Untersuchungen zur Strahllebensdauer bei HERA-e

Markus Hoffmann

Contribution to the Workshop on HERA Performance
Salzau, Germany, May 2003
DESY HERA 03-11

17. Oktober 2003

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**

2 Die Lebensdauer bei HERA-e **1**

3 Abschätzung der theoretischen Lebensdauer **3**
3.1 Streuung am Restgas 4
3.2 Weitere Lebensdauerbeiträge 8

4 Ergebnisse und Vergleich **8**

5 Suche nach unbekannten Lebensdauerbeiträgen **10**

6 Fazit **14**

Literaturverzeichnis **16**

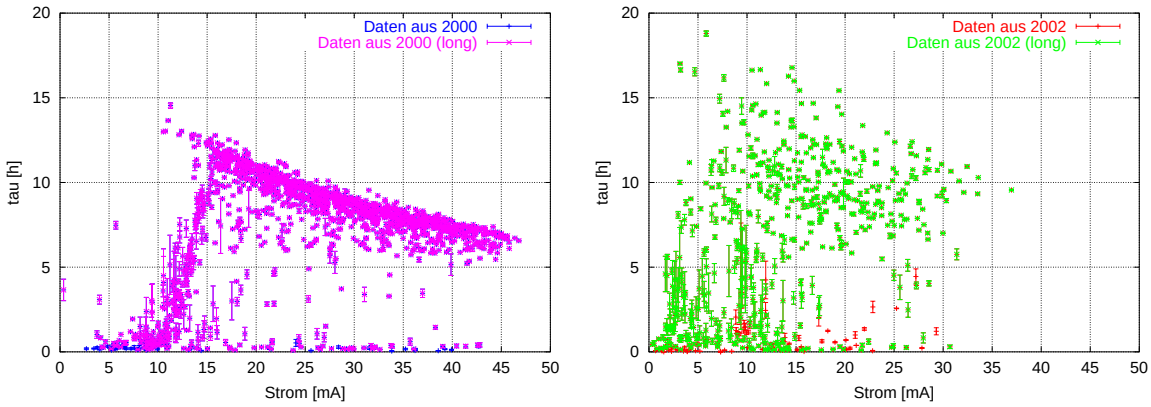

Abbildung 1: Positronenlebensdauer in Abhängigkeit vom Positronenstrom in den Perioden aus den Jahren 2000 und 2002 im Vergleich.

1 Einleitung

In diesem Bericht sollen die Beobachtungen der Lebensdauer bei HERA-e in den Jahren 2000 und 2002/2003 diskutiert werden[1]. Es soll diskutiert werden, ob die Lebensdauer, wie sie gemessen wird, den Erwartungen entspricht, oder ob sie vielleicht größer sein müßte.

In Kapitel 2 werden die Messungen der Lebensdauer und der Verlauf über die beiden Zeitperioden dargestellt. Außerdem wird der Zusammenhang zum in den Bögen gemessenen Druck analysiert.

In Kapitel 3 wird versucht, die theoretisch zu erreichende Lebensdauer aus einigen Beschleunigerparametern abzuschätzen. Die verschiedenen Beiträge der Strahl-Gasmolekülwechselwirkungen werden dabei unterschieden.

Schließlich werden die Resultate miteinander verglichen, um Abweichungen zu diskutieren und mögliche unbekannte Lebensdauerbeiträge zu identifizieren.

2 Die Lebensdauer bei HERA-e

Nach dem Injizieren von Positronenstrahlstrom in die Maschine nimmt der Strahlstrom kontinuierlich mit einem typischen Zeitverlauf ab. Abgesehen von plötzlichen Strahlverlusten ist die Strahlverlustrate proportional zum vorhandenen Strahlstrom und die Stromabnahme sollte daher in etwa exponentiell erfolgen. Bei Teilchensorten, welche Synchrotronlicht abstrahlen, ist dies aber nicht ganz der Fall: Man beobachtet, daß der Strom langsamer als exponentiell abnimmt, bzw. die Strahllebensdauer, welche aus einem Exponentialfit an den Stromverlauf berechnet werden kann, nimmt mit der Zeit bzw. mit abnehmendem Strom zu (siehe Abb. 1)[2].

Abb. 1 links zeigt neben diesem Verlauf auch sehr deutlich den Beitrag des Gastargets des

[1] Die Lebensdauer beim Protonenbeschleuniger HERA-p wurde bereits ausführlich in [1] diskutiert.

[2] Die hier präsentierten Daten sind dem HERA-Archiv entnommen. Die Lebensdauer wurde bestimmt, indem alle Runs mit Positronen, welche länger als 1.5 Stunden dauerten, in Abschnitte von ca. 1 h unterteilt wurden. An den gemessenen Verlauf des Stroms wurde dann eine Exponentialfunktion angepaßt, aus deren Zeitkonstante die Lebensdauer gewonnen wurde. Die Fehlerbalken geben die Güte des Fits an. In Zeitabschnitten mit plötzlichen Strahlverlusten ist der Fit weniger gut, was sich durch größere Fehlerbalken äußert.

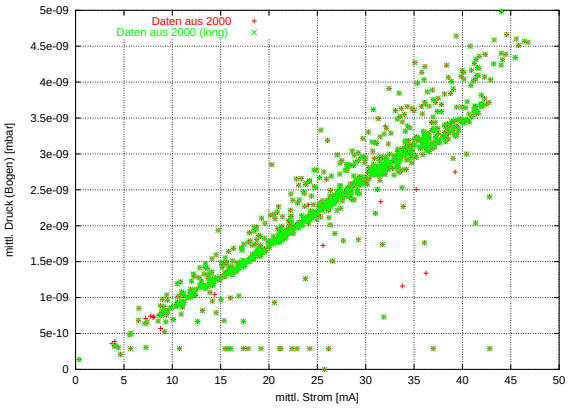

Abbildung 2: Abhängigkeit des Drucks, der an einer Ionen-Getter-Pumpe im Bogen von HERA-e gemessen wurde, vom Strahlstrom.

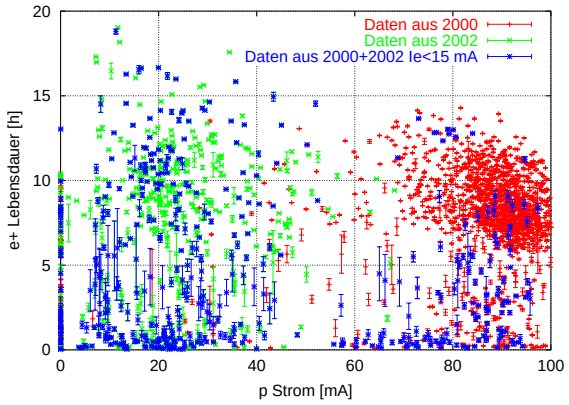

Abbildung 3: Positronenlebensdauer in Abhängigkeit vom Protonenstrom unter Kollisionen.

Experiments HERMES zur Gesamtlebensdauer im Bereich $I < 15$ mA: In Absprache mit den anderen Experimenten gab es für HERMES das sogenannte *end-of-fill running*, im Jahr 2000 ab 15 mA für eine Stunde. Da wurden große Gastargetdichten verwendet, so daß die Strahllebensdauer auf bis zu 1 h und teilweise auch noch weniger abnahm. Die Punkte mit kleiner Lebensdauer finden sich deshalb auch in den Abbildungen 3 und 4.

Die Abhängigkeit der Lebensdauer vom Strom ist ansonsten aber ganz charakteristisch und im Wesentlichen bei jedem Run dieselbe (sofern sich die Bedingungen im Beschleuniger nicht ändern). Dies liegt in erster Linie daran, daß die Hauptprozesse, welche zum Teilchenverlust führen, Streuprozesse an den Restgasmolekülen sind, und der Druck in der Vakuumkammer sich während des Runs ändert. Die Desorption von Gas in das Vakuum hinein ist nämlich (bei Elektronen- oder Positronenbeschleunigern) von der Desorption aus der Vakuumkammerwand unter Bestrahlung mit Synchrotronlicht dominiert. Man findet nämlich, daß der Druck in solchen Bereichen (z.B. den Bögen des Beschleunigers) linear mit dem Strahlstrom anwächst (siehe Abb. 2). Da die Strahlverlustprozesse von der Gasdichte in der Vakuumkammer abhängen, nimmt entsprechend auch die Strahlverlustrate zu, und die Lebensdauer sinkt entsprechend. Mit kleiner werdendem Strahlstrom wird weniger Gas aus der Kammerwand desorbiert, der Druck wird besser und die Lebensdauer daher größer. Dies erklärt den beobachteten Verlauf.

Es findet sich auch eine sehr leichte Abhängigkeit der Positronenstrahllebensdauer vom Protonenstrom unter Luminositätsbedingungen (beide Strahlen kollidieren) (siehe Abb. 3). Dies kann aber nicht auf den erhöhten Teilchenverlust bei hoher Luminosität zurückgeführt werden, denn der Beitrag zur Lebensdauer aufgrund von durch Kollisionen verursachten Teilchenverluste bei einer Luminosität von $L = 2 \cdot 10^{31}$ cm^{-2}s^{-1} ist lediglich $\tau_{\mathrm{lumi}} \approx 10000$ h (s.u.).

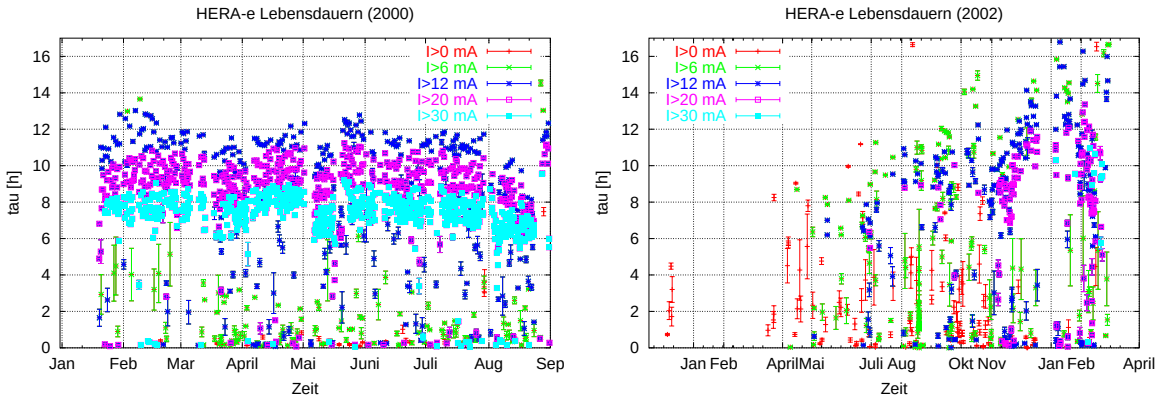

Abbildung 4: Positronenlebensdauer im Verlaufe der Run-Perioden in den Jahren 2000 und 2002 aufgeschlüsselt nach verschiedenen Strombereichen.

Außerdem werden in Abb. 3 Daten aus zwei sehr verschiedenen Run-Perioden dargestellt, und die Daten bei hohen Strömen stammen ausschließlich aus dem Jahr 2000, so daß die scheinbar leicht höhere Lebensdauer bei kleineren Strömen andere Ursachen haben wird.

HERA-e Lebensdauer in den Jahren 2000 und 2002

Vergleicht man die Entwicklung der erreichbaren Strahllebensdauern in typischen Runs im Verlaufe der Jahre 2000 und 2002 (Abb. 4), so erkennt man eine relativ konstante Entwicklung im Jahr 2000, wo nur gegen Ende des Jahres die Lebensdauern kleiner geworden sind (dies korreliert mit schlechterem Druck im Vakuumabschnitt Nord im August 2000, siehe Abb. 10). Im Jahr 2002 konnte kein war ein Betrieb der HERA-Anlage unter Routinebedingungen noch nicht erreicht, und wegen der Untergrundprobleme der Experimente wurden zunächst erheblich kleinere Ströme gefüllt. Erst gegen Ende der Run-Periode konnten wieder Ströme von mehr als 30 mA erreicht werden, mit vergleichbarer oder sogar leicht größerer Lebensdauer als im Jahr 2000. Diese Tatsache ist auch in Abb. 1 im Vergleich der Daten von 2000 und 2002 zu sehen: Bei vielen Runs wurden tendenziell höhere Lebensdauern (auch bei vergleichbaren Strömen) erreicht.

Es könnte bedeuten, daß die Verbesserung des Drucks in den beiden Wechselwirkungszonen bei H1 und ZEUS einen kleinen (positiven) Einfluß auf die Gesamtlebensdauer gehabt hat. Allerdings konnte der evtl. unterschiedliche Einfluß von HERMES für die Zeiten nicht mehr zuverlässig rekonstruiert werden. Und die Gastargetdichte dieses Experiments hat einen erheblichen und deutlich sichtbaren Einfluß auf die Gesamtlebensdauer (s.u.).

Die Zusammenhänge mit der Druckentwicklung in HERA-e sollen im Folgenden noch näher untersucht werden.

3 Abschätzung der theoretischen Lebensdauer

Die Strahllebensdauer in Kreisbeschleunigern hängt von verschiedenen Effekten ab. Grob kann man die Effekte unterteilen in natürliche Lebensdauer aufgrund der Aperturbegrenzung, Restgasstreuung sowie Intra-Beam-Scattering und Touschek-Effekt. Durch die Streuprozesse verlas-

sen die betroffenen Teilchen die Akzeptanz des Beschleunigers und gehen schließlich verloren. Die Strahlverluste können mit geeigneten Detektoren außerhalb des Strahlrohrs nachgewiesen und über die Abnahme des Strahlstroms gemessen werden.

Im Einzelnen sind die Verlustprozesse:

1. Natürliche Lebensdauer aufgrund der physikalischen Apperturbegrenzungen
2. Lebensdauer aufgrund von dynamischen Aperturbegrenzungen, Resonanzen und Rauschen bei der Betatron- und Synchrotronbewegung
3. Streuung am Restgas:
   a) Elastische Streuung der Elektronen am Kern der Restgasatome
   b) Inelastische Streuung der Elektronen am Kern der Restgasatome
   c) Elastische Streuung an Hüllen-Elektronen der Restgasatome
   d) Inelastische Streuung an Hüllen-Elektronen der Restgasatome
4. Intra-Beam-Wechselwirkungen und Touschek Effekt
5. Bei Collidern: Beam-Beam-Wechselwirkungen
6. Instabilitäten durch Ioneneinfang, Staubpartikel etc.

Diese Beiträge sollen nun — soweit möglich — für HERA-e abgeschätzt werden. Hierbei sind die Lebensdauerbeiträge durch die **natürliche Lebensdauer** aufgrund von Aperturbegrenzungen bei optimiertem Strahlbetrieb nicht relevant, soweit optische Resonanzen vermieden werden. Es kann allerdings durchaus relevant werden, insbesondere beim sogenannten Polarisationsarbeitspunkt (Tune Step 4) scheinen Synchrotron-Betatron-Resonanzen den stabilen Bereich durch eine zu **kleine dynamische Apertur** stark einzuschränken. Dieses Phänomen wurde in [7, 8] untersucht.

Intra-Beam-Wechselwirkungen und Touschek Effekt sind stark energieanhängig uns sollten bei 27.5 GeV bei HERA-e nicht relevant sein. Diese Effekte sollen deshalb in dieser Studie nicht untersucht werden. **Instabilitäten durch Ioneneinfang, Staubpartikel etc.** wurden beim Betrieb mit Positronen bei HERA bislang noch nicht beobachtet und werden deshalb ebenfalls nicht betrachtet.

3.1 Streuung am Restgas

Die Lebensdauern, die sich aus den einzelnen Beiträgen der verschiedenen Streuprozesse an Restgasmolekülen ergeben, wurden in Anlehnung an [2] berechnet. Es zeigt sich, daß bei HERA-e die Wechselwirkungen mit dem Restgas dominieren sollten. Hier gibt es vier Prozesse, die wegen ihrer unterschiedlichen Energieabhängigkeiten unterschieden werden:

Elastische Streuung an den Atomkernen

$$\tau_k = \frac{\gamma^2}{2\pi r_e^2 Z^2 c n}\left(\frac{\langle\beta_x\rangle\beta_{x,0}}{A_x^2}+\frac{\langle\beta_z\rangle\beta_{z,0}}{A_z^2}\right)^{-1} = 2.2{\cdot}10^3\mathrm{h}\frac{(E/\mathrm{MeV})^2}{Z^2(p/\mathrm{nTorr})n_z}\left(\frac{\langle\beta_x\rangle\beta_{x,0}}{A_x^2}+\frac{\langle\beta_z\rangle\beta_{z,0}}{A_z^2}\right)^{-1}$$

Bei diesem Prozess treffen leichte Teilchen auf schwere, so daß der Impulsübertrag unerheblich ist. Die leichten Teichen werden aber gestreut und stark abgelenkt, so daß sie die transversale Akzeptanz des Beschleunigers verlassen können.

Elastische Streuung an den Elektronen des Restgases

$$\tau_{ee} = \frac{\gamma\varepsilon_{\mathrm{HF}}}{2\pi r_e^2 Z c n} = 1130\mathrm{h}\frac{(E/\mathrm{MeV})\varepsilon_{\mathrm{HF}}}{Z(p/\mathrm{nTorr})n_z}$$

Hier wechselwirken gleichschwere Teichen miteinander. Der Impulsübertrag kann erheblich sein. Verglichen mit der transversalen Akzeptanz des Beschleunigers ist die longitudinale (Energie-) Akzeptanz winzig[1]. Die Lebensdauer wird daher praktisch nur von der Energieakzeptanz bestimmt

Inelastische Streuung an den Atomkernen (Bremsstrahlung)

$$\begin{aligned}\tau_b &= \frac{411}{16 r_e^2 Z^2}\left(3.22\cdot 10^{13}\frac{p}{\mathrm{nTorr}} c n_z \ln\frac{183}{Z^{1/3}}\left(\ln\frac{1}{\varepsilon_{\mathrm{HF}}}-\frac{5}{8}\right)\right)^{-1}\\ &= 9.3\cdot 10^4\mathrm{h}\left(Z^2(p/\mathrm{nTorr})n_z \ln\frac{183}{Z^{1/3}}\left(\ln\frac{1}{\varepsilon_{\mathrm{HF}}}-\frac{5}{8}\right)\right)^{-1}\end{aligned}$$

Inelastische Streuung an den Elektronen des Restgases

$$\begin{aligned}\tau_{ie} &= \frac{411}{16 r_e^2 Z^2 c n}\left(\left(\ln\frac{2.5\gamma}{\varepsilon_{\mathrm{HF}}}-1.4\right)\left(\ln\frac{1}{\varepsilon_{\mathrm{HF}}}-\frac{5}{8}\right)\right)^{-1}\\ &= \frac{9.29\cdot 10^4\mathrm{h}}{Z(p/\mathrm{nTorr})n_z}\left(\left(\ln\frac{2.5\gamma}{\varepsilon_{\mathrm{HF}}}-1.4\right)\left(\ln\frac{1}{\varepsilon_{\mathrm{HF}}}-\frac{5}{8}\right)\right)^{-1}\end{aligned}$$

Die Anhängigkeit der Lebensdauer bei allen vier Prozessen vom mittleren Druck ist $\tau \sim 1/p$.

Die verwendeten Größen sind in der folgenden Tabelle zusammen mit typischen Zahlenwerten für HERA-e aufgelistet. Leider sind die meisten Größen nur ungenau bekannt.

Z	=	5	mittl. Kernladungszahl der Restgasatome
r_e			klassischer Elektronenradius
$\langle\beta_{x,z}\rangle$	=	25 m,27 m	mittlere horizontale / vertikale Betafunktion
$A_{x,z}$	=	10 mm	minimale horizontale bzw. vertikale Apertur
$\varepsilon_{\mathrm{HF}}$	$\approx$	$9.6\cdot 10^{-3}$	Energieakzeptanz
$\beta_{x,0}, \beta_{z,0}$	=	25 m,27 m	horizontale bzw. vertikale Betafunktion am Minimum der transvers. Akzeptanz $\varepsilon_{\mathrm{x,z}} = A^2_{\mathrm{x,z}}/\beta$ (geschätzt)
n			Teilchendichte der Restgasmoleküle
n_z	=	2	Anzahl der Atome pro Restgasmolekül
p	=	$5\cdot 10^{-9}$mbar	mittlerer Restgasdruck

Unsicherheiten bestehen hauptsächlich bei der Gaszusammensetzung des Restgases, der Bestimmung des mittleren Drucks (aus den Meßwerten bei den Ionen-Getter-Pumpen), sowie über das tatsächliche Minimum der Akzeptanz. Dies ist dann von Bedeutung, wenn die Teilchen nicht gleichmäßig über den Ring verteilt verloren gehen. (Möglicherweise könnte hier ein Experiment helfen, bei dem mit einem beweglichen Kollimator eine definierte Akzeptanzbeschränkung erzeugt wird. Die tatsächliche Akzeptanz des Beschleunigers kann so vermessen werden.)

[1] Durch den relativistischen Effekt führt ein Impulsübertrag Δp in der longitudinalen Richtung zu einem erhebliche Energieunterschied von $\Delta E = \gamma\Delta p$

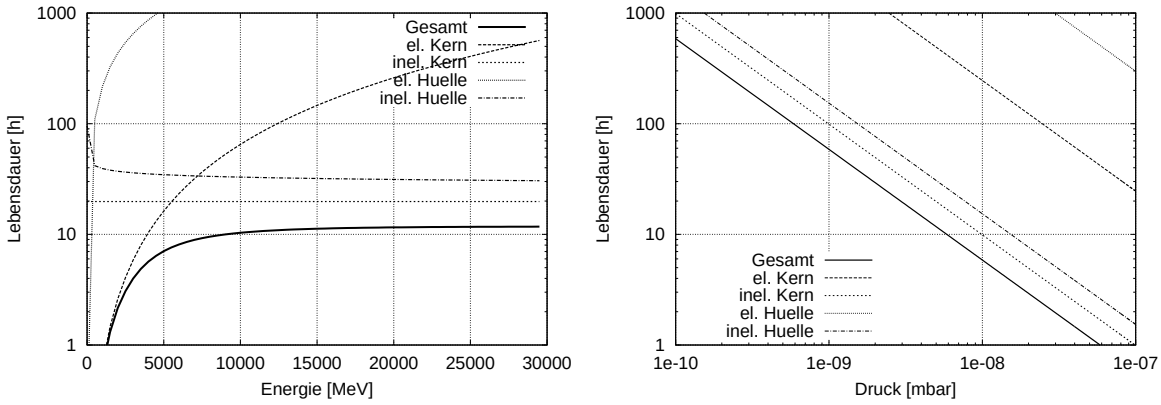

Abbildung 5: Energie- und Druckabhängigkeit der vier Lebensdauerbeiträge bei HERA-e.

Druck- und Energieabhängigkeit: Die mit Hilfe der Schätzwerte[1] aus der Tabelle berechneten Lebensdauerbeiträge für HERA-e der einzelnen Prozesse und die resultierende Gesamtlebensdauer sowie deren Energie- und Druckabhängigkeiten sind in Abb. 5 dargestellt. Die Energieabhängigkeit ist für alle Prozesse zwischen 12 GeV und 27.5 GeV nur schwach. Die bei diesen Energien dominierenden Prozesse sind die inelastischen Wechselwirkungen. In [3] wird deshalb eine Faustformel für die Lebensdauer aufgrund von inelastischer Streuung am Restgas entwickelt:

$$\tau_b = \left(-\frac{4}{3}\frac{c}{L_r} \ln \varepsilon_{\mathrm{HF}} \right)^{-1} \quad .$$

Hierbei ist L_r die *Strahlungslänge*, definiert als die Strecke, auf der die Energie des Teilchens beim Durchgang durch ein Medium (hier Restgas) auf $1/e$ abgenommen hat.

Für hochrelativistische Teilchen ist diese Strahlungslänge gegeben durch:

$$L_r = \frac{1}{r_e^2 Z^2 \alpha n} \left(4 \ln \frac{183}{Z^{1/3}} + \frac{2}{9} \right)^{-1}$$

(mit der Feinstrukturkonstante $\alpha \approx 1/137$), kann aber auch experimentell bestimmt werden. Die Strahlunslängen sind umgekehrt proportional zur Zeilchenzahldichte und damit zum Druck des Gases, deshalb werden sie immer für Normalbedingungen angegeben, also für 20°C und 760 Torr und müssen deshalb je nach tatsächlichem Druck entsprechend skaliert werden.

Für ein Gemisch aus verschiedenenen Gasspezies im Restgas, lassen sich die Strahlungslängen reziprok addieren

$$\frac{1}{L_{r,eff}} = \sum_i \frac{1}{L_{r,i}} \quad ,$$

und die Lebensdauer bei diesem Gemisch wird dann bei entsprechenden Partialdrücken P_i

$$\tau_b = \left(-\frac{4c}{3} \sum_i \frac{P_i}{L_{r,i}} \ln \varepsilon_{\mathrm{HF}} \right)^{-1} \quad .$$

[1] Es gibt Hinweise aus Trackingrechnungen ([9]) darauf, daß die Energieakzeptanz kleiner ist, als der theoretische Wert von $9.6 \cdot 10^{-3}$. Ein Wert von $\varepsilon_{\mathrm{HF}} = 8 \cdot 10^{-3}$ erscheint realistischer.

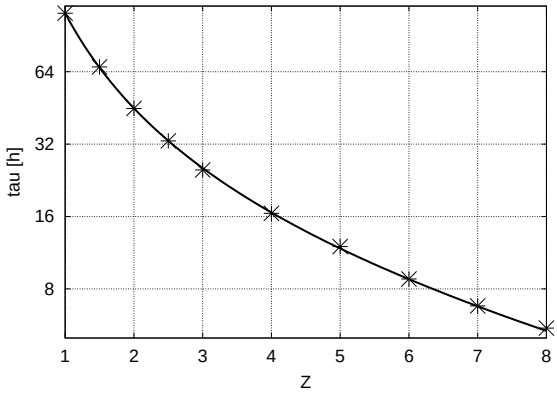

Abbildung 6: Abhängigkeit der Gesamtlebensdauer bei HERA-e von der Gaszusammensetzung (mittl. Kernladungszahl Z) des Restgases.

Für Beschleunigervakuumsysteme kann man noch eine Faustformel angeben, welche etwa für alle Beschleuniger typisch ist:

$$\tau_b \approx 100\ \mathrm{h}/p[\mathrm{nTorr}] \quad (\approx 20\ \mathrm{h} \quad \text{für HERA-e}).$$

Hierbei geht man davon aus, daß die Energieakzeptanz der Beschleuniger etwa 10^{-2} ist und die Lebensdauer nur schwach (weil logarithmisch) davon abhängt, und außerdem die Gaszusammensetzung in typischen Beschleunigern etwa ähnlich ist[1].

Für den praktischen Gebrauch hat das Konzept der Strahlungslängen Vorteile gegenüber der Betrachtung der vier Einzelprozesse, da die Strahlungslängen relativ gut experimentell bestimmt werden können, und auch Effekte wie Abschirmung der Kerne durch die Atomhüllen bereits enthalten sind.

Gaszusammensetzung: Die berechnete Gesamtlebensdauer (ca. 10 h) basiert auf den recht unsicheren Schätzungen über die Gaszusammensetzung ($Z = 5$) die bislang nicht vollständig geklärt ist. Nach neueren Untersuchungen über die Gaszusammensetzung mit Hilfe von Massenspektren ergibt sich eine Gaszusammensetzung mit hauptsächlich Wasserstoff und CO und einem verschwindenen Anteil Methan sowie etwas Argon (80% H_2, 18% CO, 2% CH_4, 1% Ar). Aus dem quadratischen Mittel ergibt sich $< Z^2 >= 14$, also liegt die mittlere Kernladungszahl nach diesen Messungen bei $Z = 3.7 \pm 0.1$. Hiernach sollte die Lebensdauer bei HERA-e eher 20 h betragen (siehe Abb. 6). Allerdings ist zweifelhaft, ob die Messung der Gaszusammensetzung representativ für den ganzen Ring ist.

Abb. 6 zeigt die Abhängigkeit der Gesamtlebensdauer bei HERA-e von der Gaszusammensetzung (mittl. Kernladungszahl Z) des Restgases. Geht man davon aus, daß Z im Bereich von 2 (H) bis 7 (N,C,O) liegen könnte, ergibt sich auch hier eine große Unsicherheit, kleine Lebensdauern könnten ein Hinweis auf schwere Elemente im Restgas sein.

Mittlerer Druck: Die Auswertung der Duruckmessungen an dern Ionen-Getter-Pumpen (s.u.) hat ergeben, daß der mittlere Druck im Beschleuniger HERA-e etwa bei $5 \cdot 10^{-9}$ mbar liegen sollte, er schwankt aber zwischen $2 \cdot 10^{-9}$ mbar und $8 \cdot 10^{-9}$ mbar. Dies bedeutet für die Lebensdauer einen Bereich von 8 bis 30 h.

Die gesamte Unsicherheit bei der Berechnung der Lebensdauern ist also erheblich.

[1] Interessanterweise wird hier von einer höheren mittleren Kernladungszahl von $Z = 7$ ausgegangen.

3.2 Weitere Lebensdauerbeiträge

Luminosität

Der durch die Kollisionen mit dem Protonenstrahl unter Luminositätsbedingungen verursachte Teilchenverlust kann grob abgeschätzt werden. Bei einer angenommenen Luminosität von $L = 2 \cdot 10^{31}$ cm^{-2}s^{-1} an den beiden Wechselwirkungszonen Nord und Süd sollte die Strahlverlustrate insgesamt etwa $\dot{N} = 2 \cdot \sigma_{\mathrm{e^+p}} L = 40$ kHz sein. Mit der Gesamtzahl von $N = 2 \cdot 10^{12}$ Positronen im Beschleuniger (20 mA) ergibt sich hieraus[1] ein verschwindend kleiner Lebensdauerbeitrag von $\tau_{\mathrm{lumi}} = 14000$ h.

HERMES

Es gibt verschiedene Szenarien für das HERMES target:

1. Das polarisierte Target hat eine Nukleonenzahldichte von $1.3 \cdot 10^{14}$ cm^{-2}. Nach [6] ergibt sich ein Lebensdauerbeitrag von: $\tau_{\mathrm{pol}} = 350$ h.

2. Unpolarisiertes Target: (vom Anfang des Fills bis 1 Stunde vor Ende des Fills), die Targetdichte wird so eingestellt, daß der Lebensdauerbeitrag hierfür maximal 45 Stunden ist, er darf aber variieren.

Gerade Strecken, ZEUS, H1 und Cavities

Die Abschätzung dieses Beitrages, sofern er durch die Meßwerte an den Pumpen nicht erfaßt wird, gestaltet sich derzeit recht schwierig, da die genaue Druckverteilung und die Gaszusammensetzung nicht bekannt sind. Druckprofilrechnungen könnten hier weiterhelfen, es liegen jedoch bisher zu wenig verläßliche Daten vor. Außerdem geben die Messungen der Experimente und das Verhalten des Drucks an einigen Stellen noch Rätsel auf [5].

4 Ergebnisse und Vergleich

Der Vergleich mit den in den Jahren 2000 und 2002 beobachteten Lebensdauern in Abhängigkeit vom Druck zeigt (Abb. 7), daß die Meßwerte im Jahr 2000 gegenüber der Rechnung für den gemessenen Druck zu kleine Lebensdauern ergeben. Dies mag zum Einen daran liegen, daß die Akzeptanzen des Beschleunigers möglicherweise überschätzt wurden und durch Verbesserungen an der Optik des Beschleunigers im Jahre 2002 größer waren, andererseits ist es schwierig, den tatsächlichen mittleren und effektiven Druck allein aus den Pumpenmeßwerten zu bestimmen.

Simulationsrechnungen zum Druckerverlauf im Bogen (Abb. 9) zeigen, daß der mittlere Druck in den Bögen[2] durchaus um einen Faktor 2–3 schlechter sein kann als an der Pumpe gemessen wird. Ferner sind die Kalibrierungen an den unterschiedlichen individuellen Pumpen nur sehr ungenau und vor allem nicht mehr rekonstruierbar. Außerdem dürften die inzwischen

[1] Hierzu wurde ein Gesamtwirkungsquerschnitt von $\sigma_{\mathrm{e^+p}} = 1$ mbarn angenommen. Außerdem nehmen wir an, daß alle Teilchen, die wechselwirken, auch den Strahl verlassen.

[2] Es wurde jeweils der Mittelwert aus den Meßwerten aller $2 \cdot 370$ Pumpen aufgetragen.

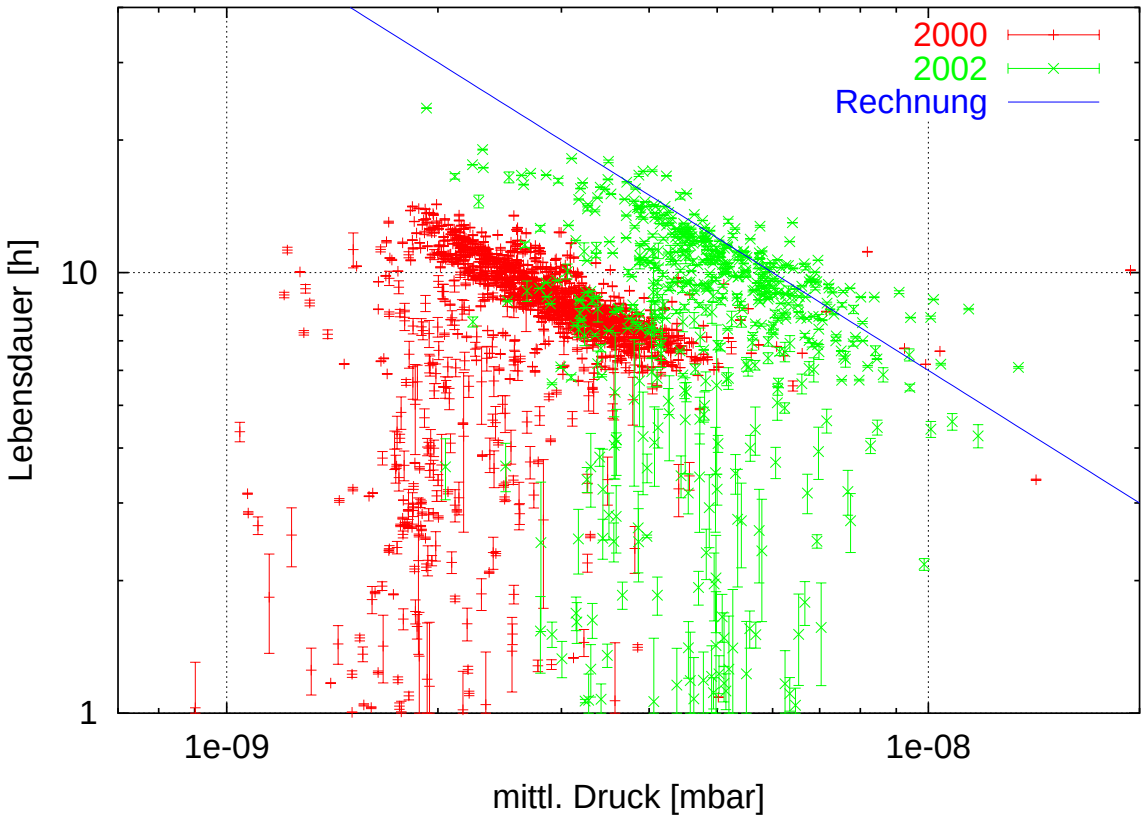

Abbildung 7: Abhängigkeit der Gesamtlebensdauer bei HERA-e vom mittleren Druck des Restgases. Die Meßwerte stellen die aus dem Stromverlauf verschiedener Runs aus den Jahren 2000 und 2002 berechneten Lebensdauern gegen den mittleren Druck, berechnet aus allen Messwerten der Ionen-Getter-Pumpen entlang des HERA-e-Rings, dar. Gut zu erkennen ist die $1/p$-Abhängigkeit. Im Jahre 2002 konnte bei vergleichbarem mittleren Druck eine höhere Lebensdauer erzielt werden. Allerdings kann auch eine systematische Fehlkalibrierung der integrierten Pumpen in den Bögen von HERA-e, welche 2002 nicht mehr in die Berechnung des mittleren Drucks eingeht, zumindest teilweise die Ursache für diese Diskrepanz sein.

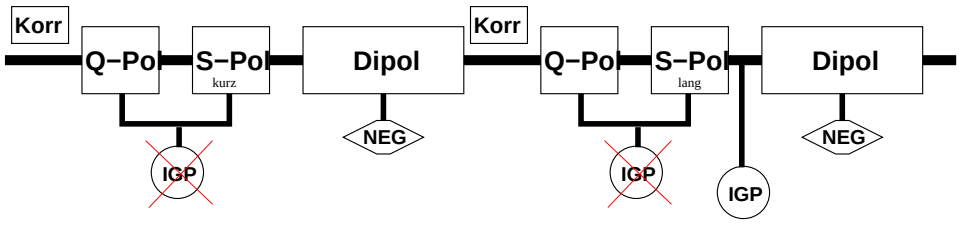

Abbildung 8: Einheitszelle des Vakuumsystems bei HERA-e im Bogen. Die in die Vakuumkammern der Quadrupole (Q-Pol) und Sextupole (S-Pol) integrierte IGP-Pumpe ist ab 2002 nicht mehr angeschlossen. Deshalb gibt es auch ab 2002 keine Druckwerte an diesen Stellen mehr.

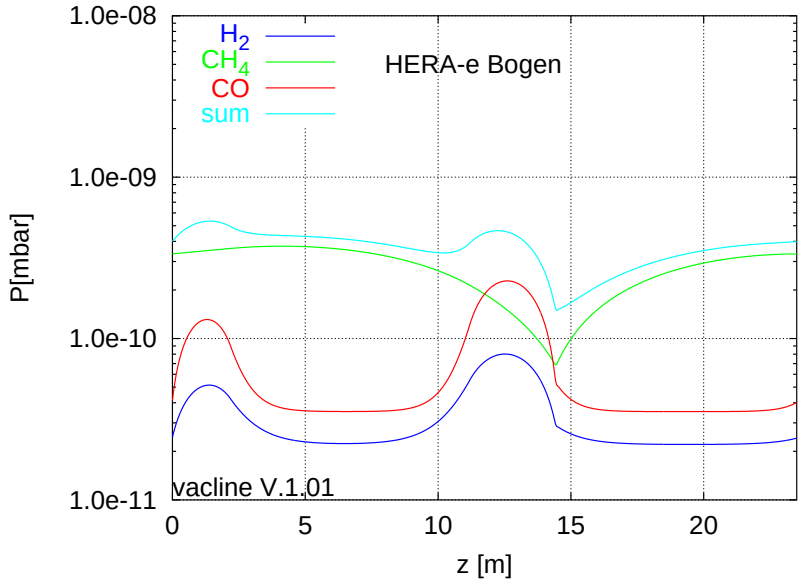

Abbildung 9: Simulierter Druckverlauf für verschiedene Gasspezies in einer Einheitszelle der Bögen von HERA-e [4]. Der Druck wird jeweils an einer Ionen-Getter-Pumpe (bei 14 m) gemessen. Es gibt noch erhebliche Zweifel bzgl. des Methan-Partialdrucks, welcher teilweise duch Desorption aus den Vakuumkammerwänden durch Synchrotronlicht entsteht und durch katalytische Reaktionen in den verwendeten NEG-Pumpen. Die Problematik wird derzeit noch untersucht [10, 11].

abgeschalteten integrierten Ionen-Getter-Pumpen bei den Quadrupol- und Sextupolkammern einen unterschiedlichen Einfluß auf den wahren mittleren Druck machen (Siehe auch Abb. 8).

Allerdings ist der Verlauf der Kurve durchaus so wie erwartet, so daß man deutlich sagen kann, daß bei HERA-e die Lebensdauer eindeutig druckdominiert ist. Lediglich bei kleinen mittleren Drücken könnte sich ein zusätzlicher Lebensdauerbeitrag von > 40 Stunden bemerkbar machen, welcher zumindest teilweise von HERMES verursacht wird. Hierbei wäre noch zu beachten, daß die Target-Dichte zum Ende der Runs von HERMES erhöht wird.

Die Meßwerte aus den Daten von 2002 stimmen gut mit der aus den Schätzwerten berechneten Kurve überein. Im Jahre 2002 konnte bei vergleichbarem mittleren Druck eine höhere Lebensdauer erzielt werden. Für das Jahr 2000 wurde offenbar die Akzeptanz des Beschleunigers leicht überschätzt. Allerdings kann auch eine systematische Fehlkalibrierung der integrierten Pumpen in den Bögen von HERA-e, welche 2002 nicht mehr in die Berechnung des mittleren Drucks eingeht, zumindest teilweise die Ursache für diese Diskrepanz sein.

Die modifizierten Wechselwirkungszonen der Experimente H1 und ZEUS scheinen keinen deutlich sichtbaren Einfluß zu haben. Im Jahre 2002 wurden allerdings Runs mit weniger Strom und damit besseren Drücken aufgesetzt. Vergleiche auch Abb. 10.

5 Suche nach unbekannten Lebensdauerbeiträgen

Es wurde versucht, anhand der vorhandenen Daten, eine mögliche die Lebensdauer dominierende Quelle zu lokalisieren. Es wird angenommen, daß die gemessene Lebensdauer stark mit

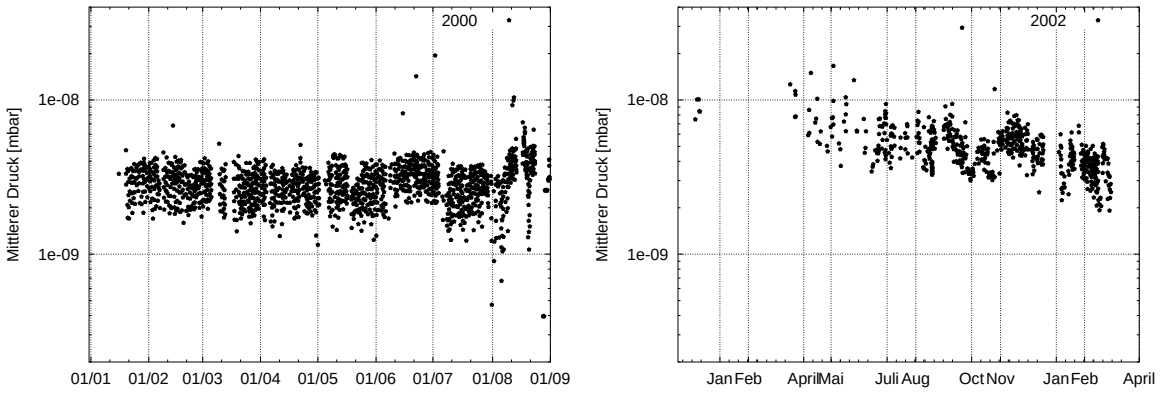

Abbildung 10: Entwicklung des über alle Druckmeßwerte entlang des HERA-e-Rings gemittelten Drucks im Verlaufe der Zeit. Die Ursachen für die leicht unterschiedliche Druckentwicklung ab etwa Juni 2000 kann nicht geklärt werden. Möglicherweise wurden Pumpen eingefügt oder entfernt. Der Druckanstieg im August 2000 ist korreliert mit kleineren Lebensdauern für diese Zeit (siehe Abb. 4). Nach dem Upgrade war der mittlere Druck im Ring zunächst deutlich schlechter, und das Druckniveau der Run-Periode 2000 konnte bis März 2003 nicht wieder erreicht werden.

dem Druck an dieser Stelle korreliert ist. Dies ist z.B. bei den Pumpen in den Bögen der Fall. Andererseits könnte auch eine Stelle mit konstantem aber hohen Druck einen signifikanten Lebensdauerbeitrag ergeben. Auf dieses Verhalten hin wurden alle Druckwerte, wie sie an den Ionen-Getter-Pumpen in HERA-e gewonnen werden, untersucht. Da es sich hierbei um ca. 750 individuelle Pumpen und Druckmessungen handelt, konnten allerdings individuelle Fehlerquellen, mögliche Kalibrationsfehler, die unterschiedlichen Anschlußgeometrien und evtl. Defekte nicht berücksichtigt werden.[1]

Abb. 11 zeigt die mittleren Drücke entlang des Rings während der Runs an. Man erkennt Bereiche mit tendenziell hohem Druck und solche, die relativ geringen Druck aufweisen (hauptsächlich Stellen, die nicht von Synchrotronstrahlung getroffen werden). Im Vergleich der Runperioden 2000 und 2002 zeigt sich, daß sich die Druckverhältnisse in den Oktanten OR und SL kaum geändert haben, in den Oktanten OL und SR ist der Druck im Jahre 2002 geringfügig schlechter, was evtl. auf das Abschalten der integrierten Pumpen bei den Quadrupolen und Sextupolen in den Bögen zurückzuführen ist. Auffällig ist die Wechselwirkungszone Süd: Hier gibt es stark gestreute Meßwerte, möglicherweise aufgrund der im Jahr 2002 immer wieder vorgenommenen Tests und Modifikationen an den Pumpen und kalten Magneten.

Abb. 12 zeigt den dynamischen Druckanstieg[2] an den jeweiligen Pumpen. In den Bögen ist es ein recht gute Konstante. Dennoch gibt es hier starke Auffälligkeiten: Zum einen fallen besonders 2002 einige wenige Pumpen durch wesentlich höheren dynamischen Druck auf auch im Vergleich zu den Ausreißern im Jahre 2000. Diese gilt es, genauer in Augenschein zu nehmen.

Zweitens gibt es im Bereich der Wechselwirkungszone ZEUS eine Anzahl Pumpen, die ein abnormes Verhalten zeigen, welches zu negativen dynamischen Druckanstiegen führt. Hier wird der Druck mit abnehmendem Strom schlechter. Dies könnte eine Folge eines Temperaturpro-

[1] Außerdem haben sich die Anzahl, Position und Typ der Pumpen zwischen den Jahren 2000 und 2002 stark geändert. Nicht alle Einzelheiten konnten hier rekonstruiert werden.

[2] D.h. die Zunahme des Drucks durch den Strahlstrom, gemessen in mbar/mA.

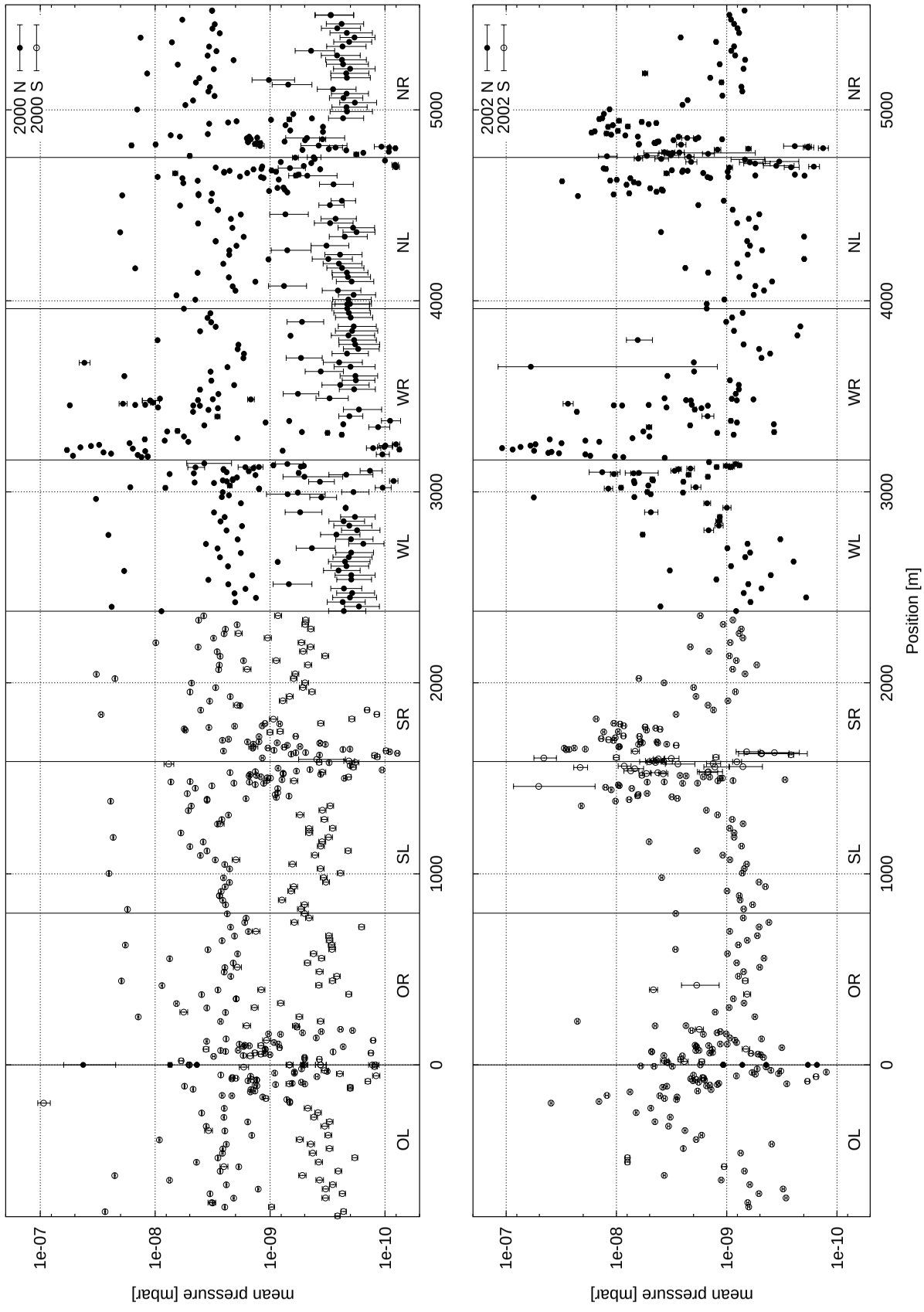

Abbildung 11: Mittlerer Druck (während der Runs) an allen Ionen-Getter-Pumpen in HERA-e im Vergleich der Jahre 2000 (oben) und 2002.

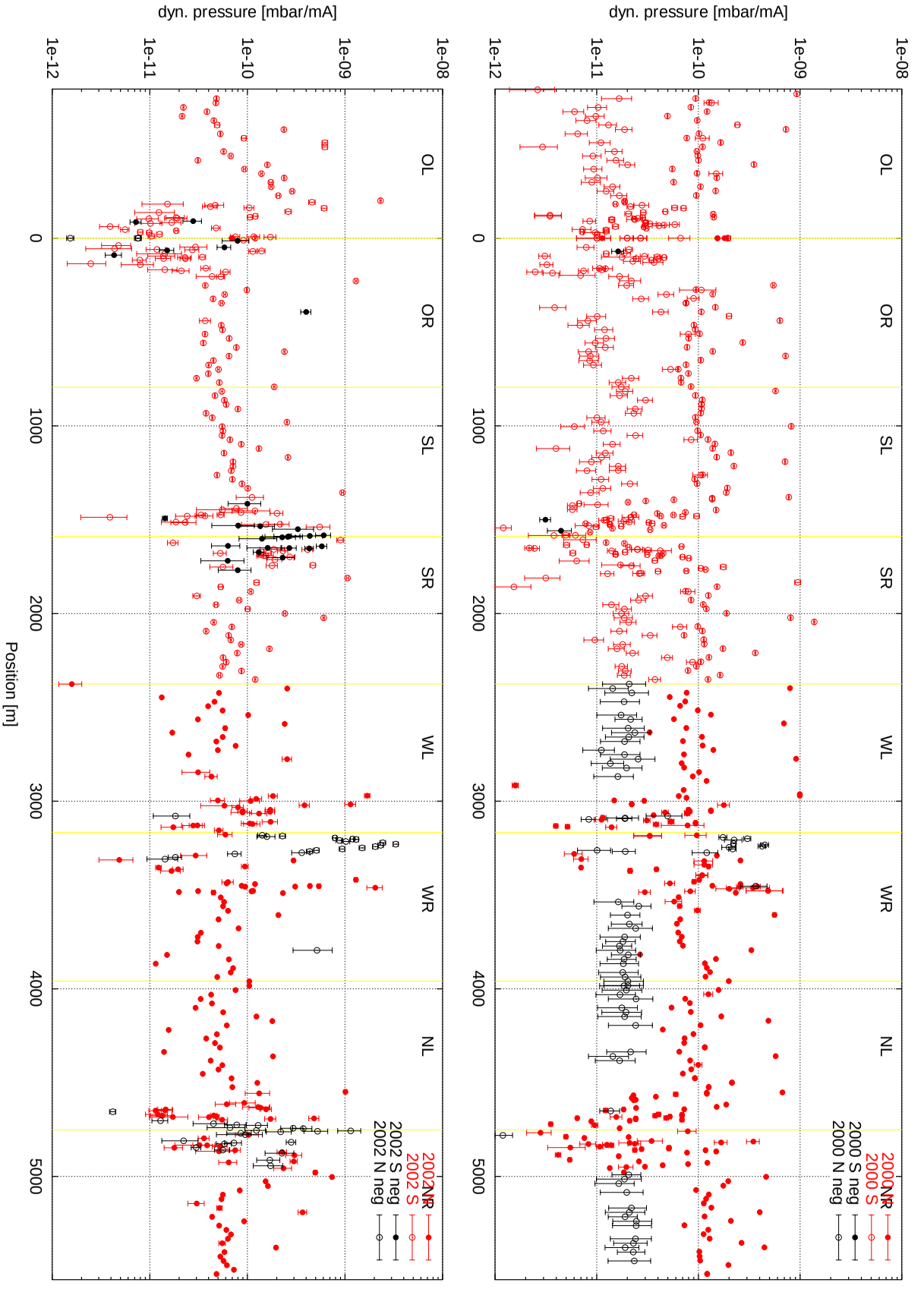

Abbildung 12: Mittler dynamischer Druckanstieg (während der Runs in den Jahren 2000 und 2002) an allen Ionen-Getter-Pumpen. Die Blauen Punkte kennzeichenen Stellen mit negativem dynamischen Druck.

blems sein: Durch langsame Erwärmung der Kammerwände während der Runs kommt es zu Druckanstiegen, die offenbar die Abnahme des Drucks wegen verminderter Synchrotronlichtleistung überwiegen.

Abb. 13 zeigt ein Maß dafür, wie gut die Gesamtlebensdauer mit den an den jeweiligen Pumpen gemessenen Drücken korreliert. Auch hier erkennt man hauptsächlich den Beitrag der Bögen. Stellen mit tendenziell gutem Vakuum sind auch wenig korreliert. Die Korrelation ist hauptsächlich dort zu beobachten, wo auch der dynamische Druckanstieg relativ hoch ist.

Im Unterschied zur Situation im Jahre 2000 ist in bei der neuen Wechselwirkungszone bei ZEUS die Korrelation der Lebensdauer mit den Drücken in der Nähe extrem klein. Die unterstützt die Vermutung, daß erstens das Vakuum in den WW-Zonen nicht Synchrotronlicht dominiert ist bzw. ein größeres Problem aufgrund von Erwärmung der Kammerwände offenbart, welches nicht die übliche Stromabhängigkeit zeigt. Andererseits beeinflußt das Ausgasen durch Erwärmung offenbar nicht die Lebensdauer.

Wir suchen nun nach Stellen hohen Drucks (mit oder ohne dynamischem Druckanstieg und Korrelation) sowie nach Stellen, die stark korreliert sind, da dies ein Hinweis darauf sein könnte, daß die Gesamtlebensdauer von dieser Stelle dominiert sein könnte.

6 Fazit

Es wurde die Entwicklung der Strahllebensdauer bei HERA-e in den Jahren 2000 und 2002/2003 bei Betrieb mit 27.5 GeV untersucht. Hierbei wurden die in den HERA-Archiven vorhandenen Druckmessungen aller Pumpen entlang des Ringes ausgewertet und auf Auffälligkeiten hin untersucht.

Es ergeben sich deutliche Hinweise, daß die beobachtete Strahllebensdauer in den Jahren 2000 und 2002 der Druckentwicklung folgt.

Augrund von Schätzwerten wurde die theroretisch zu erwartende Lebensdauer abgschätzt. Die Abhängigkeit der gemessenen Lebensdauer vom mittleren gemessenen Druck in der Maschine entspricht den Erwartungen für eine Gaszusammensetung mit einer mittleren Kernladungszahl von $Z = 5$. Es ergibt sich eine Diskrepanz zu der mit dem Massenspektrometer gemessenen Gaszusammensetzung. Hiernach sollte die Lebensdauer etwa doppelt so groß sein, wie tatsächlich gefunden.

Als einziger weiterer signifikanter Beitrag zur HERA-e Lebensdauer wurde das Gastarget bei HERMES identifiziert. Die Identifizierung weiterer bislang unbekannter Lebensdauerbeiträge brachte anhand der vorhandenen Daten keine eindeutigen Ergebnisse.

Wegen vermutlich schlechterer Apertur in HERA-e, waren die gemessenen Lebensdauern im Jahr 2000 bei vergleichbarem Druck kleiner. Es darf deshalb erwartet werden, daß — auch wenn wieder vergleichbar hohe Ströme in HERA-e gefüllt werden können — die Strahllebensdauer leicht besser sein wird, als sie es unter vergleichbaren Bedingungen im Jahr 2000 war.

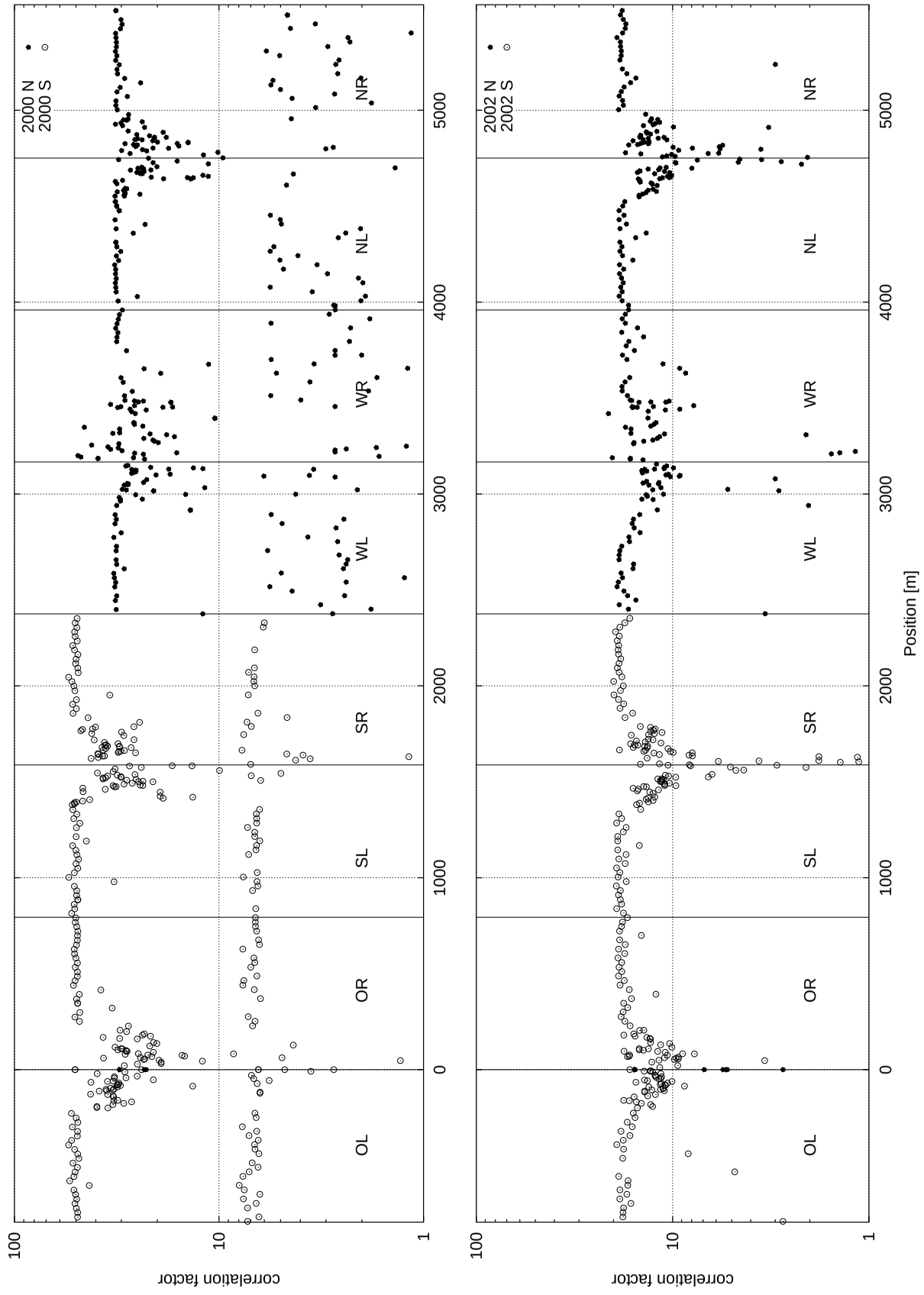

Abbildung 13: Korrelationsgüte dafür daß die Lebensdauer eine Funktion des Druckes ($\tau \sim (1/p + 1/\mathrm{const})^{-1}$) an den jeweils gemessenen Stellen ist. Oben: Daten aus 2000, Unten: 2002.

Literatur

[1] F. Zimmermann, *Emittance Groth and Proton Beam Lifetime in HERA*, Dissertation 1993, DESY 93-059

[2] H.O. Moser, D. Einfeld, R. Steininger, *Vorschlag zum Bau einer Synchrotronstrahlungsquelle (ANKA) im Forschungszentrum Karlsruhe zur Förderung der industriellen Umsetzung von Mikrofertigungs- und Analytikverfahren*, zweite Auflage, Forschungszentrum Karlsruhe, (1995)

[3] Helmut Wiedemann, *Particke Accelerator Physics*, Springer Verlag, S. 378 ff.

[4] Markus Hoffmann, *Vakuumsimulationsrechnungen für HERA*, DESY HERA 03-25, Contribution to the Workshop on HERA Performance, Salzau, Germany, May 2003

[5] Mike Seidel, *Vakuum in den HERA Wechselwirkungszonen: Erfahrungen aus dem Run 2002/2003, Pläne für den Anlauf 2003/2004*, DESY HERA 03-10, Contribution to the Workshop on HERA Performance, Salzau, Germany, May 2003

[6] Elke-Caroline Aschenauer, private communication.

[7] Winfried Decking, *Dynamische Apertur im e-Ring, Optiken/Sextupolverteilungen*, DESY HERA 03-15, Contribution to the Workshop on HERA Performance, Salzau, Germany, May 2003

[8] Ferdinand Willeke, *Dynamische Apertur im e-Ring, Synchrobetatronresonanzen*, DESY HERA 03-16, Contribution to the Workshop on HERA Performance, Salzau, Germany, May 2003

[9] Winfried Decking, private communication.

[10] Mike Seidel, *Synchrotronstrahlungsdesorptin in der GM-Kammer*, Version vom 1. Sept. 2003

[11] Mike Seidel, R. Sandhoff, B. Nagel, M. Niemann, M. Schwartz, D. Keese, T. Sommer, *Versuch zur katalytischen Erzeugung von Methan an NEG-Streifen.*, Draft, Version vom 1. Sept. 2003