) - \Gamma(\overline{\mathrm{B}^0} \to \mathrm{J}/\Psi\ \mathrm{K}^0_\mathrm{S})}{\Gamma(\mathrm{B}^0 \to \mathrm{J}/\Psi\ \mathrm{K}^0_\mathrm{S}) + \Gamma(\overline{\mathrm{B}^0} \to \mathrm{J}/\Psi\ \mathrm{K}^0_\mathrm{S})} = \sin 2\beta \sin xt$$

Die Größe x bezeichnet dabei den Mischungsparameter zwischen den B^0- und $\overline{\mathrm{B}^0}$-Mesonen[8].

Da die b-Quarks immer paarweise produziert werden, läßt sich die ursprüngliche Ladung des ersten Quarks durch die Zerfallsprodukte des zweiten bestimmen. Der goldene Zerfall wurde als Nachweismethode gewählt, weil er durch die entstehenden Leptonen einfach von hadronischen Untergrundprozessen zu unterscheiden ist. Die Anzahl der Untergrundprozesse übersteigt die der gesuchten Zerfälle um den Faktor $3 \cdot 10^{10}$. Deren Nachweiswahrscheinlichkeit beträgt nur 0,17. Man benötigt also etwa $4 \cdot 10^{14}$ inelastische Wechselwirkungen, um 1500 Signalereignisse nachzuweisen. Bei einer Meßzeit von 10^7 s, was einer ca. 120 Tagen entspricht, muß eine Wechselwirkungsrate von 40 MHz erreicht werden. Daher werden extreme Anforderungen an die Ereignisselektion und die Spurrekonstruktion gestellt, um die wenigen gesuchten Zerfälle in der großen Menge der Untergrundprozesse zu finden

Der HERA-B Detektor ist ein Vorwärtsspektrometer mit festem Target [7] (siehe Abbildung 1.2). Der Vakuumtank—im Bild ganz rechts—enthält das Target und den Vertexdetektor. Dahinter befindet sich eine Anordnung von Spurkammern, die zur Impulsmessung teilweise in einem Magneten liegen. Darauf folgen ein Cherenkowdetektor und ein elektromagnetisches Kalorimeter. Das Myonsystem schließt den HERA-B Detektor ab. Es besteht aus vier aktiven Kammerlagen und, zwischen denen sich drei Lagen Absorber aus Eisen und Beton befinden. Die Strahlrohre für Protonen und Elektronen werden durch den Detektor geführt.

1.4 Anforderungen an das Target

Das HERA-B Target besteht aus acht Drähten, die tangential zum Strahl angeordnet sind. Um Protonen zur Wechselwirkung zu bringen, werden sie an den Rand des Strahls gefahren. Das Target muß die folgenden Anforderungen erfüllen:

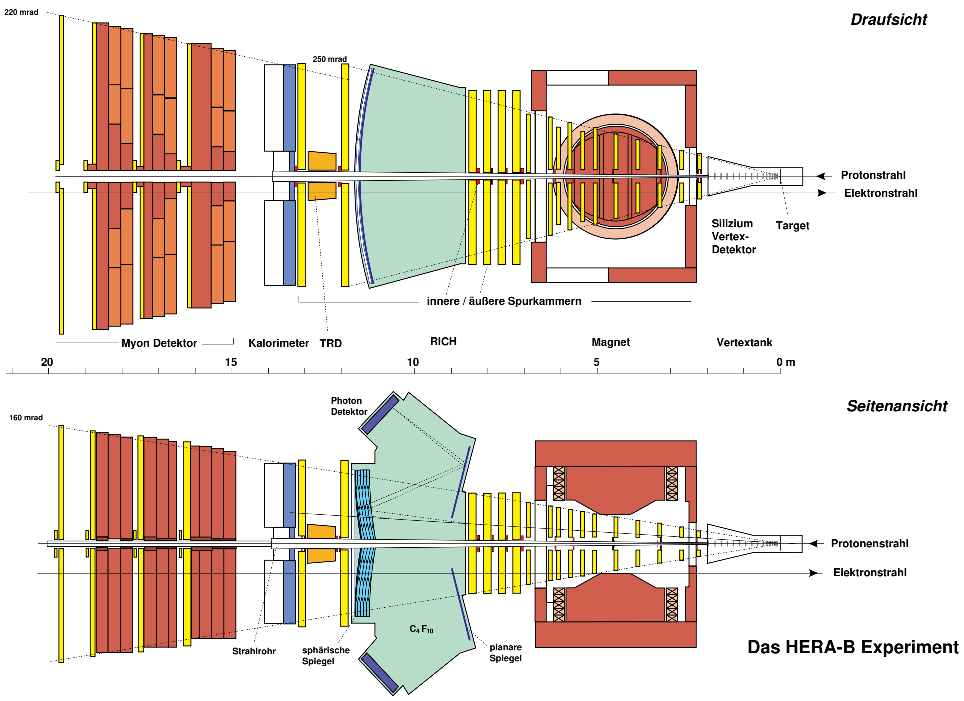


Abbildung 1.2: Querschnitt durch den HERA-B Detektor.

- Ein kontinuierlicher und sicherer Betrieb ist zu gewährleisten.
- Eine Wechselwirkungsrate von 40 MHz muß kontinuierlich erreicht werden.
- Der Betrieb des HERA Speicherrings und der anderen Experimente darf nicht beeinträchtigt werden.
- Das Auftreten von extrem hohen Raten muß unbedingt vermieden werden, dies zu einem Verlust des Protonenstrahles führen kann.
- Die Rate darf keinen starken Schwankungen unterliegen. Diese Rate ist so gewählt, daß die Anzahl der gefundenen Signalereignisse maximiert wird. Jede Abweichung verschlechtert also die Effizienz des Detektors.
- Die Wechselwirkungen müssen gleichmäßig auf alle Drähte verteilt sein, weil die Wechselwirkungspunkte räumlich getrennt sein müssen, um eine einwandfreie Rekonstruktion der Ereignisse zu ermöglichen.

Zur Erfüllung dieser Forderungen ist eine genaue Kenntnis der Vorgänge beim Targetbetrieb, der Wechselwirkung mit dem Protonstrahl und der dabei auftretenden physikalischen Effekte unabdingbar. Das Target wird ständig durch eine Anzahl Meßgeräte überwacht, die der Targetsteuerung Eingaben liefern und deren Daten zusätzlich aufgezeichnet und analysiert werden. Dies ermöglicht ein tieferes Verständnis der Funktionsweise des Targets, mit dem Ziel es weiter zu optimieren.

1.5 Untersuchungen dieser Arbeit

In Kapitel 2 wird zunächst den Aufbau und die Funktionsweise der Targets beschrieben. Dann werden die für den Targetbetrieb benutzten Zähler, die Elektronik und die Software erläutert, die zum Betrieb des Targets benutzt werden. Ein Überblick über die Aktivitäten in der Datennahmeperiode 1997 und eine Beschreibung des Targetbetriebes folgt in Kapitel 3. Außerdem werden die Begriffe der Akzeptanz und der Targeteffizienz eingeführt.

Der wichtigste Untersuchungsgegenstand der Arbeit ist das Verhalten der Wechselwirkungsrate und die Interaktion des Targets mit dem Protonenstrahl. Kapitel 4 befaßt sich mit der Reaktion der Rate auf Änderungen der Target- oder Strahlposition. Dazu wurden die Daten eines Strahllagemonitors im Zusammenhang mit der Rate analysiert. Außerdem wird ein Experiment ausgewertet, bei dem der Draht manuell um eine bestimmte Strecke bewegt wird, und die dadurch hervorgerufene Änderung der Rate gemessen wird.

Schwankungen der Wechselwirkungsrate haben sich als ein ein großes Problem herausgestellt. Daher wird in Kapitel 5 die Stabilität der Wechselwirkungsrate behandelt. Die Verteilung der Wechselwirkungsrate wurde in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern untersucht. Außerdem wurde das Frequenzverhalten der Rate analysiert.

Kapitel 6 faßt die Ergebnisse dieser Arbeit zusammen.

Kapitel 2

Das Target-Test Experiment 1997

Im folgenden wird zunächst die Strahloptik am Ort des HERA-B Targets erläutert. Danach wird auf das Target und seine Funktionsweise eingegangen. Ein weiterer Bestandteil des Target-Test Experimentes ist eine Anzahl Szintillationszähler und Siliziumzähler im Bereich des HERA-B Detektors, die zur Kontrolle der Targetoperationen dienen. Am Ende dieses Kapitels wird die für die Targetsteuerung benötigte Software beschrieben.

2.0.1 Die Strahloptik am HERA-B Target

Die HERA-Strahloptik mußte für den Einbau des neuen Experimentes geändert werden. Der Strahlabsorber, zuvor in der Experimentierhalle West gelegen, wurde in den Tunnel stromabwärts des Detektors verlegt. Der Einfluß des HERA-B Spektrometermagnetes auf den Protonstrahl wird durch Dipolmagnete vor dem Experiment kompensiert. Die wichtigste Modifikation betrifft die Betafunktion am Ort des Targets. Dort muß die Strahlausdehnung in x- und y-Richtung relativ klein sein, der Wert der Betafunktion beträgt hier 35 m in beide Richtungen. Dies führt zu einer Strahlbreite von etwa 0,5 mm [10].

2.1 Die Targetmechanik

Das HERA-B Target ist als Halotarget konzipiert, bei dem acht Drähte an den Rand des Strahls gebracht werden, so daß Protonen, die aus dem Strahlkern diffundieren, mit ihnen wechselwirken.

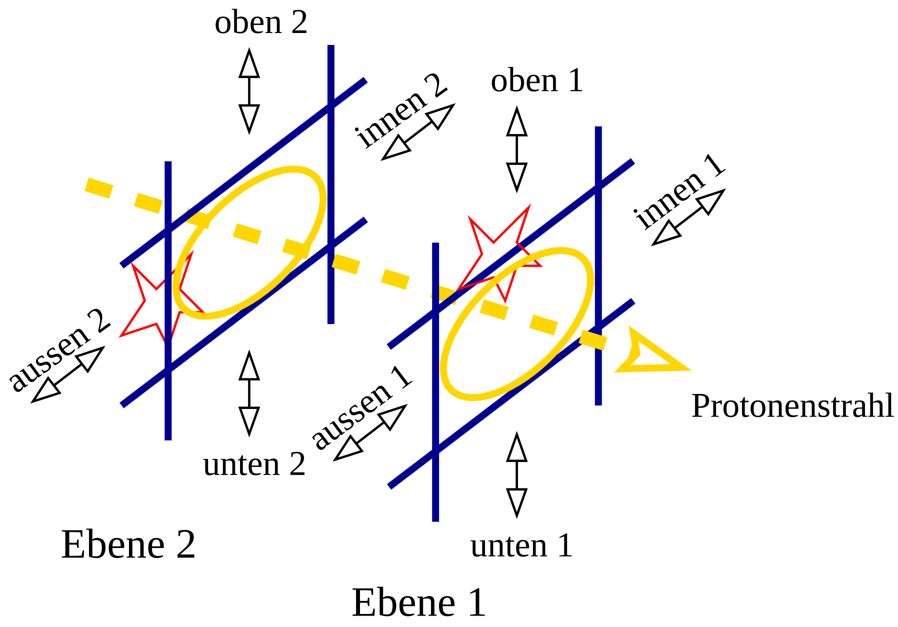


Abbildung 2.1: Anordnung und Bezeichnung der Targets.

Die Targetdrähte sind in zwei Ebenen angeordnet, die etwa 4 cm hintereinander liegen. Sie sind in vier Targetstationen zusammengefaßt, die jeweils ein Target der ersten und der zweiten Ebene enthalten. Die Stationen sind oben, unten und seitlich am Vertextank befestigt. Aus der Lage der Targets leitet sich ihre allgemein gebrauchte Benennung her. Die Ebene 1 ist stromabwärts gelegen. Die Targetstationen werden "oben", "unten", "innen" und "außen" genannt, wobei sich die Bezeichnungen auf die Lage bezüglich des HERA-Ringes beziehen (vergleiche Abbildung 2.1).

Die Drähte besitzen einen rechteckigen Querschnitt und haben eine Höhe von 50 μmund eine Breite von 500 μm. Die Targets sind so angeordnet, daß die Protonen auf ihre schmale Seite treffen.

Die Drähte sind auf Keramikgabeln befestigt, die wiederum über Stahlarme mit den Stationen außerhalb des Tanks verbunden sind (siehe Abbildung 2.2). Sie sind dort an Schlitten befestigt, die durch Spindeln in radialer Richtung bewegt werden können. Diese werden durch Schrittmotoren angetrieben. Die Targets können so über eine Strecke von 5 cm bewegt werden.

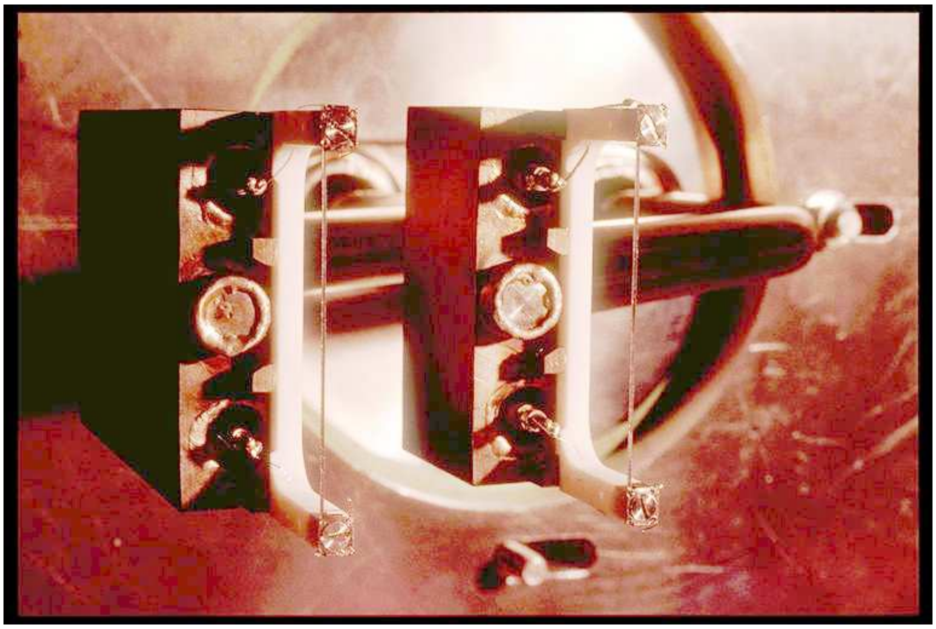


Abbildung 2.2: Foto einer Station des HERA-B Targets. Im Vordergrund sind die auf Keramikgabeln befestigten Drähte zu sehen.Die Richtung des Protonenstrahls verläuft von rechts nach links.

2.2 Die Drahtmaterialien

Die Auswahl des Drahtmaterials richtet sich nach zwei Kriterien:

- Die Produktionsrate an b-Quarks muß groß genug sein, damit in HERA-B die erforderliche Anzahl von goldenen Zerfällen erreicht wird.
- Da der Betrieb des HERA-B Targets die anderen Experimente am HERA Speicherring nicht beeinträchtigen darf, muß die Strahlaufweitung durch Vielfachstreuung möglichst gering gehalten werden. Diese verursacht bei den anderen HERA Experimenten einen erhöhten Untergrund [11].

Da die Produktionsrate der b-Quarks mit größer werdender Atommasse A und die Vielfachstreuung mit der Kernladungszahl Z steigt, ist die Wahl des Drahtmaterials immer ein Kompromiß.

Aus diesem Grund wurden in der Datennahmeperiode 1997 mehrere Materialien getestet (siehe Tabelle 2.1). Die wesentlichen Parameter sind die

Element	Z	A	X_0 in cm	l_{int} in cm
C	6	12,1	18,8	38,1
Al	13	26,98	8,9	39,4
Ti	22	47,88	3,56	27,5
Fe	26	55,85	1,76	16,8
Cu	29	63,55	1,43	15,1

Tabelle 2.1: Eigenschaften der benutzten Targetmaterialien. X_0: Strahlungslänge, l_{int}: Wechselwirkungslänge

Target	Feb – 14. Aug	15. Aug – 14. Okt	15. Okt – 31. Okt
oben 1	Al	Al	-
unten 1	Al	Al	-
innen 1	Al	Al	Al
außen 1	Al	C	Al
oben 2	Cu	Fe	-
unten 2	Al	Ti	-
innen 2	Al	Ti	Ti
außen 2	C	C	Ti

Tabelle 2.2: Überblick über die Bestückung der Targets in der Datennahmeperiode 1997.

Wechselwirkungslänge l_{int}, die die durchschnittliche Flugstrecke von Teilchen in dem Material bis zu einer inelastischen Wechselwirkung bezeichnet, und die Strahlungslänge X_0, die ein Maß für die Vielfachstreuung darstellt. Die durchschnittliche Ablenkung Θ_{SC} eines Teilchens mit dem Impuls p läßt sich durch folgende Formel beschreiben [7]:

$$\Theta_{sc}^2 \approx \left(\frac{14\text{MeV}}{p}\right)^2 \cdot \frac{l_{int}}{X_0}$$

.

Im Laufe der Datennahmeperiode 1997 wurden die Targets zu Reparaturzwecken und zur systematischen Untersuchung unterschiedlicher Materialien zweimal ausgewechselt. Tabelle 2.2 gibt einen Überblick über die im Jahr 1997 benutzten Drähte.

2.3 Zähleranordnung

Zur Überwachung des Targetbetriebes waren mehrere Zähler im Bereich des HERA-B Detektors installiert (siehe Abbildung 2.3).

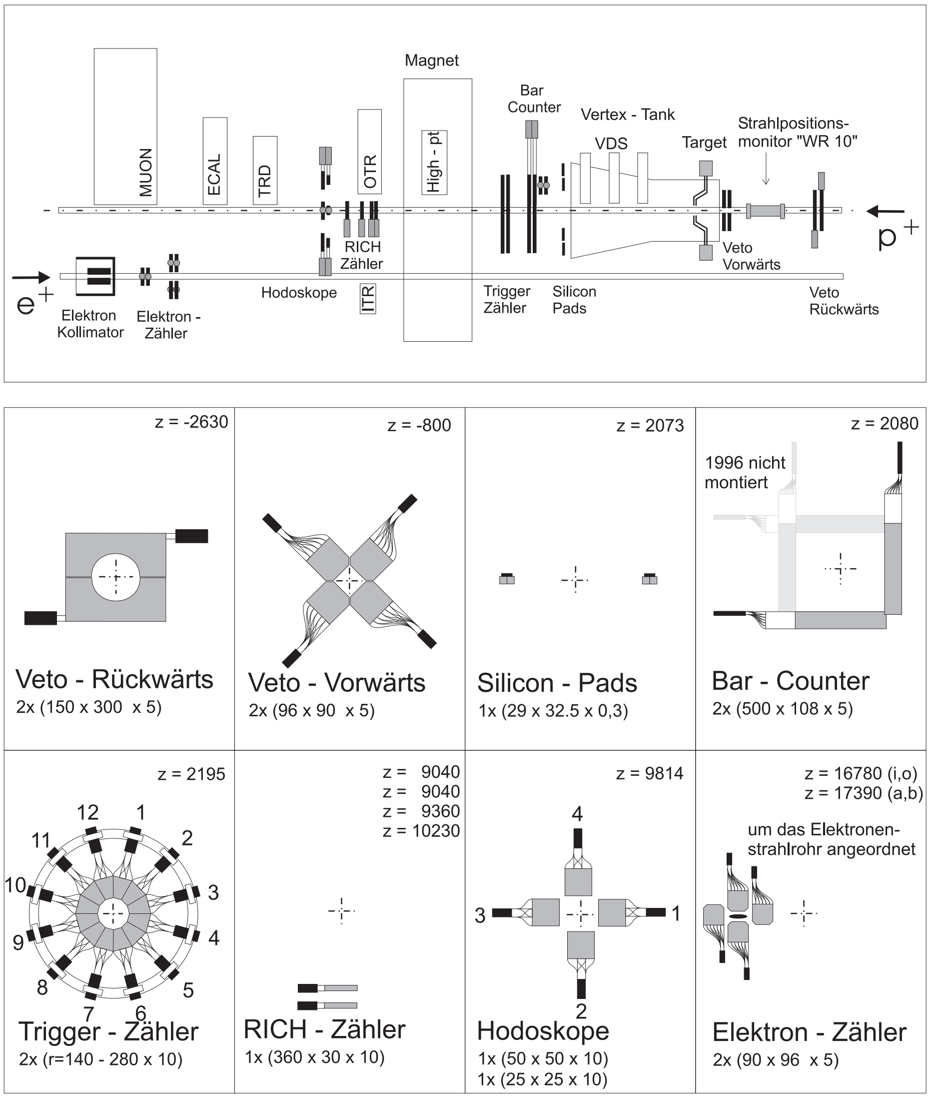


Abbildung 2.3: Zähleraufbau 1997 (nicht maßstabsgetreu) [18]

Es handelte sich hauptsächlich um Szintillationszähler. Es waren jedoch auch einige Siliziumdetektoren installiert. Dazu gehöhren kleine Detektoren, die nur wenige Zentimeter von den Drähten entfernt in den Armen der Targetbefestigung liegen. Sie befinden sich hinter den runden Fenstern in der Mitte der Haltestrukturen (siehe Abbildung 2.2. Außerdem sind Siliziumzähler am Austrittsfenster des Vertextanks befestigt. Alle Zähler bestehen aus zwei Lagen, so daß Koinzidenzen gebildet werden können. Rechts im Bild, vor dem Vertextank, befinden sich die Zähler Veto-vorwärts und Veto-rückwärts. Sie messen den Untergrund, der durch die Streuung von Protonen am Strahlrohr und anderen Aperturbegrenzungen erzeugt wird. Die zwölf Triggerzähler hinter dem Austrittsfenster des Vertextanks umgeben das Strahlrohr ringförmig. Von ihnen waren 1997 nur vier in Betrieb. Sie dienen in erster Linie Kalibrationszwecken (siehe Abschnitt 3.4. Die Barcounter, von denen zwei in der zweiten Hälfte der Runperiode 1997 zwischen den Triggerzählern und dem Vertextank zu Testzwecken eingebaut waren, sollen eventuell später zur Ratenmessung benutzt werden. Die vier Hodoskope sind hinter dem Magneten kreuzförmig um den Strahl angeordnet. Sie haben eine kleine Akzeptanz, so daß sie auch bei hohen Raten nicht in Sättigung gehen. Deshalb werden sie zur Bestimmung der Wechselwirkungsrate eingesetzt. Zur Messung des durch den Positronenstrahl induzierten Untergrundes gibt es vier Zählerpaare, die das Positronstrahlrohr umschließen. Etwa einen Meter vor den Targets ist ein Strahllagemonitor in das Strahlrohr eingebaut.

2.4 Elektronik

Abbildung 2.4 gibt einen Überblick über die elektronische Signalverarbeitung. Die Signale aller Szintillationszähler werden über Koaxialkabel in den Kontrollraum geleitet und in NIM-Modulen verstärkt. Diese Signale werden direkt in ADCs und teilweise auch in FADCs geleitet. Zusätzlich werden sie durch Diskriminatoren in Digitalsignale umgewandelt. Diese werden in TDCs und Zähler geleitet. Durch eine logische Und-Verknüpfung der Signale der beiden Zählerlagen werden die Koinzidenzsignale gebildet, die ebenfalls gezählt werden. Die Koinzidenzen des Triggerrings und der Hodoskope werden zusätzlich durch Oder-Gatter zusammengefaßt und ebenfalls gezählt.

Die Auslese der ADC- und TDC-Module sowie der Zähler wird durch einen elektrischen Impuls gestartet, der durch die Hodoskope ausgelöst wird und etwa viermal pro Sekunde erfolgt [8]. Dieser Vorgang wird “Triggern” genannt, und geschieht immer dem mit ersten Protonpaket der HERA-Protonfüllung. Die Raten werden sowohl mit CAMAC- als auch mit VME-Zählern gemessen, die ungefähr sekündlich ausgelesen werden. Die Target-

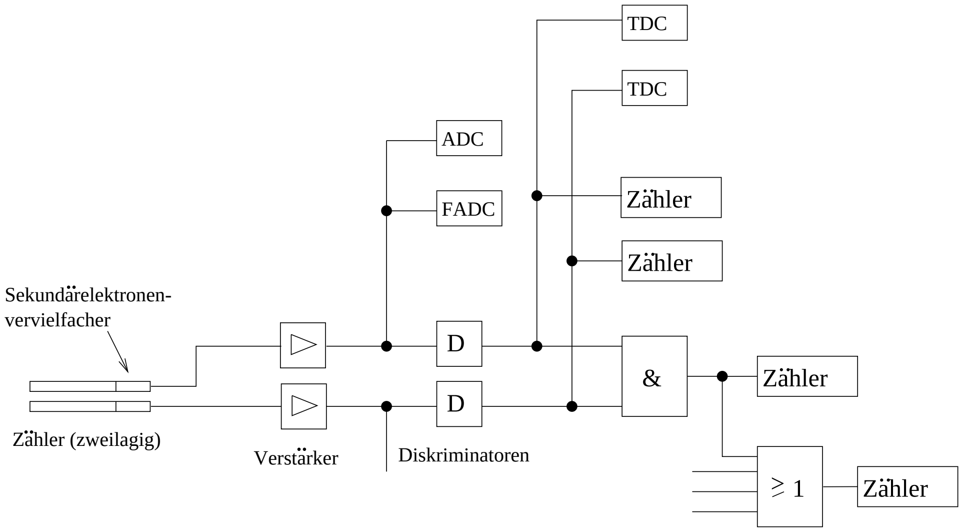


Abbildung 2.4: Schema der Signalverarbeitung des Target-Test Experimentes.

steuerung liest einige VME-Zähler auch mit einer Frequenz von 10 Hz aus.

2.5 Datennahme 1997

2.5.1 Der Datennahmefluß und die Datenspeicherung

Zur Targetsteuerung und zur Erfassung der Daten des Target-Test Experimentes dienen mehrere Programme, die auf verschiedene Rechner verteilt sind. Abbildung 2.5 zeigt schematisch den wesentlichen Datenfluß zwischen ihnen.

Es existieren zwei parallele Datenflüsse. Im ersten Datenfluß liest ein Datennahmeprogramm die Daten der VME-Zähler und aller CAMAC-Module (ADCs, TDCs und Zähler) aus und schreibt sie in eine Datei, die als "Listfile" bezeichnet wird.

Im zweiten Datenfluß werden die Informationen des Target-Steuerungsprogrammes und externe Daten in der Target-Datenbank, die durch einen Datenbankserver verwaltet wird, gespeichert.

Die Targetsteuerung liest die Raten einiger VME-Zähler mit einer Frequenz von etwa 10 Hz aus, und leitet diese an die Datenbank weiter. Desweiteren stellt die Targetsteuerung die Targetpositionen, alle Drahtbewegungen

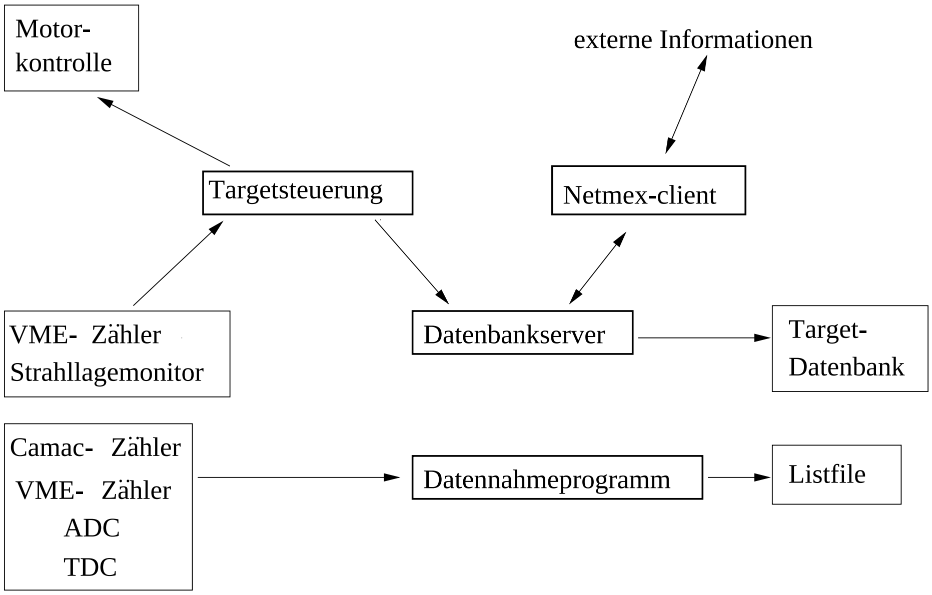


Abbildung 2.5: Die Verarbeitung der Daten des Testexperimentes. Programme sind durch dick umrandete Kästen dargestellt. Die Daten der VME-Zähler werden von der Targetsteuerung benutzt und an die Datenbank weitergegeben. Ein weiteres Programm schreibt die Daten der VME-Zähler und der CAMAC-Module in eine Datei.

und die wichtigsten internen Parameter dem Datenbankserver zur Speicherung zur Verfügung.

Ein weiteres Programm (Netmex-client) sammelt Daten über den Betrieb des Beschleunigers und der anderen Experimente zur Archivierung durch den Datenbankserver. Zu diesen Informationen gehören Parameter des Protonenstrahles, wie Strom, Lebensdauer, Emmitanz und Arbeitspunkt. Außerdem werden die Positionen der Strahlkollimatoren, die Kollimatorraten und die Werte der über den Ring verteilten Strahllagemonitore aufgezeichnet. Die anderen Experimente übermitteln Informationen über wichtige Untergrundraten. ZEUS und H1 besitzen zum Beispiel Detektorkomponenten, die nahe an den Protonenstrahl bewegt werden können (LPS[12] bzw. FPS). Deren Position und Zählrate werden angegeben.

Informationen der Datenbank werden auch an externe Benutzer weitergegeben. So kann man jederzeit über das Netzwerk einen beliebigen Datenbankinhalt graphisch darstellen lassen. Unter anderem werden die HERA-B Wechselwirkungsrate und die Drahtpositionen ständig auf der WWW-Seite der Maschinengruppe [13] angezeigt.

2.5.2 Die Datenanalyse

Die aufgezeichneten Daten werden mit Hilfe des Programmes "analysis", das im Rahmen dieser Diplomarbeit weiterentwickelt wurde, verarbeitet. Es erzeugt Energie- und Zeitspektren, sowie Histogramme, in denen zum Beispiel Raten und Drahtpositionen gegen die Zeit dargestellt werden. Diese Histogramme enthalten jedoch nicht die volle Zeitauflösung, sondern jeweils dieüber 10 Sekunden gemittelten Werte. Daher werden die Daten zusätzlich in einem anderen Format mit höherer Zeitauflösung abgespeichert.

Da keine dieser Dateien die volle Zeitinformation der Daten enthält, wurde im Rahmen der Diplomarbeit ein Programm entwickelt, das die gesamte Information aus den Rohdaten extrahiert. Diese wird zur detaillierten Untersuchung der Targetsteuerung benötigt.

Um die den Betrieb des HERA-B Targets zu protokollieren, wurde für jeden Run ein Übersichtsbild erzeugt, das die Wechselwirkungs- und Untergrundrate sowie die Drahtpositionen enthält, und auf der WWW-Seite der Targetgruppe veröffentlicht [14].

2.6 Die Targetsteuerung

Die Schrittmotoren zum Antrieb der Targets werden von einer Motorkontrolleinheit angesteuert. Da es auf dieser nicht möglich ist, komplexe Steueralgorithmen zu implementieren, wird die Steuerung von einem Programm übernommen, das auf einer VME-CPU installiert ist. Der Datenfluß, in den das Steuerungsprogramm eingebunden ist, ist in Abbildung 2.6 dargestellt.

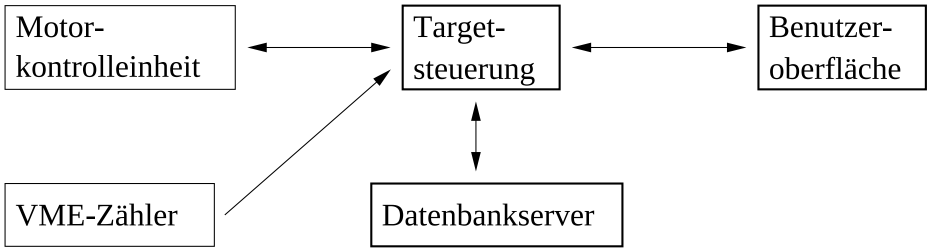


Abbildung 2.6: Datenfluß, in den das Steuerungsprogramm eingebunden ist.

Das Target-Steuerungsprogramm erhält Eingaben

- von der Motorkontrolleinheit,

- von VME-Zählern, die die Wechselwirkungsrate messen,
- vom Datenbankserver
- und von der graphischen Benutzeroberfläche, die auf einem getrennten Rechner installiert ist.

Hier werden die Rate vorgegeben, die zu benutzenden Drähte ausgewählt und Automatikparameter eingegeben. Es werden die aktuelle Wechselwirkungsrate, Drahtpositionen und mehrere Untergrundraten der anderen Experimente, die vom Datenbankserver ausgelesen wurden, angezeigt. Außerdem werden die Wechselwirkungsrate, der Untergrund und die Drahtpositionen der letzten halben Stunde graphisch dargestellt.

2.6.1 Die Algorithmen zur Targetsteuerung

Die Automatik muß im wesentlichen zwei Aufgaben erfüllen:

- die Wechselwirkungsrate muß konstant gehalten werden,
- ein schnelles und automatisches Heranfahren an den Strahl muß ermöglicht werden.

Im folgenden werden diese beiden Betriebsmodi erklärt [15, 16]:

Der Algorithmus zum automatischen Finden des Strahles

Im September 1997 wurde eine neue Version des Targetprogramms eingeführt, deren wichtigste Änderung neben einer Umstrukturierung der internen Programmstruktur darin besteht, daß der letztgenannte Vorgang erheblich beschleunigt und für den Benutzer vereinfacht wurde. Wird auf der Benutzeroberfläche ein Draht ausgewählt, bewegt er sich zunächst schnell bis auf einen Abstand von ca. 15 mm vom Strahlzentrum. Dann werden die eventuell schon in Betrieb befindliche Targets etwas zurückbewegt, um die Wechselwirkungsrate auf Untergrundniveau zu senken. In der folgenden Prozedur werden die Drähte, zunächst gemeinsam, dann einzeln zum Strahl gefahren, wobei ein Ratenanstieg das Erreichen des Strahls signalisiert. Hierfür wird in der Regel ein Ansteigen der Rate um den Faktor zwei gefordert. Sind so alle Targets an den Rand des Protonstrahl gebracht worden, wird zum normalen Automatikbetrieb übergegangen.

DerAlgorithmus zum Konstanthalten der Rate

Es gibt zwei verschiedene Regelalgorithmen, zwischen denen der Anwender wählen kann. Beide beruhen im Prinzip darauf, daß die Drähte zum Strahl gefahren werden, wenn die Rate zu niedrig ist, und vom Strahl weg gezogen werden, wenn sie zu hoch ist. Das Programm arbeitet in einer Schleife, in der etwa zehnmal pro Sekunde die Rate kontrolliert und über einen Steuerbefehl entschieden wird.

Der erste Algorithmus arbeitet mit einer konstanten Schrittweite. Weicht die Rate um mehr als einen bestimmten Betrag vom Sollwert ab, wird ein Schritt gefahren. Die erlaubte Abweichung und die Schrittweiten beim Hinein- und Herausfahren sind dabei einstellbare Parameter.

Der zweite Algorithmus beruht auf dem ersten. Der wesentliche Unterschied besteht darin, daß die Schrittweite nicht fest gewählt, sondern berechnet wird. Sie ist der Abweichung der Wechselwirkungsrate von der gewünschten Automatikrate proportional.

Abbildung 2.7 illustriert das Verhalten der Automatik. Man kann sehen, daß immer wenn die Rate von ihrem Sollwert von 40 MHz abweicht, das Target nach innen bzw. außen bewegt wird. Bis zum Zeitpunkt 1 sind die Fluktuationen der Rate nur gering, das Target wird daher nicht wesentlich bewegt. Zum Zeitpunkt 1 steigt die Wechselwirkungsrate über die eingestellte Automatikrate, und der Draht wird vom Strahl weggezogen. Dadurch wird erreicht, daß die Rate wieder auf 40 MHz sinkt. Zum Zeitpunkt 2 tritt der umgekehrte Fall ein: Die Rate sinkt unter die Automatikrate. Daher wird der Draht wird zum Strahl gefahren, und die Rate steigt wieder auf 40 MHz an. Da zum Zeitpunkt 3 die Rate wieder von der Automatikrate abweicht, muß erneut nachgeregelt werden. An diesem Beispiel kann man sehen, daß die Raten im Abstand von ca. einer Sekunde gemessen und die Targetposition angepaßt werden muß.

Zur Vermeidung zu hoher Raten existiert ein Sicherheitsmechanismus: die sogenannten “Emergencies”. Überschreitet die Rate einen bestimmten Schwellenwert, werden die Drähte 20 μm zurückgezogen. Es gibt noch einen zweiten Grenzwert, bei dessen Erreichen eine “Overall-Emergency” ausgelöst wird, in diesem Fall werden die Drähte um 200 μm bewegt. Im Gegensatz zur normalen Emergency wirkt sie auf alle Targets, egal ob sie gerade aktiv sind oder nicht.

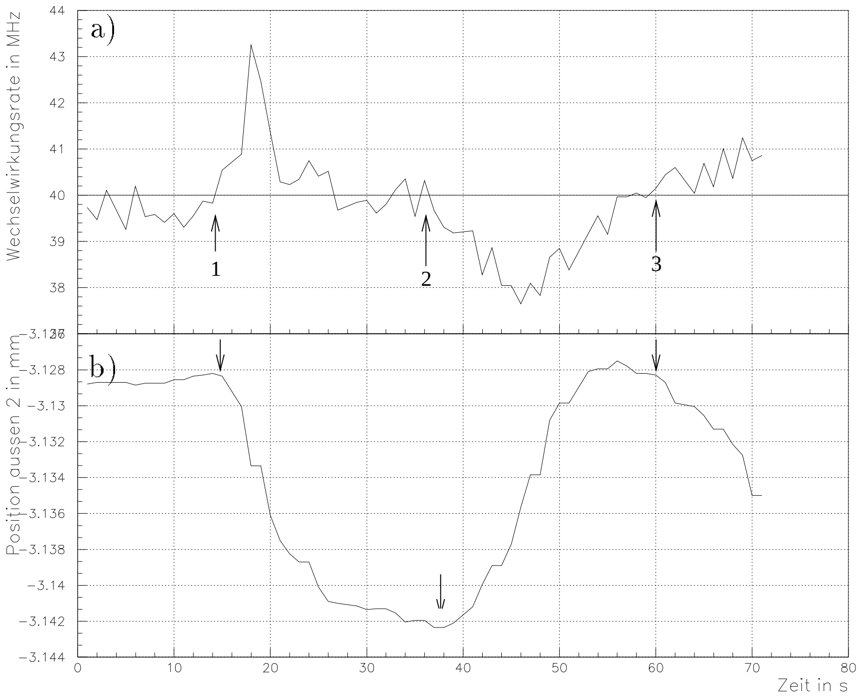


Abbildung 2.7: Illustration der Targetsteuerung: a) Wechselwirkungsrate und b) Drahtposition im Lauf der Zeit. Es wurde der Algorithmus mit berechneten Schrittweiten und nur ein Draht benutzt. Die Automatikrate ist auf 40 MHz eingestellt. Im Drahtkoordinatensystem wird der Strahl bei Null mm erwartet. Kleinere Werte bedeuten, daß der Abstand des Drahtes zum Strahl größer ist.

Kapitel 3

Datennahme 1997 und vorbereitende Untersuchungen

Während des Luminositätsbetriebes der HERA-Anlage im Jahr 1997 waren neben dem Target bereits einige andere Komponenten des HERA-B Detektors vorhanden. Um diese zu testen, wurde das Target über längere Zeit betrieben. Außerdem wurde die Funktion des Targets selbst getestet.

3.1 Beschreibung des Targetbetriebes

Die Dauer einer Füllung des HERA Speicherrings beträgt etwa 8 – 12 Stunden. Diese Zeit wird durch das Absinken des Positronenstromes auf ein Drittel des Anfangswertes und den dadurch hervorgerufenen Abfall der Luminosität bei den Experimenten H1 und Zeus begrenzt. Eine Meßperiode mit dem HERA-B -Target, die als "Run" bezeichnet wird, erstreckt sich im allgemeinen über einen solchen Zeitraum.

Abbildung 3.1 zeigt einen typischen Run. Um 17 Uhr erfolgt zunächst die Protoninjektion, bei der dreimal 60 Protonpakete injeziert werden. Danach wird ihre Energie von 40 auf 820 GeV erhöht. Als nächstes folgt die Injektion der Positronen. In diesem Beispiel zwingt ein unbeabsichtigter Verlust des Positronenstrahls dessen Neuinjektion. Bevor die Targets in den Strahl gefahren werden können, wird die Luminosität in den Kollisionspunkten der Detektoren H1 und ZEUS optimiert. Danach werden Detektorkomponenten von ZEUS nahe an den Strahl gebracht. Erst nach Abschluß dieser

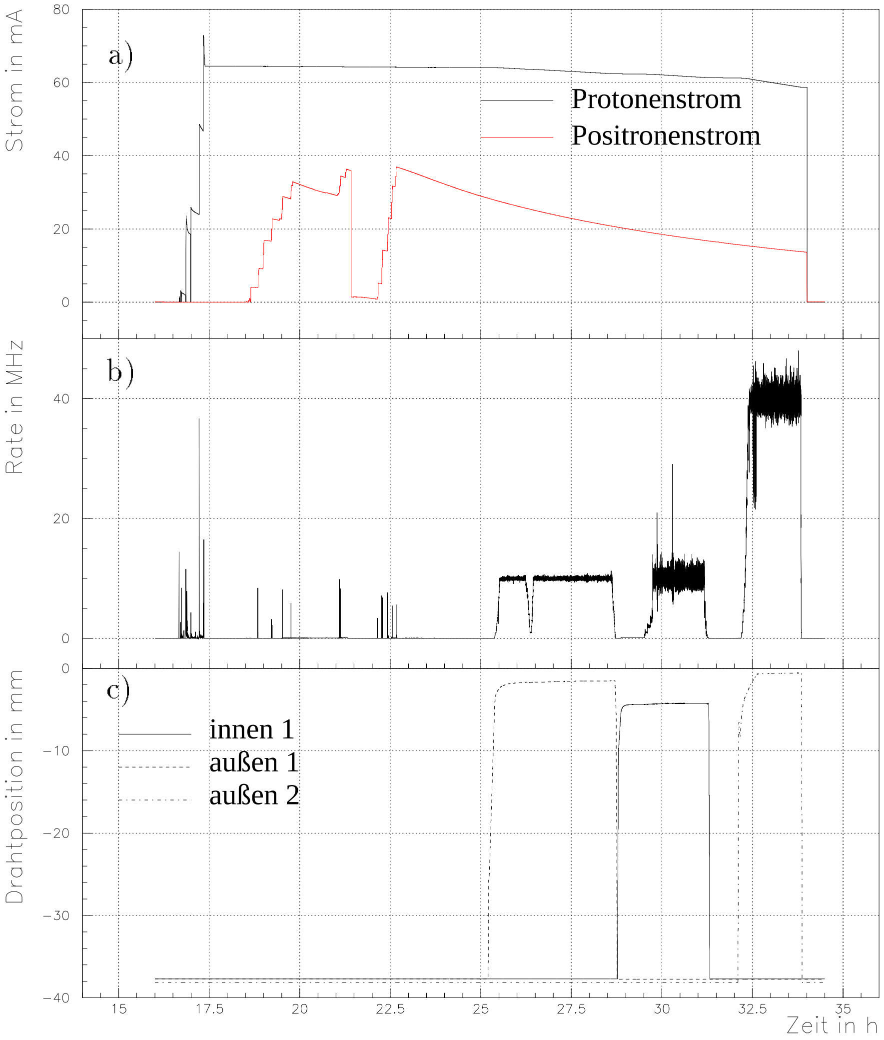


Abbildung 3.1: Eine typischer HERA-Füllung (Run 47 am 22.6.1997): a) Protonen- und Positronenstrom, b) Wechselwirkungsrate, c) Drahtposition als Funktion der Zeit. Der Run beginnt um 25 Uhr mit dem Hereinfahren des Drahtes außen 1 und Endet um 30 Uhr mit der Ejektion der Strahlen.

Vorgänge, um 25 Uhr[1], wird der Targetbetrieb mit einer Wechselwirkungsra-

---

[1] Wenn die Zeitachse in den Diagrammen Mitternacht überschreitet, werden Zeiten

te von 10 MHz aufgenommen. Der Draht wird während der Runs mehrmals gewechselt und die Rate schließlich auf 40 MHz erhöht. Man erkennt ein beschleunigtes Absinken des Protonstromes bei hoher Rate. Dies ist jedoch kein ernstes Problem, da trotzdem die Lebensdauer des Positronstroms die Länge des Runs begrenzt. Kurz bevor der Strahl zerstört wird, wird das Target ganz zurückgezogen.

3.2 Aktivitäten 1997

In der Meßperiode 1997 war der HERA-Speicherring insgesamt 5017 Stunden in Betrieb. Davon war während 2117 Stunden Luminosität deklariert. Das Target wurde in etwa 135 Runs 910 Stunden lang betrieben. Dabei wurde eine integrierte Wechselwirkungsrate von ungefähr $4{,}3 \cdot 10^{13}$ Ereignissen erziehlt. Das entspricht 13% dessen, was zum Nachweis der CP-Verletzung vorgesehen ist. In Abbildung 3.2 ist eine Übersicht über alle Runs und die gesamte Anzahl an Wechselwirkungen dargestellt. Das obere Diagramm enthält die akkumulierten Wechselwirkungen der einzelnen Runs, während im unteren diese Zahlen aufsummiert wurden. Die Rate der einzelnen Runs variiert stark, weil sie einerseits unterschiedlich lange dauern und andererseits nicht ständig mit maximaler Rate gefahren wurde. Vielmehr wurde sie den Erfordernissen der diversen durchgeführten Tests angepaßt. Deshalb ist zu erwarten, daß die Anzahl der Wechselwirkungen pro Jahr erheblich erhöht werden kann.

Ende Juni 1997 wurde der HERA-B Magnet ausgeschaltet, um Strom zu sparen. Dadurch änderte sich die Akzeptanz der zur Ratenmessung benutzten Szintillationszähler. Dieser Effekt wurde in den Daten gesehen und wird in Abschnitt 3.4 aufgezeigt.

3.3 Kontrolle der Zähler und der Elektronik

Die Energie- und Zeitspektren der Zähler dienen in erster Linie Kontroll- und Kalibrationszwecken. Eine Zusammenstellung wie in Abbildung 3.3 dient zur Überprüfung der einwandfreien Funktion der Zähler.

Die Energiespektren haben ein Maximum bei sehr niedrigen Werten, der vom Rauschen herrührt. Das zweite Maximum stammt von sogenannten minimal ionisierenden Teilchen. Dies sind Teilchen, deren Energieverlust nach der Bethe-Bloch-Formel beim Durchqueren von Materie minimal und

---

angezeigt, die größer als 24 Uhr sind. Eine Zeit von 25 Uhr entspricht 1 Uhr des nächsten Tages.

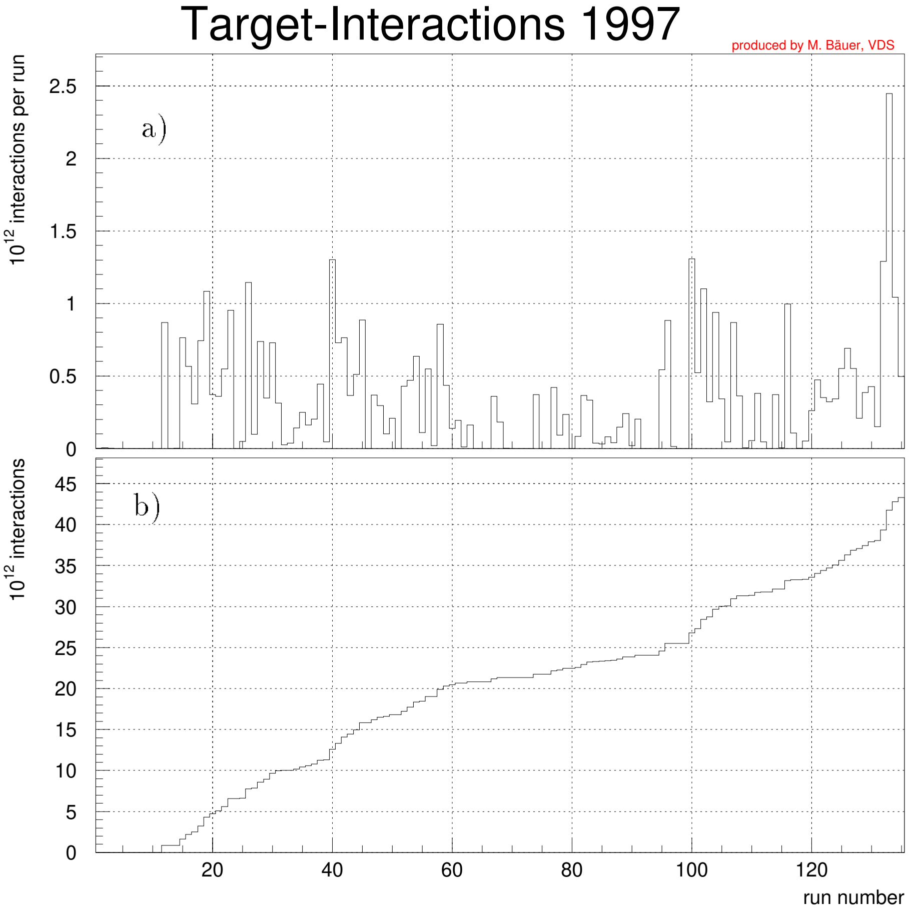


Abbildung 3.2: a) Integrierte Rate aller Runs des Jahres 1997, b) summiert über die gesamte Meßperiode [17].

annähernd unabhängig von ihrer Energie ist [19]. Daher häufen sich die Einträge im Energiespektrum bei einem Wert. Die Schwellen der Diskriminatoren sind so einzustellen, daß der Rauschen ausgeschlossen wird während die Signale der minimal ionisierenden Teilchen registriert werden, das heißt im Minimum zwischem dem Signal dieser Teilchen und dem Rauschsignal.

Die Zeitspektren umfassen einen Zeitraum von zwei Bunchen. Der erste ist wesentlich stärker ausgeprägt, weil mit dem ersten Bunch getriggert wird (siehe Abschnitt 2.4.

Die Diagramme in Abbildung 3.3 stimmen gut mit den theoretischen er-

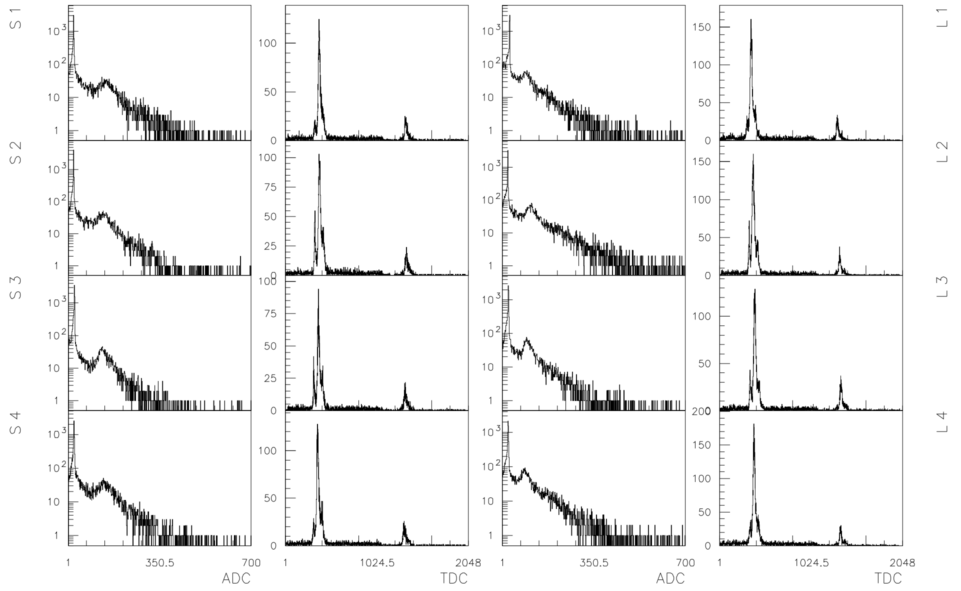


Abbildung 3.3: Energie- (ADC) und Zeispektren (TDC) der Hodoskopzähler im Run 63 am 17.7.1997. Es wurde eine Wechselwirkungsrate von 40 MHz erreicht. Die x-Achsen sind in willkürlichen Einheiten eingeteilt. Der dargestellte Zeitbereich umfaßt 200 ns.

wartungen überein. Dies zeigt, daß die Zähler und die Elektronik einwandfrei arbeiten.

3.4 Bestimmung der geometrischen Akzeptanz der Szintillationszähler

Zur Messung der Wechselwirkungsrate werden vier Hodoskopzähler eingesetzt. Dazu muß deren Akzeptanz bekannt sein, d. h. die Wahrscheinlichkeit, daß eine Wechselwirkung am Target von einer bestimmten Zähleranordnung registriert wird. Um sie zu bestimmen, wird die relative Akzeptanz von Hodoskop- zu den Triggerzählern gemessen. Die Akzeptanz der vier Triggerzähler beträgt $0,5372 \pm 0.0058$ bei eingeschaltetem Magneten und $0,5454 \pm 0,0057$ bei ausgeschaltetem Magneten. Diese Werte sind aus einer Monte-Carlo-Simulation bekannt. Wegen ihrer großen Akzeptanz, die eine hohe Statistik garantiert, und ihrer Nähe zum Target sind sie einer solchen Simulation gut zugänglich. Die relative Akzeptanz wid aus den Verhältnis der Zählraten der Zählergruppen bestimmt. In Abbildung 3.4 ist dieses Verhältnis für die Kombination aller Hodoskope (F1-Rate) und die aller Triggerzähler (ALL-Rate) gegen die ALL-Rate aufgetragen. Die Datenpunkte stammen aus einem Zeitraum, in dem nacheinander unterschiedlich hohe Raten zwischen 0 und 10 MHz eingestellt waren. Die Zähler können keine Mehrfachwechselwirkungen auflösen, deshalb können sie keine höhere Rate als die Bunchcrossingrate von 8,5 MHz messen. Aus diesem Grund knickt die Kurve bei einer hohen Rate ab. Da jeder Zähler bei jedem Bunchcrossing mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit, die proportional zu seiner Akzeptanz ist, ein Teilchen registriert, unterliegt die Anzahl der in einem gegebenen Zeitraum nachgewiesenen Teilchen einer Binomialverteilung. Das Verältnis der Raten zweier verschiedener Zählergruppen ist also nicht konstant.

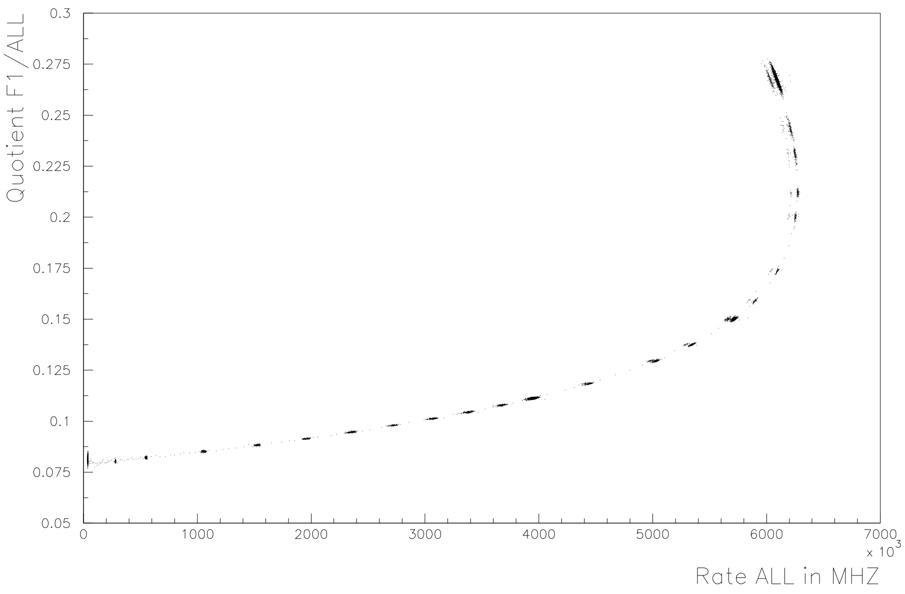


Abbildung 3.4: Das Verhältnis von F1-Rate und ALL-Rate, aufgetragen gegen die All-Rate, wie es zur Bestimmung der Akzeptanz benutzt wird. Die Streuung der Datenpunkte im Bereich von ALL-Raten unter 100 KHz wird durch den Untergrund verursacht. Das Abknicken der Kurve bei hohen Raten wird durch elektronische Effekte in den Triggerzählern verursacht. Dieser Bereich ist für die Akzeptanzmessung nicht mehr verwertbar.

Hinzu kommt ein elektronischer Effekt der Sekundärelektronen-Vervielfacher bei sehr hohen Teilchenströmen. Die Impulse dauern dann so lange an, daß die Signale des nachfolgenden Bunchcrossings überdeckt werden. Dies kann soweit führen, daß die Zählrate be steigender tatsächlichen Wechselwirkungsrate sinkt, erkennbar am Zurücklaufen der Kurve im Diagramm. Daher sind nur kleine Raten für diese Messungen verwertbar. Außerdem muß der Untergrund der Zähler, der hauptsächlich bei sehr niedrigen Raten Auswirkungen hat, berücksichtigt werden. Das Verhältnis der Zählraten kann durch folgende Formel parametrisiert werden [18]:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_{BX}}{R_1}\left(1 - c_u\left(1 - \frac{R_1}{R_{BX}}\right)^a\right)$$

R_1, R_2 : Raten der Zähler
a : relative Akzeptanz
c_u : Untergrundparameter

Eine solche Kurve ist an die Datenpunkte anzupassen. Ein Ergebnis für die Akzeptanz der F1-Rate, das durch die Auswertung zahlreicher Runs des Jahres 1997 zustande kam, ist [21]:
$a_{\mathrm{F1}} = 0.0385 \pm 0.0005$ bei eingeschaltetem Magneten
$a_{\mathrm{F1}} = 0.0489 \pm 0.0006$ bei ausgeschaltetem Magneten.

Zur Bestimmung der Wechselwirkungsrate am HERA-B Target ist die gemessene F1-Rate durch die Akzeptanz zu dividieren.

3.5 Targeteffizienz

Die Funktionsweise des Targets beruht darauf, daß Protonen mit dem Target zur Wechselwirkung gebracht, und somit dem Protonstrahl entzogen werden. In HERA-B werden jedoch nur die Protonen benutzt, die inelastisch mit dem Target wechselwirken. Wie in Abschnitt 2.2 erwähnt wurde, kann der Protonenstrahl durch das Target aufgeweitet werden, was zu einem unerwünschten Protonenverlust innerhalb des gesamten HERA Ringes führt. Ziel ist es, diesen möglichst gering zu halten.

Zur systematischen Untersuchung dieser Effekte wird die Targeteffizienz ϵ_{T} eingeführt: Sie ist das Verhältnis aus der Anzahl der am Target verlorengehenden Protonen und der Anzahl aller in HERA verlorengehenden Protonen.

Ideal wäre es, wenn der gesamte Protonenverlust nur am HERA-B Target stattfinden würde, wenn also $\epsilon_{\mathrm{T}} = 1$ wäre. In Wirklichkeit werden Teilchen jedoch auch an Aperturbegrenzungen aufgefangen; zum Beispiel an den LPS- und FPS-Detektoren bei ZEUS und H1 (siehe Abschnitt 2.5.1). Dadurch erhält man eine Targeteffizienz $\epsilon_T < 1$. Sie hängt vom Drahtmaterial und der Entfernung vom Strahlzentrum ab. Sie liegt in der Regel zwischen 0,5 und 0,8 [8].

3.6 Das HERA Kollimatorsystem

Teilchen, die aus dem Protonstrahl diffundieren, können störenden Untergrund hervorrufen, wenn sie auf die Wand des Strahlrohres oder andere Aperturbegrenzungen treffen. Insbesondere tragen auch die Protonen, die im HERA-B -Target Vielfachstreuung erleiden, zu diesem Effekt bei. Um diese Teilchen aufzufangen ist ein System aus Kollimatoren installiert [20]. Diese bestehen aus vier Kollimatorbacken, die waagerecht und senkrecht an den Strahl bewegt werden können. Wichtig für das Target sind die stromabwärts stehenden Kollimatoren, die die vom Target gestreuten Protonen abfangen.

3.6.1 Neues Verfahren zum Start des Targetbetriebes

Ende September 1997 wurde ein neues Vorgehen beim Beginn der Targetoperation eingeführt. Vorher mußte, wie in Abschnitt 3.1 beschrieben, abgewartet werden, bis alle Vorbereitungen zum Luminositätsbetrieb, darunter Kollimatorbewegungen, und LPS-Bewegungen beendet waren. Dies dauerte normalerweise mehrere Stunden. Die neue Prozedur verläuft in folgenden Schritten:

- Die Kollimatorbacken werden 3 mm vor ihrer nominellen Betriebsposition gestoppt.
- Eine komplette Ebene mit vier Targets wird an den Strahl gebracht und es wird eine Rate von 5 – 10 MHz eingestellt.
- Die Kollimatoren werden der Reihe nach in die endgültige Position gefahren. Das geschieht mit einer Automatik, die ähnlich wie die Targetsteuerung die Kollimatorraten mit einem Schwellenwert vergleicht.
- Danach wird Luminositätsbetrieb erklärt.
- Die ZEUS-LPS Detektoren werden in die Meßposition gefahren, während das Target weiter Wechselwirkungen erzeugt.
- Die Targetrate kann nun auf beliebige Werte eingestellt werden.

Abbildung 3.5 zeigt einen erfolgreichen Test dieses Verfahrens.

Zuerst wurden die Drähte zum Strahl gefahren und eine Rate von 5 MHz eingestellt. Unter diesen Bedingungen wurden die Kollimatoren auf ihre endgültige Position bewegt. Dieser Vorgang bewirkt ein Absinken des Hermes Proton-Untergrundes. Danach wird die Wechselwirkungsrate auf 8 MHz erhöht und Luminosität erklärt. Zwischen 22:30 und 23:30 werden die ZEUS LPS Detektoren and den Strahl gebracht. Da Teilchen des Strahlhalos an ihnen gestreut werden, steigen die ZEUS-Untergrundraten stark an. Auch die Untergrundrate bei Hermes erhöht sich zu diesem Zeitpunkt. Um 0 Uhr ist das Fahren der LPS-Detektoren beendet und die Targetrate wird erst auf 22, später auf 30 MHz erhöht. Dabei steigen die Untergrundraten der anderen Experimente an, dieser Anstieg bleibt jedoch vergleichsweise klein. Danach sinken die Untergrundraten rasch wieder ab.

Die Erfahrung hat gezeigt, daß die Untergrundraten der anderen Experimente, die vor der Einführung des neuen Verfahrens oft unzulässig hoch waren, nun meist unproblematisch sind. Die Effizienz der LPS-Detektoren war sehr groß, wenn die neue Prozedur benutzt wurde. Eine mögliche Erklärung für diesen Effekt besteht darin, daß Protonen die sich auf instabilen Bahnen befinden, mit dem Target wechselwirken und dadurch verlorengehen. Daher befinden sich weniger Protonen im Strahlhalo. Nun können die Kollimatoren besser positioniert werden, da der eigentliche Strahl nicht durch das Halo verdeckt wird. Die Kollimatoren sind jetzt in der Lage, instabil werdende Protonen besser abzufangen, was den Untergrund verringert.

Wie oben erwähnt, wurde der LPS-Detektor bewegt. Bei Anwendung der alten Prozedur hätte das Target erst nach dem Verschieben der LPS-Detektoren benutzt werden können, das heißt man hätte etwa drei Stunden Strahlzeit verloren. Dies größte Vorteil der neuen Prozedur für HERA-B . Die Dauer des Targetbetrieb verlängert sich um mindestens 30%. Daher wurde diese Prozedur für alle folgenden Runs benutzt.

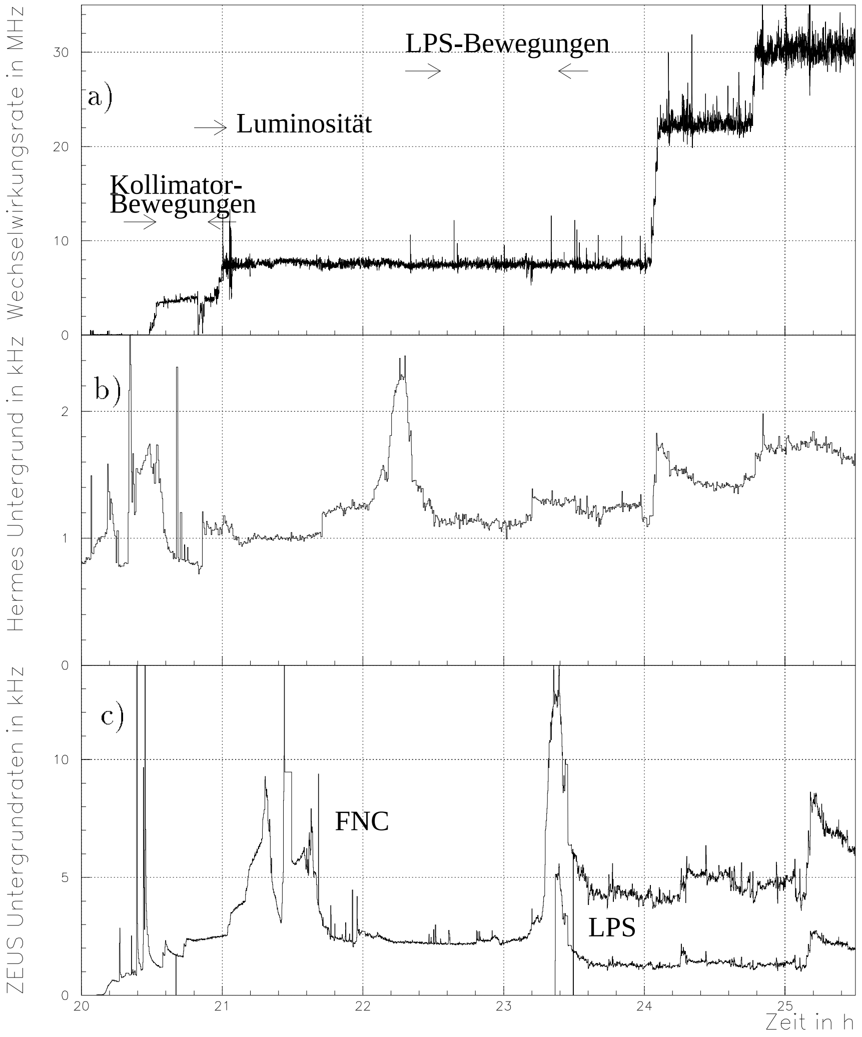


Abbildung 3.5: Test der neuen Prozedur in Run 107 am 30.9.1997: a) Wechselwirkungsrate, b) Protoninduzierter Untergrund bei Hermes, c) Untergrundraten des ZEUS-Experimentes. Die Kollimatoren wurden bei einer Targetrate von 4 MHz gefahren. Nach einer Erhöhung der Rate auf 8 MHz wurde Luminosität erklärt. Später wurden die ZEUS LPS-Detektoren bewegt , was sich an einem starken Anstieg der FNC- und LPS-Untergrundraten bemerkbar macht.

Kapitel 4

Untersuchung des Protonenstrahls

Dieses Kapitel befaßt sich mit Untersuchungen des Protonenstrahls und der Wechselwirkung zwischen dem Target und dem Strahl. Zunächst werden die Daten des Strahllagemonitors und die Reaktion der Rate auf Strahlbewegungen analysiert. Anschließend werden Experimente mit stehendem Target beschrieben, bei denen dieser Zusammenhang und andere Effekte besonders klar beobachtet werden können. Schließlich werden Experimente zur Bestimmung der Sprungantwort ausgewertet, bei denen das Verhalten der Rate bei einer erzwungenen Drahtbewegung untersucht werden. Unter der Annahme, daß die Rate zur Protonendichte am Ort des Targets proportional ist, lassen sich durch diese Untersuchungen Informationen über das Strahlprofil gewinnen.

4.1 Die Wirkungsweise des Targets

Ursprünglich ist das HERA-B Target als Halotarget konzipiert worden. Das bedeutet, daß es mit den Protonen wechselwirkt, die den Strahl durch Diffusion verlassen, so daß der Strahlkern nicht beeinflußt wird. Das Target arbeitet konkurrierend mit den Kollimatoren und anderen Aperturbegrenzungen. Da ein Targetdraht nur $a = 500\mu$m breit ist, muß ein Proton den Draht mehrere hundert mal durchqueren, bevor es inelastisch wechselwirkt[1]. Wenn es dagegen auf einen Kollimator trifft, wird es dort mit Sicherheit eingefangen. Da die Targets 4–5 σ vom Strahlzentrum entfernt sind und die

---

[1] Vergleiche mit Tabelle 2.1: Für ein Aluminiumtarget ist $l_{int}/a = 788$.

Kollimatoren bei etwa 8–10 σ stehen, kann ein großer Anteil aller verlorengehenden Protonen auf den Targets zur Wechselwirkung gebracht werden, eine hohe Targeteffizienz ist erreichbar. Die Verlustrate ν_{loss} der Protonen kann aus dem Protonenstrom und der Strahllebensdauer berechnet werden:

$$\nu_{loss} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} N = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \frac{IT}{e_0} = \frac{IT}{e_0 \tau}$$

N : Anzahl der Teilchen im Strahl
I : Protonenstrom
e_0 : Elementarladung
T : Dauer eines HERA-Umlaufs (21,12 μs)
τ : Strahllebensdauer

Bei einem Strahlstrom von 80 mA und einer Lebensdauer von 100 h besteht der Strahl aus 10^{13} Protonen, von denen pro Sekunde $3 \cdot 10^7$ verloren gehen. Mit einer Targeteffizienz von eins ließe sich so also eine Rate von 30 MHz nur durch die natürliche Protondiffusion aufrechterhalten. Die Targeteffizienz erreicht allerdings nur Werte, die deutlich kleiner als eins sind. Außerdem sind ohne Targetbetrieb Strahllebenszeiten von mehreren hundert Stunden die Regel. Es werden also Protonen des Strahlkerns verbraucht, so daß die Lebensdauer absinkt. Dies war bereits in Abbildung 3.1 zu sehen.

Die einfachste Beschreibung für die Wirkungsweise des Targets unter diesen Umständen liefert das "Scraping-Modell" [22]. Ausgehend von einem Gaußförmigen Strahlprofil und unter Vernachlässigung der Diffusion kann die Bewegung der Drähte zum Strahlzentrum berechnet werden.

$$r(t) = \sqrt{-2 \ln \left(1 - \sqrt{1 - \frac{\nu_{loss}}{N_0} t}\right)}$$

$r(t)$ ist die Targetposition in σ in Abhängigkeit der Zeit, ν_{loss} die Verlustrate und N_0 die ursprüngliche Teilchenanzahl im Strahl. Abbildung 4.1 zeigt schematisch das dabei entstehende Strahlprofil. Der Strahlkern bleibt annähernd gaußförmig, während sich am Target eine steile Kante ausbildet. Außerhalb des Targets ist die Protonendichte nahezu Null.

Der steile Abfall der Protonverteilung ist problematisch für die Targetsteuerung, da sich eine kleine Bewegung des Drahtes oder des Strahls stark auf die Rate auswirkt. Setzt man eine Wechselwirkungsrate von 10 MHz, eine Targeteffizienz von 50% und einen Strom von 80 mA ein, wird eine Targetbewegung wie in Abbildung 4.2 vorhergesagt.

Abbildung 4.3 zeigt die gemessene Bewegung eines Drahtes. Obwohl die Rate annähernd konstant ist, bewegt sich das Target ständig weiter in den

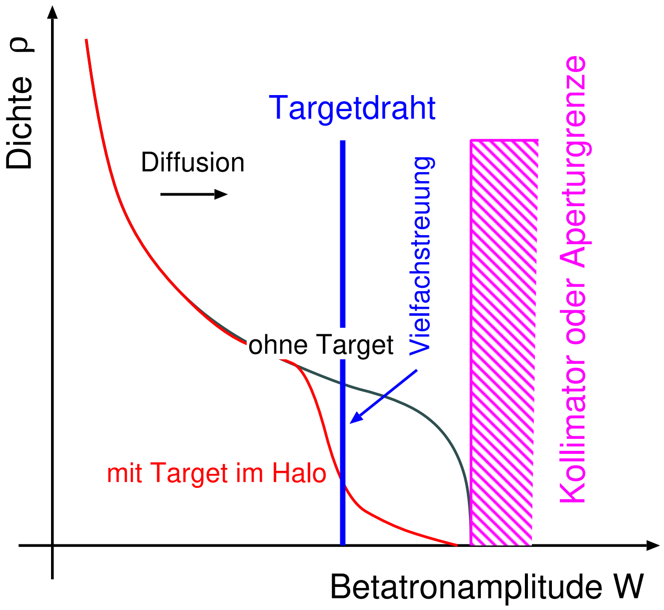


Abbildung 4.1: Modell des Strahlprofils beim Targetbetrieb. Am Draht entsteht eine steile Flanke in der Protonenverteilung.

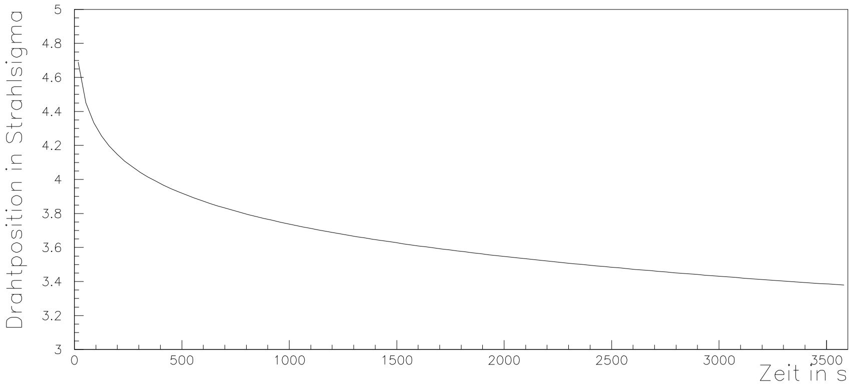


Abbildung 4.2: Die theoretische Kurve der Drahtbewegung während der ersten Stunde eines Runs nach dem Scrapingmodell. Die Targetposition ist in Strahlsigma ($\approx 480\mu$m) angegeben.

Strahl. Wie das Modell voraussagt, wird es dabei langsamer, weil es eine immer höhere Protonendichte vorfindet und die gleiche Anzahl Teilchen über eine kürzere Fahrstrecke verteilt ist.

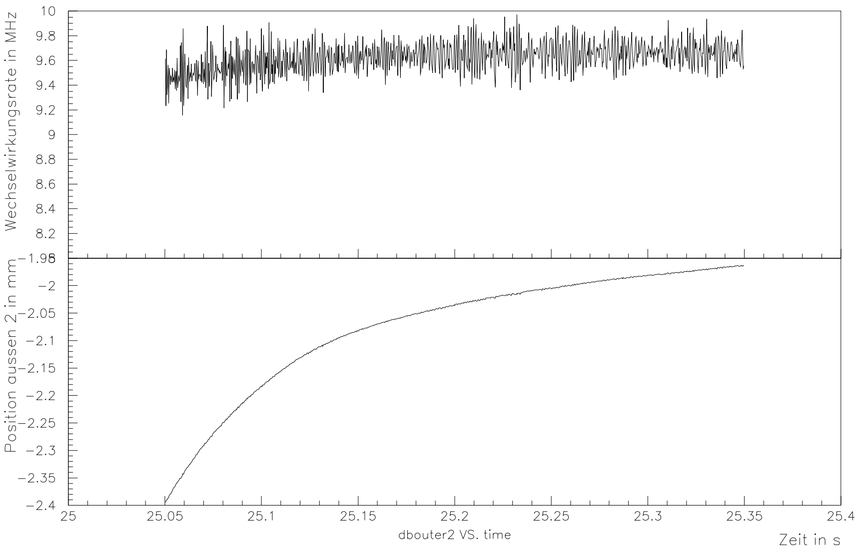


Abbildung 4.3: Bewegung des Targets zur Strahlmitte bei nahezu konstanter Rate.

Die Kurve in Abbildung 4.3 hat eine ähnliche Form wie die berechnete Kurve. Das Scraping-Modell ist eine brauchbare Beschreibung der Wirkungweise des Targets. Es gilt allerdings nicht exakt, da in der Praxis die hier vernachlässigte Diffusion auftritt.

4.2 Untersuchung der Strahllage

Die Position des Protonstrahls im Vertextank ist für den Targetbetrieb von großer Wichtigkeit. Bedeutend sind Schwankungen, die im Prinzip den gleichen Effekt haben wie Bewegungen des Targets. Daher können auch Strahlbewegungen eine Ursache für die Instabilität der Rate darstellen.

Zur Überwachung des Strahls dient ein Strahllagemonitor etwa einen Meter stromaufwärts des Targets. Er besteht aus vier Drähten, die um den Strahl angeordnet sind. Die vorbeifliegenden Protonpakete induzieren in ihnen Spiegelladungen. Durch Differenzbildung aus den Signalen gegenüberliegender Drähte läßt sich die Position des Strahls bestimmen.

4.2.1 Verteilung der Strahlposition

Die Strahlposition verändert sich von einer Protonfüllung zur nächsten. Außerdem schwankt sie während des Betriebes. Abbildung 4.4 zeigt die Verteilung der Position in horizontaler und vertikaler Richtung über die Runs 100–112.

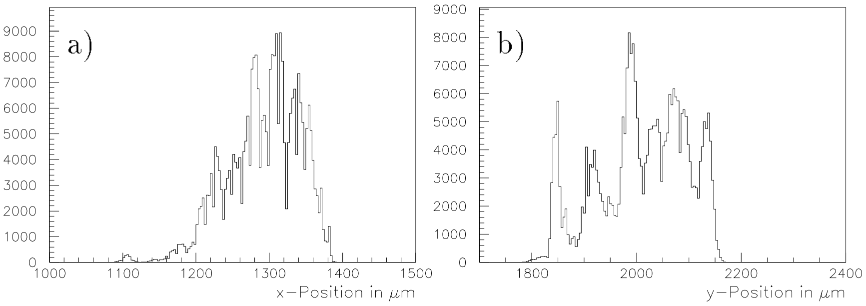


Abbildung 4.4: Häufigkeitsverteilung der Strahlposition in den Runs 100–112 a) in x-Richtung (horizontal), b) in y-Richtung (vertikal).

Zum Vergleich ist in Abbildung 4.5 im gleichen Maßstab die Verteilung nur für den Run 100 zu sehen.

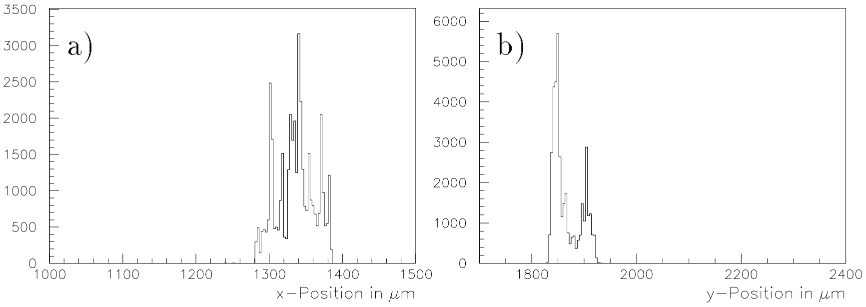


Abbildung 4.5: Häufigkeitsverteilung der Strahlposition im Run 100 a) in x-Richtung (horizontal), b) in y-Richtung (vertikal).

Die Strahllage variiert im untersuchten Zeitraum um etwa 300 μm. Meistens schwankt sie innerhalb der einzelnen Runs nur um einen Bruchteil dieses Betrages. Es fällt auf, daß die Position nicht gleichmäßig verteilt, sondern an einigen Stellen gehäuft ist. Das liegt daran, daß die Strahllage meist über einige Zeit recht stabil ist, um dann rasch auf einen neuen Wert zu springen. Solche Bewegungen verursachen Schwankungen der Wechselwirkungsrate, weshalb sie im nächsten Abschnitt näher betrachtet werden.

4.2.2 Sprünge der Strahllage

Als Beispiel zur Untersuchung dieser Problematik wurde Run 58 vom 12.7.1997 ausgewählt. Es wurde das Target außen 2 benutzt, um eine Wechselwirkungsrate von 30 MHz über acht Stunden konstant zu halten (siehe Abbildung 4.6).

Im Diagramm d) ist die Differenz zwischen Drahtposition und Strahllage dargestellt. Die Bewegungen von Draht und Strahl heben sich großenteils gegenseitig auf, so daß ihre Differenz eine wesentlich gleichmäßigere Kurve ergibt als die Drahtposition allein. Man erkennt mehrere Sprünge in der Strahlposition c) und die Reaktion der Automatik b) darauf. Das auffälligste Ereignis, um ca. 15:30 Uhr, ist in Abbildung 4.7 noch einmal vergrößert dargestellt:

Die Strahlposition springt um etwa 100 μm was einen Anstieg der Rate von 20 auf über 70 MHz zur Folge hat. Dies löst eine Overall-Emergengy aus, so daß das Target 200 μm nach außen fährt und die Rate auf 10 MHz sinkt. Danach bewegt die Automatik den Draht wieder zum Strahl zurück, um die eingestellte Rate von 30 MHz zu erreichen. Dieser Vorgang dauert etwa 30 s. Vor dem Auftreten des Sprungs bewegte sich der Strahl in die entgegengesetzte Richtung, was sich durch einen Abfall der Rate von 20 auf 30 MHz bemerkbar machte. Vermutlich ist ein Stromregler der HERA-Magnete für dieses Verhalten verantwortlich. Der Srom in einem Magneten entfernt sich von seinem Sollwert, was auch die anfängliche Drift der Strahlposition verursacht. Wenn diese Abweichung einen kritischen Wert überschreitet, wird sie korrigiert, was den Sprung der Strahlposition auslöst. Dieses Ereignis kann mit dem Strahllagemonitor nicht zeitlich aufgelöst werden. Bei einer Abtastrate von 1 Hertz bedeutet das, daß die Strahlbewegung in weniger als einer Sekunde ablief. Nachdem das Target sich wieder stabilisiert hat ist es etwa 100 μm von seiner ursprünglichen Position entfernt, was mit der Weite der Strahlbewegung gut übereinstimmt.

Der Strahllagemonitor ist ein im Jahr 1996 neu installiertes System, das später modifiziert wurde. Daher ist es angebracht, dessen korrekte Funktion

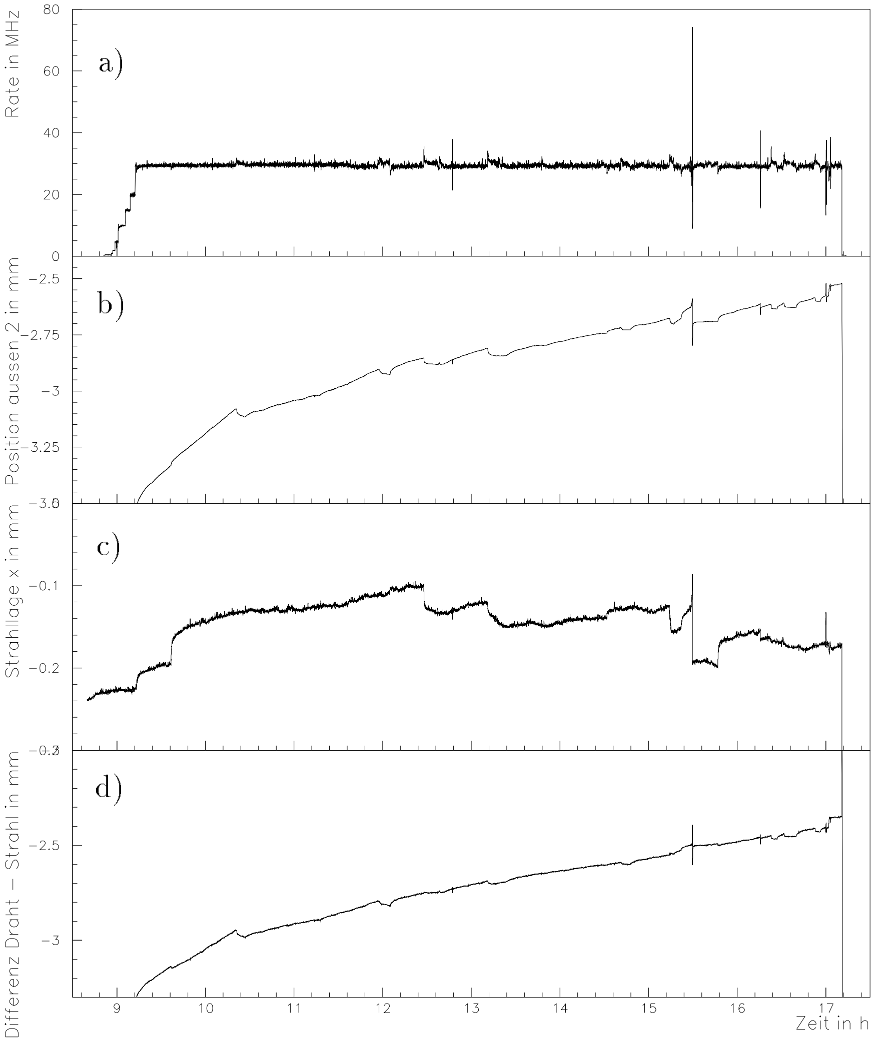


Abbildung 4.6: Überblick über den Run 58: a) Wechselwirkungsrate, b) Drahtposition, c) Lage des Strahls in x-Richtung, d) Differenz von Draht- und Strahlposition.

zu prüfen. Die Konsistenz der Daten des Monitors mit dem Verhalten der Drahtbewegung weist darauf hin, daß die Messung der Strahllage brauchbare Ergebnisse liefert.

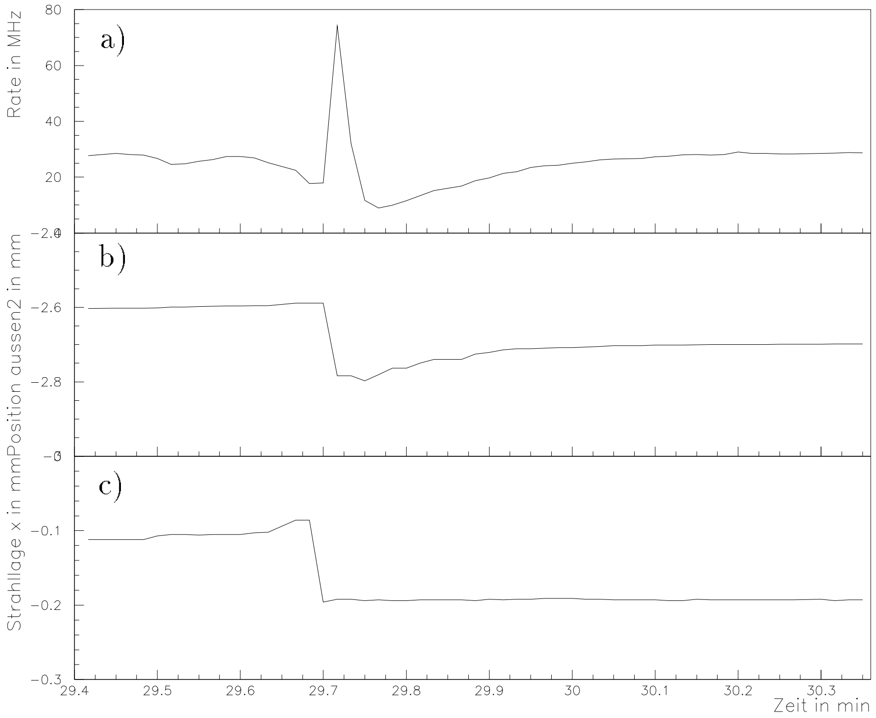


Abbildung 4.7: Ausschnitt aus Run 58 von 15:29:24 Uhr bis 15:30:22 Uhr. Die Strahlposition (c) springt um 100 μm, worauf die Rate (a) stark ansteigt. Dies wird durch ein Herausziehen des Drahtes (b) ausgeglichen.

4.2.3 Langsame Strahlbewegungen

Häufiger als die oben beschriebenen schnellen Sprünge kommen langsamere Strahlbewegungen vor, die in Abbildung 4.8 zu sehen sind.

Der Strahl verschiebt sich in etwa 40 s um 30 μm. Dabei fällt die Rate um 2 MHz, bevor die Automatik den Effekt kompensieren kann. Solche Vorgänge stellen im Gegensatz zu den schnellen Strahlbewegungen kein ernsthaftes Problem für die Stabilität der Rate dar.

4.2.4 Schlußfolgerung

Wie in Abschnitt 4.2.2 gezeigt wurde, kann die Strahlposition innerhalb kürzester Zeit um bis zu 100 μm springen. Das Target ist nicht in der Lage,

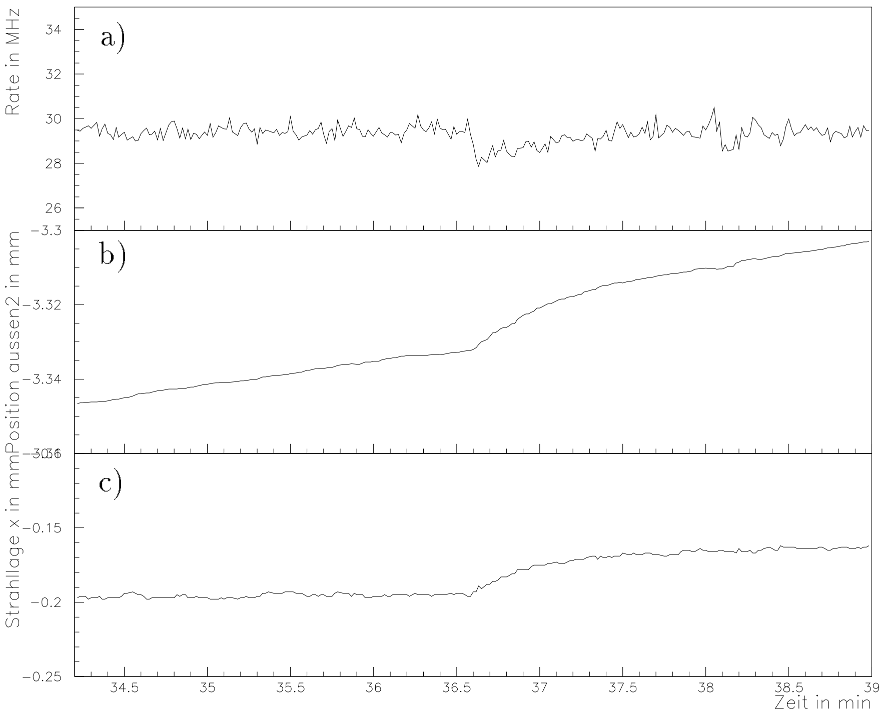


Abbildung 4.8: Ein Beispiel für eine langsame Strahlbewegung im Run 58. Die Verschiebung der Strahllage (c) wird durch die Drahtbewegung kompensiert. Zu Beginn dieser Bewegung sinkt die Wechselwirkungsrate um etwa 2 MHz ab.

einer solchen Bewegung so schnell zu folgen. Deshalb kann die Rate stark ansteigen. In diesem Fall besteht die Gefahr, daß spezielle Zähler ("Beam Loss Monitor") ansprechen, die über den HERA-Ring verteilt sind. Ihr Zweck besteht darin, die Vernichtung des Protonenstrahles auszulösen, wenn der Teilchenverlust zu groß wird, um eine Beschädigung des Beschleunigers oder der Experimente zu vermeiden. Der Strahl wird dann durch Kickermagnete in einen Absorber gelenkt. Ein solches Ereignis ist unerwünscht, weil der Strahlbetrieb dadurch für mehrere Stunden unterbrochen wird und die Effizienz des des Luminositätsbetriebes herabgesetzt wird. Im oben diskutierten Fall (siehe Abschnitt 4.2.2) führt die Rate von 80 MHz zwar zu keinem Strahlverlust, aber es besteht die Gefahr von Strahlenschäden an empfindlichen Detektorkomponenten. Eine Möglichkeit um dies zu vermeiden besteht darin, das Target und die Steuerung so zu modifizieren, daß es den schnellen Sprungen der Strahlposition folgen kann. Dieses Vorhaben wäre wahrscheinlich technisch sehr schwierig durchzuführen. Daher ist es vermutlich einfacher, beim Betrieb des Protonenspeicherrings Maßnahmen gegen schnelle Sprünge der Strahllage zu ergreifen.

Häufiger sind langsamere Strahlbewegungen, die von der Targetsteuerung ausgeglichen werden können und den Betrieb deshalb nicht wesentlich beeinträchtigen.

4.3 Messungen mit festem Target

In der Runperiode 1997 wurde die Automatik während des Ratenbetriebes mehrmals ausgeschaltet, das heißt die Bewegungen des Drahtes wurden gestoppt Diese Versuche sind wertvoll für Untersuchungen des Targetverhaltens, weil sie eine Untersuchung des Verhaltens der Wechselwirkungsrate unabhängig von der Targetsteuerung ermöglichen. Während des normalen Betriebes reagiert die Automatik auf eine Abweichung der Rate von der Sollrate, um diese zu korrigieren. Daher hat jede Änderung der Rate (zum Beispiel durch eine Bewegung des Strahles) eine Drahtbewegung zur Folge, die wiederum auf die Rate einwirkt. Ein systematisches Studium der Einflüsse auf die Wechselwirkungsrate ist unter diesen Umständen schwierig. Ist der Draht hingegen angehalten, können sich solche Einflüsse ungestört auswirken. Die komplizierte Rückkopplung zwischen Rate und Drahtposition wird ausgeschaltet und das Verhalten der Rate läßt sich isoliert von Targetbewegung und Steuerung untersuchen.

In Run 41 am 17.6.1997 wurden Experimente zur Spurrekonstruktion mit dem Vertexdetektor durchgefüht. Dazu mußte über längere Zeiträume eine hohe Rate mit fester Targetposition erzeugt werden. Abbildung 4.9 gibt einen Überblick über die Rate und die Position des einzigen benutzten Targets. Man erkennt die zahlreichen flachen Abschnitte in der Drahtposition, die Phasen mit festem Target markieren. In dieser Zeit sinkt die Rate meistens ab, so daß danach für kurze Zeit die Automatik eingeschaltet werden muß um sie wieder zu erhöhen.

4.3.1 Erläuterung der auftretenden Effekte

Anhand des Zeitraums von 7:00 – 7:32 Uhr (s. Abbildung 4.10) soll das typische Verhalten von Strahllage und Wechselwirkungsrate aufgezeigt werden. Es wurde das vertikale Target außen 2 benutzt, so daß die Position in x-Richtung für Fluktuationen der Rate maßgeblich ist. In diesem Run traten

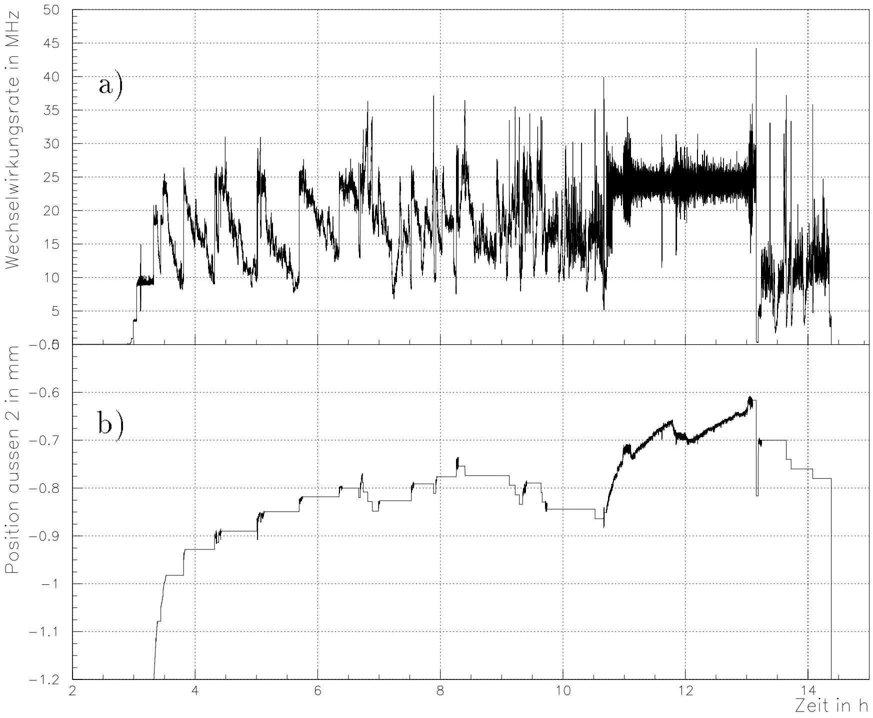


Abbildung 4.9: Überblick über Run 41. a) Wechselwirkungsrate, b) Drahtposition. Während des Runs wurde die Automatik mehrmals angehalten.

starke Strahlbewegungen, verbunden mit Ratenschwankungen auf. Dies hat jedoch keinen negativen Einfluß auf die vorliegenden Untersuchungen, weil diese Effekte beobachtet werden sollen, und daher sogar erwünscht sind. Die Strahlbewegungen in vertikaler und horizontaler Richtung sind offensichtlich stark korreliert, die Bewegungen sind jedoch nicht völlig gleich.

Man sieht, daß die Rate von der Strahlposition abhängt. Dies wird bei raschen Positionswechseln des Strahls besonders deutlich, bei denen die Rate verzögerungsfrei der Strahllage folgt. Allerdings ist die Rate keine eindeutige Funktion der Strahlposition. Dies zeigt sich besonders an den Schwankungen der Rate über längere Zeitskalen. Dort beobachtet man Scraping- und Diffusionseffekte. Zwischen 7 und 7,2 Uhr[2] und zwischen 7,4 und 7,48 Uhr

---

[2] Die Zeit wird im folgenden in Dezimalstunden angegeben. Zum Beispiel entspricht 7,2 h 7 Stunden und 12 Minuten.

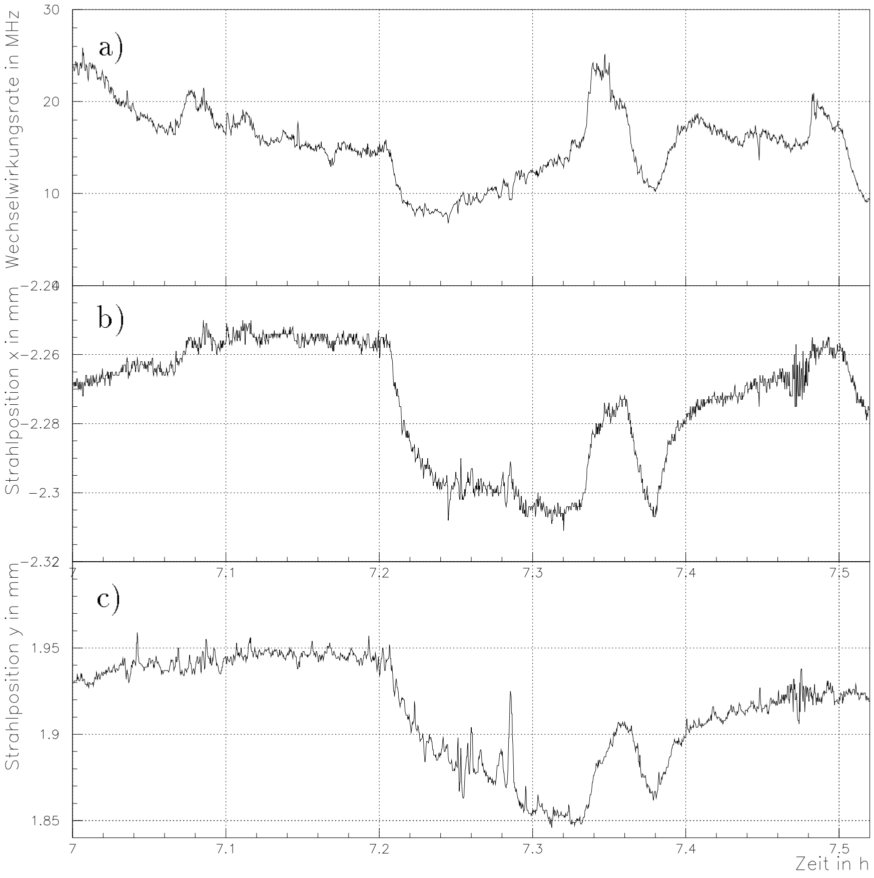


Abbildung 4.10: Ausschnitt aus Run 41 mit festem Target. Die Wechselwirkungsrate (a) reagiert auf die Bewegungen des Strahles. Strahlposition in x-Richtung (b) und in y-Richtung (c) sind korreliert.

sinkt die Rate, obwohl der Strahl bewegungslos bleibt bzw. sich sogar dem Target nähert. Dieser Effekt wurde schon füher beobachtet [23]. Er wird dadurch erklärt, daß Protonen, die die richtigen Bahnparameter haben, um den Draht zu treffen, aufgebraucht werden, und nicht schnell genug durch neue Protonen aus dem Strahlkern ersetzt werden. Wenn Target und Strahl schnell voneinander wegbewegt werden, tritt ein umgekehrter Effekt auf, wie es im Zeitraum von 7.23 bis 7,34 Uhr geschehen ist. Der Draht befindet sich nach einem solchen Sprung in einer Region, die an Protonen verarmt ist.

Aus den inneren Bereichen diffundieren langsam Teilchen nach, so daß die Rate wieder steigt.

4.4 Sprungantwort

Die Untersuchung der Sprungantwort ist ein aktives Experiment, das eine planmäßige Messung der Eigenschaften des Strahles ermöglicht. Als Sprungantwort wird das Verhalten der Rate bei einer plötzlichen Bewegung des Drahtes um eine definierte Strecke bezeichnet. Die Kenntnis dieser Größe ist für die weitere Entwicklung der Targetautomatik von großer Bedeutung, denn sie beschreibt quantitativ wie stark die Rate auf Drahtbewegungen reagiert. Darüber hinaus gewinnt man auf diese Weise Informationen über die Protonverteilung am Ort des Targets.

4.4.1 Erklärung des Meßverfahrens

Diese Experimente werden mit nur einem Draht durchgeführt. Zunächst wird mit der Automatik eine bestimmte Rate eingestellt. Dann wird der Draht gestoppt und mit der höchstmöglichen Fahrgeschwindigkeit manuell um einen Schritt bewegt. Die Schrittweite variiert dabei von 3 bis 50 μm. Bevor die normale Steuerung wieder eingeschaltet wird, bleibt die Targetposition etwa eine Minute konstant, damit die Rate einen konstanten Wert annehmen und gemessen werden kann. Dieses Verfahren wird fünfmal wiederholt, um statistische Fehler zu vermindern und sie abschätzbar zu machen.

Abbildung 4.11 zeigt die geschilderte Meßreihe. Das Target innen 1 wurde fünfmal um 10 μm in den Strahl bewegt. Vor und nach diesen Sprüngen stand der Draht jeweils für einige Minuten still, was man an den Plateaus in der Darstellung der Drahtposition erkennt. Die Rate springt bei jedem Versuch von 10 auf 15–20 MHz. Die Einzelergebnisse schwanken, zum Beispiel aufgrund von Fluktuationen der Strahllage, so daß die Wiederholung der Einzelmessungen sinnvoll und notwendig ist.

Solche Meßreihen müssen für verschiedene Schrittweiten, sowohl zum Strahl hin als auch vom Strahl weg, durchgeführt werden. Dieses Experiment ist mit unterschiedlichen Drähten und bei unterschiedlichen Raten zu wiederholen. Damit wird die Bestimmung der Sprungantwort zu einem aufwendigen Meßprogramm. Da diese Experimente große Sprünge in der Wechselwirkungsrate bewirken, stehen sie im Konflikt mit anderen Messungen, die eine konstante Rate erfordern. Daher konnte nur eine begrenzte An-

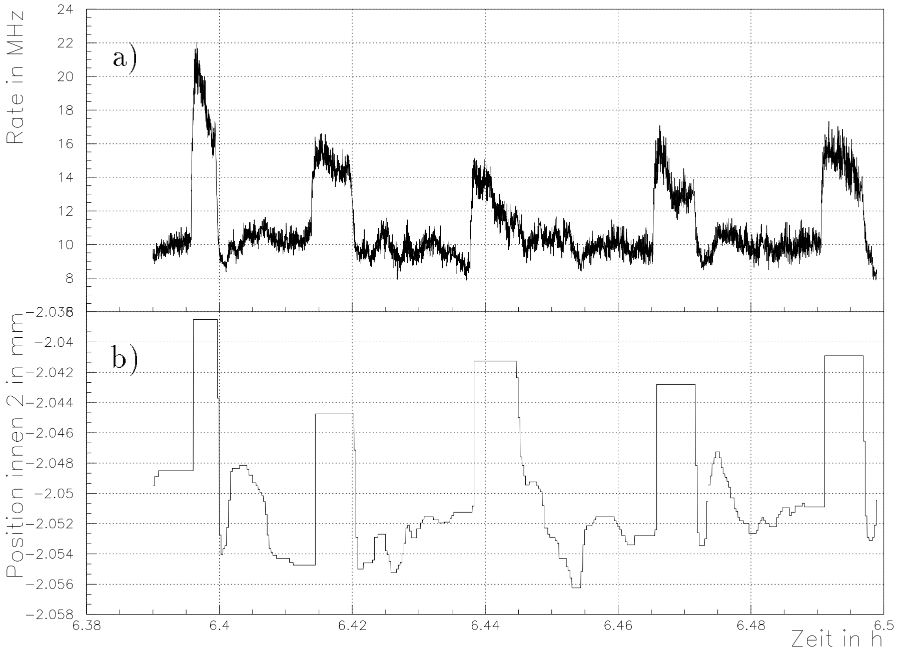


Abbildung 4.11: Beispiel einer Messung der Sprungantwort im Run 113. Fünfmal wurde der Draht manuell um 10 μm zum Strahl gefahren (b). Die Wechselwirkungsrate (a) reagiert jeweils mit einem entsprechenden Anstieg.

zahl dieser Untersuchungen durchgeführt werden, die aber bereits wichtige Resultate liefern.

4.4.2 Ergebnisse

Zur Auswertung der Versuche wurde die Rate vor und nach jedem Sprung der Drahtposition graphisch bestimmt. Es wurde jeweils die Differenz und der Quotient aus den Raten nach dem Sprung und vor dem Sprung gebildet. Aus den so erhaltenen Werten der fünf Einzelmessungen wurden Mittelwert und Standardabweichung berechnet.

Abbildung 4.12 zeigt das Ergebnis einer Meßreihe, durchgeführt in Run 114 am 5.10.1997 mit dem Target oben 1. In a) ist die durchschnittliche Ratenänderung gegen die gefahrene Schrittweite aufgetragen. Im Diagramm b) ist die relative Änderung der Rate dargestellt. Positive Schrittweiten bedeuten dabei eine Bewegung in Richtung des Strahlzentrums. Bei den an-

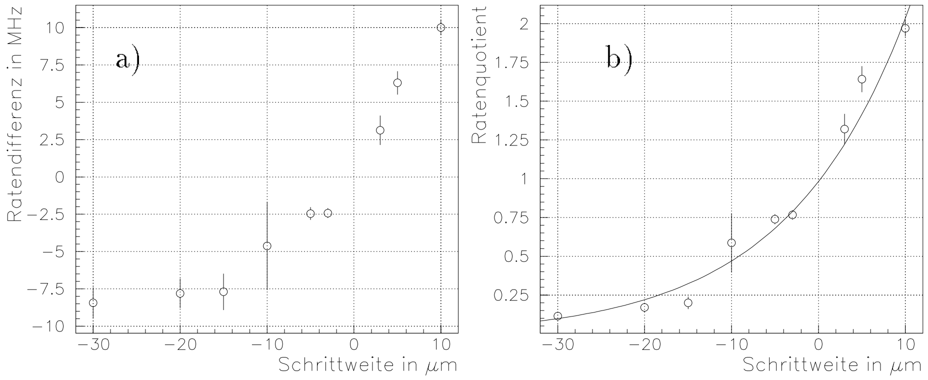


Abbildung 4.12: Sprungantwort des Targets oben 1 bei einer Ausgangsrate von 10 MHz. a) absolute Ratenänderung gegen die Schrittweite, b) relative Ratenänderung gegen die Schrittweite.

gegebenen Werten handelt es sich um die Mittelwerte aus den Ergebnissen einer Meßreihe wie in Abbildung 4.11, aus dieser Berechnung stammt auch die Größe der Fehler.

Man erkennt zunächst das erwartete Ergebnis: fährt der Draht näher an den Strahl, steigt die Rate, im umgekehrten Fall sinkt sie. Der Ratenanstieg ist jedoch keine lineare Funktion der Schrittweite. Vielmehr ist ein exponentieller Zusammenhang zu erkennen. Dieses Verhalten zeigt sich durchgängig bei allen Messungen zur Sprungantwort. An die Daten des Diagramms b) wurde die Funktion $p_1 e^{p_2 x} + p_3$ angepaßt. Das Ergebnis ist:

$$\begin{aligned} p_1 &= 1{,}000 \pm 0{,}041 \\ p_2 &= (0{,}0720 \pm 0{,}0038)\mu\mathrm{m}^{-1} \\ p_3 &= -0{,}017 \pm 0{,}027 \\ \chi^2 &= 4{,}6 \end{aligned}$$

Der wichtigste Parameter ist die Anstiegskonstante p_2. Er gibt den relativen Anstieg der Rate bei einer Drahtbewegung von 1 μm an. Der Kehrwert dieser Größe ist die Wegstrecke, die das Target für eine Änderung der Rate um den Faktor $\mathrm{e} = 2{,}718\ldots$ zurücklegt. $1/p_2$ wird im folgenden als Anstiegslänge bezeichnet. Tabelle 4.1 zeigt eine Übersicht über die Resultate aller Untersuchungen zur Sprungantwort. Die Anstiegslänge schwankt zwischen 7,5 μm und 22,7 μm. Diese Zahlen beschreiben den *relativen* Anstieg der Rate. Dieser bleibt in der gleichen Größenordnung, auch wenn die Ausgangsrate von

Run	Target	Material	Rate in MHz	$1/p_2$ in μm	p_3
113	innen 1	Al	10	$22{,}7 \pm 7{,}7$	$0{,}01 \pm 0{,}22$
114	oben 1	Al	10	$13{,}89 \pm 0{,}73$	$-0{,}017 \pm 0{,}027$
114	außen 2	C	5	$16{,}1 \pm 4{,}9$	$0{,}28 \pm 0{,}18$
116	innen 1	Al	30	$18{,}6 \pm 1{,}8$	$0.0016 \pm 0{,}027$
128	außen 2	Ti	30	$7{,}5 \pm 3{,}3$	$0{,}11 \pm 0{,}34$

Tabelle 4.1: Ergebnisse aller Meßreihen zur Bestimmung der Sprungantwort.

5 bis 30 MHz variiert. Der absolute Ratenanstieg wächst also mit der Ausgangsrate. Diese Werte bedeuten in der Praxis, daß sich die Rate um einen Faktor von 1,5 bis 3,8 erhöht, wenn der Draht 10 μm in den Strahl gefahren wird. Hätte der Strahl ein gaußförmiges Profil, sollten die Messungen einen wesentlich flacheren Anstieg der Raten ergeben. Bei einem Strahlsigma von 500 μm und einem Abstand des Targets von 5 σ führt die Annahme eines gaußförmigen Protonendichte zu einer Anstiegslänge von 100 μm. Der viel stärkere Ratenanstieg in den Messungen deutet auf einen Strahlquerschnitt mit steilen Flanken hin. Die Nullpunktsverschiebung p_3 ist im Rahmen der Fehler gleich Null. Die Protonendichte fällt also hinter dem Target rasch auf einen sehr kleinen Wert ab.

Die Resultate dieser Messungen bestätigen das im Abschnitt 4.1 beschriebene Scraping-Modell, das eine verschwindende Protondichte im äußeren Bereich des Strahles und einen sehr steilen Anstieg am Ort des Targets voraussagt. Die wichtigste Konsequenz für die Targetsteuerung ist die Größe der Reaktion bei Drahtbewegungen. Diese Werte müssen in die künftigen Entwicklung der Targetautomatik eingehen. Auch die Tatsache, daß die Beziehung zwischen Drahtposition und Rate nicht linear ist, muß für die Steuerung berücksichtigt werden.

Es gibt weitergehende Möglichkeiten für detailiertere Untersuchungen. Zum Beispiel sind die Abhängigkeit der Sprungantwort vom Drahtmaterial,von der ursprünglichen Rate und vom Alter des Runs von Interesse. Dazu sind umfangreiche Meßreihen, bei denen man alle diese Parameter variiert, notwendig. Wegen der begrenzten Meßzeit konnten diese Experimente noch nicht durchgeführt werden.

4.4.3 Spindelspiel

Bei der Auswertung der Untersuchungen zur Sprungantwort sind Anzeichen für das Vorhandensein von Spindelspiel aufgetreten. Das bedeutet, daß das Target bei einer Umkehrung der Bewegungsrichtung zunächst nicht auf die

Drehung der Spindel reagiert. Erst nachdem sie sich um einen gewissen Betrag gedreht hat, folgt das Target dieser Bewegung.

Abbildung 4.13 zeigt diesen Effekt.

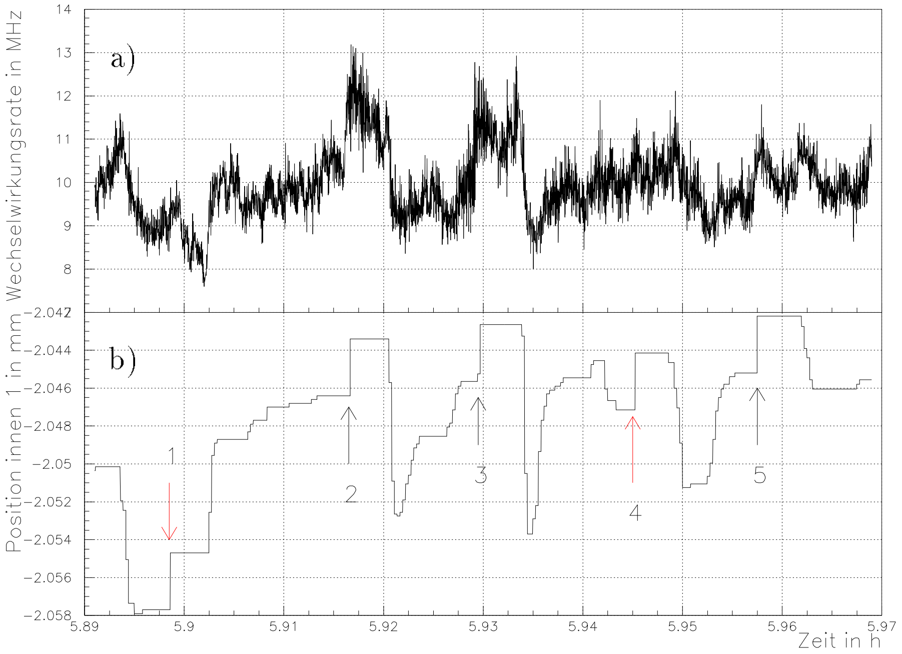


Abbildung 4.13: Anzeichen für Spindelspiel am Target innen 1 während des Runs 113 am 5.10.1997. a) Wechselwirkungsrate b)Drahtposition. Der Draht wurde fünfmal zum Strahl bewegt (Pfeile).

Bei einem Experiment zur Sprungantwort wurde der Draht innen 1 fünfmal um 3 μm zum Strahl bewegt. Die Zeitpunkte, zu denen das das geschah sind im Diagramm b) mit Pfeilen gekennzeichnet. wurde fünfmal um 3 μm zum Strahl hin bewegt. Vor dem Versuch 1 bewegte sich das Target nach außen, also entgegengesetzt zur Bewegungsrichtung beim nachfolgenden Sprung. Wenn dieser durchgeführt wird, sollte die Wechselwirkungsrate (a) rasch ansteigen, sie zeigt aber keine Reaktion. Vor der Messung 2 bewegt sich der Draht nach innen, das heißt die Bewegungsrichtung ist vor und während des Sprungs gleich. Hier ist ein Anstieg der Rate zu verzeichnen. Das gleiche gilt für die Versuche 3 und 5. Beim Versuch 4 bewegte sich der Draht wie beim Versuch 1 zuvor nach außen, und es ist keine Erhöhung der

Rate zu beobachten. Dieses Verhalten ist typisch für ein Spindelspiel von mindestens 3 μm.

In Abbildung 4.14 sieht man das entsprechende Ergebnis für eine Targetbewegung nach außen: Der Draht wurde fünfmal um 3 μm vom Strahl weg bewegt. Vor der Messung 3 bewegte er sich in die gleiche Richtung. Die Rate sinkt, wenn der Sprung der Drahtposition ausgeführt wird. Vor den vier anderen Versuchen fuhr das Target dagegen nach innen. Die dann ausgeführten Sprünge des Drahtes wirkten sich nicht auf die Rate aus.

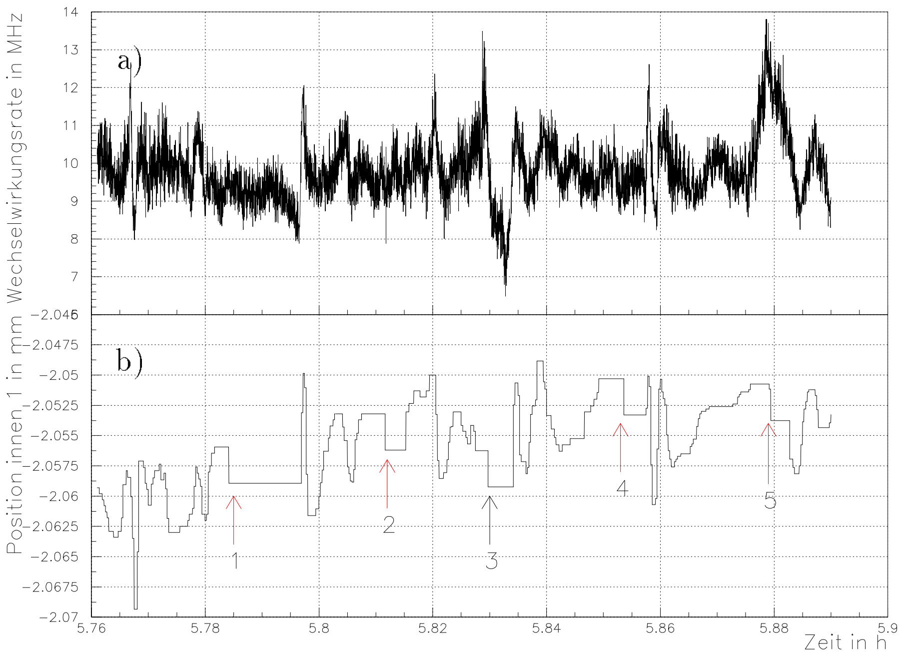


Abbildung 4.14: Spindelspiel auch beim Herausziehen des Targets: Fünfmal wurde der Draht nach außen bewegt. Nur einmal bewegte sich der Draht vorher in die gleiche Richtung.

Bei den Experimenten mit einer Schrittweite von 5 μm, die danach durchgeführt wurden, war immer eine Wirkung auf die Rate zu verzeichnen. Der tote Gang der Spindel beträgt also weniger als 5 μm.

Dieser Effekt wurde nur beim Target innen 1 beobachtet. Zum Vergleich zeigt Abbildung 4.15 eine Meßreihe mit dem Target außen 2. Der Draht wurde abwechselnd um 3 μm nach innen (ungerade Zahlen) und nach außen (gerade Zahlen) bewegt. Die Rate reagiert hier immer auf die Drahtbewegungen, auch wenn das Target vorher, wie in den Versuchen1, 3 und 9, in die entgegengesetzte Richtung gefahren ist.

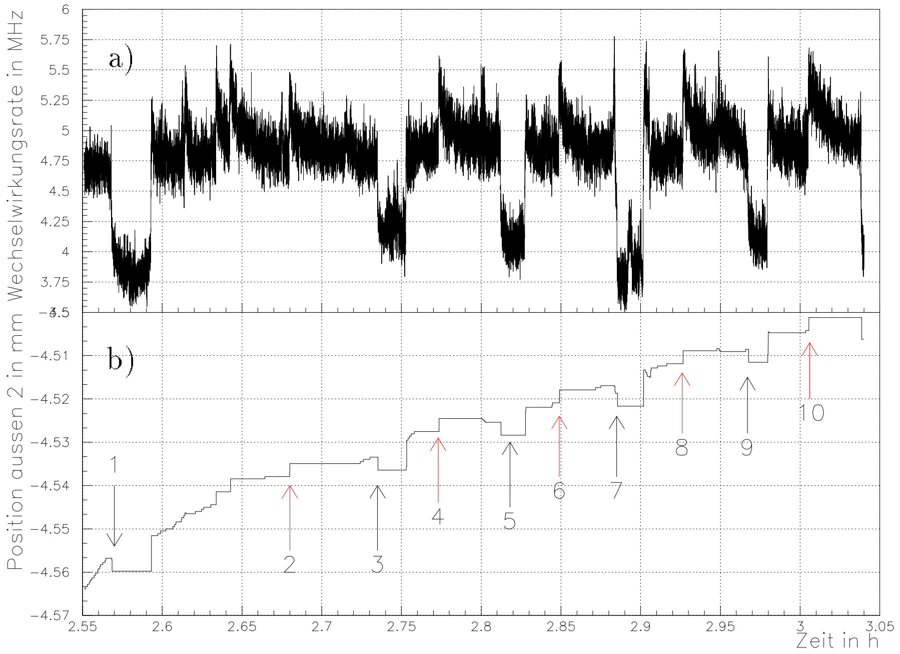


Abbildung 4.15: Messung der Sprungantwort des Targets außen 2 im Run 114. a) Wechselwirkungsrate, b) Drahtposition. Der Draht wurde jeweils fünfmal um 3 μm nach außen (ungerade Zahlen) und innen (gerade Zahlen) gefahren.

4.4.4 Einfluss auf Strahllage und Arbeitspunkt

Mit Hilfe dieser Experimente ist auch die Frage zu klären, ob Drahtbewegungen einen Einfluß auf verschiedene Parameter des Protonstrahls ausüben. Im normalen Betrieb ist das schwierig, da die Automatik auf Veränderungen des Strahles reagiert, und daher die Kausalität der Effekte kaum zu bestimmen ist. Bei der Messung der Sprungantwort führt das Target dagegen eine einzelne genau definierte Bewegung aus, deren mögliche Wirkungen eindeutig zu beobachten sind.

Ein solcher Test ist in Abbildung 4.16 zu sehen. Das Target oben 1 wurde fünfmal um 30 μm nach außen gefahren (a). Die Diagramme b) und c) zeigen die horizontale und vertikale Strahlposition. Es existiert keine Korrelation zwischen der Targetbewegung und dem Verhalten dieser Werte. Auch der Arbeitspunkt des Beschleunigers [24] (c, d) wird nicht von den Drahtbewegungen beeinflußt. Das HERA-B -Target übt also keine Wirkung auf diese Größen aus.

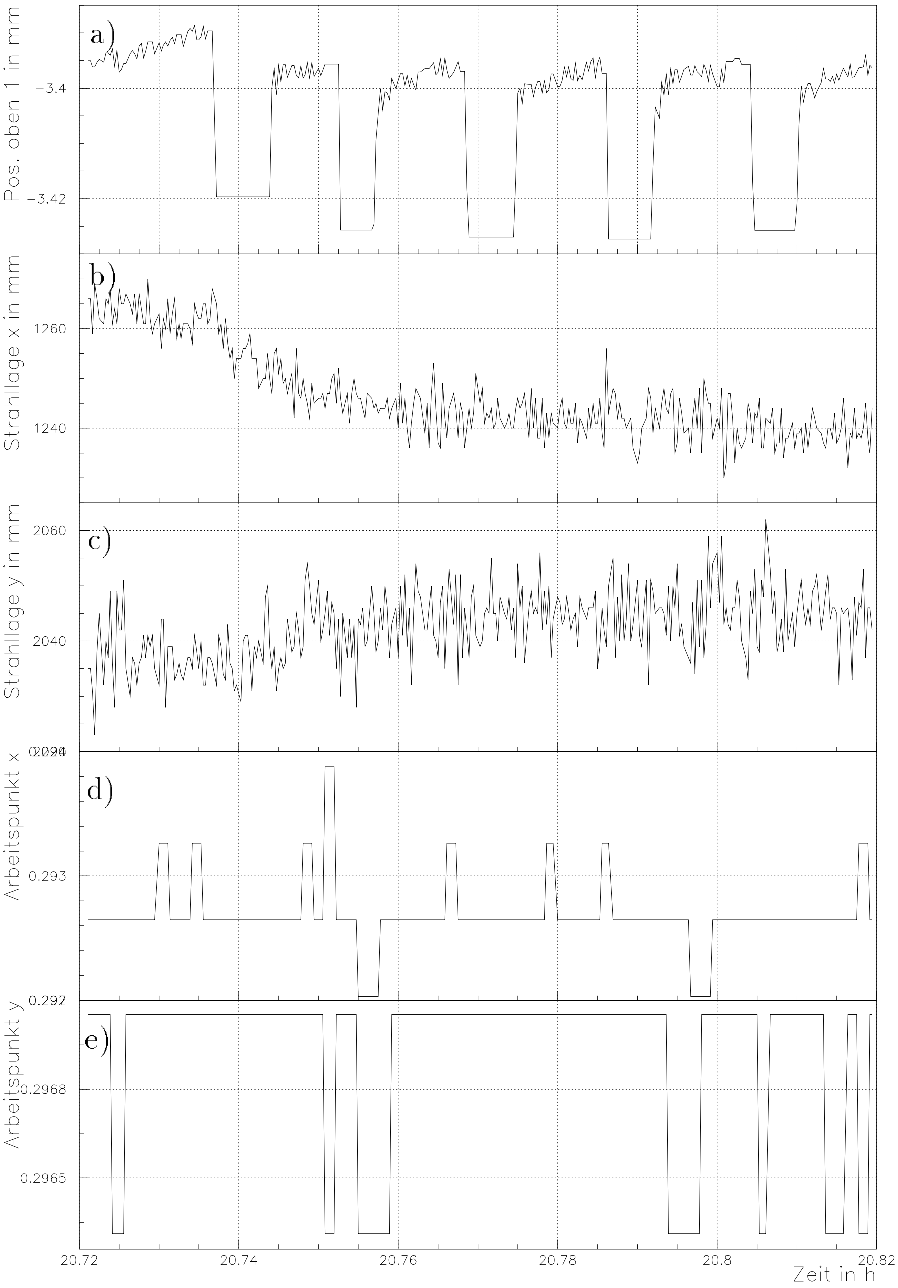


Abbildung 4.16: Das Verhalten von Strahllage und Arbeitspunkt während einer Messung der Sprungantwort (Run 114). a) Das Target oben 1 wird fünfmal um 30 μm nach außen gezogen, b), c) Strahllage in x- und y-Richtung, d), e) Arbeitspunkt in x- und y-Richtung.

Kapitel 5

Ratenstabilität

Eine Aufgabe der Targetsteuerung besteht darin, die Wechselwirkungsrate auf einem bestimmten Wert konstant zu halten. Diese Rate ist so gewählt, daß möglichst viele B^0-Ereignisse gefunden und rekonstruiert werden können. Ein anderer Grund für die Beschränkung der Rate sind mögliche Strahlenschäden. Daher sind jegliche Ratenfluktuationen unerwünscht. Sie lassen sich jedoch nicht vollständig unterdrücken. In der Meßperiode 1997 war die Wechselwirkungsrate häufig instabil, was ein großes Problem für den Targetbetrieb darstellte. Deshalb werden sie in diesem Kapitel näher untersucht.

5.1 Entwicklung der Protonfüllung.

Wenn das Target über längere Zeit eine hohe Rate aufrechterhält, verändert dies den Protonstrahl, wie in Abschnitt 4.1 beschrieben. Die Flanke der Protonverteilung wird steiler und die Rate reagiert empfindlicher auf Störungen. Häufig werden dadurch stetig zunehmende Fluktuationen verursacht.

Abbildung 5.1 zeigt ein extremes Beispiel. Während die Rate am Anfang des Runs noch relativ stabil ist, treten mit der Zeit immer häufiger kurzzeitige Abweichungen der Rate nach oben und unten auf. Dabei steigt die Rate oft so stark an, daß ein Schwellenwert überschritten wird, der ein Herausfahren der Drähte um 20 μm aus dem Strahl auslöst. Bei diesem als "Emergency" bezeichneten Vorgang sinkt die Rate nahezu bis auf Null. Das Diagramm b) zeigt die Anzahl der Emargencies in Intervallen von 10 Minuten. Ihr Vorkommen nimmt im Laufe des Runs immer mehr zu. Der Effekt, daß die Rate im Laufe einiger Stunden immer instabiler wird, trat in unterschiedlicher Intensität bei zahlreichen Runs auf.

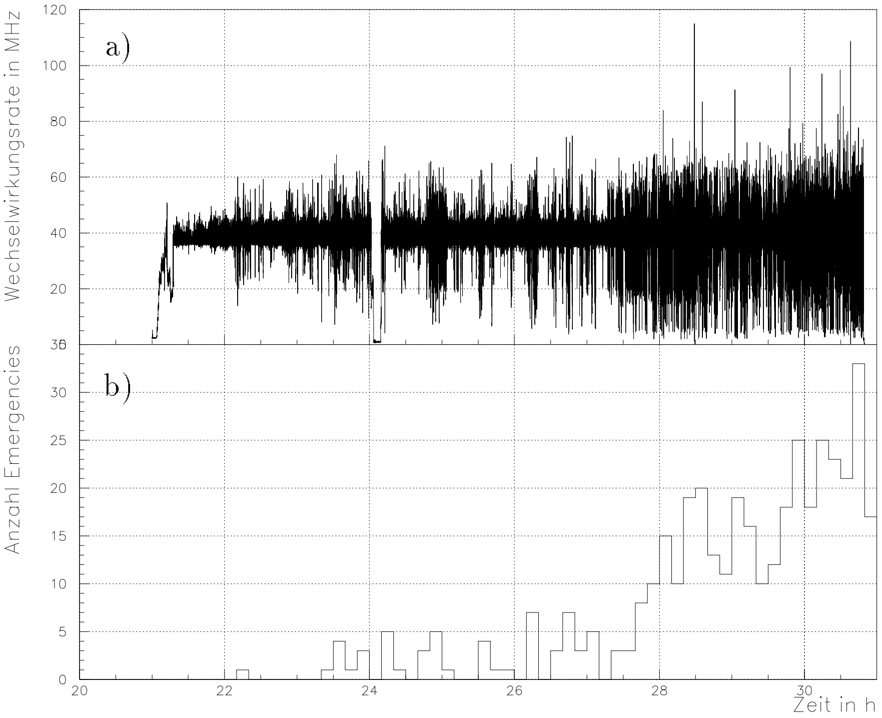


Abbildung 5.1: Alterung einer Protonfüllung: Run 98. a) Wechselwirkungsrate, b) Verteilung der ausgelösten Emergencies.

5.2 Einfluß des Targetmaterials auf die Ratenstabilität

Ein weiterer Faktor, der die Stabilität der Rate beeinflußt, ist das Targetmaterial. Es wurde oft beobachtet, daß ein Wechsel des Targets einen Effekt auf die Ratenstabilität hat. Abbildung 5.2 zeigt einen Run, bei dem nacheinander mehrere Drähte benutzt wurden.

Zuerst wurde mit vier, später mit zwei Targets gleichzeitig Rate erzeugt. Dieser Zeitraum von 12:15 bis 14:45 Uhr wird hier nicht untersucht, weil eine Zuordnung der Beobachtungen zu den Drähten natürlich nicht möglich ist. Danach werden die Targets jeweils einzeln an den Strahl gebracht. Die Breite der Ratenverteilung wurde für mehrere Zeiträume zwischen 13:44 und 16:12 berechnet, in denen verschiedene Targets benutzt wurden (s. Tabelle

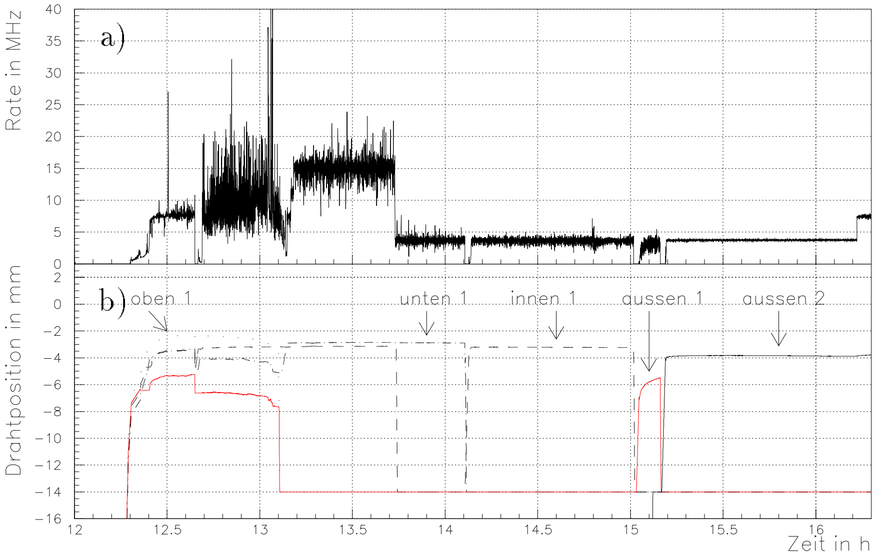


Abbildung 5.2: Der Run 122 am 10.10.1997. a) Wechselwirkungsrate, b) Bewegungen der Drähte. Zwischen 12:15 Uhr und 13:10 Uhr wurden gleichzeitig die Targets oben 1, unten 1, innen 1 und außen 1 benutzt. Danach wurden bis 13:45 Uhr die Drähte oben 1 und unten 1 gefahren. Später wurden jeweils einzelne Targets benutzt, wie im Diagramm angegeben.

Target	Material	Zeit	relative Breite
unten 1	Al	13:44 – 14:06	0,15
oben 1	Al	14:09 – 15:00	0.12
außen 1	C	15:05 – 15:10	0.23
außen 2	C	15:12 – 16:12	0.024

Tabelle 5.1: Relative Standardabweichung der Rate für die einzeln benutzten Targets.

5.1). Dabei war immer ungefähr die gleiche Rate eingestellt. Das auffälligste Merkmal ist die vergleichsweise hohe Stabilität der Rate bei Benutzung des Drahtes außen 2. Die Drähte außen 1 und außen 2 bestehen aus Kohlenstoff, dennoch haben sie ein völlig unterschiedliches Verhalten. Eine mögliche Erklärung dafür ist, daß das erst später eingebaute Target außen 1 ein kompaktes Kohlefaserband ist, während das Target außen 2 sich im Laufe der

Meßperiode stark verändert hat. Die meisten Fasern sind in der Mitte durchtrennt und bilden ein weit aufgefächertes Bündel (siehe Abbildung 5.3). Da das Target außen 2 somit im Gegensatz zu den anderen Drähten kein scharf begrenztes Objekt darstellt, ist die Wechselwirkung mit dem Protonenstrahl in radialer Richtung über einen weiten Bereich verteilt. Daher kann sich keine so steile Flanke im Strahlprofil ausbilden, wie bei den anderen Drähten. Der im Abschnitt 4.1 beschriebene Scraping-Effekt kann sich also nicht voll auswirken.

Abbildung 5.3: Das Target außen 2 während des Umbaus im August 1997.

In den späteren Runs des Jahres 1997 (vor dem Austausch durch einen Titandraht im Oktober) lieferte das Target außen 2 meist die stabilste Rate. Der Vergleich mit dem anderen Kohlenstofftarget zeigt, daß dies wahrscheinlich weniger durch Material als durch die Geometrie des Drahtes verursacht wird. Die Stabilität der Rate hängt von vielen Faktoren ab (zum Beispiel das benutzte Target, Wechselwirkungsrate, Einstellungen der Steuerung, Vorgeschichte der Protonfüllung), und schwankt stark von Run zu Run. Daher bedarf eine genaue Charakterisierung des Targetverhaltens einer umfangreichen Untersuchung.

5.3 Nahezu periodische Oszillationen der Rate

Ein Verhalten, das oft beoabachtet wurde, ist in Abbildung 5.4 dargestellt.

Die Rate zeigt abwechselnd kurze Sprünge nach oben und unten. Charakteristisch ist, daß zwischen diesen Ereignissen mehr oder weniger lange Perioden mit einer konstanten Rate liegen. Dadurch unterscheiden sie sich von den weiter unten beschriebenen Steuerschwingungen, bei denen die Rate kontinuierlich oszilliert, ohne bei einer mittleren Rate zu verharren.

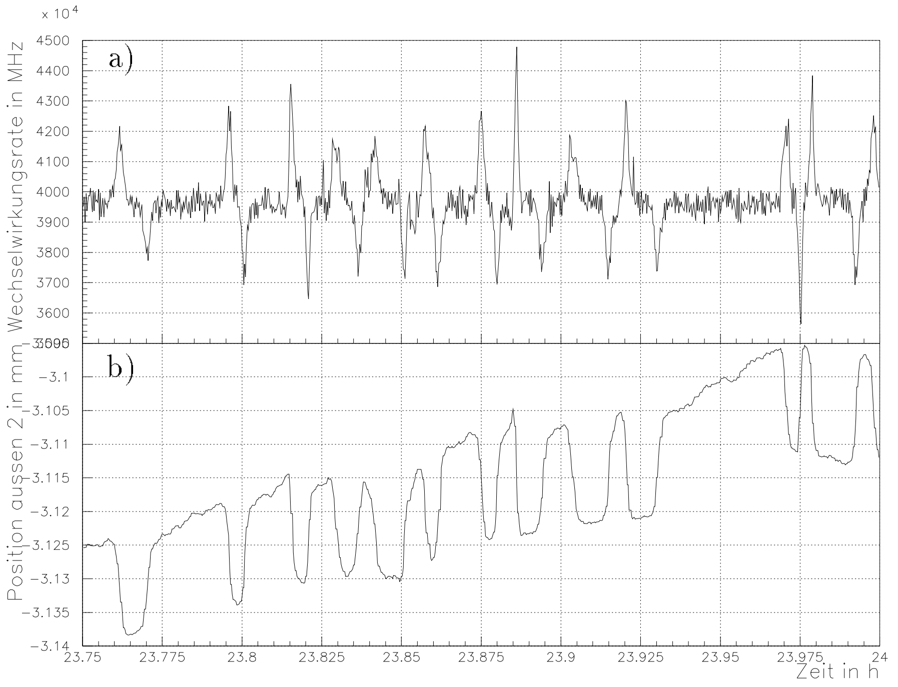


Abbildung 5.4: Schwankungen der Wechselwirkungsrate (a) und der Targetposition (b) in Run 74 am 5.8.1997.

Das Target verhält sich im Prinzip so wie man es erwartet. Es bewegt sich immer dann, wenn die Rate stark vom Sollwert abweicht, so daß die sie wieder auf den richtigen Wert gebracht wird. Betrachtet man also nur eine einzelne Ratenfluktuation, funktioniert die Automatik durchaus korrekt. Der Effekt dieser Bewegungen ist, daß der Draht zwischen zwei Positionen wechselt, deren Abstand von etwa 15 μm über längere Zeit konstant bleibt. In beiden Positionen ist das Target in der Lage eine stabile Rate von 40 MHz zu erzeugen. Da eine Verschiebung der Targetposition um 15 μm normalerweise eine beträchtliche Ratenänderung nach sich zieht (s. Abschnitt 4.4.2), liegt der Schluß nahe, daß das Target sich in Wirklichkeit in beiden Fällen an der gleichen Stelle befindet, daß es also zwei Zustände annehmen kann, in denen die es unterschiedliche Positionen bei gleicher angezeigter Lage einnimmt. Die Ursache dafür kann von einem Spiel der Spindel bis zu einer Verformung des Targetdrahtes selbst reichen. Dieses Phänomen wurde ausschließlich beim Target außen 2 beobachtet. Es trat zuerst in Run 10 auf und verschwand nach dem Targetumbau im August obwohl das Target außen 2 dabei nicht verändert wurde. Der Draht hat sich jedoch im Laufe der Meßperiode verändert, was den Wandel im Verhalten erklären könnte.

5.4 Steuerschwingungen

Steuerschwingungen werden im Rahmen der Theorie der Regeltechnik beschrieben. Jeder Regelkreis hat eine gewisse Verzögerung. Es kann also vorkommen, daß noch versucht wird, eine Abweichung vom Sollwert zu korrigieren, wenn dieser bereits erreicht oder überschritten wurde. Die Abweichung wird also überkompensiert. Der Vorgang kann sich dann in umgekehrter Richtung wiederholen. Abhängig von Verzögerung und Regelverstärkung kann der Regelkreis auf diese Weise in Schwingungen um den Sollwert geraten.

Solche Regelschwingungen wurden häufig beobachtet. Sie stellten eine erhebliche Beeinträchtigung des Targetbetriebes dar.

Abbildung 5.5 zeigt ein Beispiel. Es wurde eine Rate von 20 MHz mit dem Target außen 2 erzeugt, das zu diesem Zeitpunkt mit einem Titandraht ausgestattet war. Die Rate oszilliert um den Sollwert und weicht dabei um bis zu 30 % von ihm ab. Diese Schwingung ist keineswegs gleichmäßig, sondern schwankt deutlich in ihrer Intensität. Dennoch sind die Bewegungen von Rate und Draht immer korreliert, wobei das Target der Rate vorauseilt. Dieses Verhalten wird bei Steuerschwingungen erwartet.

Eine Ausschnittsvergrößerung des Diagramms zeigt Abbildung 5.6. Die Periode der Schwingung beträgt ungefähr 8 s, mit einer Phasenverschiebung von etwa 1 s zwischen Drahtbewegung und Rate.

5.4.1 Vergleich mit der Rate bei stehendem Target

Es stellt sich die Frage, ob die im letzten Abschnitt besprochenen Oszillationen tatsächlich Steuerschwingungen sind, oder eine andere Ursache haben. Um diese Frage zu klären wurde später im Run 128 die Steuerung ausgeschaltet. Das Ergebnis ist in Abbildung 5.7 zu sehen.

Da die Rate nicht durch die Automatik stabilisiert wird, treten hier große Fluktuationen auf. Das charakteristische Muster der Schwingungen, wie man sie in Abbildung 5.5 erkennt, ist jedoch verschwunden. Daraus folgt der Schluß, daß die Steuerung für diese Schwingungen verantwortlich ist.

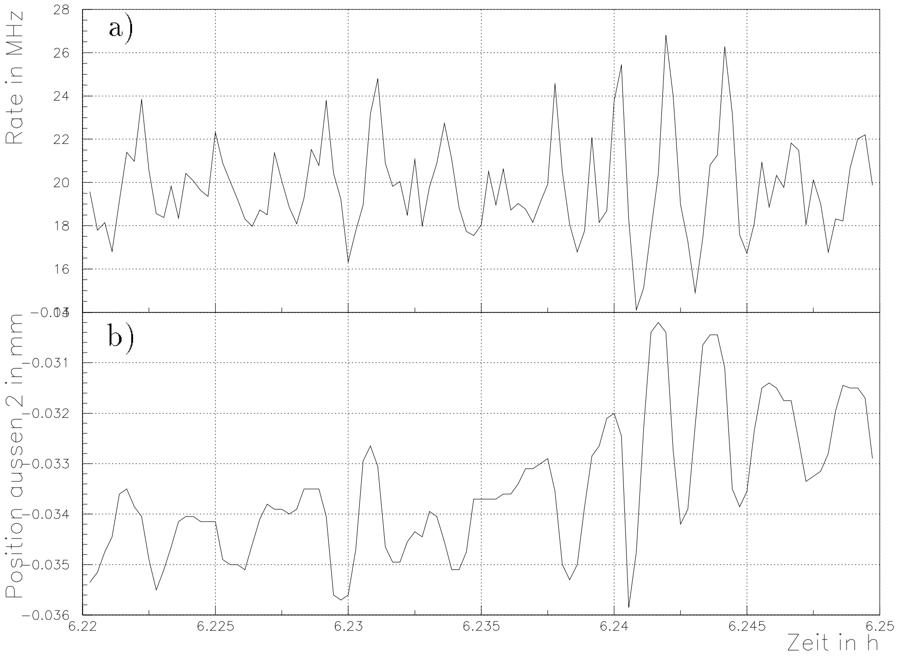


Abbildung 5.5: Steuerschwingungen in Run 128 am 21.10.1997. a) Wechselwirkungsrate, b) Position des Targets außen 2. Die dargestellte Zeit beträgt 108 s.

5.4.2 Lomb-Transformation

Es liegt nahe, die gemessenen Raten und Drahtpositionen einer Spektralanalyse zu unterziehen. Auf diese Weise erhählt man exakte Informationen über vorhandene Schwingungen und deren Frequenzen. Der normalerweise angewandte Algorithmus der Fourieranalyse stößt hier auf Schwierigkeiten, da er äquidistante Datenpunkte voraussetzt. Die aufgezeichneten Daten haben jedoch unregelmäßige Abstände. Deshalb wurde eine Lomb-Transformation eingesetzt, die ebenfalls das Frequenzspektrum der untersuchten Daten liefert, aber mit beliebig verteilten Datenpunkten arbeiten kann [25]. Der in Abbildung 5.5 dargestellte Zeitabschnitt wurde so analysiert.

Es gibt eine deutliche Linie bei 0.13 Hz, die sowohl im Frequenzspektrum der Rate als auch in dem der Targetposition vorhanden ist. Diese Frequenz stimmt gut mit der zuvor aus Abbildung 5.6 erhaltenen Periode von 7–8 s überein.

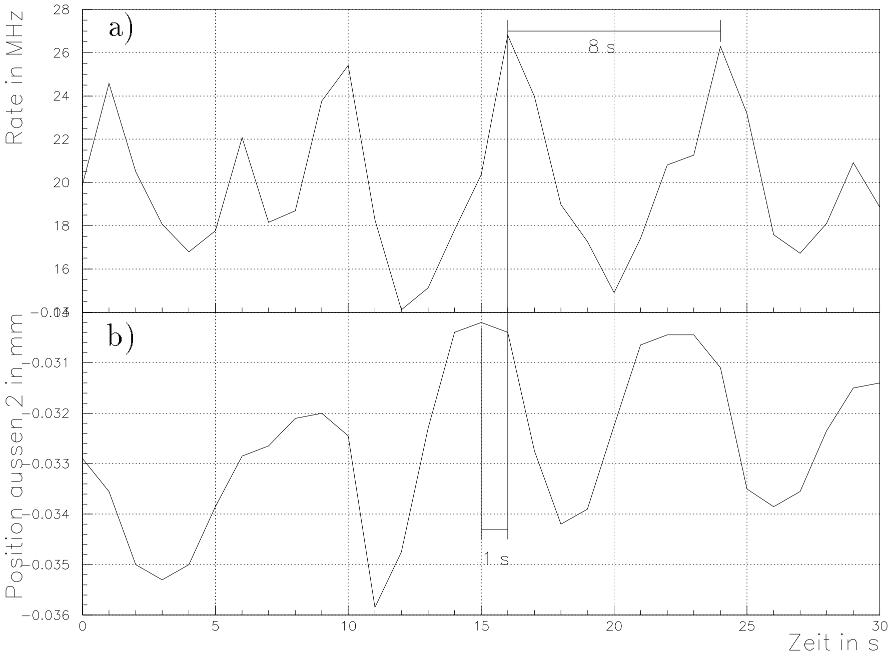


Abbildung 5.6: Vergrößerter Ausschnitt aus Diagramm 5.5. a) Wechselwirkungsrate, b) Position des Targets außen 2. Der dargestellte Zeitraum umfaßt 30 s.

Zum Vergleich wurde die Lomb-Transformation auch für den Betrieb mit ausgeschalteter Steuerung, also für den Zeitraum in Abbildung 5.7 durchgeführt. In Abbildung 5.9 sieht man, daß die Schwingung von 0,13 Hz nicht mehr vorhanden ist. Dies bestätigt die Interpretation von Abbildung 5.7, daß die Oszillationen bei stehendem Target verschwinden. Die Annahme, daß es sich um Steuerschwingungen handelt, wird damit unterstützt. Bei Untersuchungen der Bodenbewegungen in der Experimentierhalle West wurde ein Maximum der Bewegungen bei einer Frequenz von 1/7 Hz gefunden [26]. Dieser Wert stimmt mit der Frequenz der Ratenschwingungen überein. Da diese aber bei ausgeschalteter Steuerung verschwinden, ist nicht anzunehmen, daß die Bodenbewegungen die einzige Ursache für die Schwingungen der Rate sind.

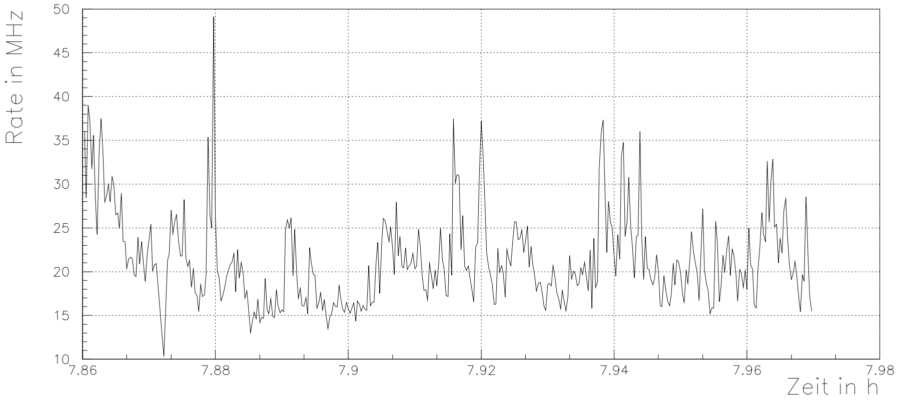


Abbildung 5.7: Die Wechselwirkungsrate in Run 128 zu einer späteren Zeit. Die Targetposition war fest.

5.5 Verteilung der Wechselwirkungsrate.

Die gemessene Rate stellt eine Summation vieler einzelner Wechselwirkungen dar. Wenn diese Wechselwirkungen unabhängig voneinander sind (oder sich Abhängigkeiten nur auf sehr kleine Zeiträume erstrecken), ist die Rate gaußverteilt. Diese Voraussetzungen sind jedoch nicht gegeben, da die Wechselwirkungsrate, beispielsweise in Steuerschwingungen, über längere Zeiträume schwankt. Daher kann die Verteilung der Rate von von einer Gaußverteilung abweichen.

Abbildung 5.10 zeigt beispielhaft die Wechselwirkungsrate dreier Runs über Zeiträume von einigen Minuten. In Abbildung 5.11 sieht man die entsprechenden Verteilungen.

Für diese Histogramme wurden allerdings Daten aus längeren Zeiträumen benutzt. Die drei Beispiele zeichnen sich durch eine sehr unterschiedliche Charakteristik aus. In Run 102 wurde die Sollrate recht genau eingehalten. Die Verteilung der Rate ist hier in guter Näherung gaußförmig. In Run 96 traten dagegen stärkere Fluktuationen auf, die Abweichungen von der Sollrate betragen 20 – 50%. Die Rate ist asymmetrisch verteilt, der Bereich der hohen Raten ist übermäßig ausgedehnt. Dies wird plausibel, wenn man die in Abschnitt 4.4 ermittelte Protondichte in Betracht zieht, die nicht linear sonder exponentiell ansteigt. Abweichungen der Rate nach oben sind also im Durchschnitt größer. Run 74 wurde bereits in Abschnitt 5.3 besprochen. In Abständen treten Ratenfluktuationen nach oben und unten auf. In der

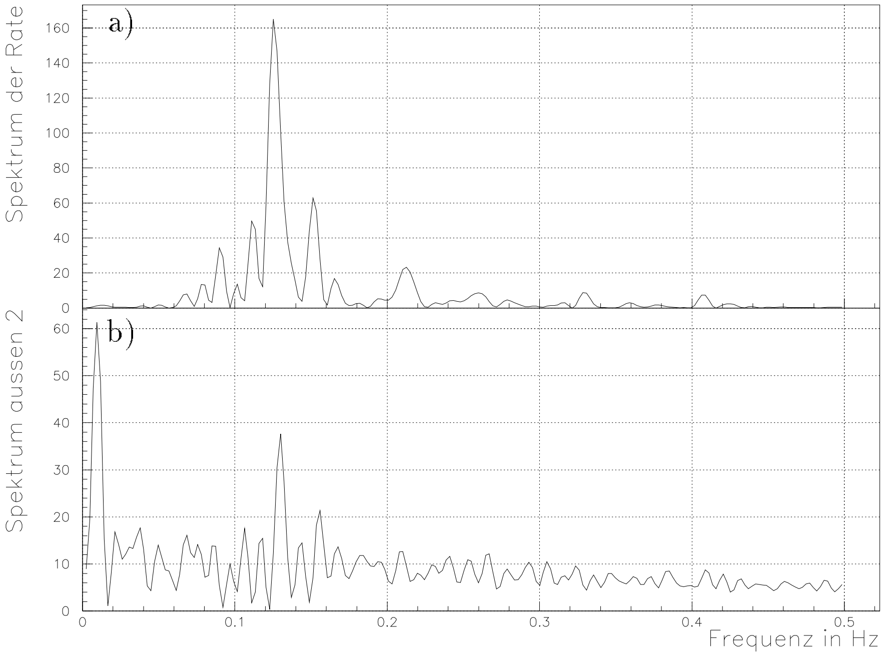


Abbildung 5.8: a) Frequenzspektrum der Wechselwirkungsrate in Run 128, b) Frequenzspektrum der Drahtposition. Es handelt sich um die Ergebnisse von Lomb-Transformationen, die auf die Kurven in Abbildung 5.5 angewendet wurden.

Ratenverteilung spiegelt sich dieses Verhalten wider. Es gibt eine zentrale gaußförmige Häufung, die durch die Bereiche mit stabiler Rate zustande kommt. Die Beiträge der Fluktuationen ergeben eine breitere überlagerte Verteilung.

Es treten also Abweichungen von der idealen Gaußverteilung auf. Diese sind besonders ausgeprägt, wenn die Rate stark schwankt oder ein ungewöhnliches Verhalten aufweist. Hingegen zeigt der "gute" Run, in dem Sinne, daß die Rate stabil ist, auch eine annähernd gaußförmige Verteilung.

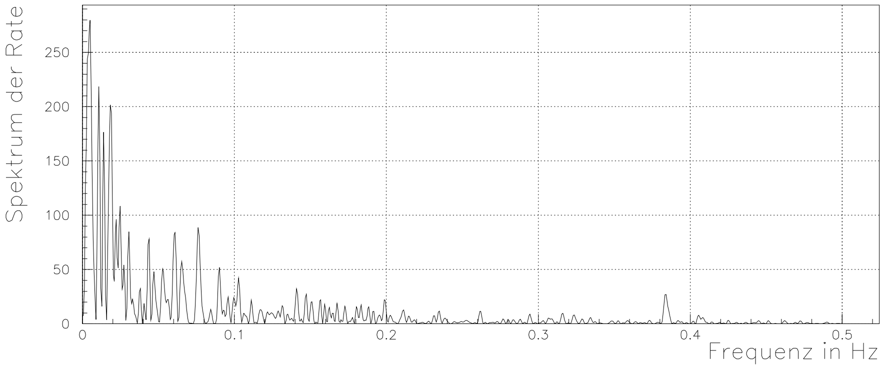


Abbildung 5.9: Das Frequenzspektrum der Rate bei angehaltenem Target. Der untersuchte Zeitraum ist in Abbildung 5.7 dargestellt.

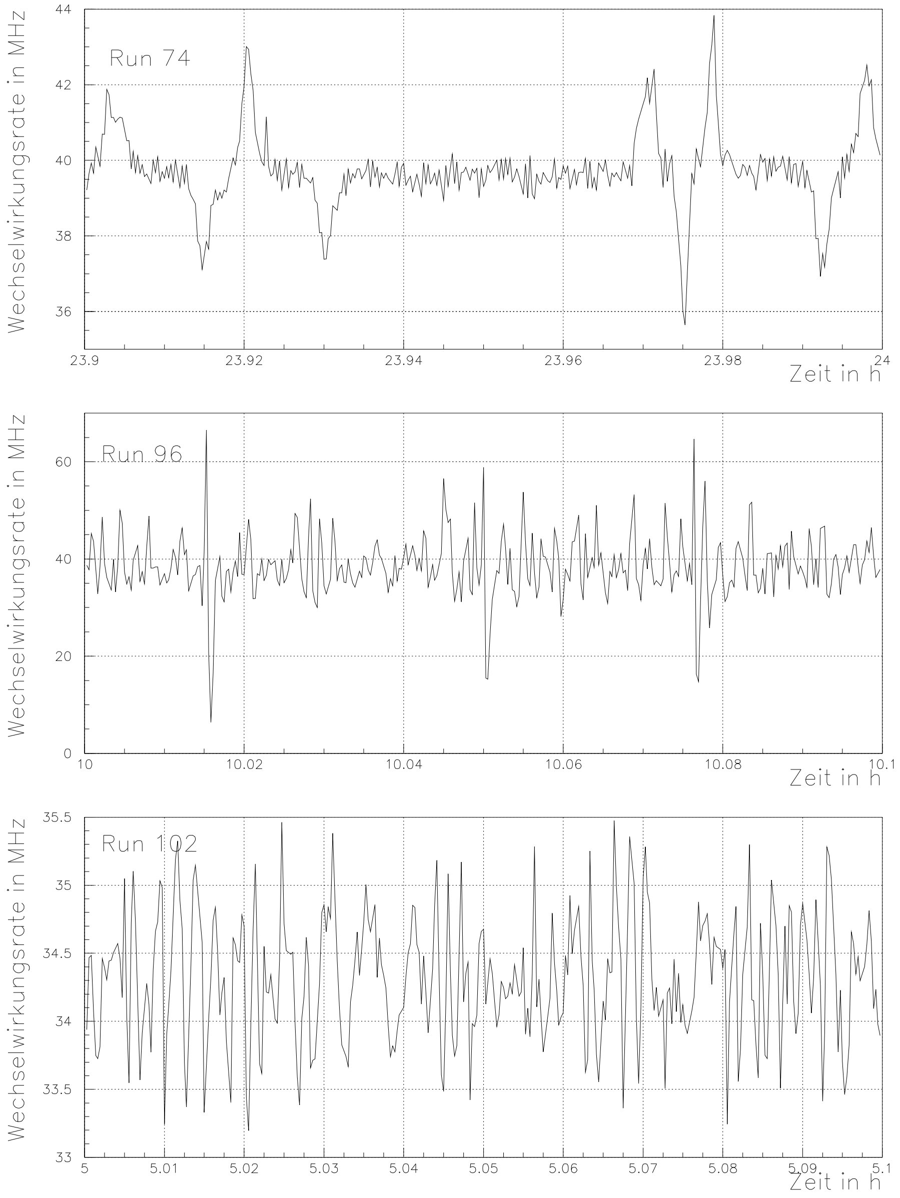
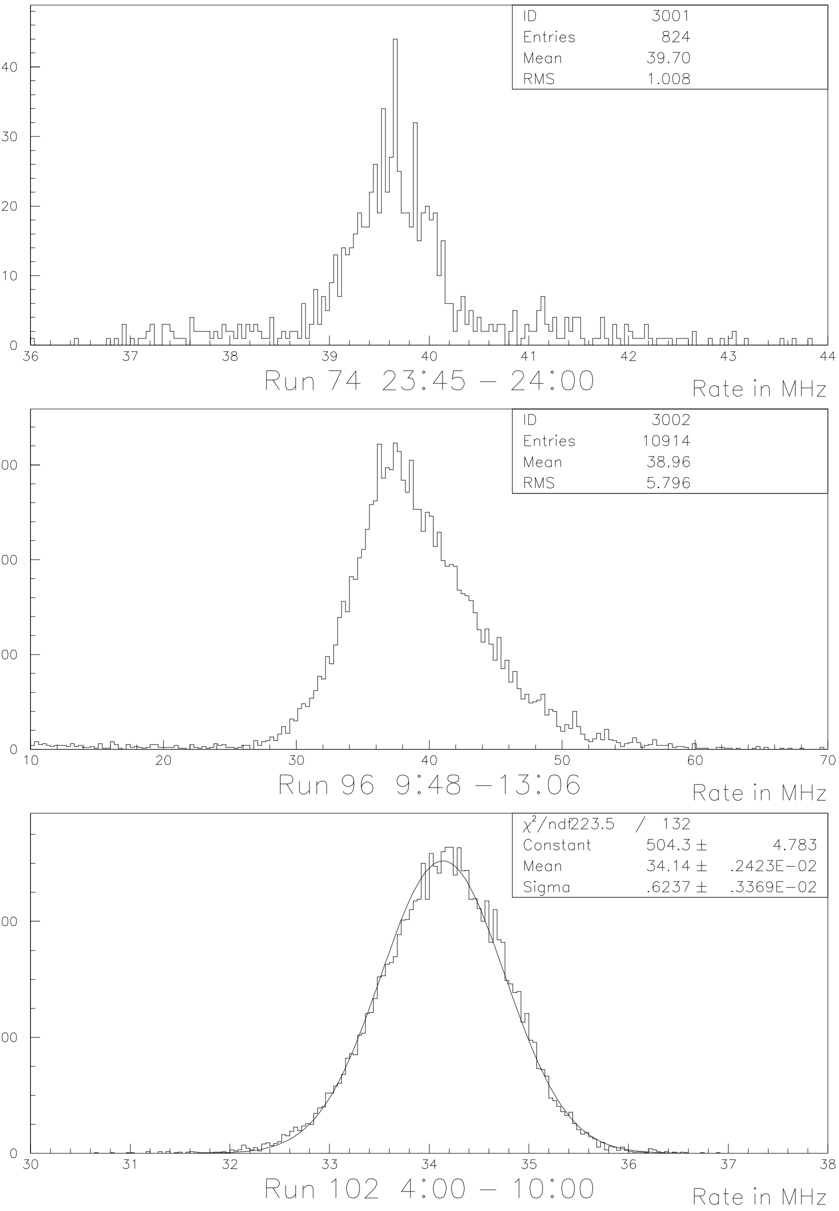


Abbildung 5.10: Beispiele für die Wechselwirkungsrate im Verlauf der Zeit für drei verschiedene Runs.



Run 74 23:45 – 24:00

Run 96 9:48 –13:06

Run 102 4:00 – 10:00

Abbildung 5.11: Verteilung der Wechselwirkungsrate mit. Die Runs entsprechen denen in Abbildung 5.10, jedoch wurden längere Zeitabschnitte ausgewertet. An die Daten des dritten Diagramms wurde eine Gaußkurve angepaßt.

Kapitel 6

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde das Verhalten des HERA-B -Drahttargets, seine Wechselwirkung mit dem HERA-Protonenstrahl und die Qualität des Targetbetriebes untersucht. Die Erfahrung der Meßperiode 1997 hat gezeigt, daß ein nahezu kontinuierlicher Betrieb des Targets zuverlässig möglich ist. Dabei wurden hohe Raten über längere Zeiträume aufrechterhalten. Durch ein neues Verfahren beim Beginn der Runs wurde die zur Verfügung stehende Meßzeit erheblich erhöht. Die Untergrundraten der anderen Experimente am HERA Speicherring blieben dabei unterhalb kritischer Werte.

Die Strahlposition verändert sich während eines Runs, was starke Auswirkungen auf die Rate haben kann. Es wurden Sprünge bis zu 100 μm innerhalb einer Zeit weniger als einer Sekunde beobachtet, die zu einer Ratenerhöhung auf über 80 MHz führten. Diese Vorgänge können eine Gefahr für den Strahl und den Detektor darstellen.

Die Untersuchungen der Sprungantwort haben gezeigt, daß die Veränderung der Rate nicht proprtional zur Targetbewegung ist. Stattdessen wird der Zusammenhang zwischen Rate und Drahtposition gut durch eine Exponentialfunktion beschrieben. Die Anstiegslänge beträgt zwischen 7,5 μm und 22,7 μm. Das bedeutet, daß sich die Rate bei einer Drahtbewegung von 10 μm um einen Faktor zwischen 1,5 und 3,8 ändert. Diese Ergebnisse müssen bei der weiteren Entwicklung der Targetsteuerung berücksichtigt werden. Der steile Abfall der Rate und ihr Absinken auf nahezu Null beim Herausfahren des Drahtes um 20–50 μm bestätigen das Scraping-Modell. Bei den Analysen der Sprungantwort sind Hinweise für das Vorhandensein eines Spindelspiels zwischen 3 und 5 μm bei einem der Targets aufgetreten.

In der Meßperiode 1997 waren Instabilitäten der Wechselwirkungsrate ein großes Problem. Abweichungen von der Sollrate tendieren dazu, mit dem

Alter der Protonenfüllung zuzunehmen. Es können Ratenfluktuationen um bis zu 100 % auftreten. Dabei wird oft eine Schwelle überschritten, bei deren Erreichen das Target aus Sicherheitsgründen 20 μm aus dem Strahl bewegt wird, was zu einem starken Absinken der Rate führt. Das Kohlenstofftarget außen 2 zeigte häufig ein Verhalten, bei dem die Rate abwechselnd nach oben und nach unten vom Sollwert abwich. Später in der Meßperiode, etwa ab August, verschwand dieser Effekt. Das Target außen 2 produzierte dann die stabilste Rate. Vermutlich hängt dies mit der Geometrie des Drahtes zusammen, da ein zweites Kohlenstofftarget mit einer kompakteren Form eine Ratentabilität aufweist, die mit den anderen, metallischen Targets vergleichbar ist. Die Targetautomatik gerät oft in Steuerschwingungen mit einer Periode um 8 s, bei denen die Wechselwirkungsrate um bis zu 30 % vom Sollwert abweicht. Diese stellen eine Quelle für Ratenfluktuationen dar. Daher muß das Steuerungsprogramm so modifiziert werden, daß das Auftreten von Steuerschwingungen verhindert wird.

Literaturverzeichnis

[1] J. H. Christenson et al.:
Phys. Rev. Lett. **13** *(1964)*, S. 138

[2] L. Wolfenstein:
Phys. Rev. Lett. **13** *(1964)*, S. 562ff.

[3] F. Halzen, A Martin:
Quarks & Leptons: An Introductory Course in Modern Particle Physics,
John Wiley & Sons, 1984

[4] H. Albrecht et al.:
An Experiment to study CP-Viaolation in the B System Using an Internal Target at the HERA Proton Ring, Letter of Intent,
DESY PRC 92/04, Oktober 1992

[5] Babar Collaboration: *Technical Design Report*,
März 1995

[6] BELLE Collaboration:
A Study of CP Violation in B Meson Decays,
Technical Design Report, März 1995

[7] HERA-B Collaboration
HERA-B —An Experiment to study CP Violation in the B System Using an Internal Target at the HERA Proton Ring,
Proposal, DESY-PRC 94/02, Mai 1994

[8] S. Spratte:
Untersuchung zu den Eigenschaften eines internen Drahttargets für das HERA-B Experiment,
Diplomarbeit, März 1996

[9] DESY,
Wissenschaftlicher Jahresbericht 1996, Juni 1997

[10] HERA-B Collaboration
HERA-B —An Experiment to study CP Violation in the B System Using an Internal Target at the HERA Proton Ring,
Design Report, DESY-PRC 95/01, Januar 1995

[11] S. Issever, *private Mitteilung*

[12] F. Benotto et al.:
The LPS Trigger System,
DESY 96-045, 1996

[13] http://www-mpy.desy.de/desy-acc.html
WWW-Seite der HERA Maschinengruppe

[14] http://ftp.desy.de/pub/herab/html/target/target_97/target_97.html
HERA-B Target 1997

[15] Selim Issever:
TaCoS — a closer look at target side,
Vortrag, Target Group Meeting, Kiev, August 1997

[16] Selim Issever:
TaCoS,
Vortrag, Target Group Meeting, Dortmund, Dezember 1997

[17] M.Bräuer:
Target-Interactions 1997
http://pluto.mpi-hd.mpg.de/ herab/interaction97.html
Dezember 1997

[18] M. Bräuer:
Aufbau und Untersuchung der Eigenschaften des Targets für den HERA-B -Detektor,
Diplomarbeit, April 1997

[19] K. Kleinknecht:
Detektoren für Teichenstrahlung,
Teubner, 1987

[20] M. Seidel:
Study of Background caused by Scattering at the HERA-B Wire Target,
DESY HERA 95-04, 1995

[21] S. Spratte
Doktorarbeit, in Vorbereitung

[22] M. Seidel:
HERA-B Interaction Rate versus Luminosity at ZEUS and H1,
Dezember 1995

[23] J. Rieling:
Studium eines Fadentargets im Protonstrahl des HERA-Ringes,
Diplomarbeit, 1994

[24] K. Wille:
Physik der Teilchenbeschleuniger und Synchrotronstrahlungsquellen,
Teubner, 1992

[25] W. Press, S.Teukolsky, W. Vetterling, B. Flannery:
Numerical Recipes in C
Cambridge University Press, 1992

[26] C. Montag:
Active Stabilization of Mechanical Quadrupole Vibrations in a Linear Collider Test Facility,
DESY 97-030, Februar 1997

Danksagung

In erster Linie möchte ich Herrn Prof. Dr. D. Wegener danken, der mir diese interessante Diplomarbeit in Hamburg ermöglicht hat. Sein Interesse für die Arbeit seiner Studenten war ein ständiger Ansporn und für das Gelingen dieser Arbeit von großem Wert. Ich danke auch für die vielen Dinge, die ich von ihm — auch schon vor meiner Diplomarbeit — über Physik, Wissenschaft und andere Themen gelernt habe.

Bei Herrn Prof. Dr. P. Buchholz bedanke ich mich dafür, daß er meine Arbeit als Zweitgutachter gelesen hat, obgleich ich ihn sehr kurzfristig darum gebeten habe.

Klaus Ehret und Carsten Hast danke ich für die gute Betreuung in meiner Diplomarbeit. Sie haben mich stets unterstützt und hatten immer Zeit für meine Fragen und Probleme.

Meine Zimmerkollegen Stefan Spratte und Selim Issever spielten eine große Rolle für das Zustandekommen dieser Arbeit. Sie waren die ersten Ansprechpartner für alle aufkommenden Fragen, die sie mir geduldig beantwortet haben. Dafür gebührt ihnen mein Dank.

Stefan, Klaus und Selim haben auch das Korrekturlesen meiner Diplomarbeit übernommen, und waren eine unschätzbare Hilfe beim Schreiben der Arbeit. Dafür möchte ich mich bedanken.

Ich danke auch alle anderen Mitglieder der Targetgruppe: Volodymyz Aushev, Michael Funcke, Torsten Jagla, Valery Pugatch, Sven Schaller und Michael Symalla für die gute Zusammenarbeit und das hervorragende Klima in unserem Team.

Darüber hinaus geht ein mein Dank an die Bewohner des Gebäudes 66. Sie trugen zur guten Stimmung bei, und waren im stets hilfsbereit, was mir besonders bei meinen Problemen mit den Rechnern sehr geholfen hat.

Ich danke auch unserem Techniker Matthias Grewe, der zu eine großem Maße dazu beiträgt, daß wir funktionierende Targets besitzen, und der immer gute Laune verbreitet, wenn er uns in Hamburg besucht.

Mein Dank gilt allen, die die Durchführung der Messungen möglicht

gemacht haben. Dazu zählen die Schichtbesatzungen und die HERA Maschinengruppe. Diese hat sich immer bereit gezeigt, mit uns zu kooperieren, und hat uns reichlich mit Protonen versorgt.

Mein Dank auch an alle Mitarbeiter bei DESY und am Lehrstuhl, mit denen ich zwar nur selten Kontakt hatte, die aber durch ihre Arbeit das Experiment und die Diplomarbeit erst möglich machen.

Cigdem Issever hat meine Arbeit durchgesehen und hat einige meiner Fehler korrigiert. Dafür danke ich ihr.

Meine Eltern haben mich während meiner Diplomarbeit auf vielfältige Weise unterstützt. Daher gilt mein Dank auch ihnen.

Mit Sicherheit gibt es noch viele, die ich hier noch nicht aufgezählt habe, die aber auf irgendeine Weise zu meiner Diplomarbeit beigetragen haben. Darum ein pauschaler Dank an alle, die ich hier vergessen habe, die aber einen gewissen Anteil, und sei er noch so klein, am Zustandekommen meiner Diplomarbeit hatten.

Diese Arbeit wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung, Forschung, Wissenschaft und Technologie unter der Vertragsnummer 054DO51P gefördert.