

Vakuum-Simulationsrechnungen für HERA

Markus Hoffmann

Contribution to the Workshop on HERA Performance

Salzau, Germany, May 2003

DESY HERA 03-25

20. Oktober 2003

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Das Konzept	1
2.1	Vakuum	1
2.2	Leitfähigkeit, Saugleistung und Durchfluß	1
2.3	Leitfähigkeiten	2
2.4	Temperatur und Molekülmasse	3
2.5	Gas-Last und Gleichgewichtsdruck	4
3	Berechnung longitudinaler Druckprofile	4
3.1	Numerische Stabilität	7
3.2	Lösungsalgorithmen	9
4	Vernetzungen von Vakuum-Systemen	9
5	VACLIN	10
5.1	Randbedingungen	10
5.2	Vernetzungen	11
6	CALCVAC	11
7	Das HERA-Vakuumsystem	13
8	Ergebnisse	14
8.1	Berechnung des Drucks in den Bögen von HERA-e	16

8.2	Konsistenz-Checks und Anpassung der Ausgasraten mit Hilfe der Pumpen-Heiz-Experimente	17
8.3	Berechnung des Drucks in den HERA-Wechselwirkunszonen	19
8.4	Bestimmung der Pumpleistung der Integrierten Pumpe bei ZEUS	19
8.5	Vorhersage der Wirkung der neuen Integrierten Pumpe bei H1	23
9	Zusammenfassung	23
A	Die Pressure Response Matrix	24
	Literaturverzeichnis	26

1 Einleitung

In diesem Bericht wird ein Verfahren vorgestellt, mit dem es möglich ist, longitudinale eindimensionale Druckprofile in zusammenhängenden Vakuumröhren unter Berücksichtigung der Anwesenheit von Pumpen und ausgasenden Elementen zu berechnen. Ausgangsgrößen sind die verwendeten Rohrprofile, deren Materialien und Oberflächentemperaturen sowie evtl. angeschlossene Pumpen.

Für die Berechnungen für HERA, speziell der Wechselwirkungszonen bei H1 und ZEUS wurde das Programmpaket CALCVAC / VACLINe entwickelt. Es ist in der Lage, ein komplettes Massenspektrum des Druckprofils zu berechnen, sowie verschiedene Ereignisse im Vakuumsystem (z.B. das Ein- und Ausschalten von Pumpen, Ausheizen von TSPs¹, sowie der Desorption von Gasen durch Synchrotronlichtbestrahlung) zu modellieren. Es lassen sich auch verknüpfte Vakuumsysteme berechnen, z.B. ringförmige oder sternförmig oder beliebig verknüpfte sogen. *Vakuum-Lines*.

Mit diesen Mitteln wurde ein Modell des Vakuumsystems bei HERA in der Nähe der Wechselwirkungszonen erstellt, mit dem es nun möglich ist, die Auswirkungen verschiedener Ereignisse, die den Druck im Vakuumsystem beeinflussen, auf das Druckprofil und das Massenspektrum des Restgases zu berechnen.

Dieser Bericht beschreibt zunächst das den Programmen zugrunde liegende Konzept. Schließlich werden einige Ergebnisse diskutiert, die durch Modellierung des HERA-Vakuumsystems, speziell der beiden Wechselwirkungszonen gewonnen wurden.

2 Das Konzept

2.1 Vakuum

Im sogenannten Hochvakuum und Ultra-Hochvakuum ($P < 1 \cdot 10^{-7}$ mbar) ist die Gaskonzentration soweit erniedrigt und die mittlere freie Weglänge der Moleküle so groß, daß man Stöße der Gasmoleküle untereinander vernachlässigen kann². Die einzelnen Gasteilchen wechselwirken dann vorwiegend mit den Kammerwänden, wo sie reflektiert, adsorbiert und desorbiert werden können.

Die Temperatur der Kammern spielt dabei auch eine Rolle. Z.B. bei einem System aus zwei verschieden warmen Kammern wird die Gaskonzentration im Gleichgewichtszustand in dem kälteren Teil größer sein. Die wichtigen physikalischen Parameter, die diesen Zustand beschreiben, sind: mittlere freie Weglänge, Dimension der Kammer und Geschwindigkeitsverteilung der Moleküle.

2.2 Leitfähigkeit, Saugleistung und Durchfluß

Wegen der verschwindenden Viskosität und der hohen Geschwindigkeiten der Gasmoleküle kann man Transportphänomene bei Druckdifferenzen in dünnen Gasen mit dem Wärmefluß

¹TSP=Titan-Sublimations-Pumpe

²sogen. *Knudsen Gas*; Im Gegensatz zum viskosen Zustand, wo die Gaskonzentration so hoch ist, daß Stöße der Gasmoleküle untereinander überwiegen.

oder dem Strom in einem elektrischen Schaltkreis bei gegebenen Widerständen und Spannungsdifferenzen vergleichen. Der *Durchfluß* Q (oder Strom I) ist dabei direkt proportional zur Potentialdifferenz und umgekehrt proportional zum Widerstand. In direkter Analogie zum Ohmschen Gesetz ($I = \Delta U/R$) erhält man für den Durchfluß durch eine Röhre mit dem Widerstand (bzw. der Impedanz) Z :

$$Q = (p_1 - p_2)/Z = C \Delta p \quad . \quad (1)$$

Wobei hier C die *Leitfähigkeit* des Rohrs ist. Einheit: Volumen/Zeit=[l/s]. Die Leitfähigkeit einer Vakuumkomponente ist abhängig von der Geometrie, der Gas-Sorte und der Temperatur und bei viskosem Gas auch noch vom Druck. Aus obigem Zusammenhang erkennt man die Einheit für den Durchfluß: $[Q] = \text{mbar l/s}$.

Ansonsten kann man die Leitfähigkeiten bei einem System von Vakuumkomponenten addieren (bei Parallelschaltung) und reziprok addieren (bei Hintereinanderschaltung).

Für die Leitfähigkeit C kann man aber auch schreiben:

$$C = pvA/\Delta p \quad .$$

Da der Druck ein Maß für die Teilchendichte $n = N/V$ ist, kann der Durchfluß auch interpretiert werden als die Anzahl der Moleküle N , die mit der Flußgeschwindigkeit v pro Zeiteinheit durch eine Querschnittsfläche A des Rohrs treten.

$$p = nkT/V \quad .$$

$$Q = pC = nk \frac{T}{V} \cdot \frac{V}{t} = nkT/t \sim \frac{N}{Vt} \cdot \frac{A}{A}$$

$$Q \sim NvA = nVvA \quad .$$

Diese Beziehung definiert die *Saugleistung* S wie folgt: $N = Avn = Sn$ mit der Saugleistung $S = Av$, Einheit: [S]=l/s.

Die Saugleistung bestimmt die Rate (Volumen/Zeit), mit der Gas vom Vakuumsystem entfernt wird. Der Durchsatz der Pumpe ergibt sich wiederum aus $Q = pS$. Die effektive Pumpleistung einer Pumpe mit Anschlussstutzen ergibt sich deshalb aus der reziproken Summe aus Saugleistung und Leitfähigkeit des Anschlusses.

2.3 Leitfähigkeiten

Die Leitfähigkeiten verschiedener Vakuumkomponenten sind nur schwer zu berechnen. Für einige einfache Geometrien (unendlich langes rundes Rohr, unendlich dünne Apertur) können analytische Ausdrücke gefunden werden, die für unterschiedliche Längen mit Korrekturfaktoren versehen werden. Für einzelne Komponenten, die an beiden Enden an unendlich große Tanks angeschlossen sind, können Molekültracking-Simulationen die gesuchten Leitfähigkeiten ergeben (z.B. mit einem Programm, welches in [10] beschrieben ist). Hierbei wird die Durchgangswahrscheinlichkeit pro Zeit für ein Teilchen auf der einen Seite für den Durchgang durch die Röhre berechnet. Allerdings ist die Annahme großer Tanks an beiden Enden bei einem aus mehreren Elementen gebildeten Röhrensystem nicht mehr zutreffend, da die Teilchen nach dem Durchtreten eines (dünnen) Rohrs keine isotrope Geschwindigkeitsverteilung mehr haben, sondern bereits eine Bündelung aufgetreten ist.

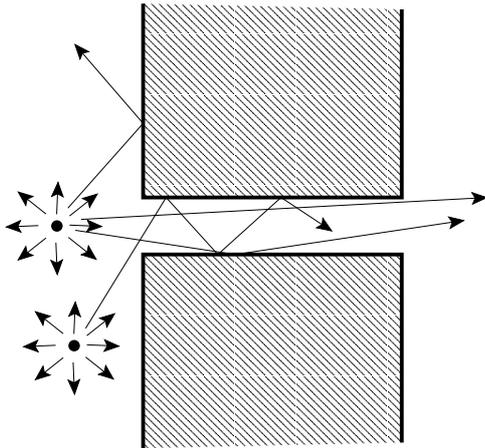


Abbildung 1: Zur Berechnung der Leitfähigkeit C eines Rohres zwischen zwei ausgedehnten Gastanks.

Für die HERA-Standard-Profiltypen für Rohre der Länge l werden folgende Formeln verwendet. Sie setzen sich meist aus einem Teil für die Apertur und einem Teil für ein Rohr mit Länge zusammen.

- Kreisförmiger Querschnitt mit Durchmesser d :

$$C_o = \frac{1}{1/C_{\text{ap}} + 1/C_{\text{len}}} \quad ; \quad C_{\text{ap}} = 11.6 \cdot d^2 \pi / 4 \quad ; \quad C_{\text{len}} = 17.1 \frac{d^3}{\sqrt{2}l} \quad .$$

- Elliptischer Querschnitt mit Durchmessern a und b :

$$C_e = \frac{1}{1/C_{\text{ap}} + 1/C_{\text{len}}} \quad ; \quad C_{\text{ap}} = 11.6 \cdot ab \pi / 4 \quad ; \quad C_{\text{len}} = 17.1 \frac{a^2 b^2}{l \sqrt{a^2 + b^2}} \quad .$$

- Rechteckiger Querschnitt mit Seitenlängen a und b :

$$C_r = \frac{1}{1/C_{\text{ap}} + 1/C_{\text{len}}} \quad ; \quad C_{\text{ap}} = 11.6 \cdot ab \quad ; \quad C_{\text{len}} = 30.9 \cdot f\left(\min\left(\frac{a}{b}, \frac{b}{a}\right)\right) \frac{a^2 b^2}{l(a+b)} \quad ,$$

mit

$$f(x) = \frac{0.0653947}{x + 0.0591645} + 1.0386 \quad .$$

Die anderen Kammerformen werden (grob) durch diese Basisformen angenähert, z.B. die Achteckkammer durch eine Ellipse. Für die Schlüssellochkammer wird der Leitwert für ein Rechteck und eine Ellipse addiert. Der Fehler, der entsteht, da in der Kammer keine Trennwand vorhanden ist, ist vertretbar klein.

2.4 Temperatur und Molekülmasse

Obige Werte für die Leitfähigkeiten für verschiedene Rohrformen gelten für Luft (Molekülmasse $m = 28$) und für Raumtemperatur ($T = 300$ K). Je höher die Temperatur und je leichter die Gasmoleküle, desto höher ist aber auch die Leitfähigkeit für die entsprechende Gasspezies.

Sie gehen in die Leitfähigkeiten wie folgt ein:

$$C \sim \sqrt{\frac{T}{m}} \quad .$$

Material	von	bis
Aluminium	$5 \cdot 10^{-14}$	$1 \cdot 10^{-8}$
Edelstahl	$4 \cdot 10^{-12}$	$2 \cdot 10^{-8}$

Tabelle 1: Typische Gesamtausgasraten einiger Materialien (aus [8]).

2.5 Gas-Last und Gleichgewichtsdruck

In einem geschlossenen Vakuumsystem befindet sich Gas aus verschiedenen Quellen. Diese Quellen können sein:

1. Restgas im System,
2. Dampfdruck im Gleichgewicht mit den kondensierten Materialien (Festkörpern),
3. Gase, die produziert oder eingebracht werden:
 - Lecks (auch virtuelle Lecks bei (in Ecken) gefangenen Gasen),
 - Ausgasungen (Adsorption),
 - Permeation (Diffusion von Gasen durch die Vakuumkammer).

Ein Gleichgewichtsdruck (bzw. eine Gleichgewichtsdruckverteilung bei verschiedenen internen Gasflüssen) entsteht aus dem Gleichgewicht von aus Gasquellen neu produziertem Gas und Abpumprate (bzw. auch Kondensationsrate bei entsprechenden Temperaturen).

$$P = \frac{Q_0}{S_{eff}} \quad (2)$$

Die größten Unbekannten bei der Bestimmung der Gaslast kommen durch die Ausgasmechanismen. Typische Ausgasraten sind temperaturabhängig und auch stark von der Vorbehandlung und Verunreinigung der Materialien abhängig. Sie können um mehrere Größenordnungen schwanken. Angegeben werden Ausgasraten üblicherweise als Fluß pro Flächeneinheit. Die Einheit ist also mbar l/s /cm².

3 Berechnung longitudinaler Druckprofile

Druckverteilung und Gasflüsse sollen berechnet werden für eine beliebige aber eindimensionale Anordnung aus Vakuumkomponenten. Hierzu kann man eine einfache Differentialgleichung verwenden. Diese wird nun kurz motiviert.

Eine Verallgemeinerung der Gleichung (1) ist

$$Q(x) = -c(x) \frac{dP(x)}{dx} \quad , \quad (3)$$

mit c : spezifische Leitfähigkeit [m l/s].

Weiterhin kann man eine Kontinuitätsgleichung (Erhaltung der Masse) aufstellen:

$$-\frac{dQ(x)}{dx} + q(x) = P(x)s(x) \quad , \quad (4)$$

mit x : longitudinale Koordinate [m]; P : Druck [mbar]; Q : Gasfluß [mbar l/s]; q : spezifische Ausgasrate [l/s/m].

Kombiniert man Gleichung (3) und (4), so erhält man

$$\frac{d}{dx} \left[c(x) \frac{dP(x)}{dx} \right] - s(x)P(x) = -q(x) \quad . \quad (5)$$

Es sei nochmal daran erinnert, daß nur im molekularen Vakuum-Bereich die Leitfähigkeiten unabhängig vom Druck sind.

Unter der Annahme, daß die spezifische Leitfähigkeit c , die spezifische Ausgasrate q und die spezifische Saugleistung s stückweise konstant sind, ist Gleichung (5) eine gewöhnliche lineare Differentialgleichung zweiter Ordnung mit (stückweise) konstanten Koeffizienten¹. Die allgemeine Lösung der Gleichung (5) lautet dann

$$P(x) = C_1 \exp(\alpha x) + C_2 \exp(-\alpha x) + \frac{q}{s} \quad ; \quad (6)$$

mit $\alpha = \sqrt{s/c}$. Hieraus läßt sich ganz analog zur Teilchenoptik aus dem Anfangswertproblem ein Matrixformalismus entwickeln (vergl. [5, 1]):

$$\begin{pmatrix} P(x) \\ Q(x) \end{pmatrix} = \mathbf{M} \begin{pmatrix} P_0 \\ Q_0 \end{pmatrix} + \vec{v}$$

mit

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} \cosh(\sqrt{s/c}x) & -\frac{1}{c\sqrt{s/c}} \sinh(\sqrt{s/c}x) \\ -c\sqrt{s/c} \sinh(\sqrt{s/c}x) & \cosh(\sqrt{s/c}x) \end{pmatrix} \quad (7)$$

und

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} -\frac{q}{s} (\cosh(\sqrt{s/c}x) - 1) \\ \frac{q}{\sqrt{s/c}} \sinh(\sqrt{s/c}x) \end{pmatrix} \quad .$$

Im Prinzip kann man also den gesamten Druckverlauf durch ein Vakuumssystem bei gegebenen Startbedingungen durch Tracking berechnen. Die Konstanten P_0 und Q_0 müssen aus einem Randwertproblem gefunden werden. Hat man beispielsweise periodische Randbedingungen, so findet man die periodische Lösung mit Hilfe der 1-Turn Matrix \mathbf{M} für die gesamte Vakuum-Line:

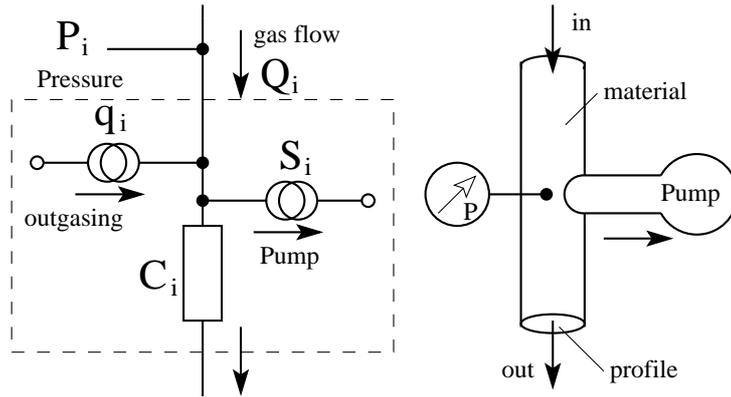
$$\begin{pmatrix} P_0 \\ Q_0 \end{pmatrix} = (\mathbf{1} - \mathbf{M})^{-1} \vec{v} \quad .$$

Für allgemeinere Randbedingungen muß ein Gleichungssystem aufgestellt und gelöst werden.

Das Problem, ein Druckprofil zu berechnen, reduziert sich also auf das Lösen eines Gleichungssystems, welches in folgender Form geschrieben werden kann:

¹Dieser Typ Differentialgleichung findet sich in der Beschleunigerphysik auch bei der Berechnung der Teilchenbahnen (Hill'sche Differentialgleichung: $\frac{d^2 x(s)}{ds^2} + \left(\frac{1}{\rho^2(s)} - k(s) \right) x(s) = \frac{1}{\rho(s)} \frac{\Delta p}{p}$ bzw. $\frac{d^2 z(s)}{ds^2} z(s) + k(s)z(s) = 0$). Die Lösungsmethoden dort sind ganz ähnlich der hier vorgestellten, was der Grund für die enge Beziehung der Vakuumrechnungen zur Beschleunigerphysik ist.

Abbildung 2: Elementares Stück Vakuumkammer zur Verdeutlichung der Parameter Durchfluß Q Leitfähigkeit C , Ausgasrate und Saugleistung. Links das Schaltbild analog zu einem elektrischen Schaltkreis.



$$\begin{pmatrix} -m_{11}^1 & -m_{12}^1 & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -m_{21}^1 & -m_{22}^1 & 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -m_{11}^2 & -m_{12}^2 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -m_{21}^2 & -m_{22}^2 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & & & & \ddots & & & \vdots & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & -m_{11}^n & -m_{12}^n & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & -m_{21}^n & -m_{22}^n & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} P_0 \\ Q_0 \\ P_1 \\ Q_1 \\ \vdots \\ P_{n-1} \\ Q_{n-1} \\ P_n \\ Q_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_1^1 \\ v_2^1 \\ v_1^2 \\ v_2^2 \\ \vdots \\ v_1^n \\ v_2^n \end{pmatrix} .$$

Die Indizes bei Drücken und Gasflüssen bezeichnen das Element i zu dem die Matrixelemente m_{ab}^i und v_j^i gehören, an dessen Ausgang P_i und Q_i herrschen.

Wie man erkennt, ist das Gleichungssystem unterbestimmt, da es bei n Elementen $n + 1$ Drücke und Gasflüsse gibt. (Es kommen Druck P_0 und Gasfluß Q_0 am Eingang des ersten Elements hinzu.)

Aus diesem Grund sind zwei Randbedingungen nötig. Hier kann man z.B. diese Parameter am Eingang des letzten Elements vorgeben. Mit $P_0 = b_1$ und $Q_0 = b_2$ sieht das Gleichungssystem dann so aus: (Die Matrix ist jetzt quadratisch.)

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -m_{11}^1 & -m_{12}^1 & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -m_{21}^1 & -m_{22}^1 & 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -m_{11}^2 & -m_{12}^2 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -m_{21}^2 & -m_{22}^2 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & & & & \ddots & & & \vdots & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & -m_{11}^n & -m_{12}^n & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & -m_{21}^n & -m_{22}^n & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} P_0 \\ Q_0 \\ P_1 \\ Q_1 \\ \vdots \\ P_{n-1} \\ Q_{n-1} \\ P_n \\ Q_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ v_1^1 \\ v_2^1 \\ v_1^2 \\ v_2^2 \\ \vdots \\ v_1^n \\ v_2^n \end{pmatrix} .$$

Dieses Gleichungssystem ist banddiagonal und kann mit entsprechend optimierten Lösungsverfahren gelöst werden. Selbstverständlich kann man aber auch beliebige andere Randbedingungen (für irgendein P_i oder Q_j oder auch – was häufig vorkommen wird – für Anfangs- und

Endfluß Q_0 und Q_n) vorgeben. Die Einsen in den ersten beiden Zeilen der Matrix stehen dann an der entsprechenden Stelle (und die Matrix ist nicht mehr banddiagonal).

Hat man nun durch Lösen dieses Gleichungssystems die Drücke und Flüsse für die Eingänge der Elemente bestimmt, ist es weiterhin ein Leichtes mit Hilfe der Transfermatrizen die Drücke an beliebiger Stelle auch dazwischen zu bestimmen. Diese Methode kann weiterhin dazu angewandt werden, die Matrix zu verkleinern, indem zunächst mehrere Elemente (bei denen keine Randbedingungen oder Verknüpfungen bestehen) zusammengefaßt werden. Kennt man den Anfangsdruck für diese Teilstrecke, kann das Vakuumprofil dann durch Tracking auf die anderen Elemente übertragen werden. Dies stößt allerdings an Grenzen in dem Moment, wo relativ schlecht leitende Elemente vorkommen (was relativ häufig vorkommt) und die numerischen Ungenauigkeiten eine Rolle zu spielen beginnen (s.u.).

3.1 Numerische Stabilität

Die Schwierigkeit beim Tracking-Verfahren für das Vakuum sind die in den Transfermatrizen auftretenden hyperbolischen Funktionen. Sowie die zu betrachtende Vakuumröhre länger wird (und deren Leitfähigkeit damit immer kleiner), werden die Argumente dieser Funktionen und die Funktionen selbst, die ja exponentiell wachsen, immer größer. Die Einträge in der Matrix werden also ziemlich schnell sehr groß¹. Die Folge ist, daß die Matrix im Sinne der numerischen Genauigkeit immer singulärer wird, und die Korrelation zwischen dem Druck und dem Gasfluß an einem Ende mit denen am anderen Ende nahezu aufgehoben wird. Nach der Grundgleichung der Vakuumtechnik (siehe auch Gleichung (2) bzw. (6)) wird der Druck im Innern dieses Teilstückes dann nur noch von der vorherrschenden Saugleistung und der Ausgasrate bestimmt (siehe Abb. 3).

Das Vakuumssystem zerfällt dann an diesem schlecht leitenden Teilstück in zwei nahezu unabhängige Teile, welche im Prinzip separate Randbedingungen benötigen. Unglücklicherweise treten diese Schwierigkeiten auch auf, wenn man nur genügend viele Einzelmatrizen für eine lange Vakuum-Line zusammenmultipliziert. Das Tracking stößt an seine Grenzen. Um diese Schwierigkeiten zu umgehen, wurde bereits ein Verfahren, die *Finite Differenzen-Methode*, vorgeschlagen (siehe [7]).

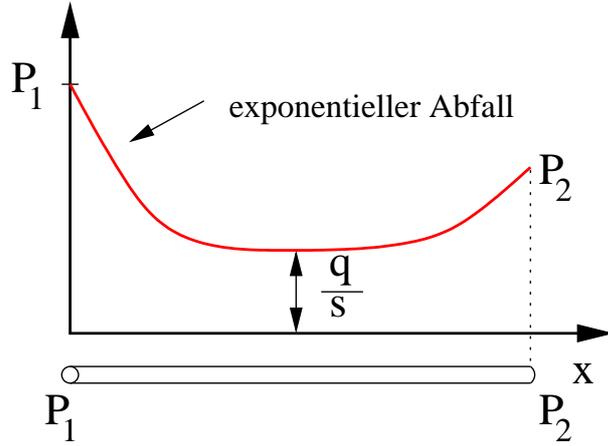
VACLINe benutzt aber eine andere Methode, um numerische Schwierigkeiten zu vermeiden:

1. Zum Lösen des Gleichungssystems wird die Singulärwertzerlegung (SVD) verwendet, welche auch brauchbare Lösungen zu singulären Gleichungssystemen mit evtl. zusätzlichen Randbedingungen liefert.
2. Für elementare Transfermatrizen wird für solche, wo numerische Schwierigkeiten zu erwarten sind ($l\sqrt{\frac{s}{c}} > \log(1 \cdot 10^{13})$) ein abgewandeltes Modell verwendet. Hierbei geht man davon aus, daß sich der Druckverlauf bei einem genügend langen Element von den Enden her exponentiell einen konstanten Wert annähert, und der Netto-Fluß im Gleichgewicht entsprechend verschwindet:

$$P(x) = C_1 \cdot \exp(-\alpha x) + \frac{q}{s}$$

¹In der Teilchenoptik treten diese Schwierigkeiten nicht auf, da dort anstelle der hyperbolischen Funktionen trigonometrische auftreten, deren Wertebereich beschränkt ist.

Abbildung 3: Ein langes Stück Vakuumkammer mit Pumpleistung entkoppelt das Vakuumsystem, da die Druckverhältnisse im Innern nicht mehr von denen am Eingang bestimmt werden. Dieses Problem verursacht annähernd singuläre Transfermatrizen was wegen der endlichen Rechengenauigkeit bei $l\sqrt{\frac{s}{c}} > \log(1 \cdot 10^{13})$ zu numerischer Instabilität führt.



$$Q(x) = \alpha c C_1 \cdot \exp(-\alpha x)$$

mit $C_1 = (P(0) - \frac{q}{s})$ und $\alpha = \sqrt{s/c}$.

Dasselbe gilt auch für das andere Ende des Vakuumrohrs (siehe auch Abb 3). Es entstehen für beide Enden also jeweils eine Randbedingung für das Verhältnis aus Druck zu Fluß für $x = 0$:

$$P(x \rightarrow 0) = \frac{1}{\alpha c} Q(x \rightarrow 0) + \frac{q}{s} \quad (8)$$

und für $x = l$ aus

$$P(x) = C_1 \cdot \exp(-\alpha(l-x)) + \frac{q}{s}$$

$$Q(x) = -\alpha c C_1 \cdot \exp(-\alpha(l-x))$$

entsprechend

$$P(x \rightarrow l) = -\frac{1}{\alpha c} Q(x \rightarrow l) + \frac{q}{s} \quad (9)$$

Anstelle der Matrizen (7) können dann zum Vakuum-Tracking folgende verwendet werden (wobei hier allerdings der Druck und der Fluß am anderen Ende bekannt sein müssen):

$$\begin{pmatrix} P(x) \\ Q(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Pi & 0 & \Gamma & 0 \\ 0 & \Pi & 0 & \Gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_0 \\ Q_0 \\ P_1 \\ Q_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{q}{s}(1 - \Pi - \Gamma) \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (10)$$

mit $\Pi := \exp(-\alpha x)$ und $\Gamma := \exp(-\alpha(l-x))$.

Dies trägt der Tatsache Rechnung, daß der Fluß durch das Vakuumelement praktisch verschwindet. Das Gleichungssystem zerfällt praktisch an diesem Element in zwei Teile wobei stattdessen zwei neue Randbedingungen (nach Gleichungen (8) und (9)),

$$P_i = \frac{1}{\alpha c} Q_i + \frac{q}{s} \quad \text{und} \quad P_{i+1} = -\frac{1}{\alpha c} Q_{i+1} + \frac{q}{s},$$

in der großen Matrix verwendet werden:

$$\begin{pmatrix} \vdots & & & & \vdots & & \\ \dots & 1 & 1/\sqrt{s_i c_i} & 0 & 0 & \dots & \\ \dots & 0 & 0 & 1 & -1/\sqrt{s_i c_i} & \dots & \\ \vdots & & & & \vdots & & \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \vdots \\ P_i \\ Q_i \\ P_{i+1} \\ Q_{i+1} \\ \vdots \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \vdots \\ q_i/s_i \\ q_i/s_i \\ \vdots \end{pmatrix} .$$

3.2 Lösungsalgorithmen

Obwohl man bei einem quadratischen Gleichungssystem Eliminationsalgorithmen anwenden kann (z.B. Gauß-Jordan-Elimination), sind die Lösungen oft nicht numerisch stabil. Dies kommt immer dann vor, wenn zwei Teile der Vakuumline durch ein schlecht leitendes Element verbunden sind. Die Lösung ist dann plötzlich extrem empfindlich von den Randbedingungen abhängig, und oft divergiert die Lösung. Dieses Problem kann umgangen werden, wenn man für solcherart zerteile Vakuumssysteme mehr Randbedingungen definiert, und das nun überbestimmte Gleichungssystem nur noch approximativ löst. Die Druckprofile passen dann lokal besser zu „ihrer“ Randbedingung. Mit Hilfe der Singulärwertzerlegung (SVD) gibt es hier ein gutes Instrument. So ist es egal, ob das Gleichungssystem über- oder unterbestimmt ist. Es wird immer die Lösung aus dem Lösungsraum gewählt (oder eine Lösung in der Nähe gefunden), die den Betrag $|M\vec{p} - \vec{b}| \rightarrow 0$ minimiert. Es stellt sich heraus, daß dies fast immer ein realistisches Druckprofil liefert, interessanterweise auch ohne Vorgabe jeglicher Randbedingungen.

4 Vernetzungen von Vakuum-Systemen

Mit dem hier vorgestellten Verfahren können zunächst einmal nur eindimensionale Druckprofile in einer eindimensionalen Topologie des Vakuumsystems berechnet werden. Für kompliziertere dreidimensionale Strukturen ist dieser Algorithmus normalerweise nicht gut geeignet. Solche Strukturen werden dann mit Molekültracking-Verfahren (siehe [10]) behandelt. Beschleuniger-Vakuumssysteme sind allerdings in der Regel hinreichend eindimensional.

Bei HERA sind die beiden Beschleuniger-Vakuumssysteme jedoch in den Wechselwirkungszonen miteinander verbunden. Außerdem gibt es Besonderheiten, wie das Photonenstrahlrohr an den Wechselwirkungszonen. Ähnliche Situationen entstehen auch in Synchrotronstrahlungsquellen, wo viele Rohre des Vakuumsystems vom eigentlichen Ring abzweigen. Auch sind manche Pumpen mit einem längeren Anschluß versehen, und können ähnlich behandelt werden.

Im folgenden wird ein Verfahren vorgestellt, wie solche Vernetzungen mehrerer eindimensionaler Vakuumssysteme im hier vorgestellten Algorithmus leicht berücksichtigt werden können.

Mit einem speziellen Kommando können die Eingänge verschiedener Elemente der Vakuumline zusätzlich miteinander verbunden werden. Z.B. kann man das Ende einer Line wieder mit dem Anfang verbinden und erhält somit periodische Randbedingungen, oder es können mehrere Teilstücke der Line, (die ggf. durch ein Ventil oder ein schlecht leitendes Teilstück miteinander verbunden sind) verbunden werden.

Mathematisch gesehen stellt so eine Verbindung ein Kanal mit unendlich hoher Leitfähigkeit dar. In das Gleichungssystem kommt also eine Randbedingung für den Druck hinzu sowie eine

weitere Unbekannte, nämlich der Fluß durch diesen Kanal (siehe Abb. 4).

Das Gleichungssystem sieht dann etwa so aus, wobei sich der Rang der Matrix um eins erhöht hat:

$$\begin{pmatrix}
 1 & 0 & m & m & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & m & m & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\
 & & \vdots & & \ddots & & & & & & & & & \vdots \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & & & \dots & & \dots & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & & & \dots & & \dots & 0 & 0 & 1 \\
 & & \vdots & & & & & & & & & & & \vdots \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & & & \dots & & \dots & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & & & \dots & & \dots & 0 & 0 & -1 \\
 & & \vdots & & & & & & & \ddots & & & \vdots \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & m & m & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & m & m & 0 \\
 & & & & \dots & 1 & \dots & & & & & & & 0 \\
 & & & & \dots & & & \dots & 1 & \dots & & & & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & \dots & -1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0
 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} P_0 \\ Q_0 \\ P_1 \\ Q_1 \\ \vdots \\ P_i \\ Q_i \\ \vdots \\ P_j \\ Q_j \\ \vdots \\ P_{n-1} \\ Q_{n-1} \\ P_n \\ Q_n \\ Q_{AB} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_0^1 \\ v_0^2 \\ v_1^1 \\ v_1^2 \\ \vdots \\ v_i^1 \\ v_i^2 \\ \vdots \\ v_j^1 \\ v_j^2 \\ \vdots \\ v_{n-1}^1 \\ v_{n-1}^2 \\ b_1 \\ b_2 \\ 0 \end{pmatrix}$$

5 VACLIN

Die hier vorgestellten Konzepte zur Berechnung longitudinaler Druckverteilungen in (Beschleuniger-)Vakuumsystemen wurde in zwei Computer-Codes realisiert. Ein Programm (VACLIN)¹ kann Druckprofile für eine Gasspezies bei gegebener Geometrie und Topologie des Vakuumsystems erstellen. Das andere Programm (CALCVAC) übernimmt die Buchführung zum Berechnen von Massenspektren, Partialdruckverteilungen und dynamischen Effekten (Ereignissen), wie z.B. das Ausheizen von TSP's oder das Deaktivieren von Pumpen. CALCVAC erzeugt außerdem die grafische Darstellung der Profile und kann auch Meßwerte darstellen oder Druckprofile an vorgegebene Meßwerte anpassen, um so z.B. die Pumpleistung von Pumpen zu bestimmen. Außerdem kann die Pressure-Response-Matrix berechnet werden.

Einzelheiten über den Aufbau und die Bedienung der Programme sprengen den Rahmen dieses Berichts und können in der entsprechenden Dokumentation nachgelesen werden. Hier werden nur die beiden wichtigsten Erweiterungen kurz umrissen.

5.1 Randbedingungen

Die Direktive BOUNDARY definiert eine Randbedingung für den Anfang eines Elements. Hierbei kann eine Randbedingung für den Druck (BOUNDARY (P= . . .)) oder für den Gas-Fluß (BOUNDARY (Q= . . .)) oder für beide (BOUNDARY (P= . . . , Q= . . .)) vorgegeben werden.

¹VACLIN wurde in seiner ursprünglichen Version von Mike Seidel entwickelt und nun um die Funktionen BOUNDARY und LINK erweitert.

In dem Gleichungssystem, welches die Startdrücke und Gasflüsse an den Eingängen der Elemente berechnet, wird pro Randbedingung eine Zeile hinzugefügt.

Diese sieht dann so aus:

$$\begin{pmatrix} & & \vdots & & \\ 0 & \dots & 1 & \dots & 0 \\ & & \vdots & & \end{pmatrix} \cdot \vec{P} = \begin{pmatrix} \vdots \\ b \\ \vdots \end{pmatrix} .$$

Für eine zusammenhängende Vakuumline sind 2 Randbedingungen nötig. Zerfällt die Vakuumline in zwei (z.B. weil ein Schlechtleitendes Element eingebaut wurde) so sind mehr Randbedingungen nötig. Wird mit dem LINK-Kommando ein ringförmiges System gebaut, so werden keine weiteren Randbedingen benötigt, da ein periodisches System entsteht. Werden zu viele Randbedingen angegeben, so versucht VACLINe eine Lösung zu finden, die den Randbedingen am nächsten kommt. Werden zu wenig Randbedingen angegeben, so ist die Lösung diejenige mit den geringsten lokalen Gasflüssen.

5.2 Vernetzungen

Mit dem speziellen Kommando LINK können die Eingänge verschiedener Elemente der Vakuumline zusätzlich miteinander verbunden werden. Z.B. kann man das Ende einer Line wieder mit dem Anfang verbinden und erhält somit periodische Randbedingeungen, oder es können mehrere Teilstücke der Line, (die ggf. durch ein Ventil oder ein schlecht leitendes Teilstück miteinander verbunden sind) verbunden werden.

Ein Beispiel:

```

VENTIL: SECTION, L=0.05, q=0, W=0.0001, A=3100, BOUNDARY(Q=0)
ELine:  LINE=(...)
PhotonLine: LINE=(...)
PLine:  LINE= (Begin, ... ,GJR,Abs4,GM1,GM2,PM0,VENTIL,ELine,VENTIL, \
              PhotonLine,End)
LINK, Abs4, PhotonLine
LINK, Abs4, ELineR
USE, PLine

```

Hier werden zunächst die ELine und die PhotonLine in die P-Line eingebaut aber durch das Element VENTIL voneinander entkoppelt. Dann werden die Stücke alle am Element Abs4 miteinander verbunden. Es entsteht eine sternförmige Topologie (siehe Abb. 5).

6 CALCVAC

CALCVAC ist eine Erweiterung für VACLINe mit den folgenden Hauptmerkmalen:

- Berechnung von Ausgasraten, spez. Leitfähigkeiten und Innenflächen für rechteckige, kreisförmige und elliptische Kammern (und für HERA speziell auch für die Schlüssellochkammer) aus einfachen Geometriewerten wie Durchmesser oder Seitenlängen und der Materialart;
- Berücksichtigung verschiedener Gasspezies,

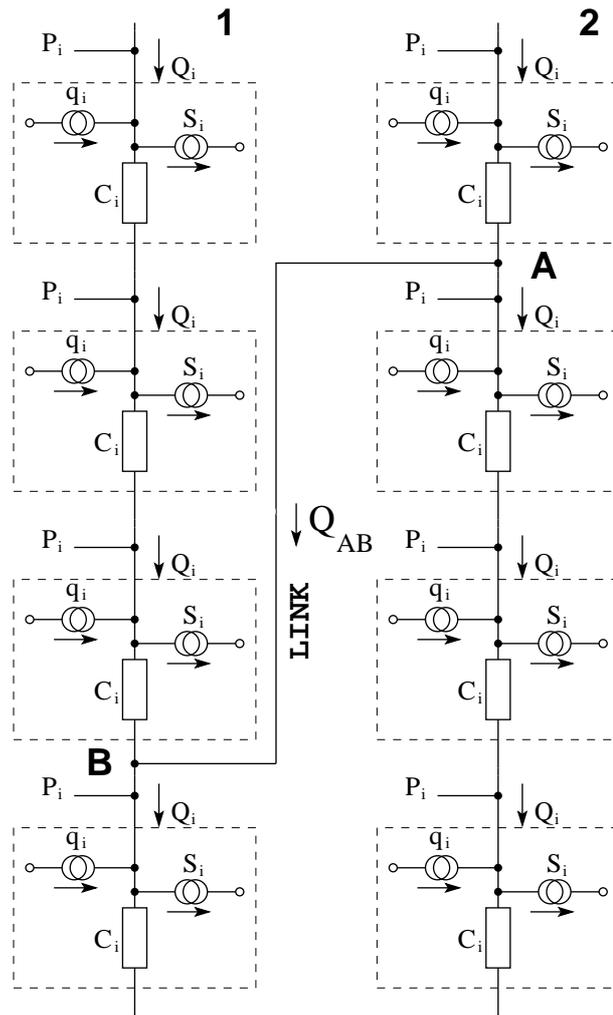


Abbildung 4: Prinzip der Verknüpfung zweier Vakuumsysteme. (Es darf sich auch um zwei Stellen desselben Vakuumsystems handeln.) Durch die Verbindung entsteht ein zusätzlicher (virtueller) Kanal, durch den Gas fließen kann. Es kommt also pro Link eine weitere Unbekannte Q_{AB} im Gleichungssystem hinzu. Dafür kommt aber auch eine neue Bedingung ins Spiel, nämlich daß der Druck an den beiden Stellen **A** und **B** gleich sein muß.

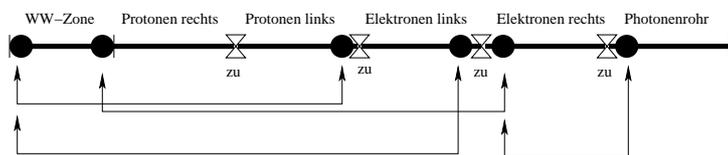
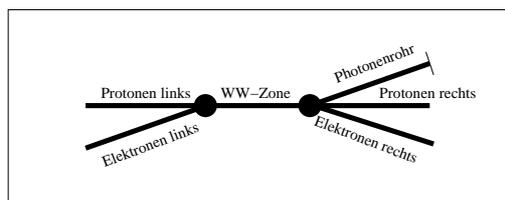


Abbildung 5: Topologie der HERA-Vakuorkammern und wie sie als lineare Vakuum-Line mit geschlossenen Ventilen und Vernetzungen realisiert werden kann.



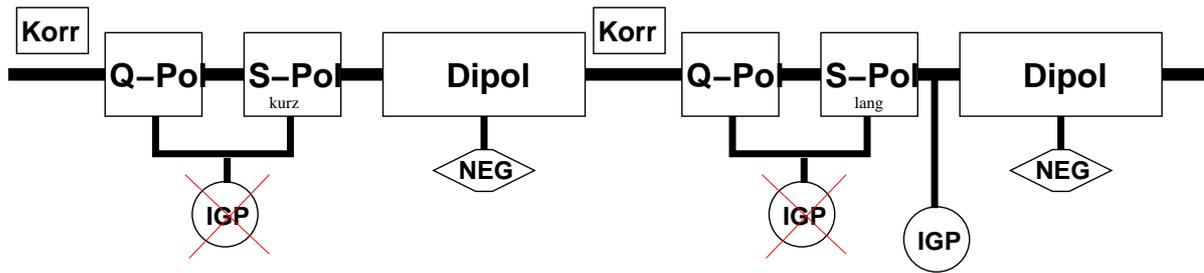


Abbildung 6: Das Vakuumsystem bei HERA-e im Bogen. Die dargestellte Einheitszelle wiederholt sich. Die in die Vakuumkammern der Quadrupole und Sextupole integrierte IGP-Pumpe ist nicht angeschlossen.

- Berücksichtigung unterschiedlicher Kammertemperaturen,
- Grafische Ausgabe der Profile und Gasspektren,
- Verschiedene vergleichende Berechnungen sind möglich.

Auch hier finden sich Einzelheiten über den Aufbau und die Bedienung des Programms in der entsprechenden Dokumentation.

7 Das HERA-Vakuumsystem

Das HERA-Vakuumsystem ist aus Rohren unterschiedlicher Querschnitte und Materialien aufgebaut. Zudem gibt es verschiedene Pumpentypen: NEG-Pumpen, Ionen-Getter-Pumpen und Titan-Sublimationspumpen.

NEG-Pumpen sind oft in die Vakuumkammer einiger Magnete integriert. IGP und TSP-Pumpen findet man meist in Kombination, wobei es einige Anschlußstellen nicht erlaubten, beide Pumpen direkt mit der Vakuumkammer zu verbinden. Hier sind die Pumpen hintereinandergeschaltet. Der Druck kann an jeder Ionen-Getter-Pumpe gemessen werden¹.

HERA-p

Der Protonenbeschleuniger und Speicherring besteht hauptsächlich aus supraleitenden Magneten, bei denen auch das innere Vakuumrohr auf niedriger Temperatur (40 K) gehalten ist. Wegen der unbekannteren Kryo-Wirkung dieser kalten Flächen wurden bislang (außer in der Nähe der Wechselwirkungszone) keine Druckprofilrechnungen gemacht.

Einzelne Fragestellungen, die die geraden Stücke betreffen, können aber dennoch untersucht werden.

HERA-e

Der Leptonenspeicherring HERA-e besteht aus vier Bogenstücken und vier geraden Stücken von denen zwei die Wechselwirkungszone enthalten und eine das HERMES-Experiment. Im

¹Für eine Auswertung aller Pumpenmeßwerte bei HERA-e siehe [14].

Unterschied zum Protonenring gibt es außer den gemeinsamen Magneten GO und GG in den Wechselwirkungszone keine Supraleitenden Magnete und damit keine kalten Innenflächen.

Abb. 6 zeigt das Vakuumsystem einer Einheitszelle in den Bögen von HERA-e. Die in die Vakuumkammern der Quadrupole und Sextupole integrierte IG-Pumpen sind seit 2001 nicht mehr angeschlossen.

Die Wechselwirkungszone

Die HERA-Wechselwirkungszone erstrecken sich ca. 11 m auf beiden Seiten vom jeweiligen Wechselwirkungspunkt. Hadronen- und Leptonenbeschleuniger teilen sich hier eine gemeinsame Vakuumkammer mit recht kompliziertem Querschnittsverlauf. Auf der rechten Seite (vom Inneren des Rings betrachtet) schnürt sich zudem das Photonenstrahlrohr ab (siehe Abb. 7).

Die Topologie des Vakuumsystems besteht aus mehreren miteinander verbundenen Vakuumkammern. Elektronen- und Protonenrohr vereinigen sich auf der linken Seite, und auf der rechten Seite teilt sich die Kammer in drei Rohre: Elektronenrohr, Protonenrohr und ein Rohr für die Synchrotronstrahlung, an dessen Ende sich ein Absorber befindet.

Die 40 K kalten Vakuumkammern der Magnete GG und GO wirken für einige Gasspezies als Kryo-Pumpe. Der verwendete IGP-Typ von Varian hat eine nominale Saugleistung von 60 l/s am Anschlußflansch. Die integrierte IGP bei ZEUS hat eine nominale effektive Saugleistung von 530 l/s (gemessen: 250-300 l/s).

Abb. 8 zeigt einige der verwendeten Querschnittprofile. Die Vakuumkammern haben unterschiedliche, teils recht komplizierte Querschnitte. Von kreisförmig über elliptisch, rechteckig, sogen. Schlüsselloch und Schmetterling-Formen sind auch Achtecke, Siebenecke und getaperte Übergänge zu finden.

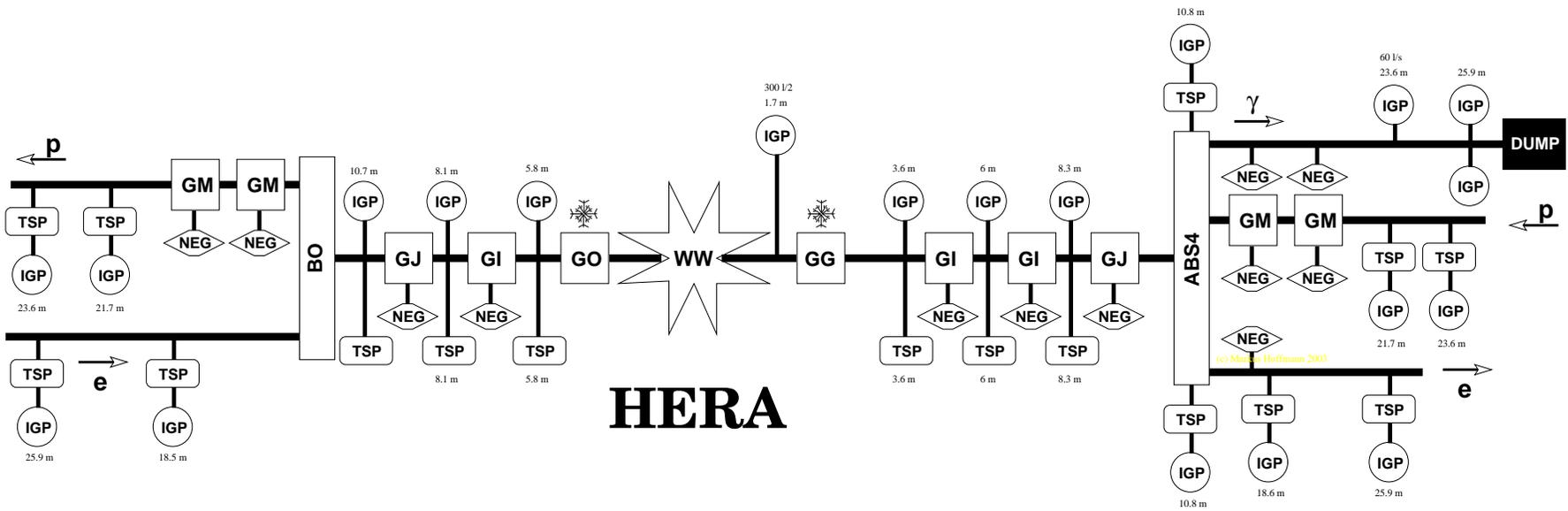
Die Vakuumkomponenten bestehen überwiegend aus Edelstahl, Kupfer, Aluminium und AlBe-Legierung. Bei den Strahlkollimatoren wurde Wolfram verwendet. Unglücklicherweise sind an den Bälgen der kalten Magnete Messingbolzen verbaut worden, die bei erhöhten Temperaturen Zink ausgasen können.

8 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden einige exemplarische Berechnungen vorgestellt, die mit Hilfe des Vakuum-Modells der Wechselwirkungszone und des oben beschriebenen Verfahrens berechnet wurden. Wegen der Schwierigkeit bei der Abschätzung der unterschiedlichen Ausgasraten für die unterschiedlichen Materialien, für evtl. von Synchrotronlicht getroffene Stellen und bei Erhitzung können die gezeigten Druckprofile und Massenspektren höchstens einen qualitativen Eindruck vermitteln. Das Modell wurde anhand der IG-Pumpenmeßwerte und beim Ausheizen verschiedener Titan-Sublimationspumpen auf Konsistenz getrimmt. Da aber beim Ausheizen dieser Pumpen hauptsächlich Wasserstoffgas frei wird, und die Drücke immens ansteigen, verbessert dies das Modell für die kleineren Ausgasraten der Kammerwände insbesondere für andere Gasspezies nicht unbedingt. Die Leitfähigkeiten des Vakuumsystems scheinen jedoch recht gut wiedergegeben zu werden.

Ohne weitere Erkenntnisse oder Experimente zur detaillierten Bestimmung von Ausgasraten in verschiedenen Situationen kann auch dieses Modell keine genaueren Aussagen machen.

Abbildung 7: Das Vakuumsystem bei HERA in der Nähe der Wechselwirkungszone.



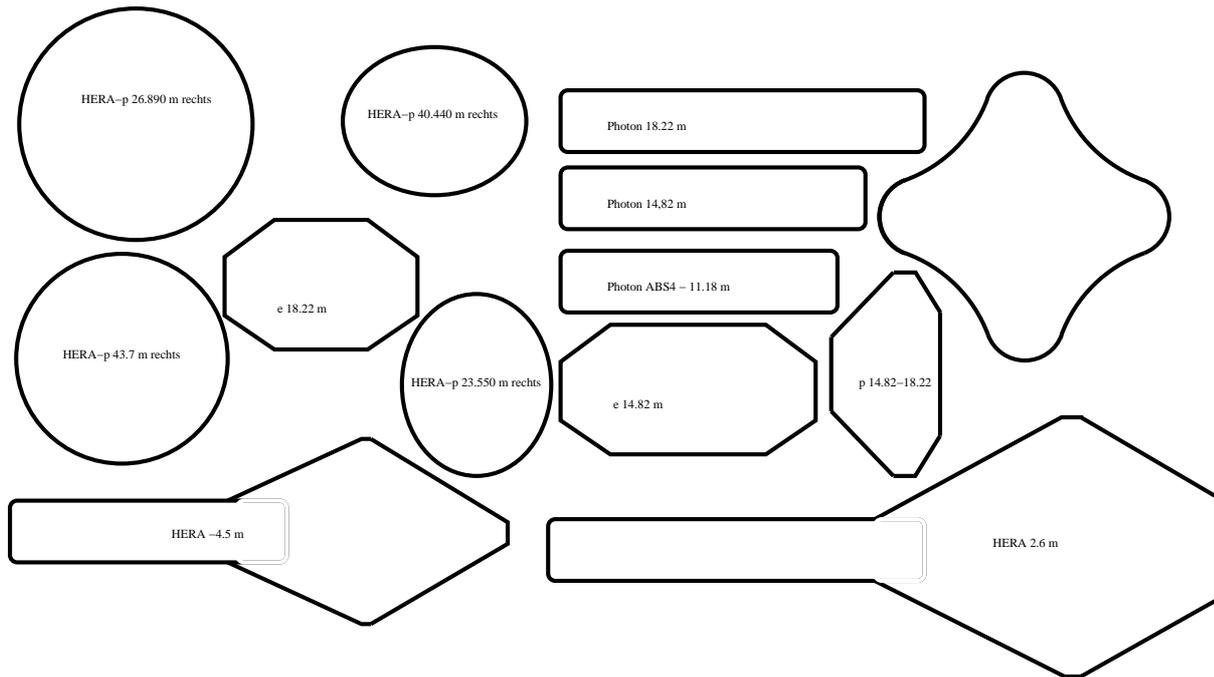


Abbildung 8: Bei HERA verwendete Rohrprofile.

8.1 Berechnung des Drucks in den Bögen von HERA-e

Die FODO-Einheitszelle von HERA-e in den Bögen ist recht einfach aufgebaut: Korrektormagnet, Quadrupol, kurzer Sextupol, Dipol, Korrektormagnet, Korrektormagnet, Quadrupol, langer Sextupol, IGP-Pumpe, Dipol. Die Vakuumkammer besteht durchweg aus dem achteckigen Standardprofil. In die Vakuumkammer der Dipole sind NEG-Pumpen integriert. In der gemeinsamen Kammer von Quadrupol und Sextupol ist zwar eine integrierte Getterpumpe vorhanden, diese ist jedoch nicht angeschlossen. Die IG-Pumpe von Varian hat eine Saugleistung von 60 l/s bei einem Anschlußstutzen mit 100 mm Durchmesser.

Das Lattice-File für CALCVAC sieht dann so aus:

```
# Korrektor-Stuecke
ks1: ROHR, L=0.600, mat=kupfer, form=ellipt, a=0.1, b=0.05
ks2: ROHR, L=1.100, mat=kupfer, form=ellipt, a=0.1, b=0.05
# Rohr fuer Quadrupol und Sextupol
QS1: ROHR, L=1.500, mat=kupfer, form=ellipt, a=0.1, b=0.05
QS2: ROHR, L=2.000, mat=kupfer, form=ellipt, a=0.1, b=0.05
# Dipol
DIP_A:ROHR, L=0.0925,mat=kupfer, form=ellipt, a=0.1, b=0.05
DIP_P:PUMP, L=9.000, mat=kupfer, form=ellipt, a=0.1, b=0.05, typ=neg, speed=495
DIP: LINE=(DIP_A,DIP_P,DIP_A)

varian: PUMP, L=0.1, mat=steel, form=circ, d=0.1, typ=igp, speed=60

End: END

LINK, Begin, VENTIL
```

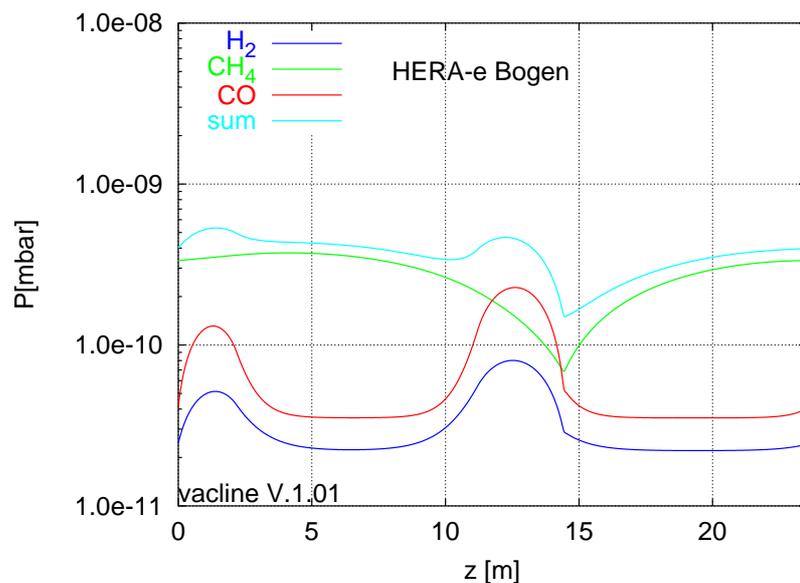


Abbildung 9: Druckverlauf für verschiedene Gasspezies in einer Einheitszelle der Bögen in HERA-e. Es wurde dieses Stück mit periodischen Randbedingungen gerechnet.

Bogenline: LINE= (Begin,KS1,QS1,DIP,KS2,QS2,VARIAN,DIP,VENTIL,End)

Das Ergebnis ist in Abb. 9 dargestellt. Bei den hier angenommenen Methanproduktionsraten wäre das Vakuum im Ring Methan-dominiert. Es gibt aber bislang keine Bestätigung dafür, daß dies auch tatsächlich der Fall ist (siehe auch [15]).

8.2 Konsistenz-Checks und Anpassung der Ausgasraten mit Hilfe der Pumpen-Heiz-Experimente

Um das Modell des Beschleunigervakuumsystems zu testen, und die bislang größtenteils geschätzten Ausgasraten näher zu spezifizieren, wurden die berechneten Druckprofile an die Druckmeßwerte der Pumpen in der Wechselwirkungszone angepaßt. Um möglichst viele unterschiedliche Gasverteilungen im Beschleuniger zu erzeugen, wurden Titan-Sublimations-Pumpen geheizt. Das Kriterium für die nun angepaßten Ausgasraten ist, daß dasselbe Modell möglichst alle diese Druckmessungen in verschiedenen Situationen gut wiedergeben sollte. Um es gleich vorwegzunehmen: Diese Anpassung ist nicht eindeutig, so daß im Laufe der Zeit evtl. weitere Verbesserungen vorgenommen werden können.

Die Hoffnung ist dann, daß mit den über die Pumpen-Heiz-Experimente gefundenen optimalen Parametern auch die Drucksituation ohne zusätzliche Gasquellen gut reproduziert werden kann.

Überraschenderweise stellte es sich heraus, daß das Modell die Meßwerte nur dann überzeugend wiedergeben konnte, wenn eine zusätzliche Gasquelle rechts vom zentralen Strahlrohr¹ angenommen wird.

Abb. 10 zeigt die Situation mit dieser Gasquelle für drei Pumpen-Heiz-Experimente und den Normalzustand bei ZEUS.

¹Die Position kann ein C5-Absorber sein, eher aber eine Gaslast im GG-Magneten.

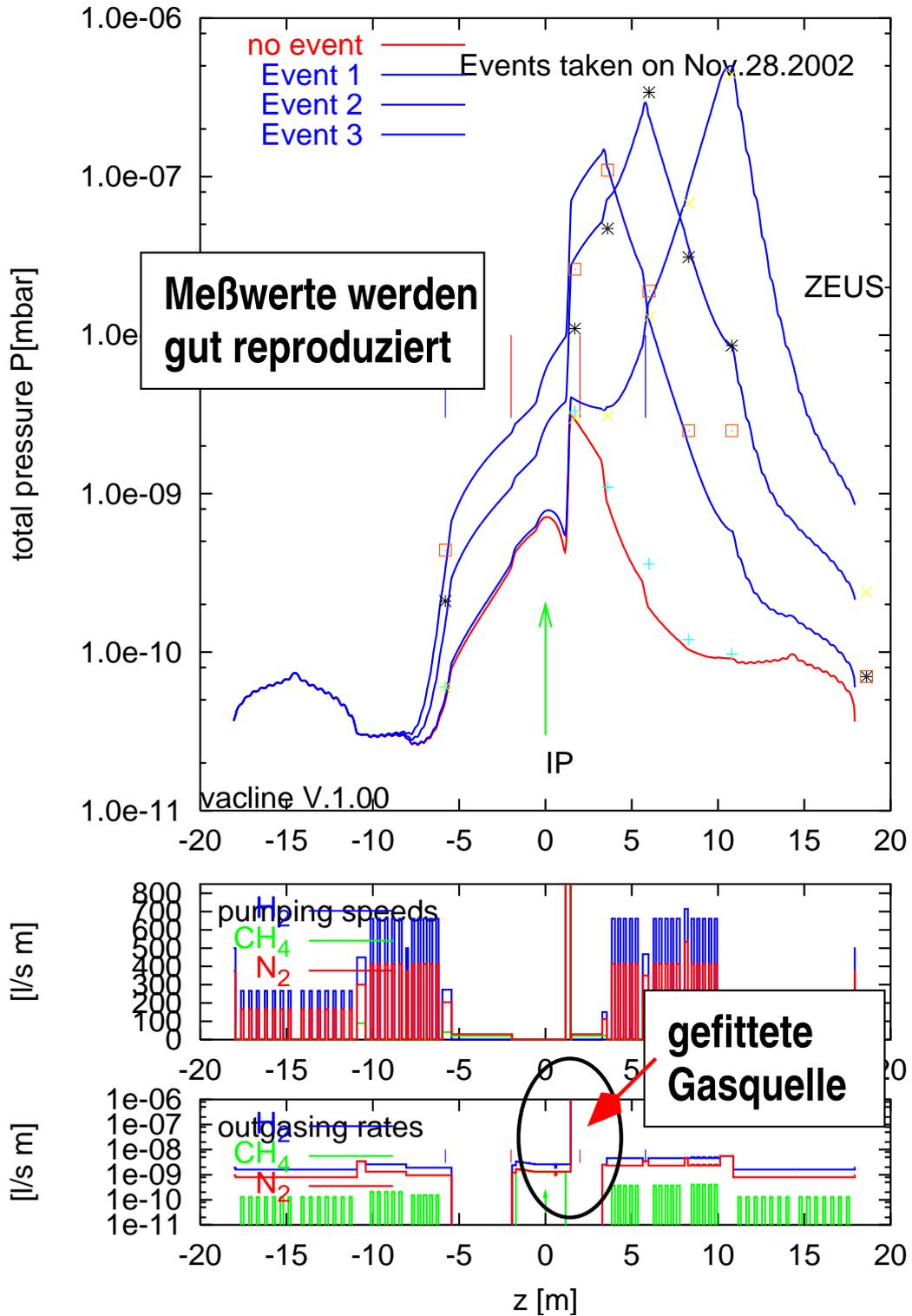


Abbildung 10: Pumpen-heiz-Experimente.

8.3 Berechnung des Drucks in den HERA-Wechselwirkungszone

In Abb. 11 sind die berechneten Massenspektren entlang der Wechselwirkungszone bei ZEUS und H1 zu sehen. Auch hier deutet einiges darauf hin, daß eine zusätzliche Gasquelle rechts vom Wechselwirkungspunkt im Modell fehlt, und zwar sowohl bei H1 als auch bei ZEUS.

Es ist nicht ganz auszuschließen, daß das Modell fehlerhaft ist, jedoch gibt dieses zumindest Anlaß zu weiteren Untersuchungen, ob möglicherweise tatsächlich z.B. ein stark ausgasendes Teil im Vakuumsystem verbaut wurde.

Leider verhindern diese Schwierigkeiten, den mittleren Druck oder die Gaszusammensetzung für die unmittelbare Umgebung um den Wechselwirkungspunkt (± 2 m) zu bestimmen. Die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Eingangsparameter erlauben dies nicht.

Auch zeigt sich relativ schnell, daß die von den Pumpen gelieferten Druckmeßwerte teilweise um einen Faktor 50 (!) falsch sind, was schon bei einer relativ einfachen Querkalibrierung auffällt. Bei H1 wurde der Druckmeßwert, den die Pumpe bei 3.6 m liefert, entsprechend um einen Faktor 47 (nach oben) korrigiert.

Und schließlich können nicht alle Druckmeßwerte verwendet werden, da Drücke kleiner $6.9 \cdot 10^{-11}$ mbar nicht mehr angezeigt werden, bzw. immer denselben Wert ergeben.

8.4 Bestimmung der Pumpleistung der Integrierten Pumpe bei ZEUS

Gegen Ende 2002 kamen Zweifel auf, ob die integrierte Ionen-Getter-Pumpe bei ZEUS (1.7 m) funktioniert. Der gemessene Ionenstrom (wird zum Messen des Drucks benutzt) macht nämlich einen Sprung nach unten, sobald auch nur ganz wenig Strom in die Maschine gefüllt wird. Der Verdacht bestand, daß dann auch die Pumpleistung entsprechend einbricht. Die nenn-Pumpleistung dieser Pumpe liegt bei ca. 500 l/s. Und im normalen Betrieb konnte an den benachbarten Pumpen bei 3.6 m und -5.8 m kein Druckanstieg beobachtet werden. Durch ein einfaches Experiment konnte jedoch verifiziert werden, daß die Pumpe nicht ganz ohne Funktion sein konnte:

Durch Heizen der SR-3.6 m Pumpe wurde in der Nähe eine hohe Gaslast mit überwiegend Wasserstoff produziert. Nun war ein kleiner Unterschied im angezeigten Druck bei der benachbarten SL-5.8 m-Pumpe sichtbar, wenn die integrierte Pumpe ausgeschaltet wird. Mit Hilfe des Modells und der Druckprofilrechnung konnte so schließlich die Pumpleistung bestimmt werden, indem der Druckverlauf durch Anpassen an die gemessenen Drücke in der Nachbarschaft bei Variation der im Modell angenommenen Pumpleistung der integrierten Pumpe berechnet wurde. Das Resultat ist in Abb. 12 zu sehen. Es konnte so eine Saugleistung¹ von (300 ± 80) l/s bestimmt werden, wobei jedoch ein systematischer Fehler durch das Modell nicht bestimmt werden kann.

Die Funktion der integrierten Pumpe konnte also bestätigt werden.

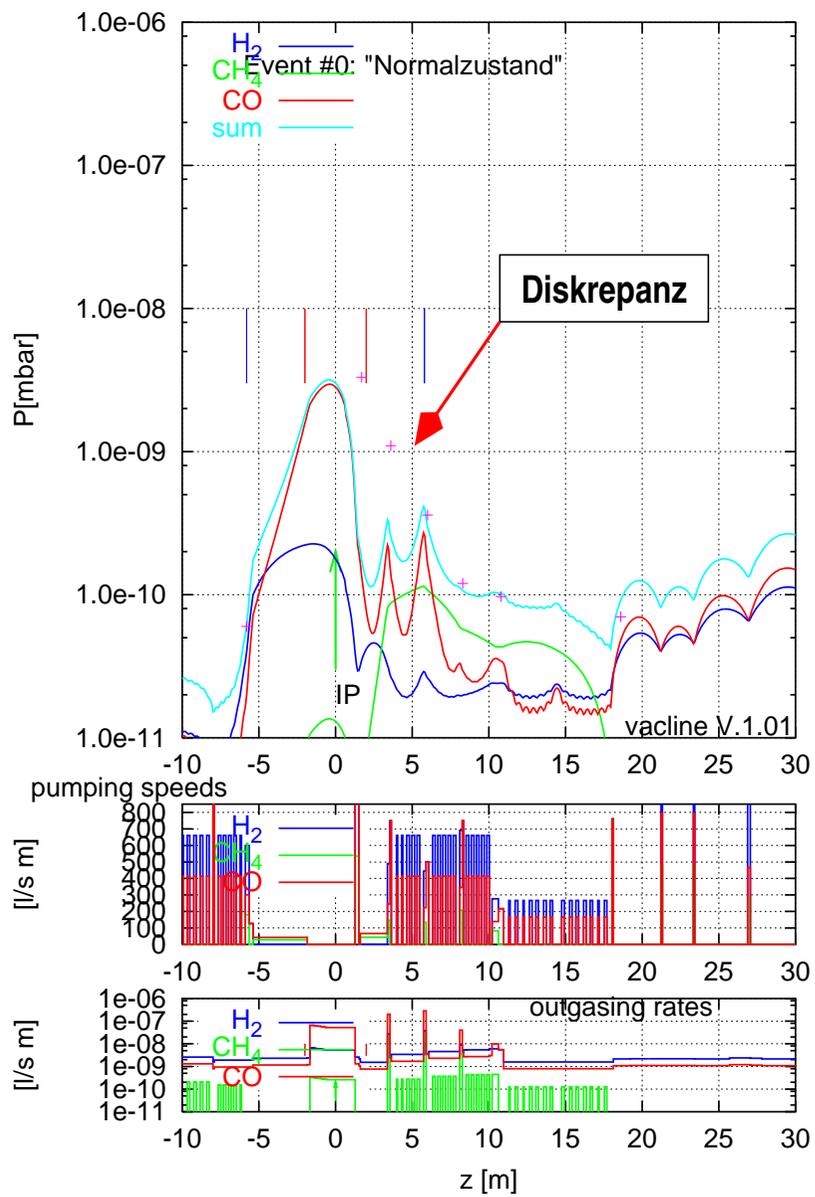
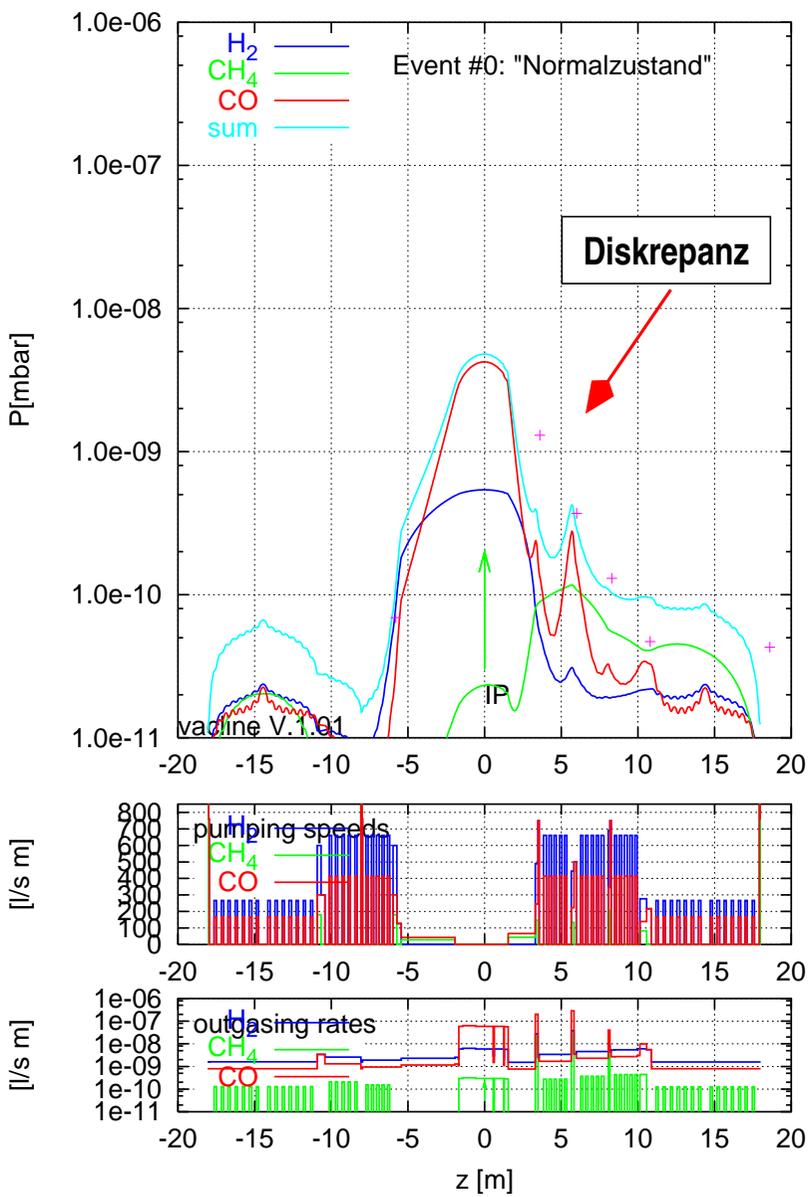


Abbildung 11: Die Wechselwirkungszone bei ZEUUS (oben) und H1.

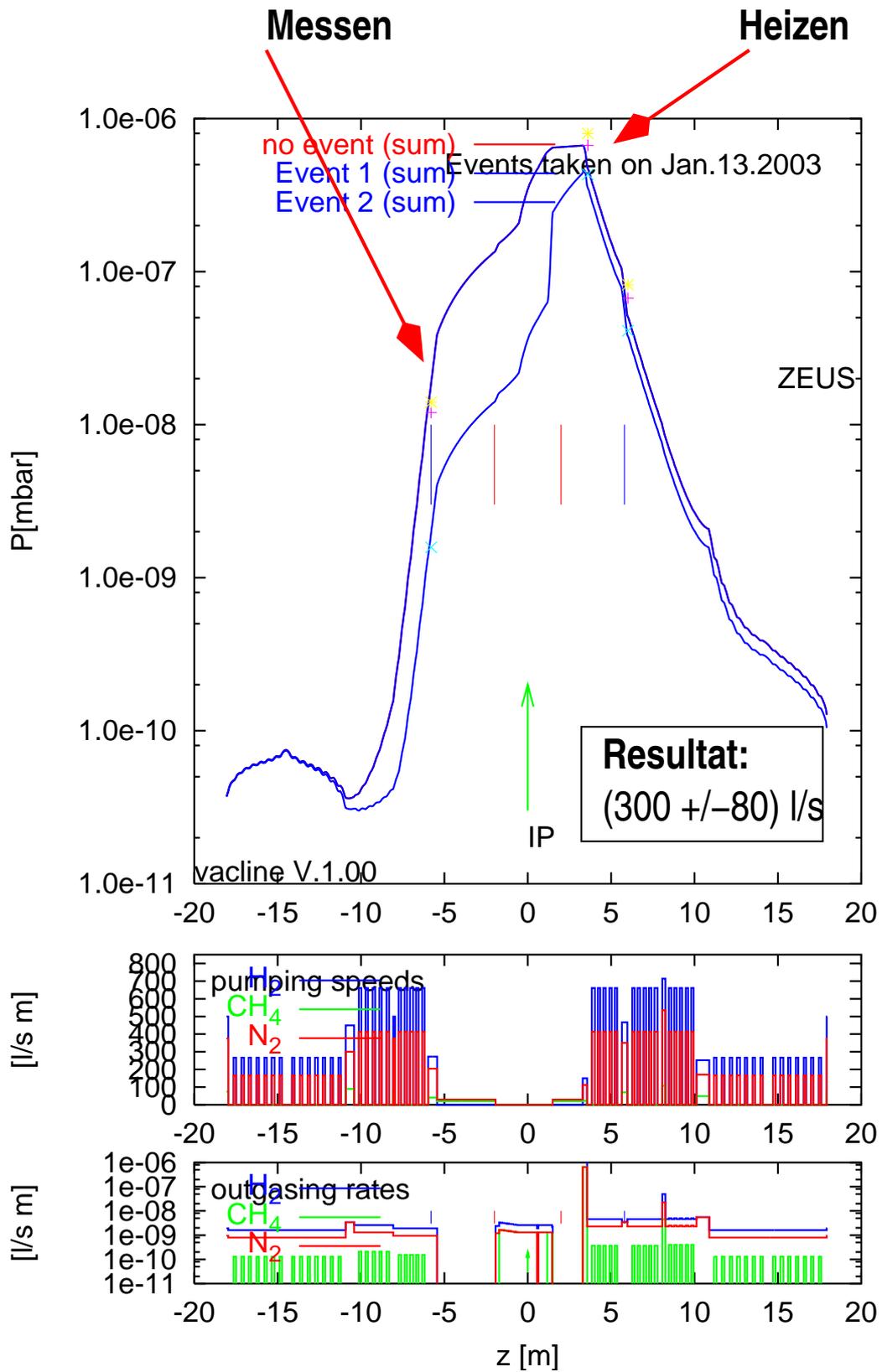


Abbildung 12: Bestimmung der Pumpleistung der Integrierten Pumpe bei ZEUS

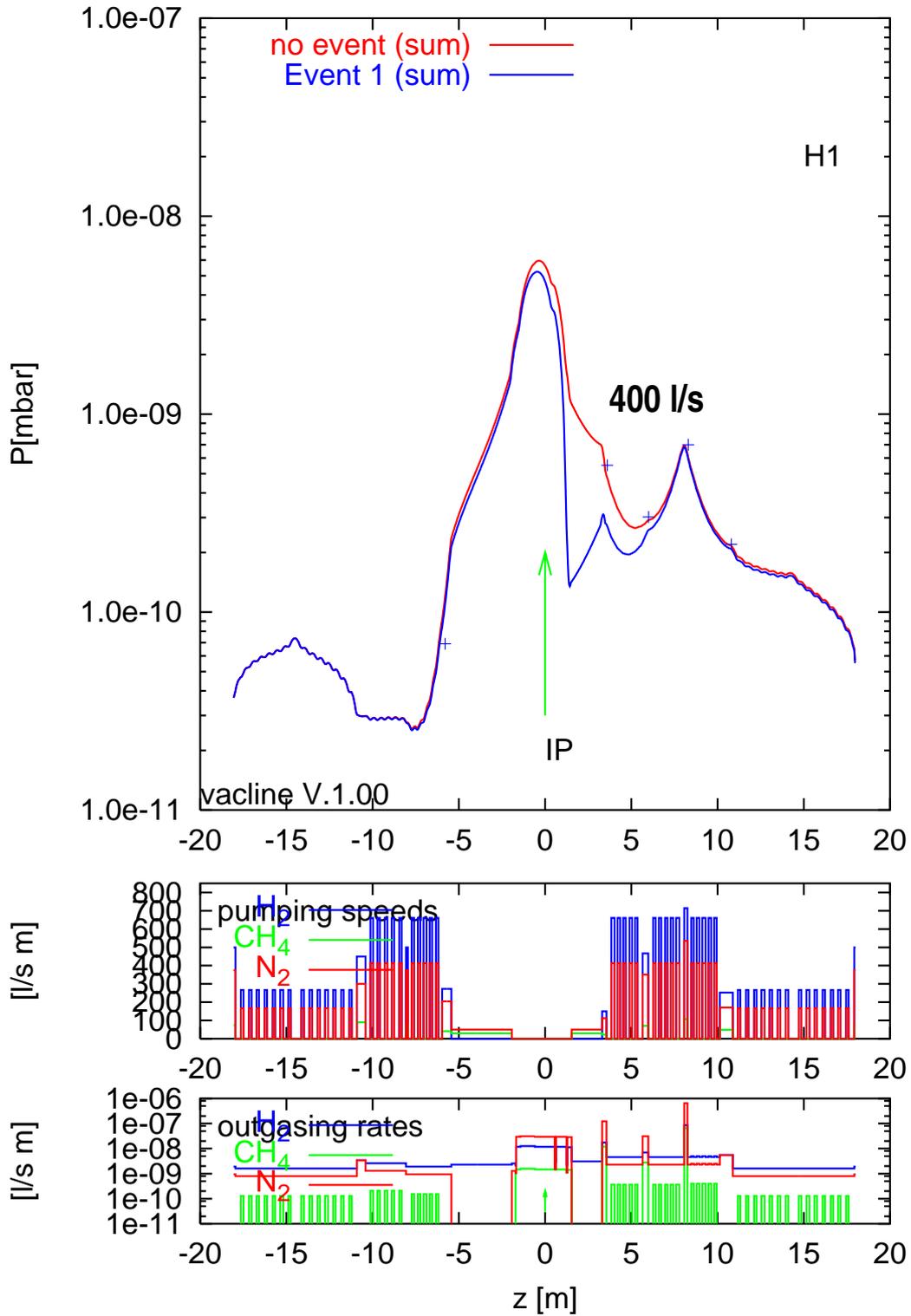


Abbildung 13: Vorhersage der Wirkung der geplanten neuen integrierten Pumpe bei H1.

8.5 Vorhersage der Wirkung der neuen Integrierten Pumpe bei H1

Mit Hilfe des Modells für die Wechselwirkungszone bei H1 kann auch die Wirkung einer im zentralen Strahlrohr (bei 1.5 m) installierten zusätzlichen Ionen-Getter-Pumpe ähnlich wie bei ZEUS berechnet werden. Bei einer angenommenen Nenn-Saugleistung von 400 l/s ergibt sich ein Unterschied in den erwarteten Druckprofilen wie in Abb. 13 gezeugt. Die rote Kurve zeigt die Situation ohne zusätzliche Pumpe, die blaue die mit. Die Verbesserung des Drucks beschränkt sich im Wesentlichen auf die rechte Seite, was auch zu erwarten war, da das innere Strahlrohr zum Abschirmen der Synchrotronstrahlung zahlreiche Apertureinschränkungen hat, welche die Leitfähigkeit stark einschränken.

Dennoch ist die rechte Seite möglicherweise Hauptquelle für die in dem Experiment beobachtete hohe Untergrundraten, die u.a. durch Streuung von am Absorber 4 zurückreflektierte Synchrotronstrahlung am Restgas entsteht.

9 Zusammenfassung

Druckprofilrechnungen sind nun also im Prinzip möglich und auch für spezielle Fragestellungen bei HERA brauchbar. Die Rechnungen können den Gewinn im Druckverlauf für neu zu installierende Pumpen berechnen und das Funktionieren von Pumpen verifizieren, sowie deren Pumpleistung abschätzen. Auch der Druckverlauf beim Ausheizen von Pumpen (mit somit dominierender Ausgasrate) läßt sich zufriedenstellend modellieren. Wegen der unzureichend bekannten Ausgasraten im normalen Betrieb von HERA lassen sich allerdings absolute Drücke und genaue Druckverläufe speziell in den Wechselwirkungszone nicht bestimmen. Hier darf man also keine Wunder erwarten. Untersuchungen zur Methanproduktion durch Synchrotronstrahlung und den katalytischen Effekt der NEG-Pumpen stehen noch aus¹. Auch ist das Verständnis der Einflüsse der kalten Magnete noch nicht ausreichend. Hier werden experimentelle Untersuchungen notwendig.

¹Diese Angabe bezieht sich ebenfalls – wie üblich – auf Stickstoff. Da der Wert allerdings mit Hilfe von hauptsächlich Wasserstoff gefunden wurde, geht der Effektivitätsfaktor der Saugleistung für Wasserstoff (1.5) voll ein, welcher aber nur ein Richtwert darstellt. Außerdem könnte die unbekannte Effektivität der Druckmessung bei Wasserstoff nicht berücksichtigt werden.

¹Zur Zeit des Salzaus-Seminars waren die Untersuchungen, welche nun in [15] zusammengefaßt sind, noch nicht bekannt. (Anm. d. Redaktion)

A Die Pressure Response Matrix

Konzept

In Analogie zur in der Beschleunigerphysik üblichen Orbit-Response-Matrix kann man bei genügend vielen Manometern im Vakuumsystem eine *Pressure Response Matrix* (PRM) aufstellen. Diese kann unter anderem direkt am Vakuumsystem gemessen werden, und somit erhält man einen direkten Vergleich zum Modell.

Angenommen, im Vakuumsystem gibt es n Manometer, welche die Drücke P_i anzeigen, und m mögliche Quellen für Gas-Last, welche durch die Ausgasflüsse Q_j beschrieben werden können.

Die Druckerhöhungen $\Delta\vec{P}$ an allen Meßstellen, verursacht durch eine Veränderung der Ausgasraten $\Delta\vec{Q}$, können dann mit Hilfe der PRM bestimmt werden:

$$\Delta\vec{P} = M\Delta\vec{Q} \quad .$$

Die Definition der *Pressure Response Matrix* (PRM) lautet allgemein:

$$M = \begin{pmatrix} \frac{dP_1}{dQ_1} & \frac{dP_1}{dQ_2} & \cdots & \frac{dP_1}{dQ_m} \\ \frac{dP_2}{dQ_1} & \frac{dP_2}{dQ_2} & \cdots & \frac{dP_2}{dQ_m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{dP_n}{dQ_1} & \frac{dP_n}{dQ_2} & \cdots & \frac{dP_n}{dQ_m} \end{pmatrix}$$

Sie ist nicht notwendigerweise quadratisch.

Wäre die PRM quadratisch (und nicht singular), so könnte man mit Hilfe ihrer Inversen auch aus (evtl. gemessenen) Druckanstiegen auf evtl. vorhandene zusätzliche Gaslasten (z.B. Lecks oder Synchrotronlicht-Desorption) schließen.

$$\Delta\vec{Q} = M^{-1}\Delta\vec{P} \quad .$$

In den meisten Fällen ist die PRM jedoch hochgradig nichtquadratisch, da es sehr viel mehr Stellen mit potentieller Ausgasung gibt, als Druck-Meßgeräte.

Im Falle von nichtquadratischen und/oder singulären Matrizen kann zur sinnvollen Invertierung der Matrix die Singulärwertverlegung (SVD) verwendet werden. $M^{-1}\Delta\vec{P}$ ergibt dann den Vektor von Ausgasraten aus allen möglichen des mehrdimensionalen Lösungsraums, welcher von einer möglichst gleichmäßigen Verteilung der Raten auf viele Stellen ausgeht.

Das Eigenwertspektrum der PRM

Wenn sinnvoll aufgestellt, birgt die PRM alle meßbaren Eigenschaften des Vakuumsystems. Sie kann mit Hilfe von z.B. Pumpenausheizexperimenten leicht gemessen werden oder eben auch mit Hilfe des Vakuummodells und den Programmen zur Druckprofilberechnung berechnet werden.

Einige Eigenschaften sind aber nicht sofort offensichtlich. Angenommen wir finden einen Vektor $\Delta\vec{Q}$ für den gilt:

$$\Delta\vec{P} = M\Delta\vec{Q} = \lambda\Delta\vec{Q} \quad .$$

Betrachten wir zunächst den Fall $\lambda = 0$. Haben wir einen von $\vec{0}$ verschiedenen Vektor $\Delta\vec{Q}$ gefunden, so ist wahrscheinlich, daß seine Komponenten teils positiv und teils negativ sind. Negative Ausgasflüsse können aber nur durch Pumpen realisiert werden. Dieser Vektor besagt nun, daß es bestimmte Stellen gibt, an denen Gas ausgasen kann, die mit bestimmten zusätzlichen Pumpleistungen an anderen Stellen kompensiert werden können, ohne daß man an den Druckmeßstellen einen Unterschied sieht (Natürlich kann sich der Druck an den unbeobachteten Stellen wohl ändern.).

Gibt es weitere Eigenwerte $\lambda \neq 0$ (die falls vorhanden alle positiv sein dürften), so gibt dies evtl. einen Hinweis darauf, daß das Vakuumsystem in mehrere unabhängige Teile zerfällt.

Literatur

- [1] M. Michel, *Überlegungen zum Ultrahoch-Vakuumsystem für DELTA* , Diploma Thesis, Universität Dortmund, (1988)
- [2] K. Kanazawa, *On the pressure distribution of a ring accelerator: A Green's function approach*, J. Vac. Sci. Technol. A 6 (5), 3003, Sep/Oct 1998
- [3] H. Hirano et al., *Matrix calculation of pressures in high-vacuum systems*, J. Vac. Sci. Technol. A 6 (5), 2865, Sep/Oct 1998
- [4] M. Michel, *Calculation of pressure profiles in accelerators using a matrix method*, Nucl. Instr. Meth. A, 0168-9002/92, (1992)
- [5] V. Ziemann, *Vacuum Tracking* , SLAC-PUB 5962, (Oct. 1992) und PAC93
- [6] M.K. Sullivan, *A Method for Calculating Pressure Profiles in Vacuum Pipes* , AP Note 94.06, (Feb. 1993)
- [7] M. Sullivan, *A Method for Calculation Pressure Profiles in Vacuum Pipes* , SLAC PEP-II AP-Note-94.06, (March 1994)
- [8] N. Marquardt, *Introduction to the Principles of vacuum physics*, CERN-99-05, (1999)
- [9] M. Seidel, *The Upgraded Interaction Regions of HERA* , DESY HERA-00-01, (April 2000)
- [10] G.B. Bowden, *RF Accelerator Pressure Profile by Monte Carlo* , Linear Collider Collaboration Tech Notes, LCC-0078, (May 2002)
- [11] M. Seidel, *Report on HERA Vacuum Status and Modifications in Preparation for the Shutdown 2003* , DESY HERA, (Dec. 2002)
- [12] V. Andreev et al. *Further Report on the Beam-Induced Backgrounds in the H1 Detektor* , H1 note H1-01/03-607, (Jan 2003)
- [13] A. Antonov et al. *Study of beam-induced backgrounds in the ZEUS detector from 2002 HERA running* , ZEUS-02-027, (Jan 2003)
- [14] M. Hoffmann, *Untersuchungen zur Strahllebensdauer bei HERA-e*, DESY HERA 03-11, Contribution to the Workshop on HERA Performance, Salzgau, Germany, May 2003
- [15] 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