

SIS18-Maschinenexperimente vom Juli 2025 mit U²⁸⁺ und den Cryoinserts

L. Bozyk

Version 1.0
2. September 2025

Im Juli 2025 wurden Maschinenexperimente mit U²⁸⁺ und den Cryoinserts am SIS18 durchgeführt werden. Es wurden insgesamt drei Abkühlvorgänge durchgeführt. Zu Beginn lag die Intensität bei ca. $1.2 \cdot 10^{10}$ injizierten Teilchen pro Spill. Durch eine gemeinsame Optimierungs-Aktion mit Inbetriebnahme des Wasserstoff-Stippers konnte die Intensität auf bis zu $3 \cdot 10^{10}$ gesteigert werden.

Es wurden verschiedene Messungen zum dynamischen Vakuum mit warmen und kalten Cryoinserts durchgeführt, wie das Vermessen extrahierter Teilchenzahl als Funktion der injizierten Teilchen unter Variation der Ramprate. Während des vierstündigen Abkühlens wurde zwei Mal die Entwicklung der Lebensdauer und der Ströme auf dem Umladungskollimator hinter den Cryoinserts vermessen.

Weiterhin wurde die energieabhängige Lebensdauer vermessen, Kollimatorströme aufgenommen und die Abhängigkeit der beschleunigbaren Intensität von der Ramprate untersucht um Vergleiche mit vorangegangenen Jahren zu erhalten.

Es wurde eine Datenaufnahme per Python-Bridge realisiert. Dadurch fallen verschiedene Kopier- und Konvertivorgänge der Daten weg und es konnte erstmalig eine schnelle Online-Auswertung der Daten durchgeführt werden. Diese erlaubte es, verschiedene Effekte direkt zu bemerken und gezielt zu untersuchen bzw. fehlerhafte Messungen zu wiederholen.

1 Durchführung der Messungen

Die Uran-Maschinenexperimente wurden in der Woche 28 vom 7. Juli 2025 durchgeführt. Ziel dieser Messungen war den Einfluss der Cryoinserts auf den teilgeladenen Uran-Strahl zu vermessen. Dabei wurden verschiedene Aspekte betrachtet: Intensität, Transmission, Lebensdauer und Umladungsraten. Zu diesem Zwecke wurden verschiedene Abhängigkeiten (extrahierte über injizierte Intensität, für verschiedene Rampraten) mit warmen und kalten Cryoinserts vermessen. Während des Abkühlvorgangs wurde

kontinuierlich die Lebensdauer bei 11.4 MeV und Umladungsströme auf dem darauffolgenden inneren Kollimator vermessen.

Im Folgenden ist eine Beschreibung der durchgeführten Aktivitäten und Messungen der verschiedenen Tage.

1.1 Montag, 7. Juli

Die Optimierung der MAZ am Unilac und der gesamten Beschleunigerkette auf Uran-Hochstrombetrieb fand am Montag in der Früh- und Spätschicht statt. Gegen Beginn der Nachschicht war eine Intensität von ca. $1.2 \cdot 10^{10}$ injizierten Teilchen pro Spill verfügbar. Diese Intensität ist ausreichend, um Umladungsströme zu messen, nicht jedoch um Sättigungs-Effekte verursacht durch das dynamischen Vakuum zu sehen. Um Zeit zu sparen, wurde der Abkühlvorgang von 300 K auf 200 K bereits während der Optimierung durchgeführt. In diesem Temperaturbereich wurde mit keinem signifikanten Einfluss auf den Strahl gerechnet.

Folgende Messungen wurden durchgeführt:

- Lebensdauermessung bei 11.4 MeV
- Verlauf der Lebensdauer, nachdem das Ventil S01VV1T zu und wieder aufgefahren wurde
- Start des Abkühlvorgangs bei ca. 200 K (3:00 Uhr)
- Vermessung der Energieabhängigkeit der Lebensdauer; durch das Online-Display konnte die Relaxation des Vakuums beobachtet werden.
- Kontinuierliche Vermessung von Lebensdauer bei 11.4 MeV und Kollimatorströmen bei $1 \cdot 10^{10}$ gespeicherten Teilchen während des Abkühlens
- Verlauf der Lebensdauer, nachdem das Ventil S01VV1T zu und wieder aufgefahren wurde bei 80 K
- Erreichen der Minimal-Temperatur (5:50 Uhr)
- Verlauf der Lebensdauer, nachdem das Ventil S01VV1T zu und wieder aufgefahren wurde bei 16 K
- Vermessung von Transmission bei schnellen (4 T/s) Rampen
- Verlauf der Lebensdauer während des Aufwärmens (Druckstoß)

1.2 Dienstag, 8. Juli

Am Dienstag wurden zwei Schichten investiert, um die Intensität nach zu optimieren. Hierzu wurde der Wasserstoff-Stripper in Betrieb genommen. Abschließend konnten am TK-Ende 3 mA gemessen werden und im SIS konnten bis zu $3.2 \cdot 10^{10}$ Teilchen injiziert werden.

Die Zeit wurde verwendet, um die Cryoinserts auf Raumtemperatur aufzuwärmen für eine zweite Messung am Mittwoch.

1.3 Mittwoch, 9. Juli

Am Mittwoch konnte ein zweiter Abkühlvorgang durchgeführt werden. Vor dem Abkühlen wurden wieder Messungen bei verschiedenen Rampraten als Referenz bei Raumtemperatur durchgeführt:

- Es wurden bei folgenden Rampraten die Intensität variiert und die Transmission vermessen: 9 T/s, 3 T/s, 2 T/s und 1 T/s. (Es war zu erwarten, dass nur bei niedrigen Rampraten Effekte durch das dynamische Vakuum sichtbar werden.)
- Start des Abkühlvorgangs bei ca. 260 K (12:35 Uhr)
- Kontinuierliche Vermessung von Lebensdauer bei 11.4 MeV und Kollimatorströmen bei $3 \cdot 10^{10}$ gespeicherten Teilchen während des Abkühlens
- Auf dem beweglichen S03-Kollimator, welcher das Extraktionsseptum schützt, konnten während der Speicherzeit spontane Peaks ca. 2 s nach der Injektion beobachtet werden. Zwischen 14:50 Uhr und 15:50 Uhr wurde versucht, diese systematisch zu untersuchen unter leichter Variation verschiedener Parameter. Die Ursache ist noch unklar, offenbar geht hier spontan ein Halo verloren.
- Um 16:00 Uhr wurde die Minimal-Temperatur erreicht
- Vermessung von Transmission bei folgenden Rampraten: 9 T/s, 3 T/s, 2 T/s und 1 T/s
- Es wurden immer wieder Interlocks durch eine Druckmessung verursacht, welche nur durch Reduktion der Intensität verhindert werden konnten. Es stellte sich am nächsten Tag heraus, dass der Kicker den Strahl nicht richtig extrahierte.
- Verlauf der Lebensdauer, nachdem das Ventil S01VV1T zu- und wieder aufgefahren wurde bei 16 K
- Verlauf der Lebensdauer während es Aufwärmens, nachdem die Cryoinserts für zwei Stunden kalt waren.

1.4 Donnerstag, 10. Juli

Es war beobachtet worden, dass die Transmission im SIS zwei verschiedene „Äste“ aufweist. Ggf. hängen diese Äste davon ab, wie man die Abschwächung am Magnet UH1QQ11 einstellt (kontinuierliches Drehen oder diskretes Anfahren von Werten, von oben oder von unten). Dies wurde versucht, während des Aufwärmes der Cryoinserts (parasitär zu SD-Experimenten) zu untersuchen. Außerdem wurde der Kicker wieder vollständig zur Funktion gebracht und Abhängigkeiten von der Injektionseffizienz (Länge des Chopperfenster) untersucht.

1.5 Freitag, 11. Juli

Am Freitag wurden noch einmal die systematischen Messungen bei Raumtemperatur und im abgekühlten Zustand wiederholt. Die Zeit Abkühlvorgangs wurde für ein anderes Experiment (Multiladungs-Betrieb) genutzt. Folgende Messungen wurden durchgeführt:

- Warm: Variation der Intensität bei verschiedenen Rampraten. Aufgrund der Beobachtungen vom Vortag wurde die Intensität von oben und von unten kontinuierlich variiert. Ein Unterschied konnte nicht beobachtet werden. Folgende Rampraten wurden vermessen: 9 T/s, 4 T/s, 3 T/s, 2 T/s und 1 T/s. Bei 9 T/s und bei 1 T/s wurden außerdem die Injektionsverluste mit Hilfe eines verlängerten Chopper-Fensters variiert.
- Von 8:30 Uhr bis 12:30 Uhr wurde abgekühlt. In dieser Zeit wurden Messungen zum Multiladungs-Betrieb durchgeführt
- Kalt: Variation der Intensität bei verschiedenen Rampraten. Aufgrund der Beobachtungen vom Vortag wurde die Intensität von oben und von unten kontinuierlich variiert. Ein Unterschied konnte nicht beobachtet werden. Folgende Rampraten wurden vermessen: 9 T/s, 4 T/s, 3 T/s, 2 T/s und 1 T/s. Bei 9 T/s und bei 1 T/s wurden außerdem die Injektionsverluste mit Hilfe eines verlängerten Chopper-Fensters variiert.
- Gespeicherter Hochstromstrahl zur Vermessung von Kollimatorströmen für verschiedene Intensitäten
- Verschiedene Hochstrom-Zyklen mit 9 T/s

Probleme

- Die Intensität der gespeicherten Strahlen reichte anfangs nicht aus, um Effekte des dynamischen Vakuums zu sehen.
- Der Kicker funktionierte zwischenzeitlich nicht vollständig. Das hatte zur Folge, dass ein Teil des extrahierten Strahls im SIS verloren ging und zu Vakuum-Interlocks geführt hat, welches die Ausführung aller Maschinen blockiert hat.

2 Lebensdauermessungen

In die gemessenen Zyklen wird die Lebensdauerfunktion

$$I(t) = I_0 \cdot e^{-t/\tau} \quad (1)$$

im Bereich konstanter Energie gefittet. Hierbei ist $I(t)$ der zeitliche Intensitätsverlauf, I_0 die Anfangsintensität und τ die Lebensdauer. Tatsächlich wird aus technischen Gründen die Funktion

$$I(t) = e^{i_0 + i_1 \cdot t} \quad (2)$$

gefittet. Die bekannten Parameter Anfangsintensität und Lebensdauer berechnen sich wie folgt:

$$\tau = -1/i_1 \quad I_0 = e^{i_0} \quad (3)$$

Aufgrund der Wechselwirkungen zwischen Strahl und Vakuum durch Umladungsverluste und Gasdesorption gibt es eine Abhängigkeit zwischen τ und I_0 . Bis hin zu moderaten Intensitäten ($\lesssim 10^9$ Teilchen) ist diese Abhängigkeit im SIS18 linear. Trägt man τ über I_0 auf, kann man diese Intensitätsabhängigkeit durch Extrapolation eliminieren. Die so erhaltene Lebensdauer wird als *Einteilchenlebensdauer* bezeichnet.

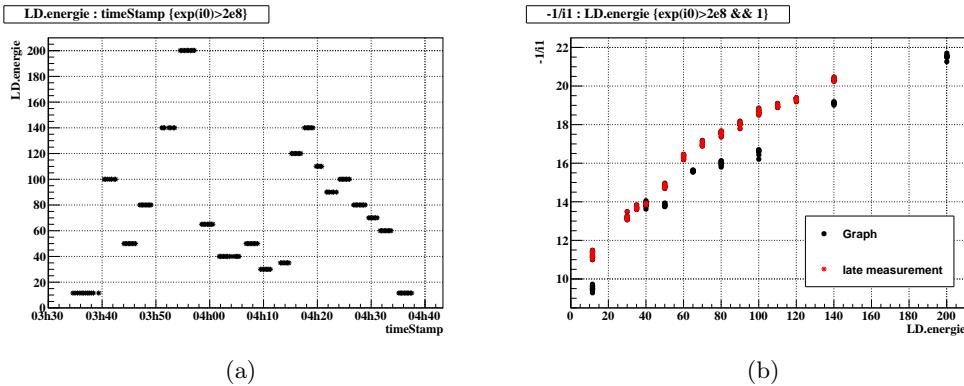


Abbildung 1: Lebensdauermessungen mit U^{28+} . (a) Gemessene Energie gegen die Uhrzeit (als spätere Referenz, wie lange eine LD-Messung dauert), (b) ermittelte Lebensdauern. Während der Messung konnte beobachtet werden, dass die Lebensdauer bei gleicher Energie steigt. Dies wurde auf Relaxation des Vakuums zurückgeführt, weshalb einige Punkte zu einer späteren Zeit erneut vermessen wurden.

Von der Theorie erwartet man, dass die Steigung der linearen Abhängigkeit negativ ist. Höhere Intensität führt zu niedrigerer Lebensdauer. In der Praxis kann jedoch häufig beobachtet werden, dass keine eindeutige lineare Abhängigkeit zu beobachten ist, bzw. eine positive Steigung berechnet wird. Dies tritt beispielsweise auf, wenn die Anfangsintensität in einem zu kleinen Bereich variiert. Bei den folgenden Betrachtungen wird im Falle einer positiven Steigung der Mittelwert der gemessenen Punkte verwendet, anstelle der Extrapolation zur Einteilchenlebensdauer.

Abbildung 1(a) zeigt den zeitlichen Verlauf der gemessenen Energien. Diese Abbildung kann herangezogen werden, wenn es darum geht, den Zeitbedarf einer Lebensdauermessung abzuschätzen. Es wurden diesmal außerordentlich viele Energien vermessen, da die Vakuum-Relaxation bemerkt wurde. Abbildung 1(b) zeigt die ermittelten Lebensdauern als Funktion der Energie. Sie sind unterteilt in zwei Messzeiten.

Um die gemessene Lebensdauern einordnen zu können, sind die Daten in der Vergleichs-Abbildung 2 eingezeichnet. Die Lebensdauer von U^{28+} liegt oberhalb der letzten gemessenen Uran-Lebensdauer von 2023. Da zwischenzeitlich das UHV-System in drei Abschnitten belüftet war und Pumpen gewechselt wurden, können diese Daten aber nicht direkt verglichen werden.

In der Vergangenheit konnte immer wieder beobachtet werden, dass einzelne Messpunkte von einer glatten Kurve abweichen. Insbesondere die Messung bei 11.4 MeV weicht von einem glatten Kurvenverlauf ab. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Wert bei 11.4 MeV immer als erstes gemessen wurde. (Um im Falle eines kapitalen Ausfalls der Maschine wenigstens den Referenz-Wert gemessen zu haben.) Die übrigen Energien wurden in chaotischer Reihenfolge gemessen, um keinen zeitlichen Einfluss auf die Messung zu haben. Da es aber 30 Minuten und länger dauert, bis das Vakuum relaxiert ist, wurden bisher die Punkte bei 11.4 MeV und die ersten gemessenen Energiepunkte immer während dieser Relaxationszeit gemessen. Dadurch liegen diese Punkt niedriger, als erwartet. Die bereinigte Kurve von 2025 zeigt erstmalig einen vollständig glatten Verlauf.

Der Verlauf der Lebensdauer bei 11.4 MeV über die Jahre ist in Abbildung 3 zu

Beam Lifetime in SIS18

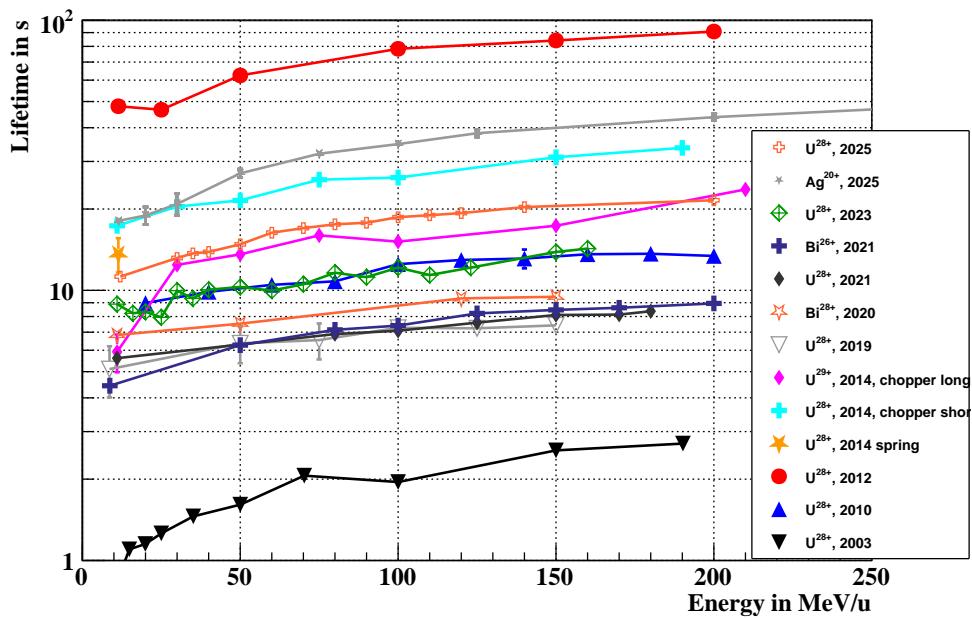


Abbildung 2: Vergleich verschiedener gemessener Lebensdauern. Die Ag-Messungen können nicht mit den U-Messungen verglichen werden, da sich die Umladungsquerschnitte deutlich unterscheiden. Diese Abbildung dient lediglich zur Einordnung der gemessenen Daten.

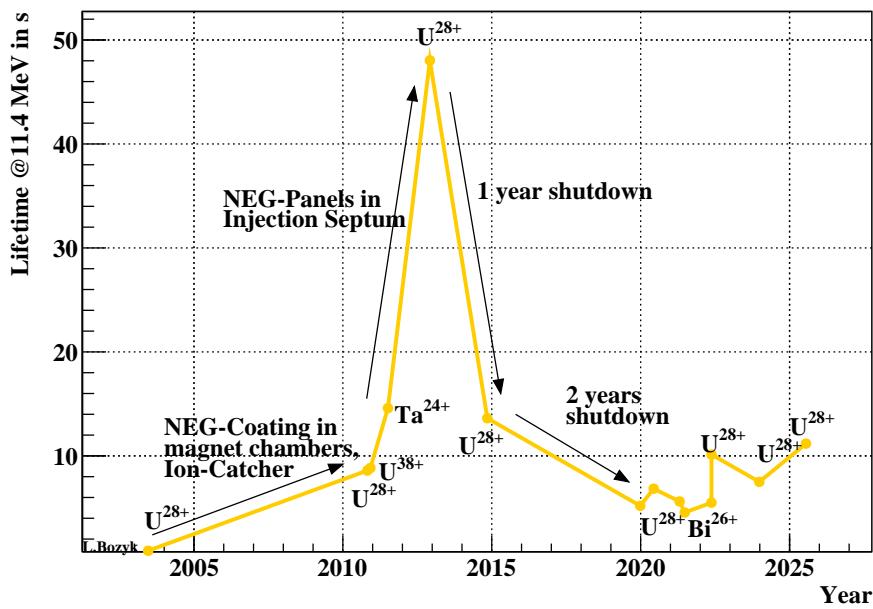


Abbildung 3: Verlauf der gemessenen Lebensdauer für U^{28+} über die Jahre. Diese Abbildung dient zur Einordnung der gemessenen Daten.

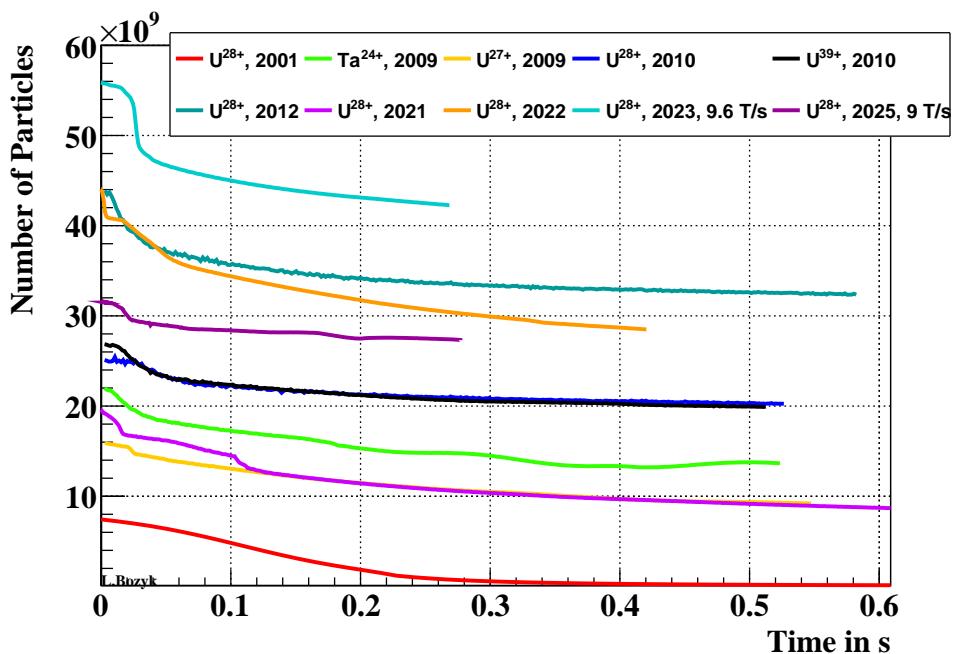


Abbildung 4: Maximal erreichte Intensität in den verschiedenen Jahren.

sehen. Es ist zu beachten, dass in diesem Jahr ausreichen lange gewartet wurde, bis das Vakuumsystem hinreichend relaxiert war. Siehe auch die Messpunkte für 11.4 MeV in Abbildung 1.

3 Hochstrom-Betrieb

Wie bereits in der Einleitung beschrieben konnte eine maximale Intensität von ca. $3.2 \cdot 10^{10}$ bei Injektion und von ca. $2.8 \cdot 10^{10}$ bei Extraktion erreicht werden. Dies liegt unterhalb der bisher erreichten maximalen Intensitäten, trotz hoher Ramprate (9 T/s) und Wasserstoff-Stripper. Ein Vergleich mit den bisherigen Rekord-Zyklen ist in Abbildung 4 gezeigt. Hier ist zu erkennen, dass der Rekord aus dieser Strahlzeit deutlich weniger verlustbehaftet ist, als der Rekord-Zyklus von 2023.

Die Wellen im Zyklus kommen vom Trafo, es wurde versäumt auf den Hochstrom-Trafo für diese Messungen zu wechseln.

4 Cryoinserts

Im Folgenden werden alle Messungen beschrieben, welche die Cryoinserts betreffen. Das sind kontinuierliche Messungen der Lebensdauer und der Kollimatorströme. Weiterhin gibt es verschiedene Vergleiche zwischen warmen und kalten Cryoinserts: Transmission, Ramprate und Analyse der Ionisationsverluste. Außerdem findet sich hier eine Analyse der gespeicherten Strahlen.

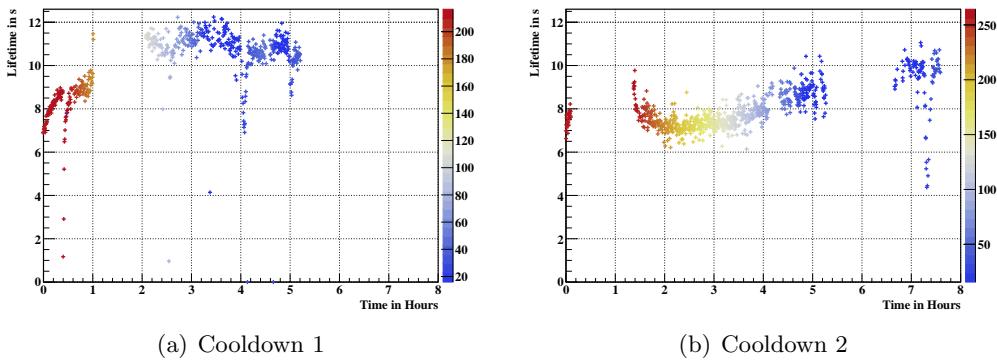


Abbildung 5: Kontinuierliche Lebensdauermessungen mit U^{28+} bei 11.4 MeV
 (a) 1. Abkühlvorgang (b) 2. Abkühlvorgang. Die Temperatur der Cryoinserts ist in der Farbe der Messpunkte codiert.

4.1 Lebensdauer-Verlauf

Der Verlauf der Lebensdauer während der beiden Abkühlvorgänge ist in Abbildung 5 zu sehen. Die Temperatur der Cryoinserts ist in der Farbe der Messpunkte codiert. Während der Lücke von ca. einer Stunde im Verlauf des ersten Abkühlvorgangs wurde die Energieabhängigkeit der Lebensdauer (siehe Abbildung 1) vermessen. Vor der Messung wurde auf Hochstrom optimiert. Es sollte mindestens eine halbe Stunde nach solchen Betriebszuständen gewartet werden, bis eine Lebensdauermessung durchgeführt wird, besser sind 1.5 bis 2 Stunden. Bei den scharfen Abweichungen nach unten wurde das Ventil S01VV1T, direkt neben den Cryoinserts gefahren, um einen definierten Druckstoß hervor zu rufen, bzw. am Ende der Messung wurde der Aufwärmvorgang gestartet.

Der Verlauf der Lebensdauer nach Fahren des Ventils S01VV1T ist in Abbildung 6 im Detail zu sehen. Bei 200 K dauert die Relaxation auf den Wert vor dem Fahren am längsten. Bei 80 K ist davon auszugehen, dass bereits alle Restgase außer Wasserstoff gepumpt werden. Die niedrigste gemessene Lebensdauer während dieses Vorgangs gleicht der für 200 K, der Druckstoß war also in erster Näherung vergleichbar. Das Abpumpen und Erreichen der Lebensdauer vor dem Ereignis geht jetzt jedoch deutlich schneller. Bei der Minimal-Temperatur von 16 K fällt der Druckstoß offenbar kleiner aus und das Abpumpen geht noch schneller.

Das Ventil wurde im DeviceControl so schnell wie möglich zu- und wieder aufgefahren. Die Maschine wurde vorher angehalten und direkt danach wieder gestartet. Der ganze Vorgang hat ca. 30 s gedauert. Lebensdauermessungen dauern ca. 10 s. Sie liefern abwechselnd zu den Kollimatorstrommessungen, d.h. eine Lebensdauermessung wurde in etwa alle 17-20 s gestartet. Die verschiedenen Werte für die Tiefe der Peaks können durch diese Abtastrate zustande kommen. Das Abklingverhalten ist davon jedoch nicht beeinflusst und zeigt deutlich den Einfluss der Cryoinserts.

4.2 Verlauf der Kollimatorströme

Abwechselnd zu den Lebensdauermessungs-Zyklen wurden Zyklen zum Vermessen der Kollimatorströme aufgenommen. Dazu wurde jeweils ein Strahl mit der maximal ver-

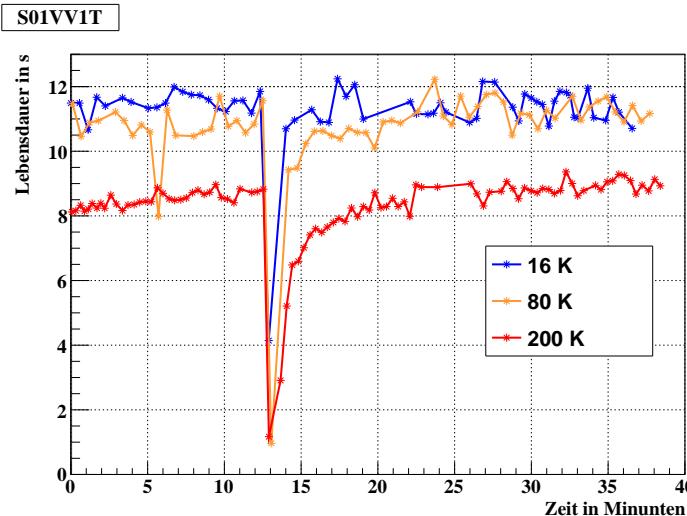


Abbildung 6: Kontinuierliche Lebensdauermessung während das Ventil S01VV1T bei drei verschiedenen Temperaturen gefahren wurde. Je niedriger die Temperatur der Cryoinserts, desto schneller relaxiert die Lebendauer.

fügbaren Intensität für 5 s gespeichert. In Abbildung 7 sind gemessene Kollimatorströme auf dem Umladungskollimator S02-innen, also dem Sektor hinter den Cryoinserts gezeigt. Hier gemessene Umladungen sind proportional zum Druck im vorangehenden Sektor, also Sektor S01 mit den Cryoinserts. Auf der linken Seite sind die gemessenen Kollimatorströme der beiden Abkühlvorgänge für verschiedene Temperaturen gezeigt. Diese nehmen naturgemäß innerhalb der Speicherdauer ab, weil die Intensität des Strahls abnimmt. Aus diesem Grund sind auf der rechten Seite die gleichen Daten, jedoch normiert auf die jeweils aktuelle Anzahl gespeicherter Teilchen im Ring gezeigt. Diese Darstellung ist nun unabhängig von der aktuellen Strahlintensität und zeigt den Druckverlauf des vorangehenden Sektors innerhalb des Zyklus. (Siehe auch [1, 2].) Ab ca. 5.5 s beginnt die Beschleunigung und die Umladungsquerschnitte sinken mit steigender Energie. Es ist zu erkennen, dass die Vakuum-Dynamik innerhalb des Zyklus mit sinkender Temperatur der Cryoinserts stark abnimmt. Beim Vergleich der beiden Abkühlvorgänge muss beachtet werden, dass beim ersten Abkühlvorgang ca. $1.2 \cdot 10^{10}$ Teilchen gespeichert wurden, während beim zweiten Abkühlvorgang bis zu $3.2 \cdot 10^{10}$ Teilchen injiziert wurden. Unter Berücksichtigung dieser Randparameter ist es bemerkenswert, dass bei kalten Cryoinserts in beiden Fällen der initiale Druckstoß auf $0.4 \cdot 10^{-18} \text{ A/Teilchen}$ begrenzt wird.

Die schwarze Kurve zeigt zum Vergleich den (normierten) Strom auf dem gleichen Kollimator während eines gespeicherten U²⁸⁺ Strahls im Jahr 2023, also vor der Installation der Cryoinserts. Der Basisdruck war während dieser Messungen offenbar niedriger. Der initiale Druckstoß ist jedoch doppelt so hoch. Außerdem betrug hier die gespeicherte Intensität etwa $1.4 \cdot 10^{10}$ Teilchen. Die grauen Kurven zeigen Daten aus 2022. Hier wurden $1.5 \cdot 10^{10}$ (tief) und $3 \cdot 10^{10}$ (hoch) U²⁸⁺ Teilchen injiziert und gespeichert.

Im Anhang in Abschnitt 9 in Abbildung 23 sind die normierten Ströme auf den übrigen Kollimatoren zu finden. Weitere Untersuchungen, welche die Kollimatorströme beinhalten finden sich in Abschnitt 7.

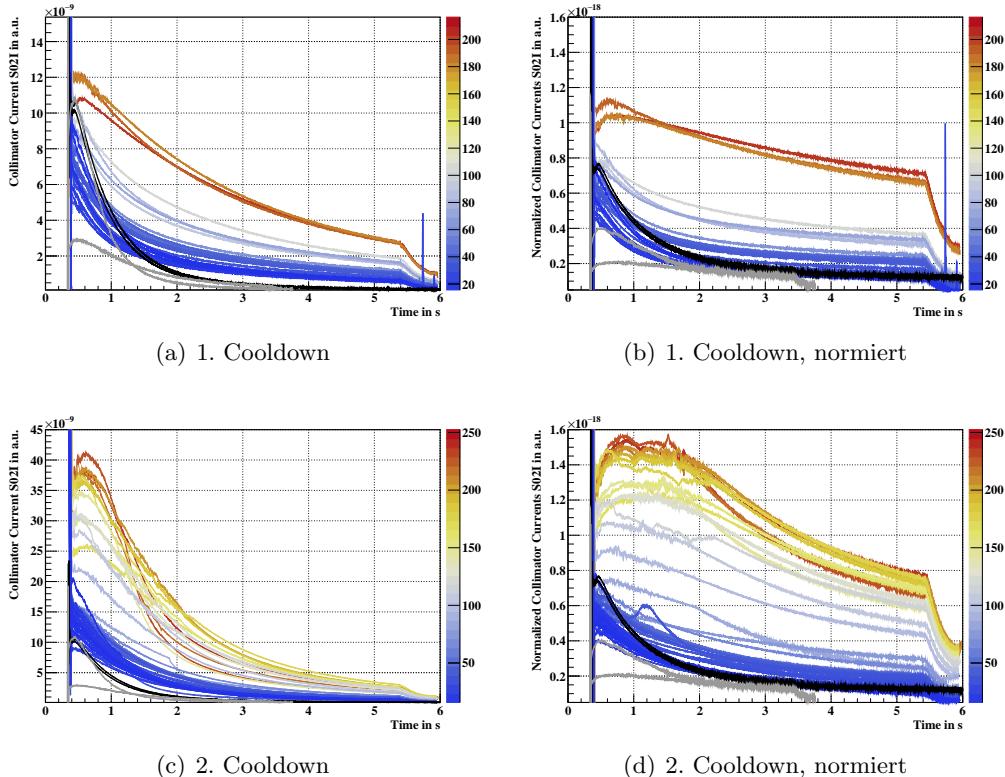


Abbildung 7: Kollimatorströme auf dem Umladungskollimator S02I, der Sektor hinter den Cryoinserts. Oben: Erster Abkühlvorgang mit je ca. $1.2 \cdot 10^{10}$ Teilchen pro Zyklus, unten: zweiter Abkühlvorgang mit je ca. $3.2 \cdot 10^{10}$ Teilchen pro Zyklus. Links: Rohdaten der Kollimatorströme, rechts: Kollimatorstrom auf die jeweils aktuelle Strahl-Intensität normiert. In der Farbe der Linie ist die Temperatur der Cryoinserts in S01 codiert. Zum Vergleich zeigen die schwarzen Kurven Kollimatorströme aus 2023 mit ca. $1.4 \cdot 10^{10}$ Teilchen U^{28+} pro Zyklus und die grauen Kurven zeigen Kollimatorströme aus 2022 mit $1.5 \cdot 10^{10}$ (tief) und $3 \cdot 10^{10}$ (hoch) injizierten U^{28+} Teilchen.

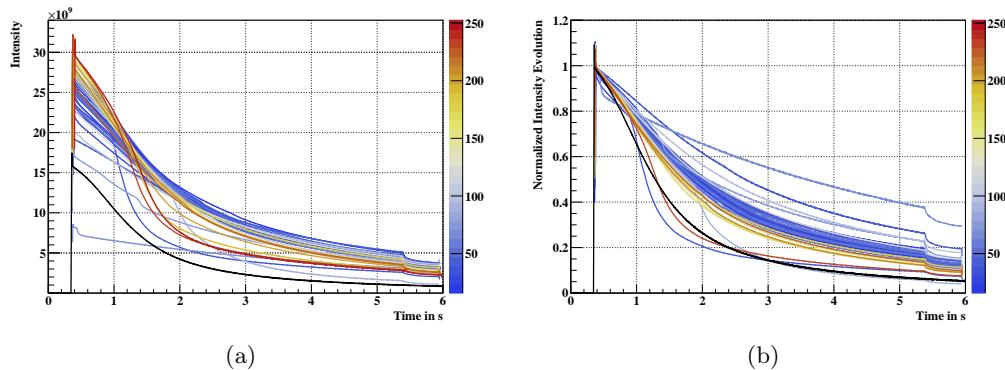


Abbildung 8: (a) Intensitäts-Verlauf der gespeicherten Strahlen während des zweiten Abkühlvorgangs. (b) Auf die Anfangsintensität normiert. Die Temperatur der Cryoinserts ist in der Farbe codiert. Die schwarze Kurve zeigt den Verlauf eines gespeicherten Strahls aus 2023.

4.3 Transmission der gespeicherten Strahlen

Der Intensitäts-Verlauf während des Speicherns von Strahlen im zweiten Abkühlvorgang ist in Abbildung 8 gezeigt. Auf der linken Seite im realen Intensitätsverlauf ist zu erkennen, dass hohe Intensitäten offenbar einen kritischen Wert überschreiten und es nach 1 s zu einem Zusammenbruch der Intensität kommt, während geringfügig niedrigere Intensitäten deutlich besser gespeichert werden können. Die gleichen Daten sind auf der rechten Seite auf die initiale Intensität normiert und die Temperatur der Cryoinserts wieder in der Farbe codiert. Hier ist zu erkennen, dass mit sinkender Temperatur offenbar die normierten Strahlen besser gespeichert werden können.

Zum Vergleich ist auch hier wieder eine Messung aus 2023 in schwarz gezeigt. Trotz niedrigerer Intensität konnte der Strahl während dieser Messung nicht so gut gespeichert werden. Im Shutdown 2023/2024 wurden drei Abschnitte blüftet und in zwei Vakuumabschnitten die Pumpen getauscht. Dies kann eine Ursache für das bessere Speichererverhalten des SIS18 sein. Um eine detailliertere Aussage dazu machen zu können, müssen die Kollimatorströme der einzelnen Sektionen verglichen werden.

4.4 Transmission von schnellen Zyklen

Zur Charakterisierung der intensitätsabhängigen Transmission werden die Anzahl extrahierter Teilchen über der Anzahl injizierter Teilchen aufgetragen, siehe Abbildung 9. Hier werden vom langsamen Trafo der höchste Wert nach Injektion und der letzte Wert vor Extraktion verwendet. Es ist (beim Vergleich mit Simulationen) zu beachten, dass der Wert bei Injektion nach Verlust der Injektionsverluste ist. Die Messung wurde bei 1 T/s durchgeführt, um Effekte des dynamischen Vakuums zu sehen. Eine Sättigung mit steigender injizierter Teilchenzahl ist jedoch nicht erkennbar. In der kalten Messung sind zwei „Zweige“ sichtbar. Die Herkunft muss noch evaluiert werden. Da dieser Effekt bei der warmen Messung nicht auftritt und nicht ausgeschlossen werden kann, dass hier der „bessere Zweig“ fehlt, wurde die Messung wiederholt.

Abbildung 10 zeigt wieder die Anzahl extrahierter Teilchen über der Anzahl gespeicherter Teilchen in das SIS18 für verschiedene Rampraten bei warmen und bei

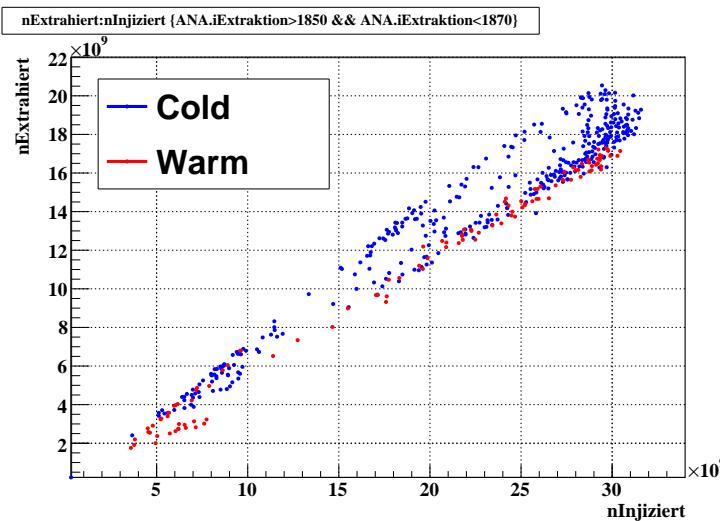


Abbildung 9: Anzahl extrahierter Teilchen über der Anzahl injizierter Teilchen in das SIS18 bei warmen und bei kalten Cryoinserts während des zweiten Abkühlvorgangs mit 1 T/s. In der kalten Messung sind zwei „Zweige“ sichtbar, deren Herkunft noch unbekannt ist. Da bei der warmen Messung nicht ausgeschlossen werden kann, dass hier der „bessere Zweig“ fehlt, wurden diese Messungen wiederholt.

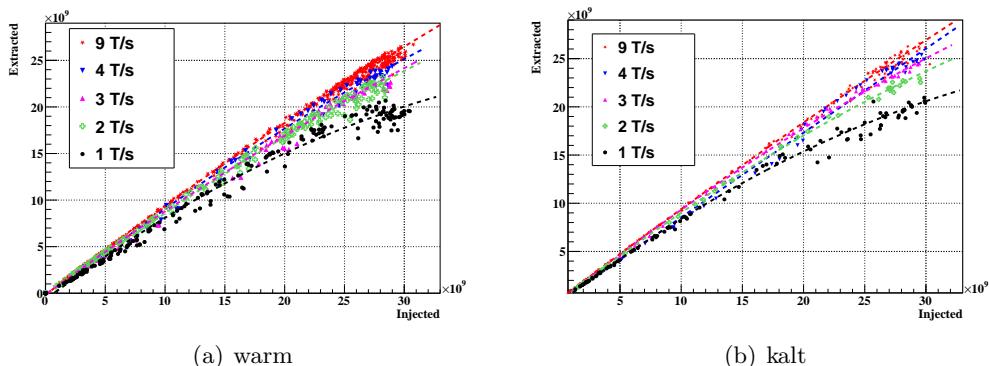


Abbildung 10: Anzahl extrahierter Teilchen über der Anzahl injizierter Teilchen in das SIS18 bei (a) warmen und bei (b) kalten Cryoinserts während des dritten Abkühlvorgangs für verschiedene Rampraten. Die Daten sind jeweils mit einer Parabel gefitett.

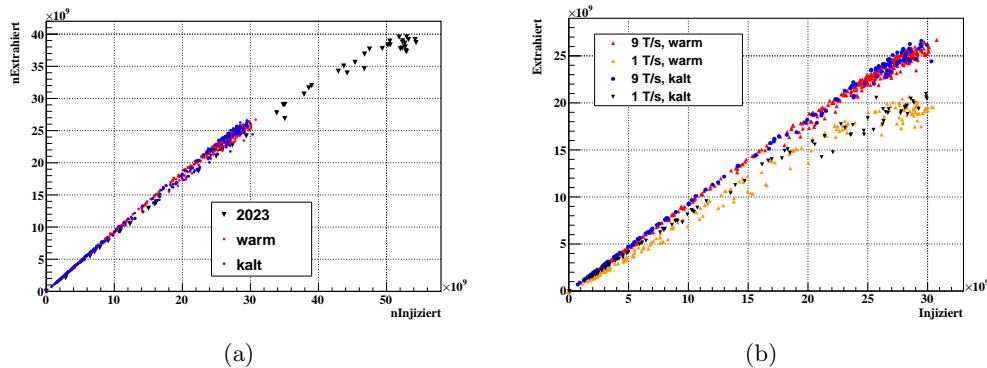


Abbildung 11: Vergleich zwischen warmen und kalten Cryoinserts anhand der Anzahl extrahierter Teilchen über der Anzahl injizierter Teilchen in das SIS18: (a) 9 T/s, sowie Vergleich mit Daten aus 2023. (b) Vergleich von großer und kleiner Ramprate.

kalten Cryoinserts. Die Daten sind mit Parabeln gefüttet um sie besser unterscheiden zu können. Es ist zu erkennen, dass bei hohen Rampraten ein linearer, nahezu winkelhalbierender Verlauf sichtbar wird. Mit sinkender Ramprate sinkt die Steigung und Nichtlinearität im Verlauf nimmt zu. Ein Unterschied zwischen warmen und kalten Cryoinserts ist schwer zu erkennen aber vorhanden. (Bspw. liegt die Parabel für 1 T/s für kalte Cryoinsert ein wenig höher als für warme Cryoinserts.)

Zu beachten ist, dass in diesen Abbildung immer noch zwei „Zweige“ ausgemacht werden können. Die Ursache der Zweige ist noch nicht ermittelt, sie treten aber eher bei niedrigen als bei hohen Rampraten auf.

Diese Abbildungen zeigen auch die Notwendigkeit der Nachoptimierung und Inbetriebnahme des Wasserstoff-Strippers. Mit $1 \cdot 10^{10}$ Teilchen wäre kein Unterschied sichtbar gewesen. Ein Vergleich von Daten bei warmen und kalten Cryoinserts ist in Abbildung 11 gezeigt. Bei den Daten für 9 T/s sind zum Vergleich auch Daten aus 2023 eingezzeichnet. Es ist zu erkennen, dass bei diesen Maschineneperimenten zwar nicht die gleiche maximale Intensität wie in 2023 erreicht werden konnte. Die Steigung der Kurve ist aber größer, was bedeutet dass in dieser Strahlzeit der Zyklus weniger Verlusten unterworfen war. Ob dies durch bessere Maschineneinstellungen oder bessere Vakuumbedingungen verursacht ist, kann anhand dieser Abbildung nicht gesagt werden. Die kalten Cryoinserts führen ebenfalls zu einer leichten Verbesserung der Transmission. Im Vergleich zwischen schneller und langsamer Ramprate kann ebenfalls eine leichte Verbesserung der Transmission durch abgekühlte Cryoinserts erkannt werden.

4.5 Ramprate

In den Maschineneperimenten von 2023 wurde die Abhängigkeit der Transmission von der Ramprate vermessen. In Abbildung 12 ist die Abhängigkeit der Anzahl extrahierter Teilchen von der Anzahl injizierter Teilchen und der Ramprate gezeigt. Es ist zu sehen, dass bei niedrigen Rampraten bereits ein Maximum bei Anzahl extrahierter Teilchen überschritten werden kann. Aufgrund von Zeitbeschränkungen wurde in diesem Jahr die Ramprate nicht so fein variiert, wie 2023. In Abbildung 13(a) sind die maximale Anzahl an extrahierten Teilchen als Funktion der Ramprate gezeigt. Bereits hier ist

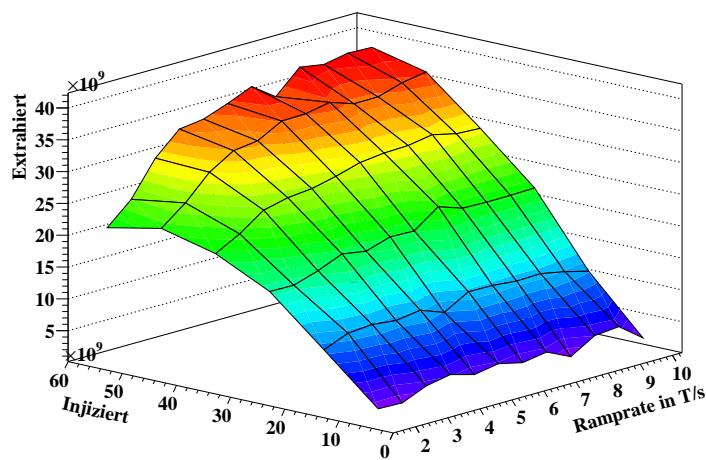
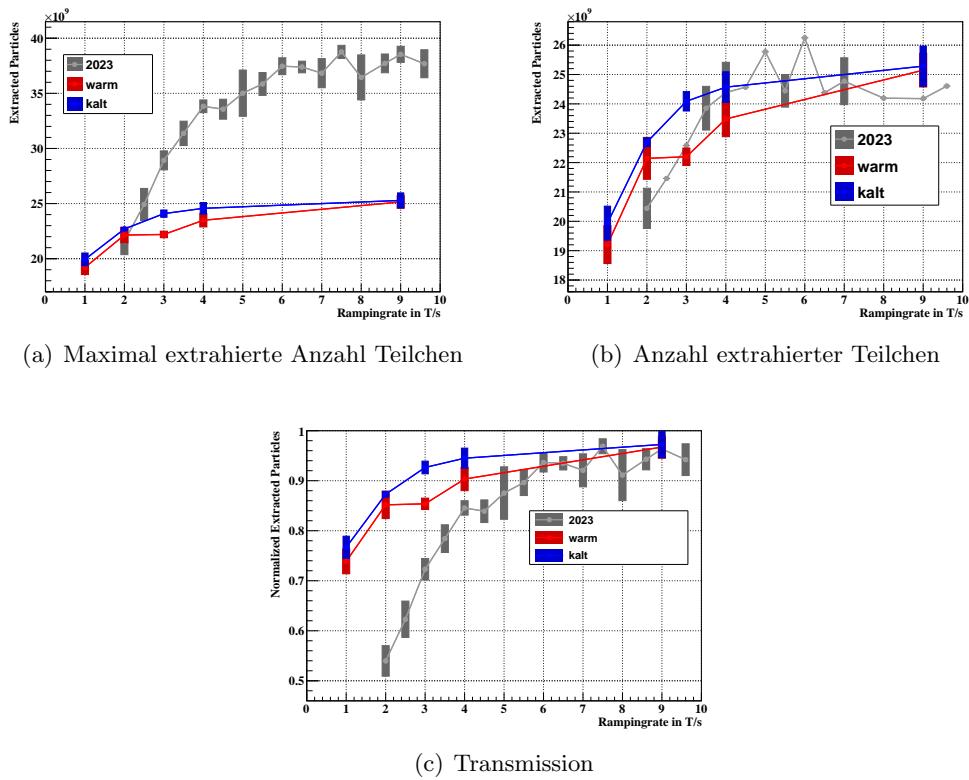


Abbildung 12: Anzahl extrahierter Teilchen als Funktion der Anzahl injizierter Teilchen und der Ramprate für Daten aus 2023.



(a) Maximal extrahierte Anzahl Teilchen

(b) Anzahl extrahierter Teilchen

(c) Transmission

Abbildung 13: Untersuchungen zur Ramprate: (a) Maximal extrahierte Anzahl Teilchen, (b) Anzahl extrahierter Teilchen, wobei die Daten aus 2023 auf den Intensitätsbereich aus 2025 beschränkt wurden, (c) Transmission. Es sind jeweils Daten mit warmen und kalten Cryoinserts, sowie zum Vergleich Daten aus 2023 mit dem aktuellen Hochstromrekord gezeigt.

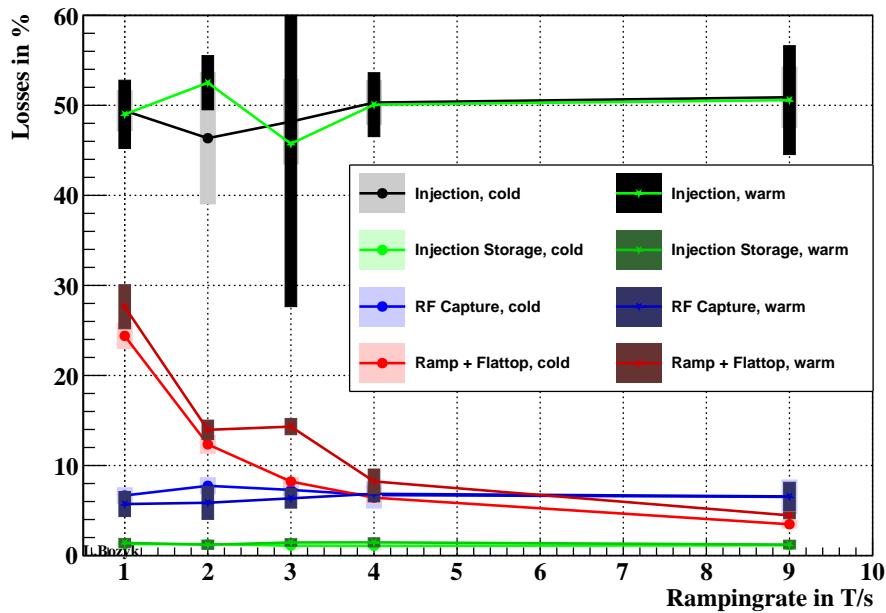


Abbildung 14: Analyse der Verluste innerhalb des Zyklus für verschiedene Rampraten bei warmen und kalten Cryoinserts.

zu erkennen, dass die Daten für kalte Cryoinserts oberhalb derer für warme Cryoinserts liegen. Aufgrund der höheren Intensität vom Injektor liegen die Daten von 2023 deutlich darüber. Sie schneiden aber die Werte aus diesem Jahr bei ca. 2 T/s. In Abbildung 12 entsprechen diese Daten einem Schnitt durch das Bild bei $> 5 \cdot 10^{10}$ injizierten Teilchen. Bei niedrigen Rampraten ist das also bereits jenseits des Maximums. Für Abbildung 13(b) wurden die Daten aus 2023 auf den Intensitätsbereich von 2025 beschränkt, um eine bessere Vergleichbarkeit zu erreichen. In dieser Abbildung ist der Unterschied zwischen warmen und kalten Cryoinserts erkennbar. Die kalten Cryoinserts führen zu einer leichten Verbesserung der Intensität. Die Daten aus 2023 liegen zumeist unterhalb den Daten aus 2025, was dafür spricht, dass der Zyklus weniger Umladungsverlusten unterlegen war. Abbildung 13(c) zeigt die Transmission. Auch hier ist eine Verbesserung durch das Abkühlen der Cryoinserts erkennbar, ebenso eine Verbesserung gegenüber 2023. Anzumerken ist, dass hier wieder die maximalen Intensitäten verglichen werden.

4.6 Analyse der Verluste

Analog zu [1] wurde eine Analyse der verschiedenen Verluste durchgeführt und eine Vergleich zwischen warmen und kalten Cryoinserts angestellt, siehe Abbildung 14. Es wurde die Ramprate variiert und die verschiedenen Verluste untersucht. Die Injektionsverluste wurden mit Hilfe der schnellen Trafos im TK und im SIS ermittelt. Der Bereich nach der Injektion bis zum Bunching wird als „Injection Storage“ bezeichnet. Die bisher genannten Verluste sollten unabhängig von der Ramprate sein. Verluste durch RF-Capture beschreiben die Stufe im Intensitätsverlauf zu Beginn der Beschleunigung. „Ramp + Flattop“ bezeichnet schließlich die Verluste während der Rampe und

Teilchenzahl/nInjiziert:t:nInjiziert { t>0.36}

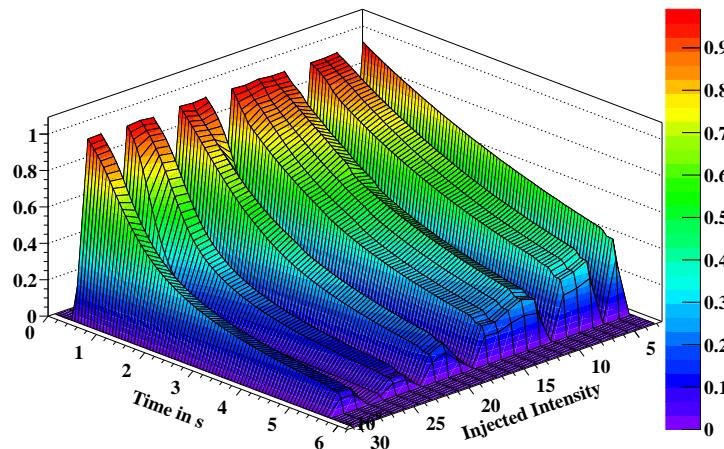


Abbildung 15: Transmission von gespeicherten Hochstromstrahlen als Funktion der Speicherzeit und der Anzahl injizierter Teilchen.

des Flattops, welche mutmaßlich durch Umladung hervorgerufen werden. Erkennbar ist, dass wie bereits in [1] nur die Verluste auf der Rampe deutlich von der Ramprate abhängen. Es ist aber auch erkennbar, dass diese Verluste durch das Abkühlen Cryoinserts reduziert werden, während alle anderen Verluste in erster Näherung unbeeinflusst bleiben durch die Temperatur der Cryoinserts.

4.7 Analyse von gespeicherten Strahlen

In Abbildung 15 ist die Transmission von für 5 s gespeicherten Hochstromstrahlen während der Speicherdauer als Funktion der Anzahl injizierter Teilchen dargestellt. Bei niedrigen Intensitäten ist ein linearer Zusammenhang sichtbar. Die Verlustrate ist also konstant während der Speicherdauer. Mit steigender Intensität steigt auch die Nicht-Linearität des Transmissionsverlaufes. Zu Beginn der Speicherdauer sind starke Verluste zu sehen, bis die Strahlintensität unter einen kritischen Wert gefallen ist, sodass der weitere Verlauf linear sein kann. Diese Nicht-Linearität wird durch Umladungsverluste verursacht und führt dazu, dass mit steigender Intensität die Speicherfähigkeit von teilgeladenen Schwerionenstrahlen abnimmt.

Aus der gleichen Messung wurden für Abbildung 16 Kollimatorströme verwendet. Zu sehen sind hier zeitliche Verläufe von auf die aktuelle Intensität normierte Kollimatorströmen aus S02-innen (bei abgekühlten Cryoinserts), für verschiedene Intensitäten von gespeicherten Strahlen. Diese Messung ist proportional zum Druck im Bereich von S01. Zu sehen ist, dass sich bei niedrigen Intensitäten ein konstanter Verlauf ergibt. Hier findet also keine Variation des Restgasdruckes während des Zyklus statt. Mit steigender Intensität steigt aber auch die Dynamik des Druckes innerhalb des Zyklus. Dieses „dynamische Vakuum“ führt zur Zunahme der Nichtlinearitäten in Abbildung 15.

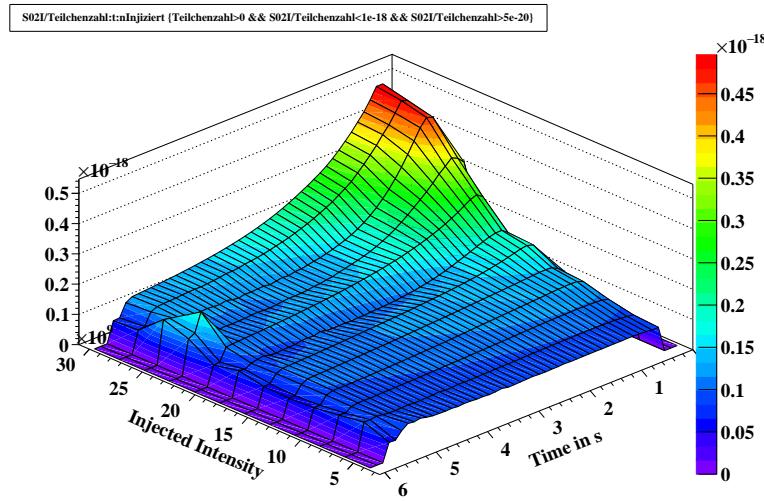


Abbildung 16: Zeitlicher Verlauf von intensitäts-normierten Kollimatorströmen als Funktion der injizierten Intensität.

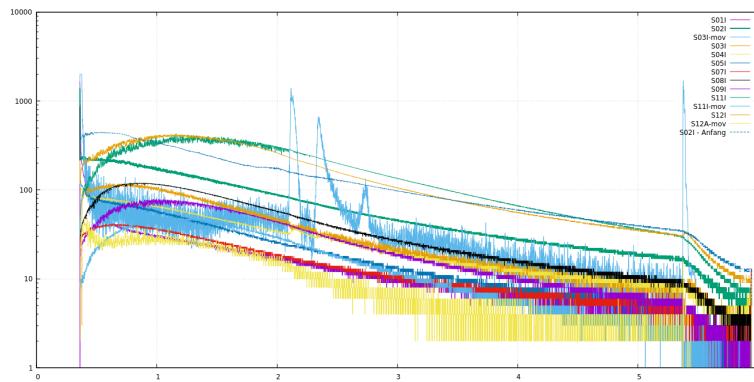
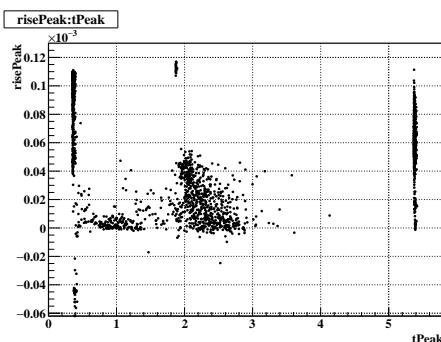
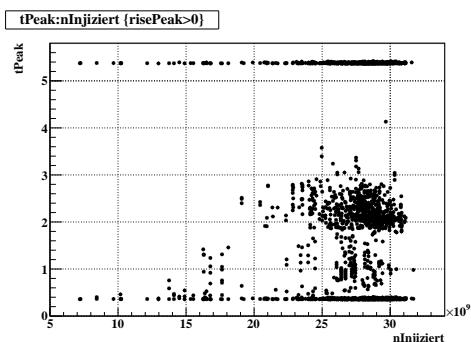


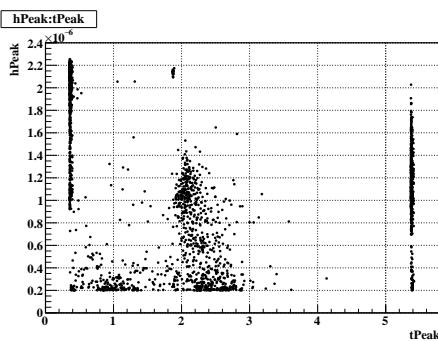
Abbildung 17: Spontan auftretende Peaks auf dem beweglichen Kollimator in S03 (türkis, zum Schutz des Extraktionsseptums). Dargestellt sind Rohdaten. Die Strommessung des Kollimators war in einem anderen Messbereich als die übrigen, weshalb die türkisene Spur einen Faktor 10 erniedrigt dargestellt ist.



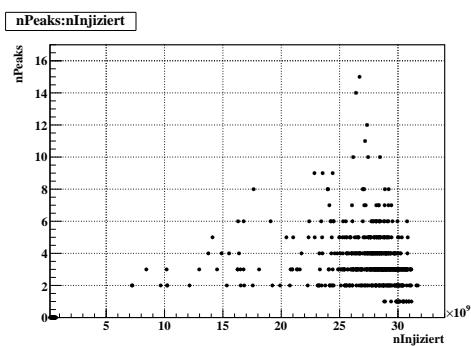
(a) Anstiegszeit über Zeitpunkt



(b) Zeitpunkt über Anzahl injizierter Teilchen



(c) Peak-Höhe über Zeitpunkt



(d) Anzahl Peaks über Intensität

Abbildung 18: Analyse der spontan auftretenden Peaks während der Speicherzeit von hochintensiven U^{28+} -Strahlen

5 Spontane Peaks auf S03

Während des Abkühlvorgangs wurden über mehrere Stunden Hochstrom-Strahlen im SIS18 gespeichert um das Verhalten der Kollimatorströme hinter den Cryoinserts zu vermessen. Dabei wurden auch die übrigen Kollimatorströme betrachtet und es ist aufgefallen, dass auf dem beweglichen Kollimator in S03 nicht nur ein höherer Strom als auf den übrigen Kollimatoren zu messen ist, sondern dass hier auch spontane Peaks auftreten. Abbildung 17 zeigt die aufgenommen Roh-Werte von Strömen aller Kollimatoren auf der Innenseite während einer solchen Speicherzeit. Zu beachten ist, dass der bewegliche Kollimator in S03 in einem höheren Messbereich betrieben wurde, wodurch seine Spur hier um den Faktor 10 reduziert dargestellt wird. Nichtsdestotrotz sind bei Injektion und Start der Rampe deutliche Peaks zu sehen, welche sich erklären lassen. In seiner transversal eingestellten Position schützt der Kollimator das elektrostatische Extraktions-Septum. Einfangverluste zu Beginn der Rampe sind hier also erwartungsgemäß messbar. In der Mitte der Speicherzeit, bei ca. 2 s wird jedoch kein voreingestellter Prozess durchgeführt, trotzdem sind hier spontan auftretende Verluste sichtbar.

Die Peaks auf dem beweglichen S03-Kollimator wurden analysiert. Dazu wurde zunächst jedes Ereignis, wo ein bestimmter Grenzwert (200 nA) überschritten wird, als Peak identifiziert. Für jedes Ereignis wurden folgende Größen ermittelt:

- Zeitpunkt des Überschreitens des Grenzwertes (tPeak)

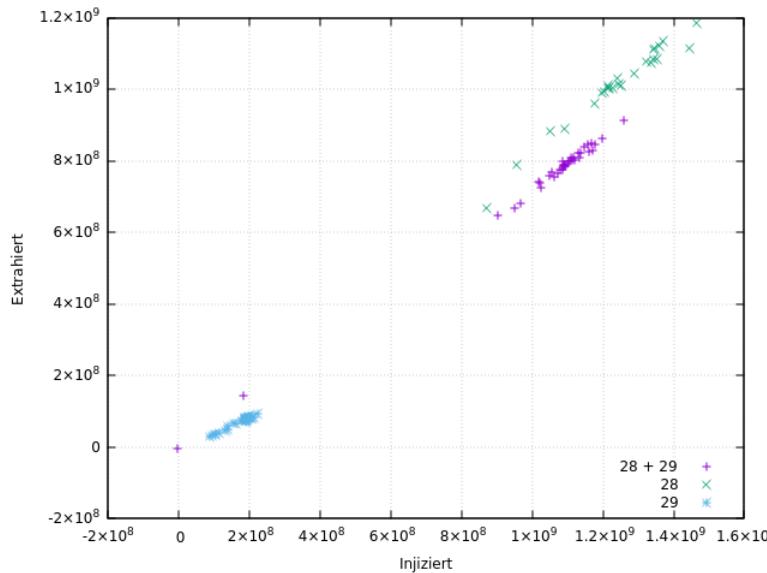


Abbildung 19: Multiladungs-Betrieb von U²⁸ und U²⁹ im Unilac, Vergleich der erreichbaren Intensitäten im SIS18.

- Länge des Peaks, Dauer zwischen Über- und Unterschreiten des Grenzwertes (lPeak)
- Höhe des Peaks, Maximaler Wert zwischen den beiden Trigger-Punkten
- Anstiegszeit zum Zeitpunkt des Überschreitens des Grenzwertes

Außerdem wurde die Anzahl der Peaks innerhalb eines Zyklus ermittelt. Diese Informationen wurden den Zyklusdaten hinzugefügt, sodass Korrelationen zwischen den Peak-Eigenschaften und Zyklus-Informationen hergestellt werden können. In Abbildung 18 sind verschiedene Zusammenhänge dargestellt. Die spontanen Peaks haben typischerweise eine geringere Anstiegszeit, als die Peaks bei Injektion und beim Start der Rampe, auch haben sie eine breitere Verteilung. Die Zeitpunkte variieren, eine Häufung tritt jedoch bei 2 s auf während nach 3 s fast keine Peaks mehr beobachtet werden. Von der (verwendeten) Intensität scheint es keine Abhängigkeit zu geben. Ggf. kann bei der Anzahl Peaks eine Abhängigkeit von der Intensität erkannt werden. Eine Abhängigkeit von der Injektionseffizienz ist nicht sichtbar.

Bei allen bisher betrachteten Darstellungen sind keine Zusammenhänge gefunden worden.

6 Multiladungs-Betrieb

Während des dritten Abkühlvorgangs wurden Messungen zum Multiladungs-Betrieb durchgeführt. Bei diesem Betriebsmodus werden im Unilac mehrere Uran-Ladungszustände gleichzeitig beschleunigt und im TK auf U⁷³ gestript. Dadurch soll die Intensität von U⁷³ für das SIS18 gegenüber dem Einladungs-Betrieb gesteigert werden. In vergangenen Experimenten am Unilac konnte eine Steigerung beobachtet werden, jedoch wurden noch kein Einschuss in das SIS18 durchgeführt. In Abbildung 19 ist ein Vergleich vom

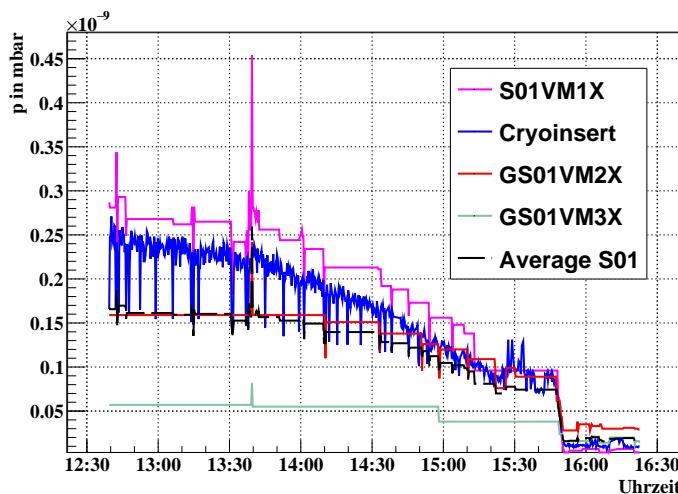


Abbildung 20: Druckverlauf in der Sektion S01 und am Cryoinsert während der zweiten Messung. Der Mittelwert ist über die Sektor-Messungen gebildet. S01VM1X und „Cryoinsert“ befinden sich beide am Cryoinsert; erstere am Strahlrohr, letztere weiter oben am UHV-Einsatz.

Multiladungs-Betrieb mit einzelnen Ladungszuständen aus dem Unilac gezeigt. Der Multiladungsbetrieb konnte keine Steigerung der Intensität hervorrufen.

7 Vergleich mit UHV-Daten

In Abbildung 20 ist der Druckverlauf in Sektion 1 während der zweite Messung gezeigt. Während dieser Zeit wurden die Cryoinserts abgekühlt. Alle Druckmessungen befinden sich am Strahlrohr, außer die Messröhre „Cryoinserts“; diese befindet sich weiter oben am UHV-Einsatz. Letztere wurde über eine eigene Datenerfassung aufgenommen, die Sektor-Messungen wurden dem SCADA-System entnommen. Der Mittelwert wurde über die Messröhren am Strahlrohr (also ohne „Cryoinsert“) genommen. Das Abkühlen der Cryoinserts beeinflusst den Druck in der gesamten Sektion 1. Der starke Druckabfall gegen 15:45 Uhr entsteht durch das Einsetzen des Wasserstoff-Pumpens an den Cryoinserts.

Die Dynamik der Kollimatorströme wurde für Abbildung 21 untersucht. Hierzu wird die Differenz zwischen dem Wert gegen Ende und zum Beginn der Speicherzeit gebildet. Es lassen sich mehrere Eigenschaften aus den Abbildungen ablesen:

- In fast allen Sektionen bleibt die Dynamik während der Messzeit näherungsweise konstant. Es gibt Sektionen mit mehr und mit weniger Dynamik.
- Nur in S02 kann eine große Variation beobachtet werden, welche durch das Abkühlen der Cryoinserts in S01 hervorgerufen wird.
- Es gibt Temperatur-Bereiche, wo in S02 eine Zunahme und in einigen anderen Sektionen (zB. S03) eine gleichzeitige Abnahme der Dynamik beobachtet werden kann. Die Ursache lässt sich nicht zweifelsfrei feststellen. Die Injektions-Intensität ist in diesen Zeiträumen temporär leicht reduziert. Ggf. wurden kurzzeitig Einstellungen geändert, um die spontanen Peaks in S03 zu beobachten.

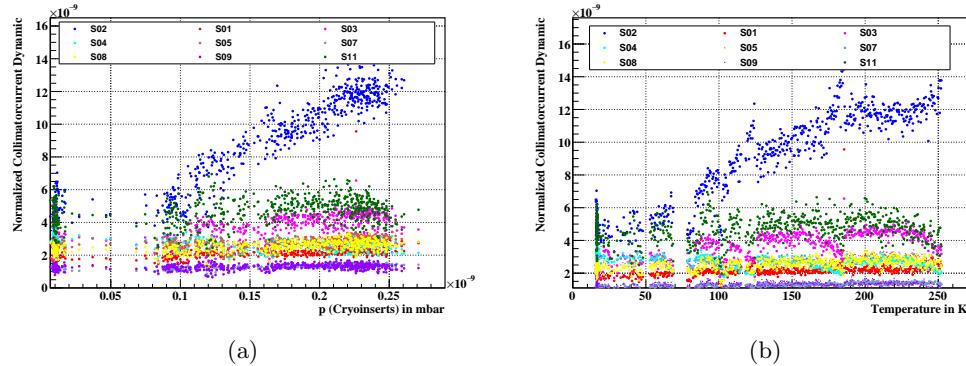


Abbildung 21: Dynamik der Kollimatorströme (Differenz zwischen End-Wert und Wert zu Beginn) als Funktion von (a) des Drucks an den Cryoinserts und (b) der Temperatur an den Cryoinserts.

- Unterhalb von 10^{-10} mbar ist ein Bereich mit wenigen Messpunkten. Dies ist der Bereich, wo der Druck mit dem Einsetzen des Wasserstoff-Pumpens schnell gefallen ist. Offenbar hat das Wasserstoff-Pumpen keinen Einfluss auf die Vakuumdynamik, da in diesem Bereich unterhalb von ca. 60 K keine weitere Abnahme der Dynamik in S02 mehr zu beobachten ist.

Das Speichern von intensiven Strahlen bei Injektionsenergie führt dazu, dass nicht nur Kollimatorströme für Elektronenverlust (Ionisation) auf der Innenseite, sondern auch Ströme für Elektroneneinfang (Außenseite) gemessen werden können. In Abbildung 22 ist das Verhältnis aller gemessener Ströme zwischen Innenseite und Außenseite als Funktion der Temperatur der Cryoinserts gezeigt. Die Sektionen können in zwei Gruppen eingeteilt werden: Hohes und niedriges Verhältnis. Zu den Sektionen mit hohem Verhältnis gehören S11 und S12, also die Sektionen S10 (Elektronenkühler) und S11 (Spillglättungskavität). Die Ströme in S02, also die Druckverhältnisse an den Cryoinserts wechseln während des Abkühlens vom hohen zum niedrigen Verhältnis. Das weist darauf hin, dass sich die Restgaszusammensetzung ändert.

8 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Cryoinserts konnten erstmalig beim Betrieb mit Schwerionenstrahlen abgekühlt werden. Es wurde der Einfluss auf gespeicherte Strahlen untersucht und es konnten Abhängigkeiten von der Temperatur der Cryoinserts beobachtet werden. Eine leichte Verbesserung der Transmission ist sichtbar und eine deutliche Reduktion der Umladungsströme kann verzeichnet werden. Gleichzeitig liegen die Umladungsströme bei warmen Cryoinserts jedoch deutlich höher als in den Vorjahren. Ob dies durch eine lokale Verschlechterung des Vakuums durch den Einbau der Kryoinserts oder systematische Verluste durch Maschineneinstellung verursacht wird, konnte noch nicht festgestellt werden.

Von diversen Messungen an kryogenen UHV-Systemen ist der schnelle Druckabfall mit Einsetzen des Wasserstoff-Pumpens bekannt. Dieser hat aber offenbar keinen messbaren Einfluss auf den Strahl. Mit dem Einsetzen des Wasserstoffpumpens ist keine Auswirkung auf den Ionenstrahl messbar. Von der Theorie erwartet man, dass die

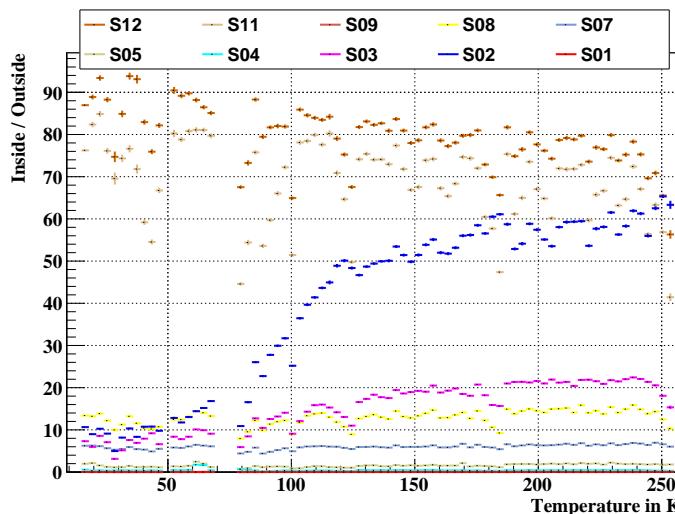


Abbildung 22: Verhältnis zwischen Elektronenverlust (Innenseite) und Elektroneneinfang (Außenseite) als Funktion der Temperatur der Cryoinserts für alle Kollimator-Pärchen im SIS18.

Wasserstoff-Querschnitte etwa eine Größenordnung kleiner sind, als übrige Querschnitte. Anhand der Messungen zur Kollimatorstrom-Dynamik kann dies bestätigt werden.

9 Anhang

Im Anhang befinden sich einige Bilder, welche nicht im Fließtext positioniert werden sollen. Abbildung 23 zeigt alle festen Kollimatoren auf der Innenseite während des Abkühlens. Alle Abbildungen haben die gleiche Skalierung und zeigen normierte Kollimatorströme. Erwartungsgemäß ist nur in S02 eine große Variation mit der Temperatur sichtbar. In S03 kann eine kleine Variation mit der Temperatur festgestellt werden, dies kann auf die Verluste in S02 zurückgeführt werden. Hier kann also erkannt werden, wie die Propagation der Druckwelle um den Ring eingeschränkt wird. In den meisten Sektionen ist keine Abhängigkeit von der Temperatur zu sehen. Zum Vergleich sind jeweils Daten aus 2023 (schwarz) und aus 2022 (grau) mit vergleichbaren Intensitäten eingezeichnet. Hier kann also erkannt werden, wie sich der mittlere Druck in den verschiedenen Sektion über die Jahre verändert hat. (Zu beachten ist, dass die Kollimatorströme immer proportional zum Druck in der vorangehenden Sektion sind.)

Literatur

- [1] L. H. J. Bozyk and P. J. Spiller, “SIS18 Operation with U^{28+} ”, in *Proc. IPAC24*, Nashville TN, USA, May 2024,
- [2] L.H.J. Bozyk, P.J. Spiller, “Measurement of Beam Ionization Loss in SIS18”, in *Proc. IPAC’14*, Dresden, Germany, June 2014, pp. 864–866, doi:10.18429/JACoW-IPAC2014-MOPRI104

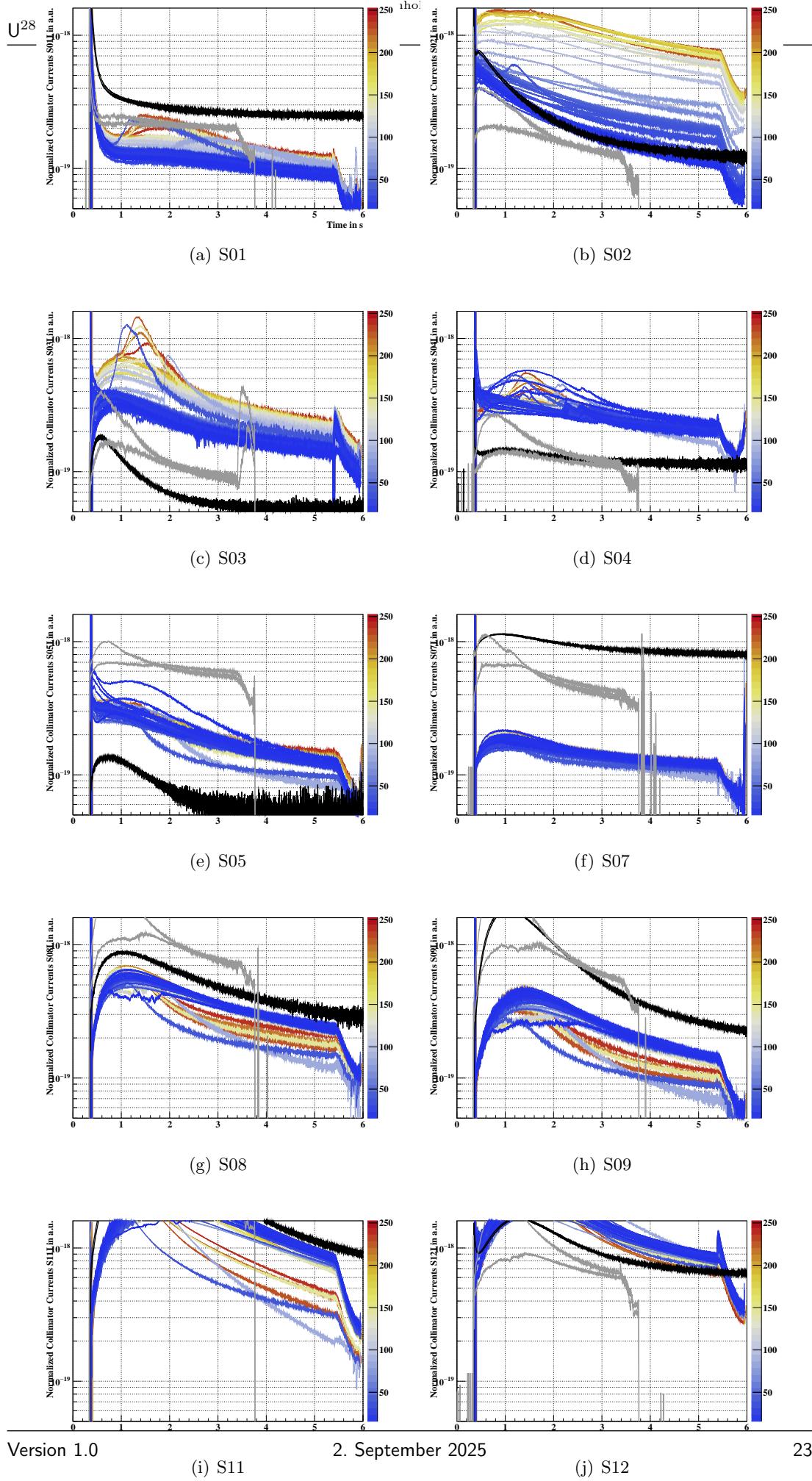


Abbildung 23: Vergleich aller Kollimatorströme während des Abkühlens, siehe auch Abbildung 7.

10 Version History

- 1.0 Version 1 (L.Bozyk).