

SIS18-Maschinenexperimente vom 27. Juni 2011 mit Ta²⁴⁺

L. Bozyk, P. Puppel, P. Spiller

Version 1.0
1. August 2011

Am 27. Juni 2011 wurden Maschinenexperimente mit Ta²⁴⁺ durchgeführt. Ziel war Hochstrombetrieb einzustellen und Lebensdauermessungen durchzuführen. 10¹⁰ extrahierte Teilchen konnten wieder schnell erreicht werden, aufgrund von Intensitätslimitierungen vom Unilac (< 1 mA in TK9) konnte diese Intensität jedoch nicht überschritten werden. Es wurden Lebensdauern von ca. 20 s bei Injektion gemessen, welche um den Faktor 2-3 höher liegen, als bisherige Messungen. Weiterhin wurden Lebensdauern bei verschiedenen Energien gemessen, welche alle deutlich höher liegen, als bei vergangenen Messungen. Diese Tatsache wird den NEG-Panels im Injektions-Tank zugeschrieben, welche am Ort des vermeintlich höchsten Druckes im Ring zusätzliche Saugleistung zur Verfügung stellen. Die gemessenen Lebensdauern liegen damit erstmals im von der Theorie vorhergesagten Bereich.

1 Durchführung

Während der Maschinenexperimente am 27. Juni 2011 wurde Ta²⁴⁺ im SIS18 beschleunigt. Es wurde mit 11.45 MeV/u in das SIS18 injiziert. Der Unilac stellte einen Strom von bis zu ca. 1 mA (gemessen in TK9) zur Verfügung. Die Kavitäten wurden mit einer Beschleunigungsspannung von 28 kV betrieben. Die Beschleunigung erfolgte mit einer Ramprate von 4.0 T/s. Die Endenergie der Tantalionen betrug 230 MeV/u. Die verwendeten Basis-Maschineneinstellungen sind Abbildung 1 zu sehen.

Am Morgen vor den Messungen wurde im SIS18 Titan sublimiert. Im Laufe des Tages wurde noch das Restgasspektrometer in S12 neu gestartet, sodass auch hier wieder der Verlauf der Restgaszusammensetzung mitgeschrieben werden konnte. Die Druckmessung stürzte im Laufe des Nachmittags ab, weshalb nur bis ca. 17.00 Uhr Druckdaten zur Verfügung stehen.

Zunächst wurde ab 16.00 Uhr damit begonnen den Hochstrombetrieb einzustellen. Nach kurzer Zeit, gegen 16.50 Uhr wurden bereits die 10¹⁰ extrahierten Teilchen erreicht. Darüber hinaus war aufgrund der eingeschränkten Intensität vom Unilac (< 1 mA) keine weitere Intensitätssteigerung möglich.

Anschließend wurden verschiedene Lebensdauermessungen durchgeführt; zunächst bei Injektionsenergie und im Verlaufe des Abends noch bei weiteren höheren Energien. Hier wurden deutlich längere Lebensdauern gemessen, als bei früheren Messungen. Dies

Abbildung 1: Screenshot der SISMODI-Einstellungen

wird auf die erhöhte Saugleistung im Injektionstank zurückgeführt, welche durch die Installation von NEG-Panels realisiert wurde.

Zum Schluss wurde versucht, diese Annahme zu verifizieren. Dazu wurde mit bewusst schlecht eingestellter Injektion ein Druckanstieg durch Überschläge im Septumstank provoziert. Anschließend wurden für einige Minuten kontinuierlich Lebensdauermessungen durchgeführt. Hier konnte ein Anstieg der Lebensdauer mit der Zeit beobachtet werden, was einem Druckabfall im Injektionstank gleichzusetzen ist.

Die Messungen wurden um 20.11 Uhr beendet.

Die gemessenen Lebensdauern liegen erstmalig im Bereich der simulierten Lebensdauern. Es kann also davon ausgegangen werden, dass der Druck im Septumstank bisher deutlich schlechter war, als angenommen.

Probleme

- Der vom Unilac bereit gestellte Strom in TK9 reichte nicht aus, um neue Intensitätsrekorde zu erzielen.
- Die Druckmessung stürzte während der Maschinenexperimente ab und war nicht mehr verfügbar.

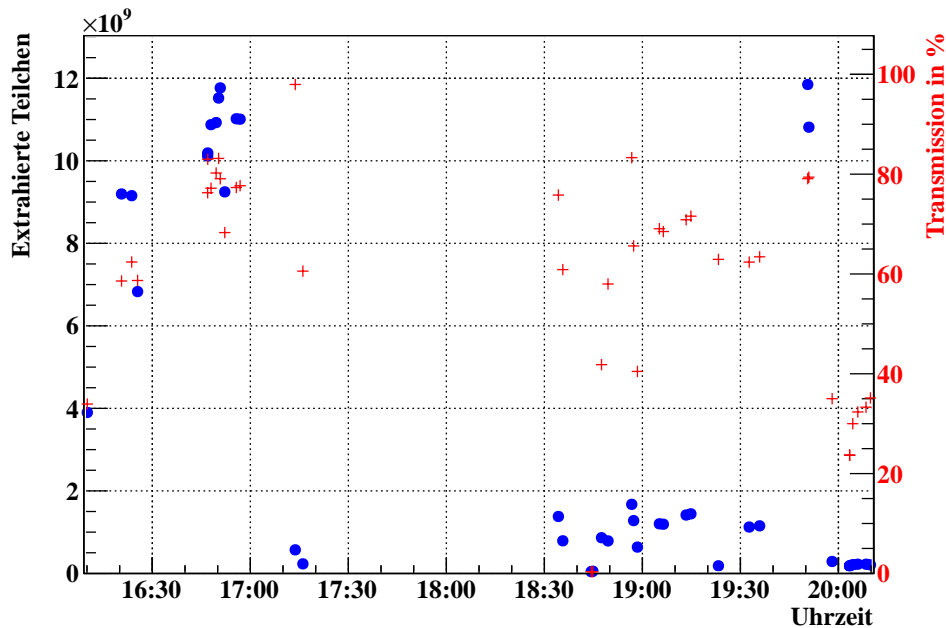


Abbildung 2: Anzahl extrahierter Teilchen (blaue Punkte) und Transmission (rote Kreuze) als Funktion der Uhrzeit.

2 Zeitabhängige Teilchenzahl, dynamisches Vakuum

Im Verlauf des Maschinenexperiments wurden die Maschinen optimiert. Die dabei erreichten extrahierten Teilchenzahlen sind in Abbildung 2 zu sehen. Es war möglich einen stabilen Betrieb mit ca. $1 \cdot 10^{10}$ extrahierten Teilchen einzustellen.

Abbildung 3 zeigt einige im Trafo S07DT_ML gemessene Zyklen. Anders als in vergangenen Maschinenexperimenten führt eine höhere Intensität bei Injektion auch zu einer höheren Intensität bei Extraktion. Die maximal mögliche Teilchenzahl bei Extraktion für die gegebene Maschineneinstellung war offenbar noch nicht erreicht, wie man auch in Abbildung 5 erkennen kann. Auffällig ist die Stufe im Intensitätsverlauf auf der Rampe. Zu dieser Zeit ist auch ein Anstieg in einigen Kollimatorströmen zu sehen (siehe auch Abschnitt 2.2).

In Abbildung 4 ist die Anzahl extrahierter Teilchen als Funktion der injizierten Teilchenzahl aufgetragen. Der Verlauf ist in etwa linear. Für hohe Intensitäten liegt die Transmission bei etwa 80%. Der Verlauf lässt den Schluss zu, dass bei den hier verwendeten Intensitäten noch keine dynamischen Vakuum-Effekte aufgetreten sind. Wäre dies der Fall gewesen, würde die die Anzahl extrahierte Teilchen ein Maximum aufweisen bzw. auf ein Maximum zulaufen.

2.1 Intensitätsabhängige Transmission

Nachdem die Maschineneinstellungen auf Hochstrombetrieb optimiert waren und 10^{10} Teilchen pro Puls extrahiert werden konnten, wurde die Intensität vom Unilac langsam herunter gedreht. Auf diese Weise kann der Zusammenhang zwischen der Anzahl injizierter und extrahierter Teilchen abgefahren werden, ohne die relative Füllung der Akzeptanz durch Verstellen des Chopper-Fensters zu verändern. Das Ergebnis dieser

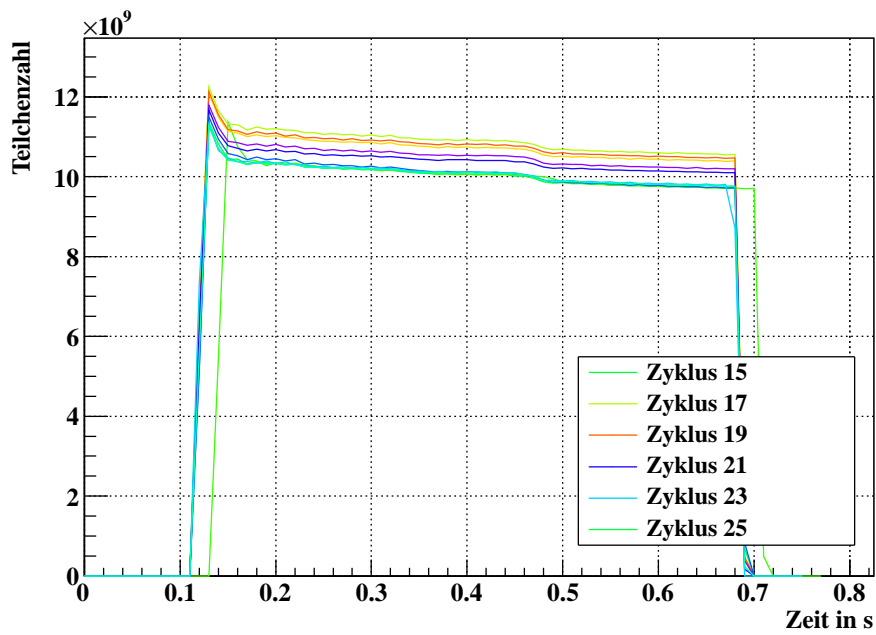


Abbildung 3: Einige im Trafo S07DT_ML gemessene Zyklen

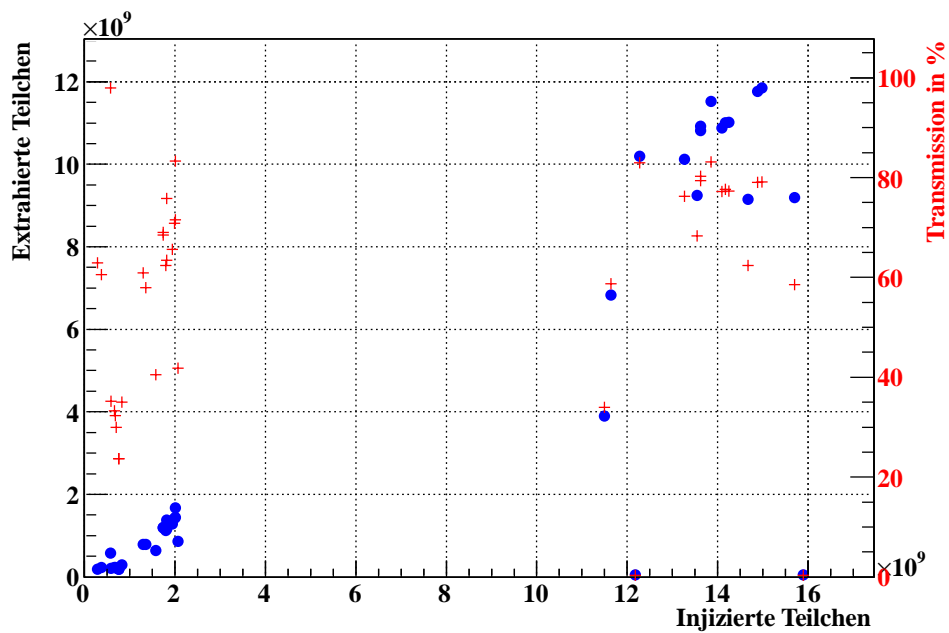


Abbildung 4: Anzahl extrahierter Teilchen über injizierter Teilchenzahl (blaue Punkte) und Transmission, Anzahl extrahierter Teilchen pro injizierter Teilchen (rote Kreuze).

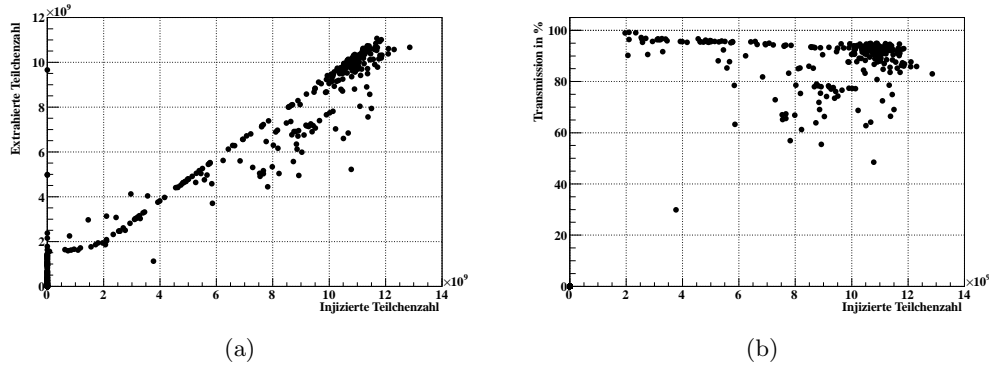


Abbildung 5: (a) Anzahl extrahierter Teilchen als Funktion der injizierten Teilchenzahl. Der Zusammenhang ist linear, es ist keine Sättigung zu erkennen, daher kann davon ausgegangen werden, dass noch keine dynamischen Vakuum Effekte zum Tragen kommen. (b) Transmission als Funktion der injizierten Teilchenzahl

Messung ist in Abbildung 5 zu finden. Die Anzahl extrahierter Teilchen hängt linear von der Anzahl injizierter Teilchen ab, es ist keine Sättigung zu erkennen. Daher kann davon ausgegangen werden, dass bei diesen Intensitäten noch keine dynamischen Vakuum Effekte zum Tragen kommen. Die Transmission (letzter Datenpunkt einer Zyklus-Messung geteilt durch erster Datenpunkt) liegt bei über 90%.

2.2 Kollimatorströme

In Abbildung 6 sind die gemessenen Kollimatorströme eines beliebigen aber typischen Zyklusses in zwei Darstellungen gezeigt. Die Graphen sind nach Innen- und Außenseite sortiert, die Farbdarstellung nach Position. Die Teilchenintensität und Energie über den Plots dient der Orientierung im Zyklus. Folgende Beobachtungen können gemacht werden:

- Erwartungsgemäß tritt auf S01I der höchste Strom auf, in Sektion 12 herrscht also offenbar immer noch der höchste mittlere Druck. Bei ca. 0.3 s ist ein Wackeln zu sehen.
- Der Strom auf S07I steht an zweiter Stelle, was auf einen hohen Druck in S06 (Extraktion) hindeutet
- Der Strom in S12I kommt untypischerweise an dritter Stelle. Bei ca. 0.5 s ist ein ein schneller Anstieg zu erkennen. Dieser Anstieg korreliert mit der Stufe im Intensitätsverlauf aus Abbildung 3.
- Auf S03I sind ebenfalls Stufen während der Rampe zu erkennen.
- Auf dem beweglichen S03-Kollimator werden nur zeitlich begrenzt Ströme gemessen. Diese Zeiten scheinen korreliert mit Stufen in den Stromverläufen anderer Kollimatoren.
- HF-Einfangs-Verluste wurden dieses Mal offenbar nicht von S12I eingefangen. Bei vergangenen Maschinenexperimenten konnte dies beobachtet werden.

- Der Strom auf S08I liegt vergleichsweise niedrig. Beim letzten Maschinenexperiment war dieser Strom aufgrund eines inzwischen behobenen Lecks in Sektion S07 ungewöhnlich hoch.
- Die Ströme liegen generell niedriger als für U²⁸⁺ am 22.11.2010, hier war jedoch die Intensität auch höher.

Am Messkanal S10A hängt einen Elektronenpickup zur Vermessung von Elektronenwolken im SIS18. Auf diesem Kanal kann unabhängig von der Anwesenheit von Strahl nur Rauschen beobachtet werden.

2.3 Strahlverlustmonitore

In Abbildung 7 sind die Signale aller Strahlverlustmonitore für einen beliebigen aber repräsentativen Zyklus um den Ring dargestellt (der gleiche wie in Abbildung 6). Im Vergleich mit den Maschinenexperimenten am 22.11.2010 mit U²⁸⁺ sind wieder auf allen BLSs Messwerte zu sehen.

Die Monitore um Sektion 6 herum messen zum Zeitpunkt der Extraktion erhöhten Strahlverlust. Hier befindet sich die Extraktion.

Auffällig sind die Verluste bei 0.48 s am Reinjektionsseptum. Diese korrelieren mit einer Stufe im Intensitätsverlauf. Kurz darauf folgt der Anstieg im Strom auf S12I aufgrund vom Umladungsverlusten am erhöhten Restgasdruck in S11. Auf dem BLM in S12 ist gleichzeitig auch eine Signalerhöhung zu erkennen. In S02 ist ebenfalls zur gleichen Zeit eine leichte Erhöhung von Verlusten zu erkennen.

3 Lebensdauer-Messungen

Nachdem die Maschine auf Hochstrombetrieb optimiert war, wurden Lebensdauer-messungen bei verschiedenen Energien durchgeführt. Hierbei wurde jeweils die Intensität vom Unilac reduziert, während mehrere Lebensdauerzyklen aufgenommen wurden. Auf diese Weise werden Messungen bei verschiedenen Intensitäten durchgeführt. In die gemessenen Zyklen wird die Lebensdauerfunktion

$$I(t) = I_0 \cdot e^{-t/\tau}$$

im Bereich konstanter Energie gefittet. Hierbei ist $I(t)$ der zeitliche Intensitätsverlauf, I_0 die Anfangsintensität und τ die Lebensdauer.

Während der Analyse ist es dann möglich, für jede Messung die ermittelte Lebensdauer als Funktion der gefitteten Anfangsintensität aufzutragen. Aus dem linearen Zusammenhang wird der Y-Achsenabschnitt als sogenannte Einteilchen-Lebensdauer ermittelt. Diese Größe ist unabhängig von der von Zyklus zu Zyklus schwankenden Intensität.

3.1 Energie-Abhängigkeit

Die Lebensdauer des Ta²⁴⁺-Strahls im SIS18 wurde bei verschiedenen Energien vermessen. Die aus den gemessenen Zyklen ermittelten Lebensdauern als Funktion ihrer Anfangsintensität sind in Abbildung 8 zu finden. Aus diesen Daten wird der Y-Achsenabschnitt als intensitätsunabhängige Einteilchen-Lebensdauer ermittelt.

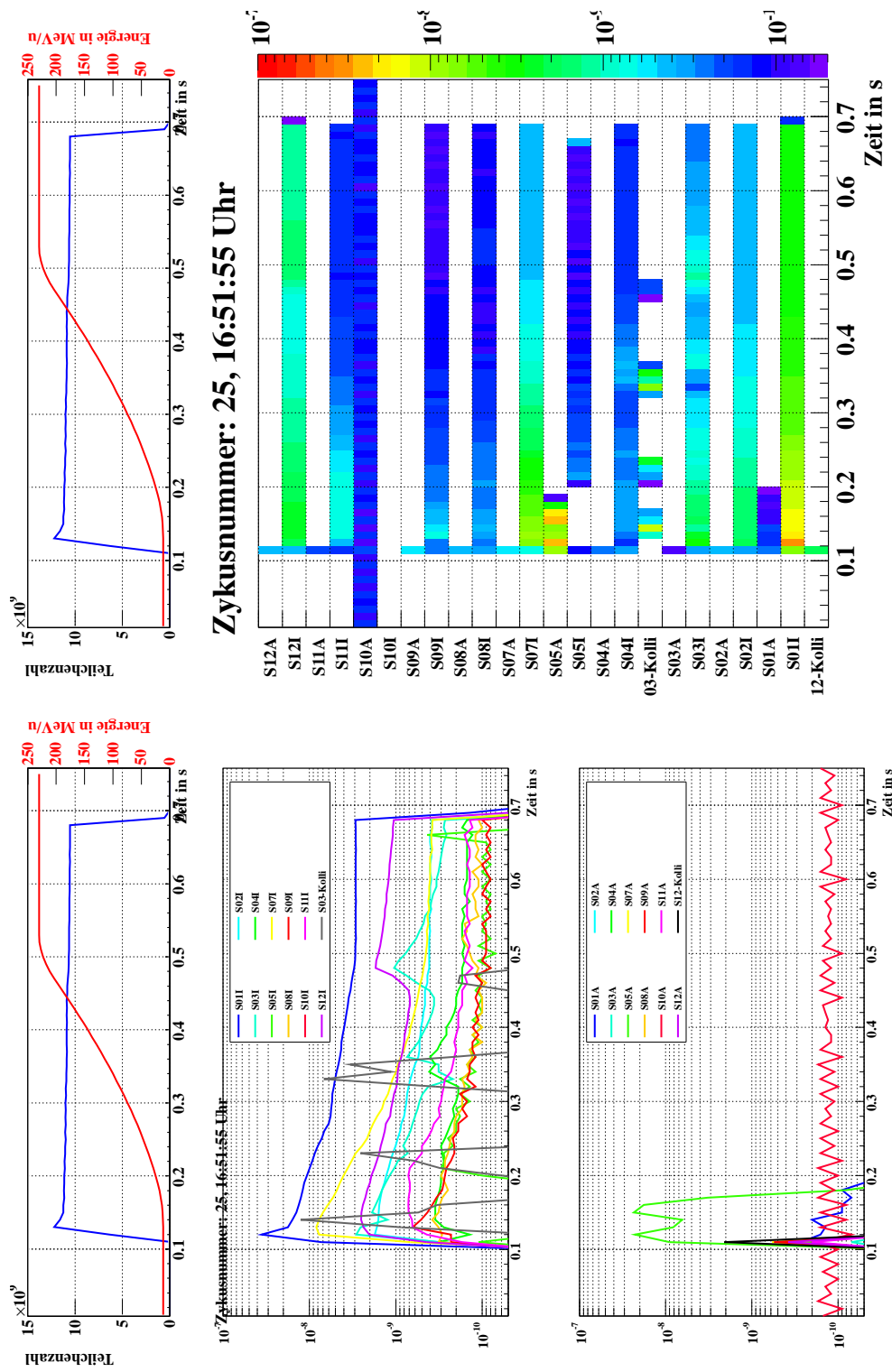
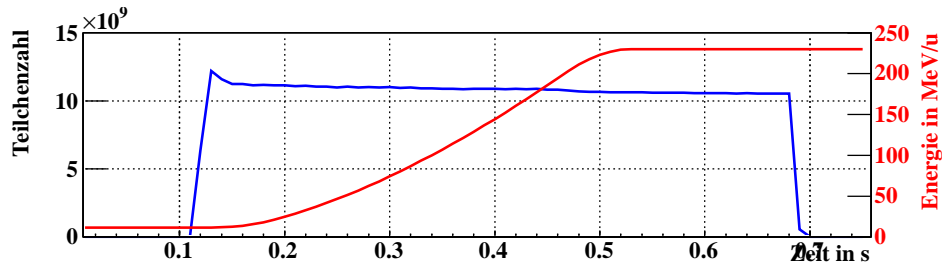


Abbildung 6: Gemessene Kollimatorströme eines beliebigen Zyklusses in A in zwei verschiedenen Darstellungen.



Zyklusnummer: 25, 16:51:55 Uhr

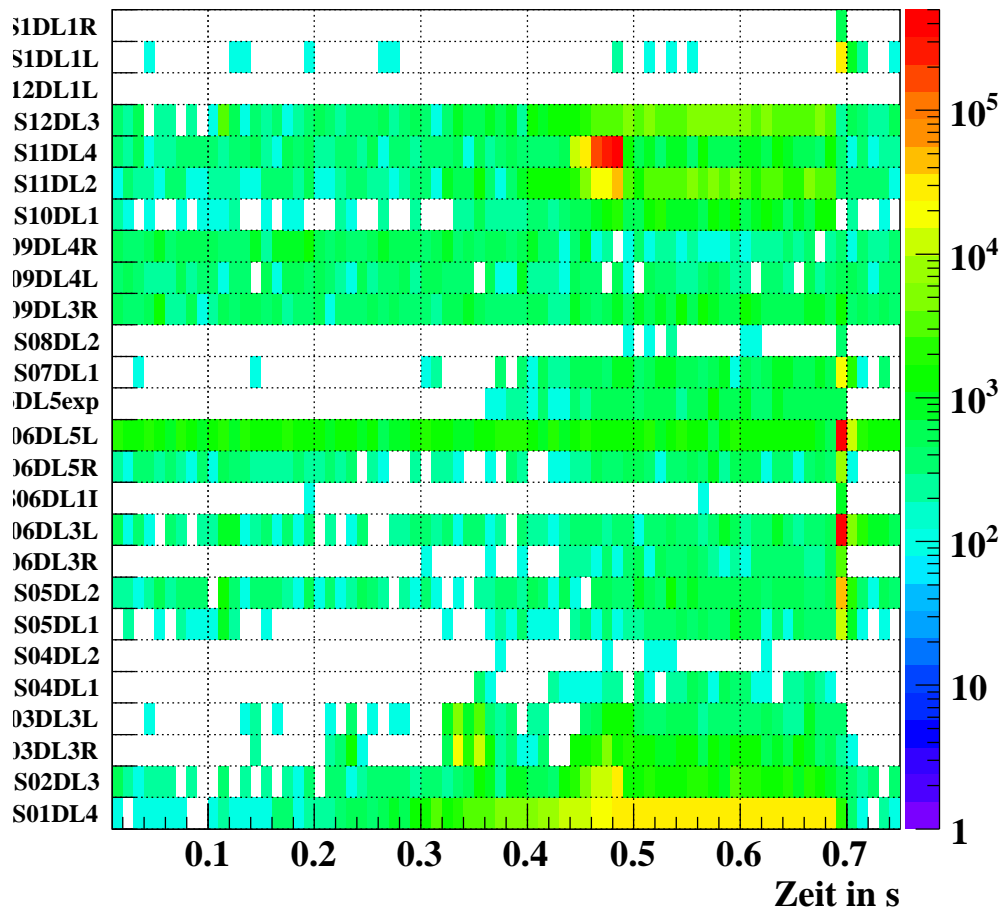


Abbildung 7: Signale der Strahlverlustmonitore für einen beliebigen, repräsentativen Zyklus.

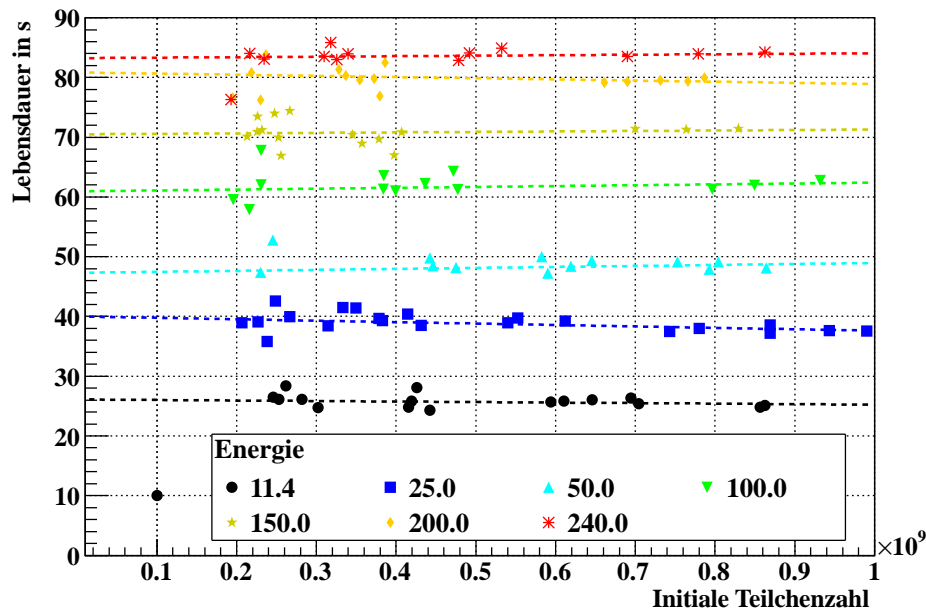


Abbildung 8: Ermittelte Lebensdauern als Funktion der Anfangsintensität. Der Zusammenhang ist linear, der Y-Achsenabschnitt wird als intensitätsunabhängige Einteilchen-Lebensdauer herangezogen.

In Abbildung 9 sind die gemessenen Einteilchen-Lebensdauern als Funktion der Teilchenenergie zu finden. Wie erwartet steigt die Lebensdauer mit der Energie, da die Umladungswirkungsquerschnitte sinken. In dieser Abbildung findet sich gleichzeitig auch die simulierte Lebensdauer. Erstmals ist eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation zu erkennen. Es wird davon ausgegangen, dass die neuen NEG-Panels im Injektionstank dort den Druck deutlich reduziert haben.

3.2 Provozierter Druckanstieg

Um die Annahme des verbesserten Druckes im Injektionstank zu verifizieren, wurde dort ein Druckanstieg hervorgerufen. Dies wurde durch eine bewusst schlecht eingestellte Injektion und daraus resultierenden Überschlügen am Septum realisiert. Um keine Bauteile zu schädigen wurde dieser Zustand nur für wenige Minuten aufrecht erhalten.

Anschließend wurden über mehrere Minuten Lebensdauer-Zyklen aufgezeichnet. In Abbildung 10 ist zu erkennen, dass die Lebensdauer während der ersten Messung im Bereich vergangener Messungen liegt (ca. 10s), dann aber im Laufe von 5 Minuten auf über 20s ansteigt. Während dieser Zeit relaxiert der Druck im Septumstank.

4 Vakuum

4.1 Restgasdruck

Kurz vor dem Maschinenexperiment wurden die Titan-Sublimationspumpen im SIS18 neu sublimiert um eine möglichst hohe Saugleistung zur Reduktion des dynamischen

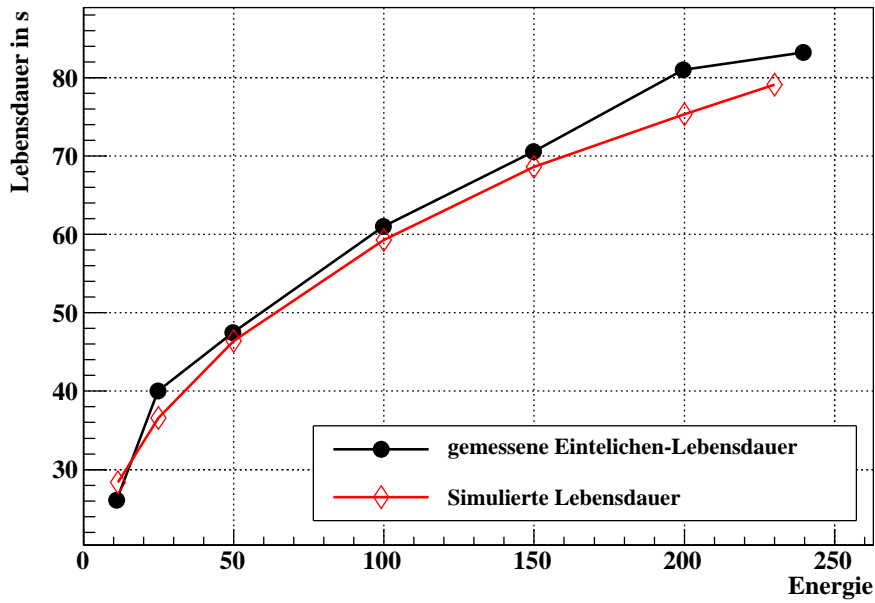


Abbildung 9: Gemessene Einteilchen-Lebensdauer und simulierte Lebensdauer als Funktion der Teilchenenergie. Erstmals ist eine gute Übereinstimmung zu erkennen.

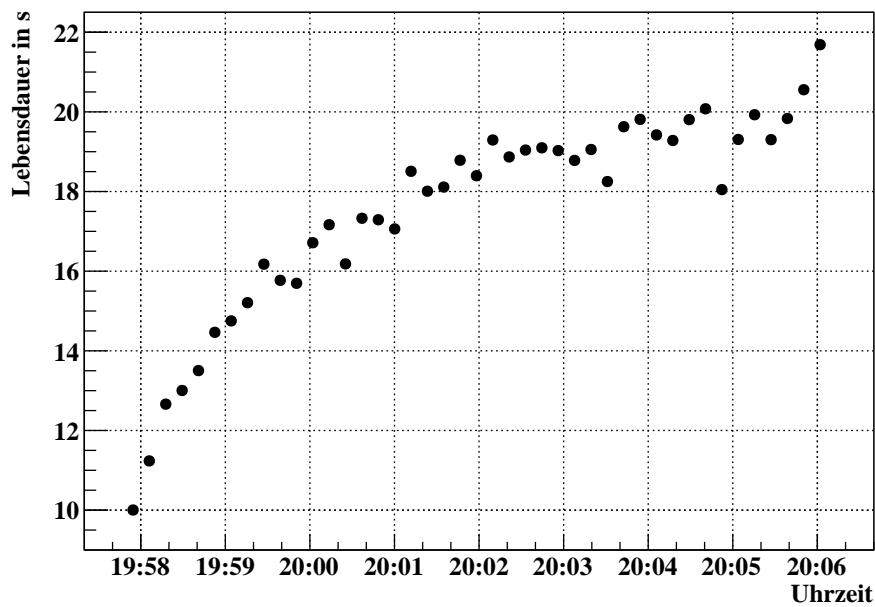


Abbildung 10: Anstieg der Lebensdauer während der im Injektionstank hervorgerufene Druckanstieg relaxiert.

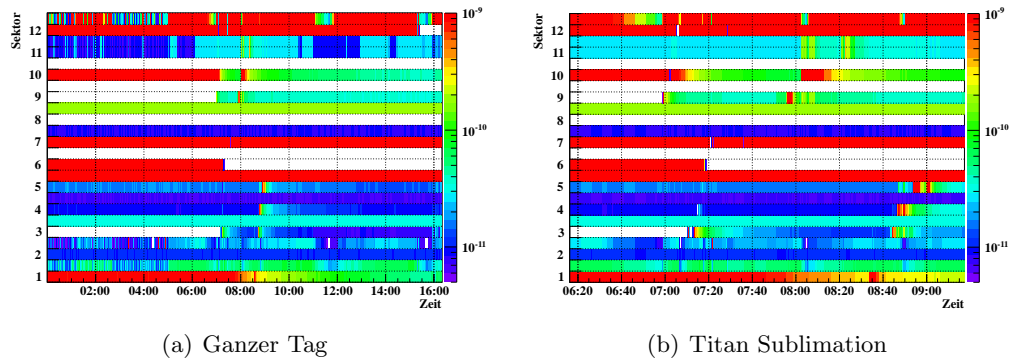


Abbildung 11: Druckprofile der einzelnen Sektorsonden im SIS18 am 27.6.2011. Die Zeilen, welche eine Beschriftung am linken Rand tragen, zeigen den Restgasdruck der Sektionssonde, die Zeilen darüber den Druck in der Kollimatorkammer der jeweiligen Sektion. (a) Druckprofile des ganzen Tages, (b) Druckprofile während der Ti-Sublimation.

Vakuums zur Verfügung zu stellen. Dieser Zeitraum ist in Abbildung 11(b) dargestellt. Dieses Mal ist die Titan-Sublimation nicht so deutlich zu erkennen, wie bei vergangenen Maschinenexperimenten. Es ist zu erkennen, dass sich die Druck-Messung in keinem guten Zustand befand.

In Abbildung 12 befindet sich das Druckprofil während der Maschinenexperimente. Da es bei der Druckmessung einen Ausfall gab, konnte der Druckverlauf nur über einen kurzen Zeitraum aufgezeichnet werden.

4.2 Restgasspektrum

Das Restgasspektrum in der Diagnosekammer S12DK3 konnte dieses Mal wieder mitgeschrieben werden. In Abbildung 13 ist der zeitliche Verlauf der Restgaszusammensetzung während dieses Maschinenexperimentes. Die Zeiten mit Hochstrom in der Maschine sind jeweils am Auftreten zusätzlicher Massen zu erkennen. Der provozierte Druckanstieg an der Injektion erfolgte kurz nach 20.00 Uhr und ist ebenfalls gut sichtbar.

In Abbildung 14 ist ein Restgasspektrum während den Lebensdauermessungen zwischen 17:30 Uhr und 18:30 Uhr zu sehen. Mit Hilfe von [1] wurde ein Restgasspektrum simuliert (schwarze Linie in Abbildung 14) um die Restgaszusammensetzung zu ermitteln. Die Zusammensetzung ist in Tabelle 1 zu finden.

5 Simulation und Wirkungsquerschnitte

Die Strahllebensdauer wird neben den energieabhängigen Wirkungsquerschnitten für Umladung lediglich von der mittleren Restgasdichte und der Restgaszusammensetzung bestimmt. Für die Simulation der Lebensdauer können die letztgenannten Parameter variiert werden. Die in Tabelle 2 angegebene Restgaszusammensetzung wurde mit dem orts- und zeitaufgelösten Vakuummodell unter Berücksichtigung der NEG-beschichteten Vakuumkammern berechnet.

Um die gemessenen Ta²⁴⁺-Lebensdauern zu reproduzieren musste ein mittlerer Druck von $7 \cdot 10^{-11}$ mbar eingestellt werden. Die simulierten und gemessenen Lebensdauern

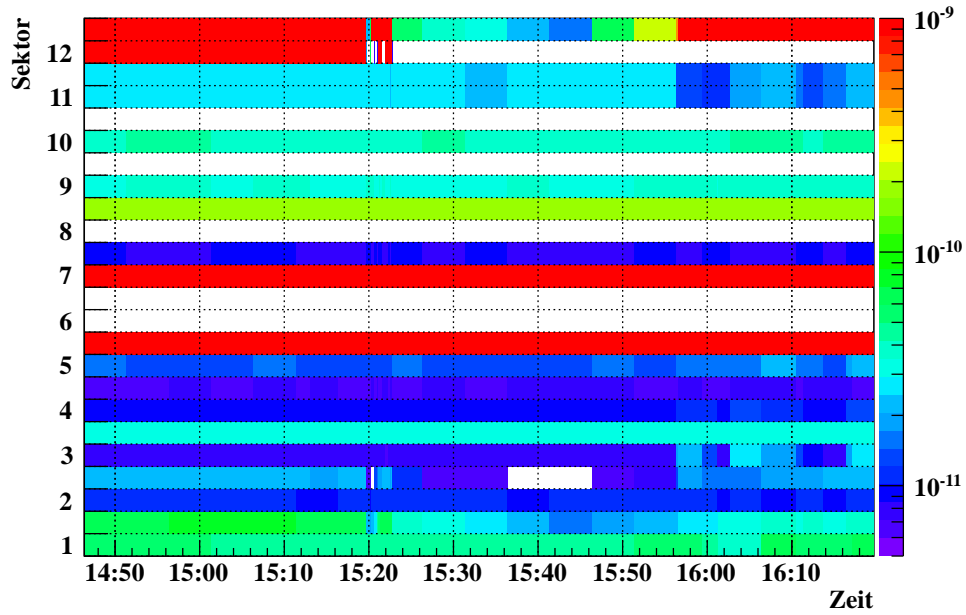


Abbildung 12: Druckprofil während der Maschinenexperimente

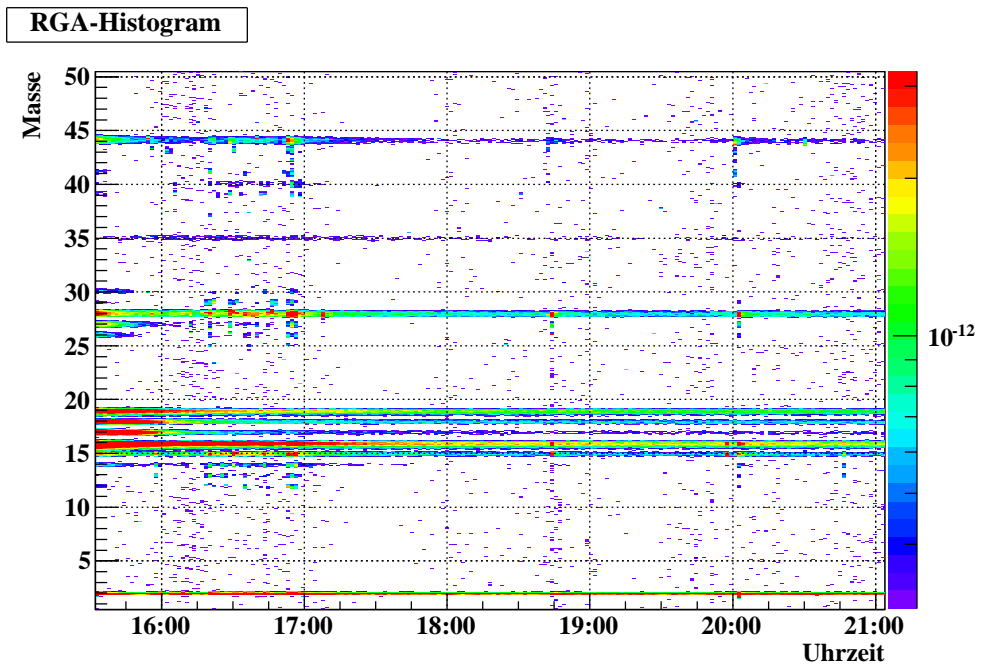


Abbildung 13: Verlauf der Restgaszusammensetzung in der Diagnosekammer S12DK3.

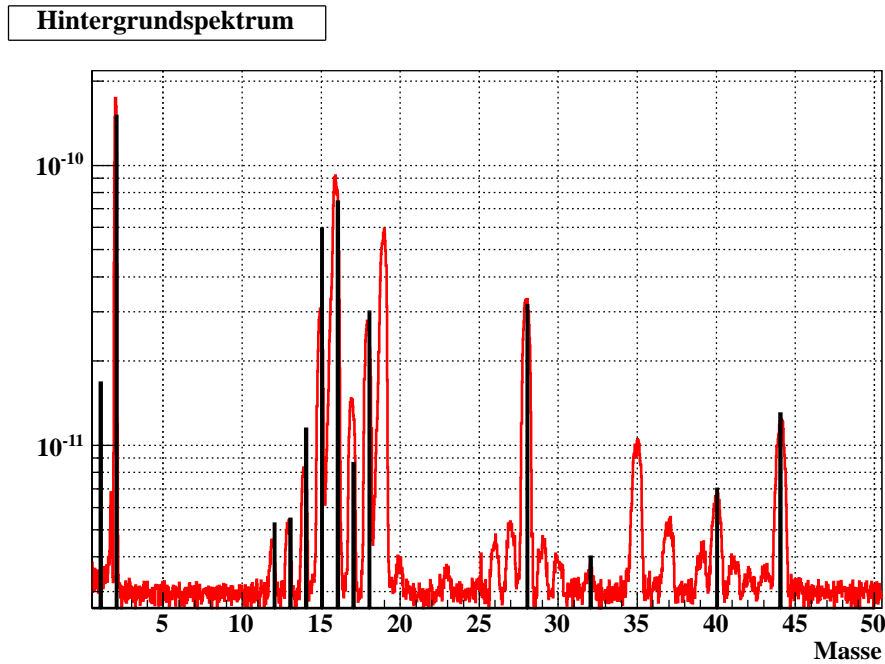


Abbildung 14: Hintergrundspektrum, Restgaszusammensetzung für den statischen Fall: Hierzu wurde der Bereich am Ende zwischen 17:30 Uhr und 18:30 Uhr verwendet. In schwarz ein aus den in Tabelle 1 angegebenen Werten simuliertes Restgasspektrum.

Restgaskomponente	Hintergrund
H ₂	49.34%
CH ₄	23.02%
N ₂	0.0%
O ₂	1.30%
H ₂ O	9.86%
CO	9.86%
CO ₂	4.28%
Ar	2.30%
He	0.743%
Ne	0.000%

Tabelle 1: Restgas-Zusammensetzung, für Abbildung 14 (schwarze Linien) verwendet.

Komponente	Anteil
H ₂	73.0%
CH ₄	14.0%
N ₂	0.0%
O ₂	0.0%
H ₂ O	5.0%
CO	2.8%
CO ₂	1.5%
Ar	3.7%

Tabelle 2: In der Simulation angenommene Restgaszusammensetzung.

sind in Abbildung 9 abgebildet und zeigen eine gute Übereinstimmung.

In früheren Maschinenexperimenten wurden stets Lebensdauern gemessen, die nur durch anscheinend „unrealistisch“ hohe mittlere Drücke reproduziert werden konnten. Basierend auf Druckmessungen lag es nah anzunehmen, dass der mittlere Druck in der Größenordnung von einigen 10^{-11} mbar liegen muss. Um die kurzen Lebensdauern zu reproduzieren, war allerdings ein Druck von etwas mehr als 10^{-10} mbar notwendig. Der einzige Ort (außer dem Elektronenkühler) an dem der Druck signifikant höher sein könnte als im Rest der Maschine, ist der Septumstank an der Injektion. Um nun einen angenommenen mittleren Druck von $5 \cdot 10^{-11}$ mbar auf 10^{-10} mbar anzuheben, müsste im Septumstank ein Druck von ca. 10^{-8} mbar herrschen. Dieser Wert erscheint unrealistisch.

Nach der Installation der NEG-Panels im Septumstank, die die Saugleistung drastisch erhöhen, wurden nun allerdings Lebensdauern gemessen, die zu der Annahme passen, dass der mittlere Druck im Bereich von einigen 10^{-11} mbar liegt. Dies hat mehrere Implikationen. Zum einen lässt diese Messung den Schluss zu, dass der Druck im Septumstank vor der Installation der NEG-Panels tatsächlich relativ schlecht gewesen sein muss. Zum anderen zeigt die Messung, dass die theoretisch bestimmten energieabhängigen Wirkungsquerschnitte, die seitens der Theorie mit einem Faktor 2 bzgl. der Genauigkeit versehen sind, in der Tat in diesem Genauigkeitsbereich liegen.

Nach der Installation der NEG-Panels kann ein mittlerer Druck von über 10^{-10} mbar empirisch ausgeschlossen werden. Erhöht man den mittleren Druck in einem Gedankenexperiment von $7 \cdot 10^{-11}$ mbar auf 10^{-10} mbar, müssen die Wirkungsquerschnitte bei gleichbleibender gemessener Lebensdauer um einen Faktor 1.4 kleiner werden.

Einen minimal möglichen mittleren Druck festzulegen ist allerdings nur bedingt möglich. Kontinuierliche Messungen legen nahe, dass der mittlere Druck an ausgewählten Stellen im SIS18 nicht besser als ca. $2 \cdot 10^{-11}$ mbar ist. Dies lässt allerdings Stellen an denen der Druck erhöht sein kann, wie z.B. den Elektronenkühler, die Injektion, die Reinjektion und die Extraktion, sowie NEG-beschichtete Abschnitte mit potentiell niedrigerem Druck unberücksichtigt. Nimmt man dennoch einen mittleren Druck von $2 \cdot 10^{-11}$ mbar an, würde dies bedeuten, dass die realen Wirkungsquerschnitte maximal um einen Faktor 3.5 größer sein können als von der Theorie vorhergesagt. Empirisch kann jedoch davon ausgegangen werden, dass der tatsächliche mittlere Druck sich eher im Bereich von $7 \cdot 10^{-11}$ mbar als von $2 \cdot 10^{-11}$ mbar befindet.

In der obigen Diskussion wird die Zusammensetzung des Restgases als Unsicherheitsfaktor nicht berücksichtigt. Insbesondere der Anteil von schweren Restgaskomponenten

wie Argon trägt auf Grund der großen Wirkungsquerschnitte überproportional stark zu den Umladungsverlusten bei.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Wirkungsquerschnitte im Energiebereich von 11 bis 230 MeV/u mit hoher Wahrscheinlichkeit innerhalb des von der Theorie vorhergesagten Konfidenzbereichs liegen. Insbesondere bei Energien oberhalb von 100 MeV/u lagen bisher keine experimentellen Daten vor, die die Korrektheit der verwendeten Wirkungsquerschnitte ohne weitere Annahmen direkt belegen.

6 Schlussfolgerungen

Die Intensitäts-Limitierungen vom Unilac haben leider keinen neuen Hochstrom-Erfolg ermöglicht. Ein stabiler Betrieb mit mehr als 10^{10} extrahierten Teilchen konnte schnell realisiert werden.

Bei den Lebensdauer-Messungen wurden erstmalig deutlich höhere Lebensdauern gemessen, welche gut mit den von der Theorie vorhergesagten Werten übereinstimmen. Der zur Reproduktion der gemessenen Lebensdauern angenommene mittlere Druck liegt bei $7 \cdot 10^{-11}$ mbar. Die hohen Lebensdauern werden den neuen NEG-Panels im Injektionstank zugeschrieben. Durch den provozierten Druckanstieg an der Injektion und der ansteigenden Lebensdauer über die nächsten fünf Minuten kann diese Annahme bestätigt werden.

Die gute Übereinstimmung der gemessenen mit den simulierten Lebensdauern lässt weiterhin die Schlussfolgerung zu, dass die Wirkungsquerschnitte im Energiebereich zwischen 11 und 230 MeV/u innerhalb der von der Theorie vorhergesagten Genauigkeit liegen und damit tatsächlich bis auf einen Faktor 2 exakt sind.

Literatur

[1] Massenspektrometer Katalog, Pfeiffer Vacuum GmbH, 2005

7 Version History

- 0.1 Anfangen zu schreiben (L. Bozyk).
- 0.2 Kleinere Korrekturen (P. Puppel).
- 0.3 Beschreibung der Simulation und Diskussion der Wirkungsquerschnitte hinzugefügt (P. Puppel).
- 0.4 Bild von Zyklen und Kollimatorströmen, sowie Beobachtungen bei Kollimatorströmen hinzugefügt (L. Bozyk).
- 0.5 Kollimatorströme aktualisiert, BLM-Plots hinzugefügt, RGA-Zusammensetzung (L. Bozyk)
- 1.0 Rote Anmerkungen entfernt, fertig zum Veröffentlichen (L. Bozyk)