

Beschleuniger-Experiment-Bericht	U. Weinrich, 16.07.02
Messung von Druckanstieg und Lebensdauer im Uran-Betrieb	
Teilnehmer: B. Franczak, W. Kaufmann, H. Reeg, H. Reich-Sprenger, P. Schütt, U. Weinrich	
Verteilerliste: N. Angert, K. Blasche, O. Boine-Frankenheim, P. Forck, B. Franczak, B. Franzke, W. Kaufmann, E. Mustafin, A. Peters, H. Reeg, P. Schütt, P. Spiller, UHV-Gruppe	

### Lebensdauermessungen von U<sup>73+</sup> von U<sup>28+</sup> bei Einschussenergie

Ziel der Messung war die Ermittlung der Lebensdauer der beiden Strahlarten bei Einschussenergie in das SIS bei gleichzeitiger Messung des Totaldruckes.

Es war angestrebt, die Strahlintensität so niedrig zu halten, dass keine dynamische Druckerhöhung mit einhergehender schwankender Lebensdauer stattfand. Aus diesem Grunde wurden für jede Strahlart mehrere Messungen bei unterschiedlicher Einschussintensität vorgenommen. Darüber hinaus wurden Einschussverluste durch eine reduzierte Länge des Chopperfensters verringert und die Strahlintensität im Transferkanal gemessen.

Die Einschussenergie wurde zu 8.72 MeV/u für U<sup>28+</sup> und 11.17 MeV/u für U<sup>73+</sup> gemessen.

Der Abstand zwischen zwei Messungen betrug 6.8 s.

Die folgenden Messergebnisse wurden erzielt:

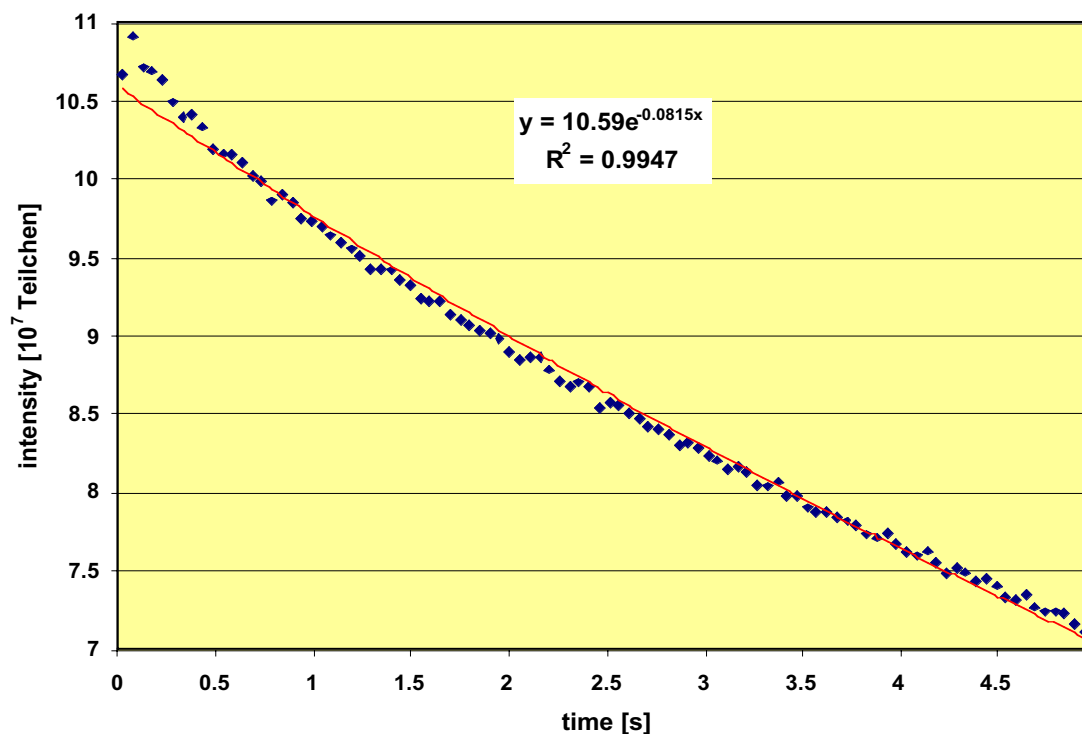


Figure 1 Lebensdauermessung bei gespeicherter Intensität von  $1.1 \cdot 10^8$  U<sup>73+</sup>

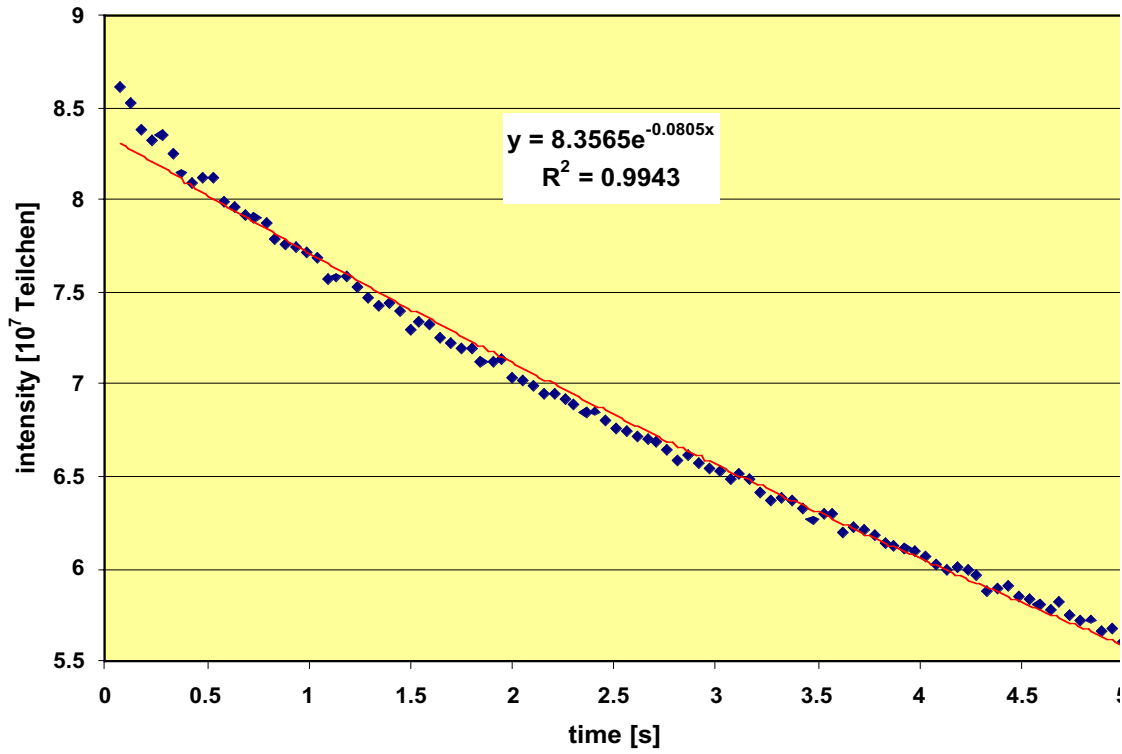


Figure 2 Lebensdauermessung bei gespeicherter Intensität von  $8.6 \cdot 10^7 U^{73+}$

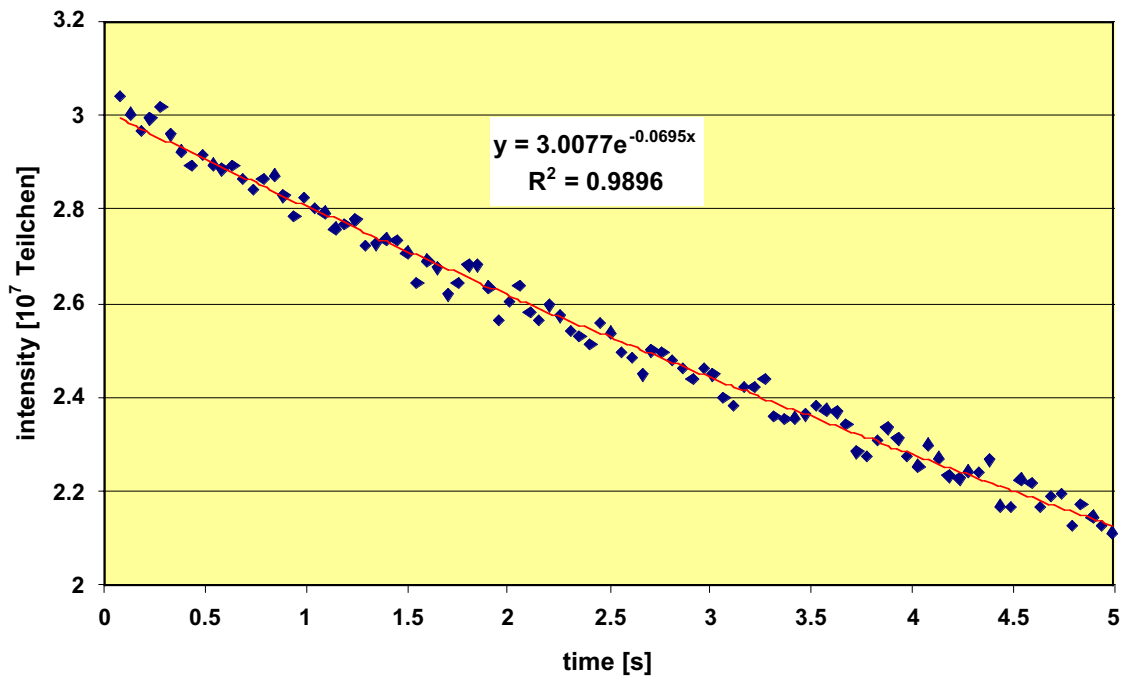


Figure 3 Lebensdauermessung bei gespeicherter Intensität von  $3.0 \cdot 10^7 U^{73+}$

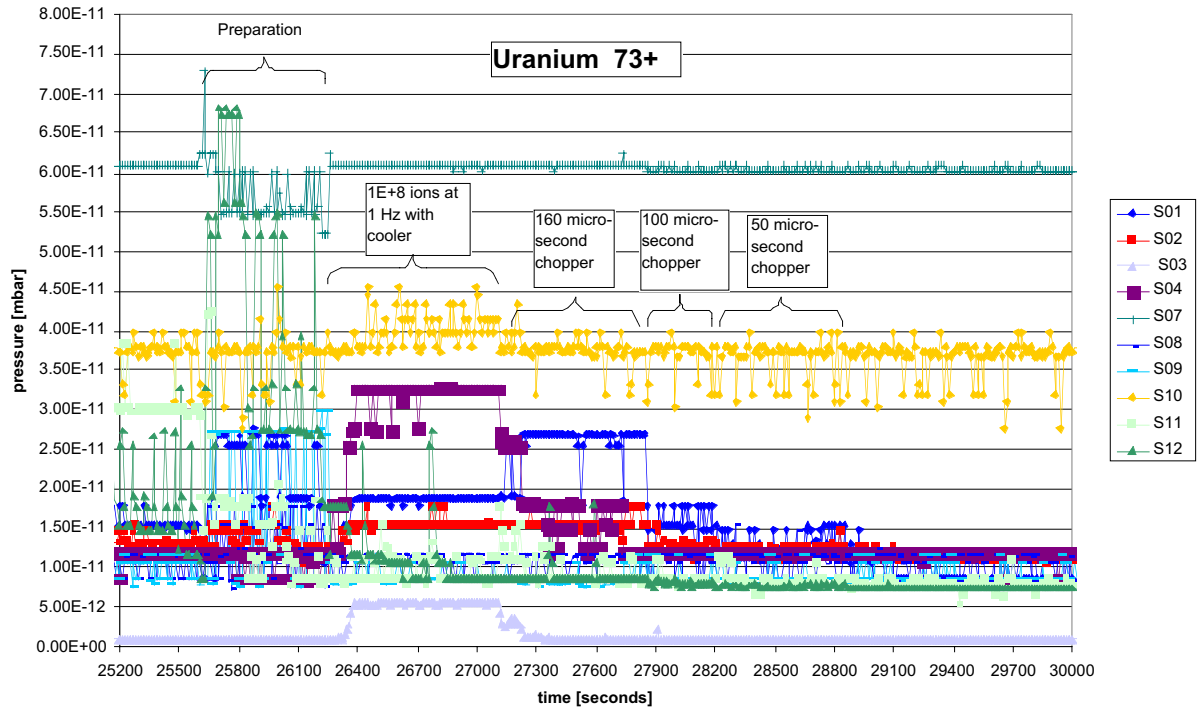


Figure 4 Totaldruckmessung während der Lebensdauermessungen mit  $U^{73+}$

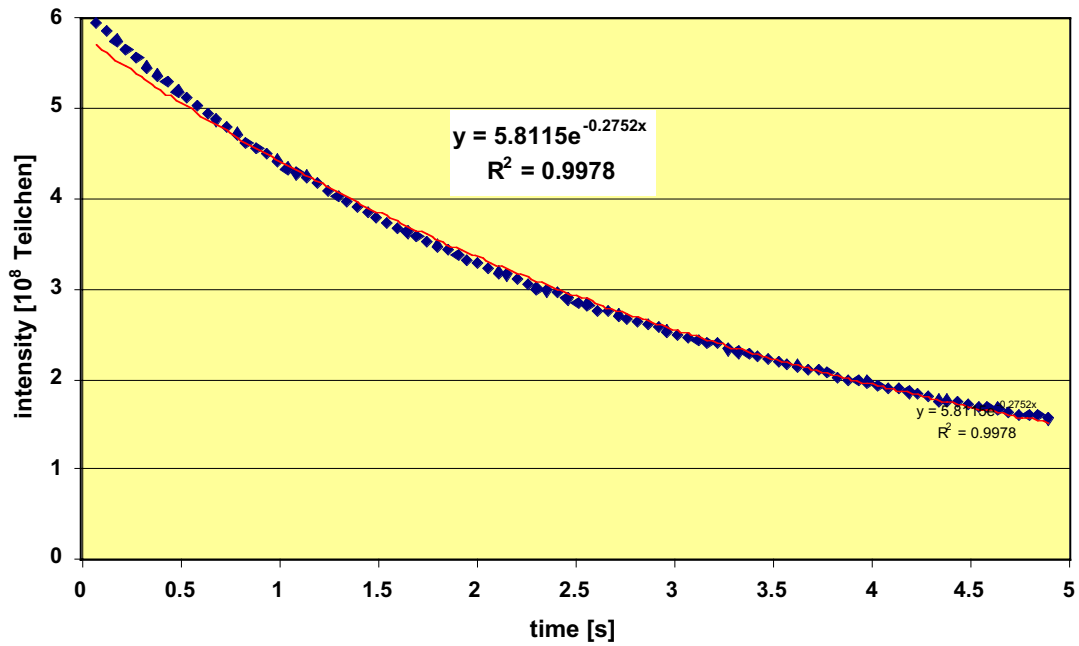


Figure 5 Lebensdauermessung bei gespeicherter Intensität von  $5.9 \cdot 10^8 U^{28+}$

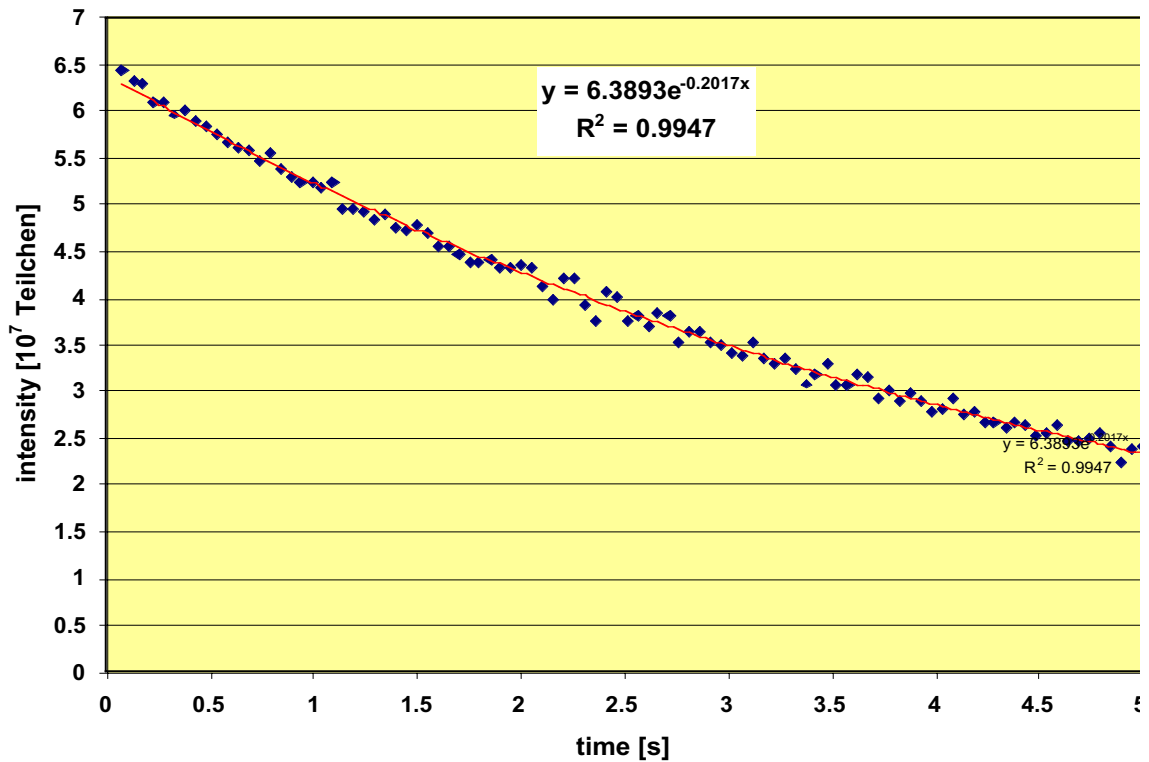


Figure 6 Lebensdauerermessung bei gespeicherter Intensität von  $6.5 \cdot 10^7 U^{28+}$

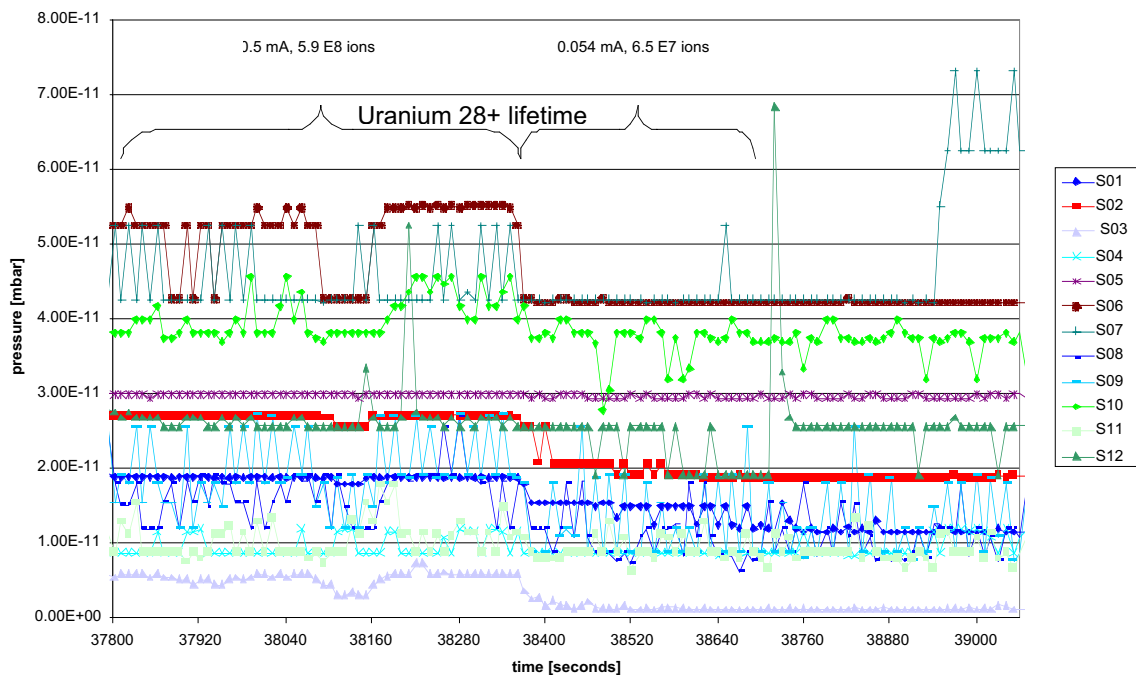


Figure 7 Totaldruckmessung während der Lebensdauerermessungen mit  $U^{28+}$

Man kann aus den Graphen der Totaldruckmessungen einige Schlüsse ziehen. Zunächst einmal fällt auf, dass es trotz der moderaten Einschussintensitäten zu erheblichen lokalen Druckanstiegen kommt – und dies für beide Strahlarten. Dabei treten die Druckanstiege in mehreren Sektoren auf und variieren zum Teil gewaltig. **Es muss daher davon ausgegangen werden, dass die Strahlverlustpositionen sehr von der jeweiligen Einstellung der Maschine abhängen und an vielen Stellen auftreten.**

Aus den jeweiligen Messungen wurde die mittlere Ionenverlustrate, der mittlere Druck im SIS und die jeweilige Lebensdauer bestimmt. Dabei wurde die Ionenverlustrate aus der Kenntnis der Strahlintensität im Transferkanal, der Pulslänge und der Einschussfrequenz ermittelt. Die angegebenen Druckwerte sind die Mittelwerte aller Extraktorröhren. Dabei sollte beachtet werden, dass der wirkliche mittlere Druck darüber liegt. Die Diskrepanz kann dabei von ca. 50% bei Wasserstoff dominiertem Druck bis zu einem Faktor 3 für Stickstoff dominierten Druck reichen.

Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Gesp. Strahl	Verlustrate [ $10^7 \text{ s}^{-1}$ ]	Druck [ $10^{-11} \text{ mbar}$ ]	Lebensdauer [s]
Kein Strahl		1.96	
$1.1 \cdot 10^8 \text{ U}^{73+}$	2.2	2.22	12.3
$8.6 \cdot 10^7 \text{ U}^{73+}$	1.6	2.03	12.4
$3.0 \cdot 10^7 \text{ U}^{73+}$	0.88	1.99	14.4
$5.9 \cdot 10^8 \text{ U}^{28+}$	11.4	2.62	3.6
$6.5 \cdot 10^7 \text{ U}^{28+}$	1.2	2.13	5.0

**Table 1** Verlustraten, Totaldruck und Lebensdauer

Man erkennt, dass die Messungen bei Verlustraten vorgenommen wurden, bei denen es gerade zu einem leichten Druckanstieg und entsprechend erniedrigter Lebensdauer kommt. Die Daten lassen sich daher sehr gut als Referenz für die Lebensdauer als Funktion des Druckes verwenden. Aufgrund des vorhanden geringen Drucksanstieges lassen sich darüber hinaus jedoch auch Prognosen für den Druckanstieg aufgrund von ioneninduzierter Desorption erstellen- allerdings mit sehr viel größerem Fehler. Die ermittelten Werte sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

	U <sup>73+</sup>	U <sup>28+</sup>
Druckanstieg [mbar/Teilchen/s]	7.2 10 <sup>-20</sup> ± 63%	9.9 10 <sup>-20</sup> ± 41%
Lebensdauer · Druck [s · mbar]	2.7 10 <sup>-10</sup> ± 6%	1.0 10 <sup>-10</sup> ± 6%
Druck (10 s Lebensdauer) [mbar]	2.7 10 <sup>-11</sup> ± 6%	1.0 10 <sup>-11</sup> ± 6%
Druck (10 <sup>11</sup> Teilchen/s) [mbar]	7.2 10 <sup>-9</sup> ± 63%	9.9 10 <sup>-9</sup> ± 41%
Druckverhältnis	267 ± 63%	990 ± 41%

**Table 2 Aus der Messung ermittelte Daten für den dynamischen Druck**

Der Druckanstieg wurde aus der Druckdifferenz zum Druck ohne Strahlverluste bestimmt und in Verhältnis gesetzt zu der ermittelten Verlustrate. Die ermittelten Werte sind im Rahmen der Fehlergenauigkeit in etwa gleich für U<sup>28+</sup>-Ionen und U<sup>73+</sup>-Ionen.

Mit der Kenntnis des Kammervolumens im SIS lässt sich aus dem Druckanstieg auch die Zunahme, der sich im SIS-Vakuumsystem befindlichen, Moleküle ermitteln.

Für gleichbleibende Gaskomposition sollte das Produkt aus Totaldruck und Lebensdauer eine Konstante sein. Dies ist in der Tat für jede der beiden Einstellung der Fall gewesen.

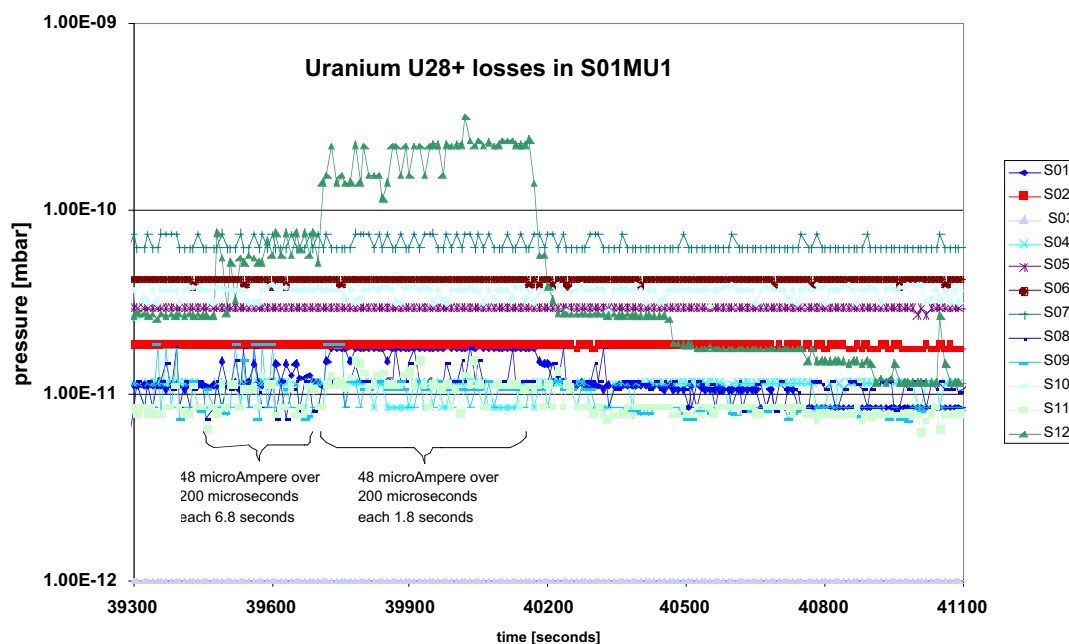
Aus dieser ermittelten Konstante lässt sich dann für die unterschiedlichen Drücke die jeweilige Lebensdauer berechnen. Bei einer Projektion auf hohe Verlustraten ist jedoch mit einer signifikanten Änderung der Gaszusammensetzung zu rechnen.

Die Frage ist, was die ermittelten Werte für Rückschlüsse auf den Hochstrombetrieb zulassen. Dazu wurde folgende vereinfachte Abschätzung vorgenommen: Bei einer projektierten Injektionsrate von 1·10<sup>12</sup> U<sup>28+</sup>-Ionen pro Sekunde und Strahlverlusten im 10% Bereich ergibt sich eine Strahlverlustrate von 1·10<sup>11</sup> Ionen pro Sekunde. Im gegenwärtigen Zustand des SIS ist bei einer solchen Verlustrate mit einem Druck von in etwa 1·10<sup>-8</sup> mbar zu rechnen. Andererseits erhält man bei einer Lebensdauer von 10 Sekunden in etwa 10% Strahlverlust pro Sekunde. Ermittelt man aus den Messwerten den Druck bei dem eine Lebensdauer für U<sup>28+</sup>-Ionen von 10 Sekunden zu erwarten ist so ergibt sich ein Wert von 1·10<sup>-11</sup> mbar. Zwischen den beiden Druckwerten liegen drei Größenordnungen.

**Aus den Messungen lässt sich schlussfolgern, dass der Druckanstieg durch ioneninduzierte Desorption in etwa um drei Größenordnungen im Vergleich zur aktuellen Situation vermindert werden muss, um bei 1·10<sup>12</sup> eingeschossenen U<sup>28+</sup>-Ionen pro Sekunde den Strahlverlust durch Stöße mit dem Restgas auf 10% zu begrenzen.**

### Schnelle Druckmessungen bei lokalen Verlusten von $U^{28+}$ bei Einschussenergie

Ziel der Messung war die Messung des Anstieges von Total- und Partialdruck bei lokalisierten Verlusten von  $U^{28+}$ -Ionen. Zu diesem Zweck wurde bei Beibehaltung der sonstigen Parameter der Strom in den Dipolen auf 80 A begrenzt. Dies hat zur Folge, dass der komplette Strahl am Ende des Dipols SU1MU1 die Dipol-Vakuumkammer auf der Außenseite trifft. Zunächst einmal wurde diese Einstellung vorgenommen und die Extraktorröhren im 10 Sekundentakt ausgelesen. Danach wurden im Rahmen einer Tunnelintervention drei schnelle Druckmessungen und eine Partialdruckmessung in Betrieb genommen. Dies ging nur, in dem die Normalauslese der Extraktorröhren in S12DK5 und S06DK5 gestoppt wurde. Die schnellen Druckmessungen fanden in S12DK5, S01VK4 und S06DK5 statt. Die Partialdruckmessung wurde in S01VK4 gestartet. Ein Teil der Ergebnisse ist in dem folgenden Graphen zu sehen.



**Figure 8** Totaldruckmessung während der lokalisierten Verluste von  $U^{28+}$

Zunächst einmal fällt auf, dass der Druckanstieg sehr lokalisiert blieb. Nur die Messröhre S12DK5, die in etwa 4 m von der Einschlagstelle der Ionen entfernt liegt zeigt deutliche Druckanstiege. Der Druckanstieg ist dort um eine Größenordnung höher als bei S01VK4, das in etwa 10 m entfernt liegt. In diesem Fall liegen auch noch zwei Pumpkammern mit jeweils einer Ionenzerstäuber- und einer Titansublimationspumpe dazwischen.

Bei der schnellen Druckmessung werden die geringen Ströme, die von den Extraktorröhren ausgesandt werden aufintegriert und bei Erreichen einer bestimmten Ladung als Puls gesandt. Es ergibt sich somit eine Folge von Pulsen. Der Strom den eine Extraktorröhre aussendet ist proportional zum gemessenen Druck. Die Frequenz der Pulsfolge ist somit ein direktes Maß für den Druck. Die Pulsfolge ist auf einen Oszillograph im HKR gegeben und dann abgespeichert wurden. Die entsprechenden Daten wurden dann in eine EXCEL-Datei übertragen. Ein Teil der Ergebnisse ist in den folgenden Graphen zu sehen.

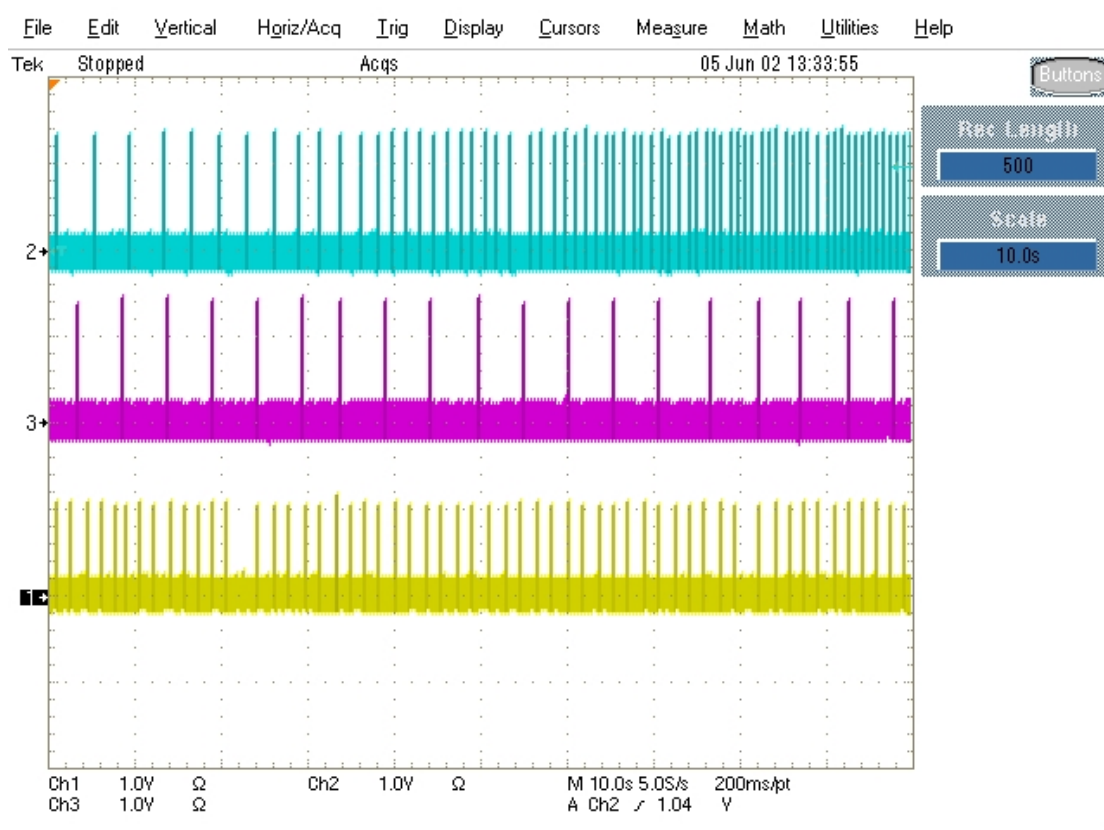


Figure 9 Anzeige der schnellen Druckmessung während der Druckanstiegsphase. Die Reihenfolge der Stationen ist von oben nach unten S12, S01 und S06

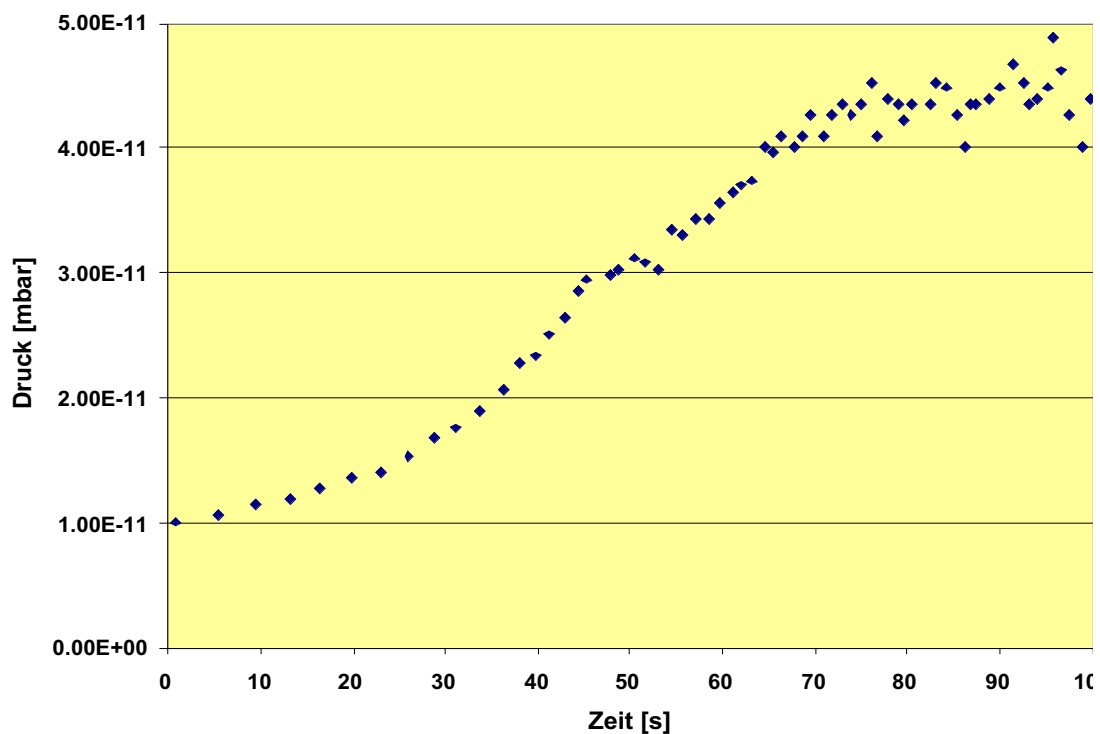
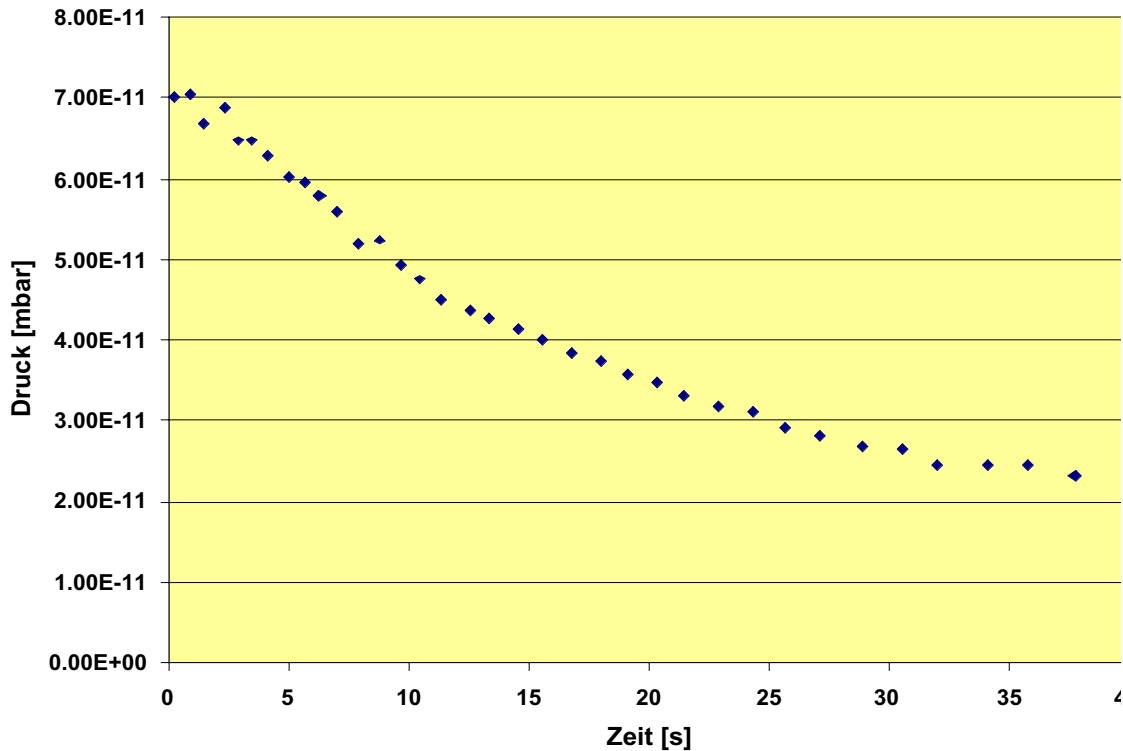


Figure 10 Druckanstieg bei S12DK5 während der lokalisierten Verluste von  $U^{28+}$ . Der Startdruck gibt die Situation ohne Strahl wieder, der Enddruck das Gleichgewicht bei einer kontinuierlichen Injektion alle 1.8 Sekunden.



**Figure 11 Druckabfall bei S12DK5 während der lokalisierten Verluste von  $U^{28+}$ . Hier wurde nach Erreichen des Druckgleichgewichtes die Injektion abgestellt.**

Zur Auswertung wurde der maximale Druckanstieg bestimmt. Daraus lässt sich mit einer Abschätzung des Kammervolumens eine Ausgasrate ermitteln. Setzt man diese in Bezug zu der ermittelten Ionenverlustrate, so kann man einen Desorptionskoeffizienten ermitteln.

Es lassen sich folgende Werte ermitteln:

Maximaler Druckanstieg:	$6.9 \cdot 10^{-13}$ mbar/s
Ausgasrate:	$6.2 \cdot 10^{12}$ Teilchen/s
Verlustrate:	$1.2 \cdot 10^9$ Teilchen/s
Desorptionskoeffizient:	5200

Der ermittelte Desorptionskoeffizient ist sehr ungenau, da sehr schwer abzuschätzen ist, über welches Kammervolumen sich die freigesetzten Teilchen ausbreiten.

Bei einer abrupten Veränderung der Desorptionsrate ändert sich der Druck von Ausgangsdruck  $p_1$  zum Enddruck  $p_2$  gemäß der folgenden Formel:

$$p(t) = p_1 \cdot e^{-S/V \cdot t} + p_2 \cdot (1 - e^{-S/V \cdot t})$$

S ist dabei die installierte effektive Pumpleistung, die das Kammervolumen V abpumpt. Der Druckanstieg/abfall folgt danach folgendem zeitlichen Verhalten.

$$\frac{dp(t)}{dt} = \frac{S}{V} (p_2 - p_1) \cdot e^{-S/V \cdot t}$$

Die Zeitskala auf der sich die Druckanpassung einstellt ist S/V. Es fällt auf, dass die Druckanpassung sich auf der Zeitskala von einer Minute befindet. Der folgende Zahlenwert wurde aus den beiden oben dokumentierten Messungen zum Druckanstieg und Druckabfall ermittelt:

$$\frac{S}{V} = 3 \cdot 10^{-2} \pm 1 \cdot 10^{-2} \frac{l/s}{l}$$

Legt man einmal das Kammervolumen eines Vakuumsektors mit ca. 342 l zu Grunde so ergibt sich eine Pumpleistung von ca. 10 l/s. Dies ist ein erstaunlich niedriger Wert angesichts der installierten externen Pumpleistung der Titansublimationspumpen von bis zu 8000 l/s. Die Erklärung könnte

vielleicht daher kommen, dass die Pumpleistung für Edelgase wie Argon bei nur ca. 20 l/s pro Sektor liegt. Es wäre daher vorstellbar, dass die gemessenen Druckveränderungen durch Argon dominiert waren. Sieht man sich z.B. die Lebensdauermessungen genauer an, so erkennt man durchaus einen deutlich stärkeren Intensitätsabfall während der ersten halben Sekunde nach Einschuss. Auf der schnellen Druckmessung allerdings ist dieses nicht zu erkennen gewesen. Hier ist darauf hinzuweisen, dass während vorausgegangener Messungen bei höherer Strahlintensität unterschiedliche Zeitskalen des Druckabfalls beobachtet wurden.

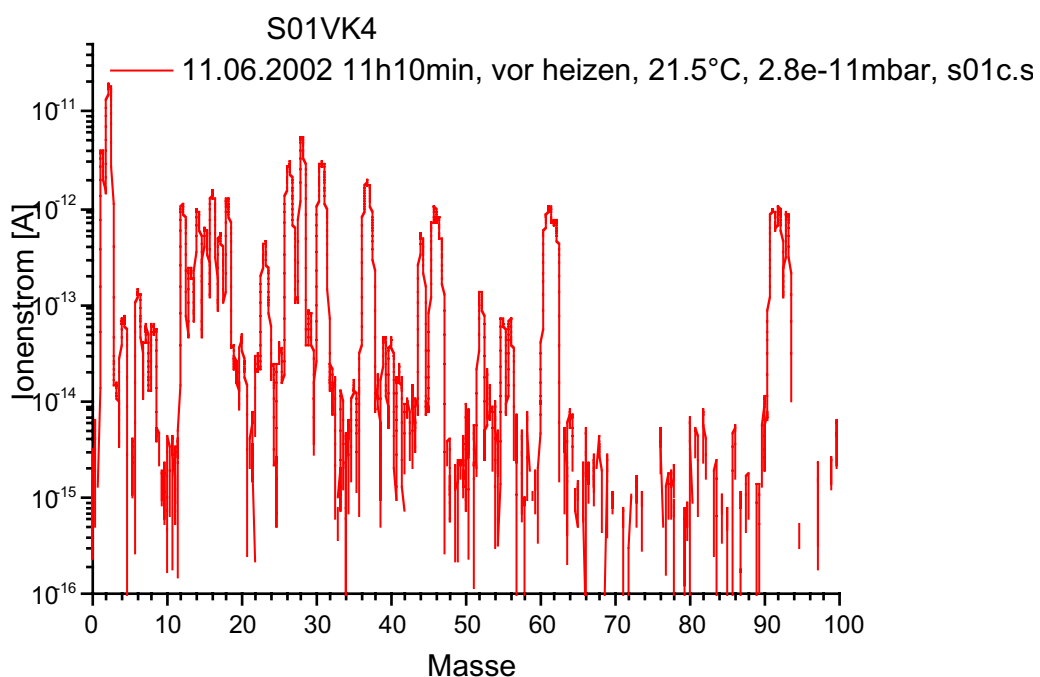
Insgesamt legen die unterschiedlichen Messungen die Vermutung nahe, dass es aufgrund der gasspezifischen Pumpleistung zu deutlich unterschiedlichem dynamischen Druckverhalten kommt. So ist z.B. durchaus denkbar, dass sich das Freisetzen von Kohlenmonoxid nur innerhalb des entsprechenden SIS-Zyklus auswirkt und damit von der Anzahl der Ionenverluste pro Zyklus dominiert wird. Der Argondruck hingegen wird wohl eher von der mittleren Ionenverlustrate bestimmt, da er sich über viele Zyklen aufbaut. Dies hätte dann eine Reihe von Konsequenzen:

Aufgrund der niedrigeren Pumpleistung könnte z.B. ein Argonanteil von wenigen Prozent bei der Ioneninduzierten Desorption durchaus die Lebensdauer dominieren. Andererseits ließen sich dennoch sehr hohe Strahlintensitäten pro Puls erzielen, wenn die Pulsabstände groß gewählt werden. Dies wäre im Falle von aktiven Gasen nicht möglich. Sollte man sich allerdings im Zuge des SIS-Upgrades für eine Erhöhung der Pumpleistung für Edelgase entscheiden, könnte die entsprechende Zeitskala in den Bereich von unter einer Sekunde rutschen und somit einzelpulsdominiert werden. **In Zukunft sollten bei der Diskussion des dynamischen Druckes diese gasspezifischen Aspekte stärker berücksichtigt werden.**

## Restgasanalyse

Über die Messung des Totaldruckes hinaus wurde auch eine Messung des Partialdruckes in S01VK4 vorgenommen. Der unwesentliche Druckanstieg in S01VK4 führte jedoch dazu, dass während der Messung keine signifikanten Partialdruckänderungen zu sehen waren. Während der folgenden Maschinenschichten wurde jedoch durchaus ein erhöhter Kohlenmonoxiddruck gemessen, der auch mit dem Strahlbetrieb korreliert war. Wahrscheinlich haben zu diesem Zeitpunkt offensichtlich auch Strahlverluste in S01 stattgefunden – ähnlich der Situation während der Lebensdauermessungen.

Der Vollständigkeit halber ist eine typische Restgasanalyse bei statischem Druck in S01VK4 im folgenden Bild zu sehen.



**Figure 12 Restgasanalyse des statischen Druckes in S01VK4**

Bei der Interpretation dieser Spektren ist große Vorsicht geboten. Einige der Massenpeaks sind direkt durch das Massenspektrometer selber produziert. So sind die Massen 36,37,45,46,61, 91 und 92 Fragmente der Wolframkathode ( $W^{2+}$ ,  $W^{3+}$ ,  $W^{4+}$ ,  $W^{5+}$ ). Es lassen sich jedoch auf jeden Fall die Fragmente Wasserstoff, Kohlenstoff, Stickstoff, Sauerstoff, Kohlenwasserstoffe, Wasser, Argon, Kohlenmonoxid und Kohlendioxid wiederfinden. Das Spektrum ist reichhaltiger als einer „sauberen“ Vakuumkammer entsprechen würde.

Im Verlauf des Juni-Shutdowns wurden eine Reihe von zusätzlichen Restgasspektren aufgenommen. Die Daten werden derzeit noch analysiert und anschließend zur Diskussion gestellt.