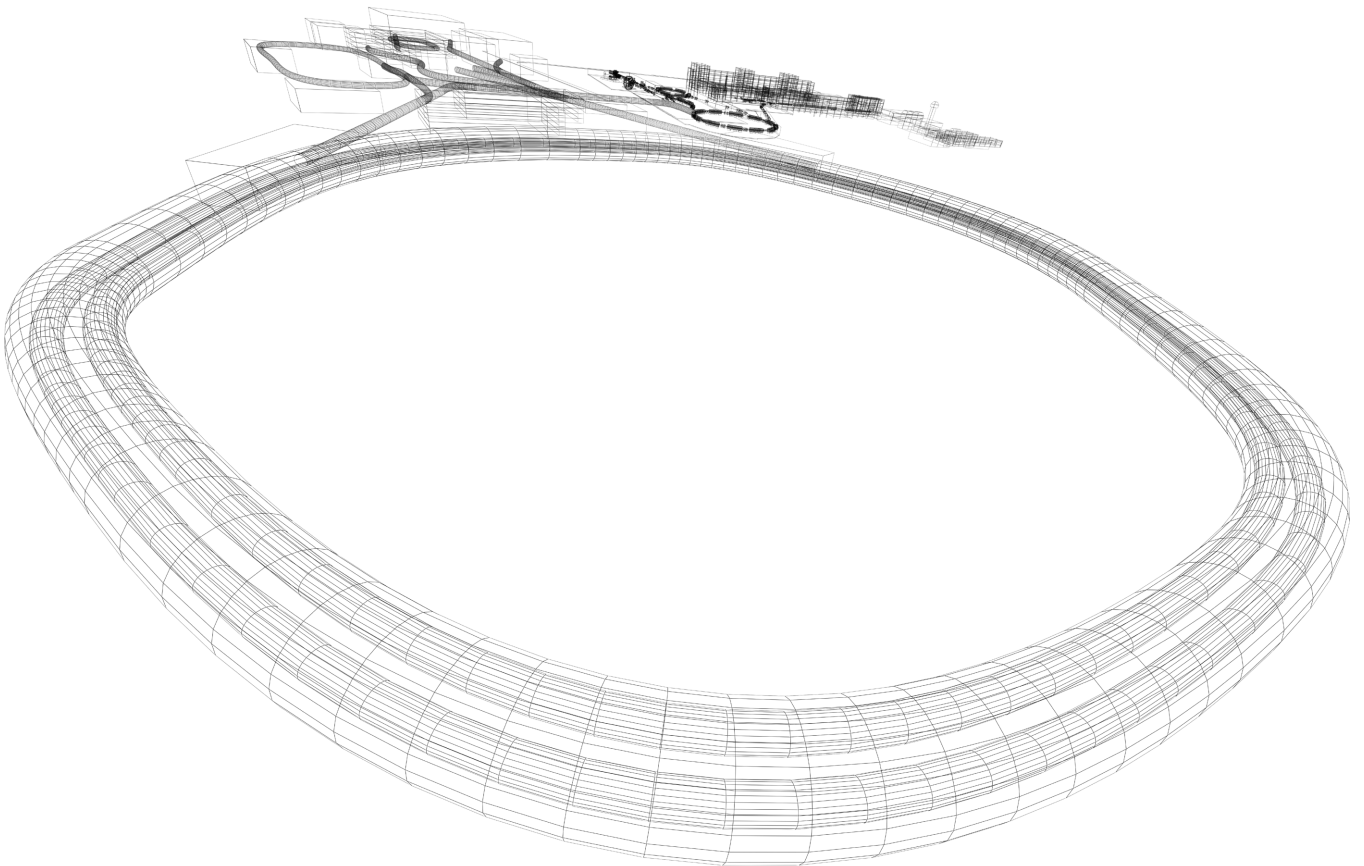


Loss Calculations for an Ion Beam under Dynamic Vacuum Conditions in a Circular Accelerator

Carsten Omet; Peter Spiller

GSI



GSI-Acc-Report-2004-12-001

December 22, 2004

Interner Bericht

StrahlSim:

**Optimierung eines Kollimatorsystems zur Kontrolle von
Umladungsverlusten und Desorptionsgasen
und
Strahlverlustberechnung eines Ionenstrahls im dynami-
schen Vakuum eines Ringbeschleunigers**

GSI, 15.12.2004

C. Omet, P. Spiller

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	3
1 ZUSAMMENFASSUNG	4
2 GRUNDLAGEN	4
2.1 Teilchen-Tracking	4
2.2 Lebensdauerberechnung	6
2.2.1 Coulomb-Streuung an Restgaspartikeln	7
2.2.2 Projektil-Ionisation	7
2.2.3 Target-Ionisation	8
2.2.4 Desorptionsterme	9
2.2.5 Vakuum-Parameter	10
2.2.6 Zusammenfassung der Verlustmechanismen	10
2.2.7 Beschleunigungszyklus	11
3 PROGRAMMOBERFLÄCHE	12
4 SIMULATIONSERGEBNISSE (SIS12/18)	14
4.1 Vergleich mit experimentellen Ergebnissen	15
4.2 Ausblick auf den Booster-Betrieb des SIS12/18	16
5 SCHLUSSFOLGERUNGEN	18
6 REFERENZEN	18

Einleitung

Schwerionenstrahlen können bei Stößen mit Restgasatomen mit einer gewissen, durch den Wirkungsquerschnitt definierten Wahrscheinlichkeit den Ladungszustand ändern. Durch die Änderung des Ladungszustandes ändert sich die magnetische Steifigkeit des Ions relativ zum Referenzion. Ist die Abweichung gegenüber der Sollbahn groß genug, so werden die umgeladenen Ionen in der Regel hinter den Umlenkmagneten die Apertur der Kammer erreichen und verloren gehen. Durch das Auftreffen der Ionen auf der Kammerwand werden auf und in der Oberfläche gebundene Sekundärteilchen freigesetzt (desorbiert), welche lokal zu einem Druckanstieg führen. Der lokale Druckanstieg vergrößert wiederum die Umladungsverluste, sodass sich im Extremfall ein lawinenartiger Verlust von Strahlionen einstellen kann. Eine Methode, diesem Prozess entgegen zu wirken, ist die lokale Kontrolle der desorbierten Gase in speziellen Kollimatoren [SPILL]. Darüber hinaus gibt es weitere Größen die für die Lebensdauer des Strahles von Bedeutung sind. Bei der zeitaufgelösten Berechnung der Strahlverluste müssen alle relevanten Mechanismen berücksichtigt werden. Diese sind:

- Anfängliche, systematische Strahlverluste (z.B. Injektionsverluste).
- Projektil- und Target Ionisations- und Einfangquerschnitte und dem daraus resultierenden Ionisationsgrad und Vielfach-Ionisationsgrad.
- Kollimationseffizienz für jeden erzeugten Ladungszustand.
- Energieabhängigkeit der Kollimationseffizienz und der Wirkungsquerschnitte.
- Effektive Desorptionsrate des Kollimatorsystems.
- Anfängliche Restgaszusammensetzung.
- Realistische Saugleistung des UHV Systems für jede Restgassorte.
- Desorptionskoeffizient und Annahmen für die Zusammensetzung des desorbierten Gases.
- Desorption hervorgerufen durch Targetionisation.
- Coulomb-Streuung am Restgas

Basis für die Berechnungen ist ein ionenoptisches „tracking“ Programm in welches die oben genannten Effekte implementiert wurden.

1 Zusammenfassung

Zur genauen Analyse des Beitrages eines Kollimatorsystems wurde das Programm „StrahlSim“ entwickelt. Es ermöglicht die Berechnung der Effizienz eines speziellen Kollimatorsystems und daraus resultierend eine Abschätzung der Lebensdauer des umlaufenden Ionenstrahls in einem Synchrotron.

Der Algorithmus wurde teilweise durch Experimente verifiziert. Eine Abschätzung der kritischen Parameter, welche das SIS18 im Rahmen des FAIR-Projektes erfüllen muss, wurde vorgenommen.

2 Grundlagen

Eine vollständige Beschreibung der Effekte, welche die Lebensdauer von Ionenstrahlen in einem Ringbeschleuniger beeinflussen, erfordert neben der Berechnung der Teilchenbahnen in der Ringstruktur die Betrachtung der Wechselwirkungen des Strahls sowohl mit ihm umgebenden Restgas.

Im Folgenden werden die Grundlagen des Programms „StrahlSim“ zusammengefasst.

2.1 Teilchen-Tracking

Zur optimalen Positionierung der Kollimatoren müssen die Stellen berechnet werden, an denen die ionisierten Partikel auf die Strahlwand auftreffen. Die Impulsabweichung $\Delta p / p$ eines Partikels der Ladung q zu den Referenzpartikeln mit der Ladung q_0 ergibt sich zu:

$$\frac{\Delta p}{p} = \frac{q_0}{q} - 1 \quad (1)$$

Die Berechnung der Auftreffpositionen umgeladener Ionen basiert auf linearer Strahloptik, wie sie z.B. in [WOL] bzw. [WIL] beschrieben wird. Hier wird jedem Element im Strahlengang (Dipol, Quadrupol, Driftstrecke) eine Transfermatrix zugeordnet. Auch Teilchen mit durch Umladung veränderter magnetischer Steifigkeit (bzw. daraus resultierender Impulsabweichung) sind damit berechenbar. Die mit „StrahlSim“ berechneten Strahlverläufe wurden mit dem Programm „WINAGILE“ verglichen und weisen gute Übereinstimmung auf.

Zur Analyse der Kollimationseffizienz werden die auf den Kollimator und die Strahlwand auftreffenden Partikel mit Position, mittlerem Winkel und Ladungszustand registriert. Die Größe der Emittanzen in x (horizontal)- und y (vertikal) -Richtung kann definiert werden; über die TWISS-Parameter wird der entsprechende Anfangs-Phasenraumverteilung erzeugt. Derzeit können zwei Verteilungsfunktionen ausgewählt werden a) abgeschnittene Gausverteilungen und b) Rechteckverteilungen.

Als Aperturbegrenzungen können beliebige Ellipsen und Rechtecke (beide mit Verschiebung bzgl. der Mitte) angegeben werden. Ein typisches Ergebnis einer Simulation ist in Abbildung 1 abgebildet.

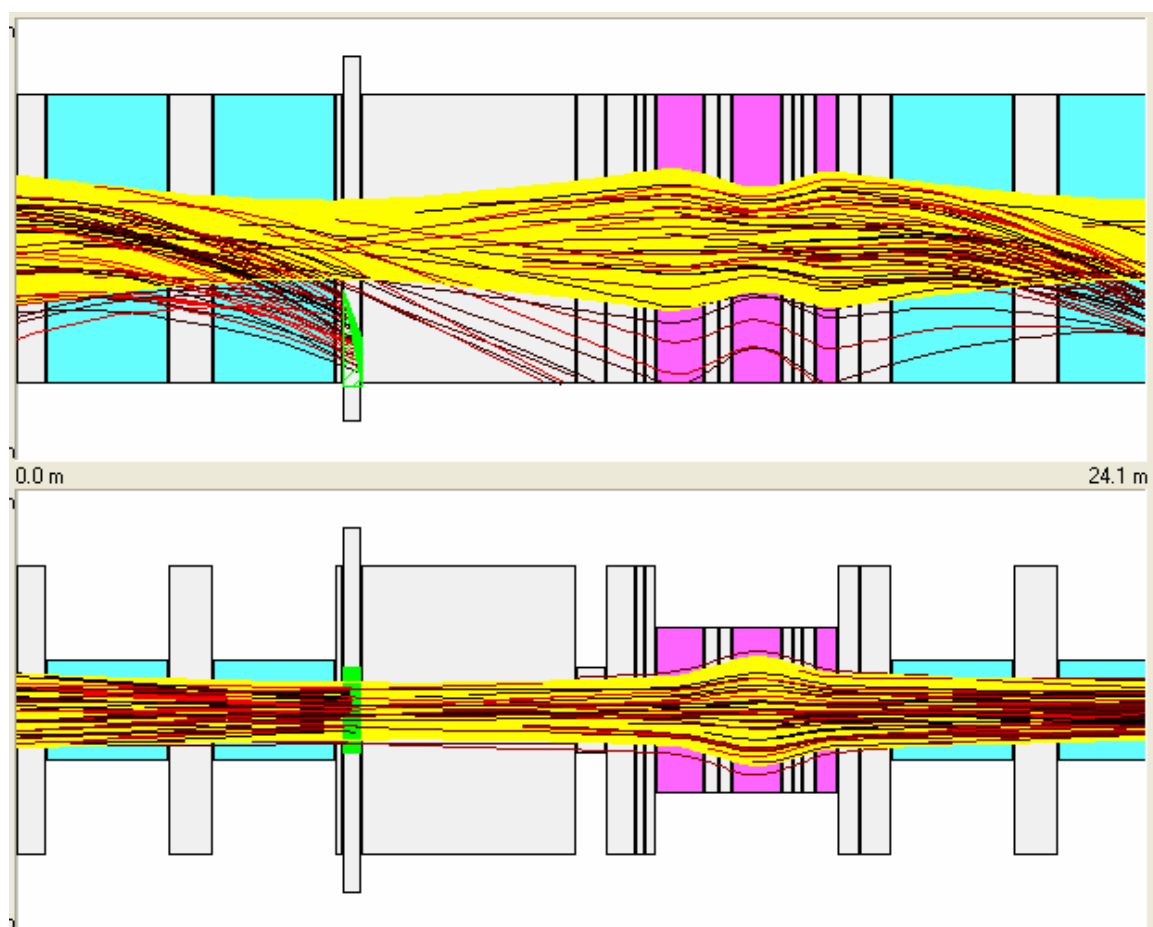


Abbildung 1: Simulierter Strahlverlauf von $U^{28+} \rightarrow U^{29+}$ im SIS18

Die Position und Eigenschaften der Elemente (Dipole, Quadrupole, Driftstrecken und Kollimatoren) sind auf Windows-Art direkt im Programm editierbar. WinAGILE- und MIRKO-Dateien können importiert werden. Ein einfacher Export in das MAD-X-Format ist ebenfalls implementiert und möglich.

Die folgende Berechnung wurde mit $2,5 \cdot 10^5$ Probeteilchen durchgeführt. In Abbildung 2 ist die Verteilung der durch einfache Ionisation verlorenen U^{29+} -Ionen aufgetragen. Die Abbildung zeigt die Verluste entlang des gesamten SIS18 Umfanges, wobei realistische Strahlrohr- und Geräteaperturen zugrunde gelegt wurden.

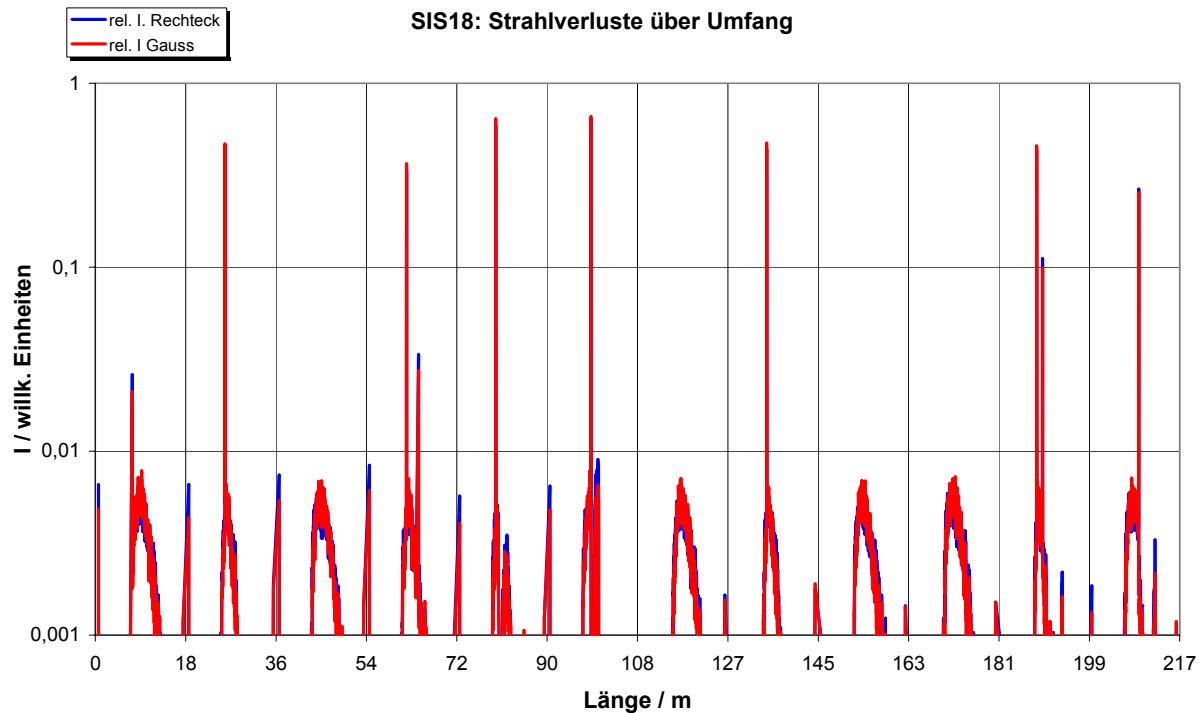


Abbildung 2: Verlustverteilung von einfach ionisierten U^{28+} -Ionen entlang des SIS18 Umfanges.

2.2 Lebensdauerberechnung

Zur Abschätzung der Lebensdauer eines Strahls im Vakuum werden folgende Verlustprozesse des Primärstrahles berechnet:

- Projektil-Ionisation durch Restgaspartikel
- Coulomb-Streuung durch Restgaspartikel

Weiterhin werden die folgenden Erzeugungsprozesse von Restgaspartikeln berücksichtigt:

- Kontinuierliches Ausgasen von Metalloberflächen
- Ioneninduzierte Desorption unter streifendem Winkel und hoher Energie (Projektion)
- Ioneninduzierte Desorption unter senkrechtem Winkel und niedriger Energie (Targetion)

Auf das Zustandekommen der einzelnen Prozesse wird im Folgenden kurz eingegangen. Abschließend wird die Auswirkung der einzelnen Effekte zusammengefasst dargestellt.

2.2.1 Coulomb-Streuung an Restgaspartikeln

Unter der Annahme, dass die Elektronen um den Kern des Ions keinen Beitrag zur Streuung, sondern nur zum Energieverlust beitragen [JACK], lässt sich nach [RGIBS] die Verlustrate eines Ionenstrahls durch Streuung an Restgaspartikeln beschreiben durch

$$\Gamma_{Streu} = \frac{2 \cdot \pi \cdot Z^2 \cdot r_p^2 \cdot c \cdot n_{sc}}{A^2 \cdot \gamma^2 \cdot \beta^3} \cdot \left(\frac{\langle \beta_h \rangle}{\varepsilon_{acc,h}} + \frac{\langle \beta_v \rangle}{\varepsilon_{acc,v}} \right) \quad (2)$$

wobei $r_p = 1,535 \cdot 10^{-18} m$ der klassische Protonenradius, β und γ die relativistischen Faktoren sind. ε_{acc} ist die horizontale bzw. vertikale Akzeptanz des Beschleunigers und $\langle \beta_{h,v} \rangle$ die mittlere Betafunktion des Ringes. c ist schließlich die Lichtgeschwindigkeit, A die Massenzahl, Z die Kernladungszahl des Ions und n_{sc} die Coulomb-Streuungsdichte, welche gegeben ist durch:

$$n_{sc} = \sum_i Z_i^2 \cdot n_i \quad (3)$$

wobei n_i die Teilchendichte und Z_i die Kernladungszahl aller vorkommenden Vakuum-Bestandteile beschreibt.

2.2.2 Projektil-Ionisation

Bei der Projektil-Ionisation werden die schnellen, schweren Projektile durch Wechselwirkung mit den (sich in Ruhe befindlichen) Restgas-Molekülen ionisiert. Dies kann entweder in Form eines Elektronenverlustes ($q \rightarrow q+n$) oder auch als Elektro-neneinfang ($q \rightarrow q-n$) geschehen.

Die Wirkungsquerschnitte für diesen Effekt sind in dem für das FAIR Projekt relevanten Energiebereich ($\sim 6 \dots 2.700 \text{ MeV/u}$) bislang nur für wenige Ionenarten genau bekannt. Sie wurden für U^{28+} durch [OLS] mittels einer CTMC- (Classical Trajectory

Monte Carlo) Simulation berechnet und liegen im Bereich von einigen 10^{-20} bis 10^{-24} m^2 . Die Verlustrate ergibt sich zu:

$$\Gamma_{PI} = \beta \cdot c \cdot \sum_k \sum_i n_i \cdot \sigma_i(E, q_k) \quad (4)$$

Wobei β der relativistische Faktor, c die Lichtgeschwindigkeit, E die Projektil-Energie und q_k die einzelnen Ladungszustände sind. n_i schließlich sind die Teilchendichten und σ_i die von der Projektilenergie und dem Ladungszustand abhängigen Wirkungsquerschnitte der einzelnen Vakuumkomponenten. Diese werden aus den in [OLS] genannten Daten durch Interpolation berechnet.

2.2.3 Target-Ionisation

Bei der Target-Ionisation werden (praktisch ruhende) Partikel des Restgases durch Wechselwirkung mit den sehr schnellen und schweren Ionen ionisiert. Als Folge entstehen ein Elektron und ein Ion, wobei letzteres durch das Potential des umlaufenden Strahles in Richtung Strahlwand beschleunigt wird und diese mit einigen keV Energie nahezu senkrecht trifft. Der Wirkungsquerschnitt für die Target-Ionisation lässt sich durch die Formel von Bethe [GILL] beschreiben:

$$\sigma_{Bethe} = 4 \cdot \pi \cdot a_0^2 \cdot \frac{\alpha^2}{\beta^2} \cdot \left\{ M_{ion}^2 \cdot \left[\ln \left(\frac{\beta^2}{1 - \beta^2} \right) - \beta^2 \right] + C_{ion} + \gamma_{ion} \cdot \frac{\alpha^2}{\beta^2} \right\} \quad (5)$$

Hierbei ist α wieder die Feinstrukturkonstante, a_0 der Bohr'sche Atomradius, β der relativistische Faktor; M_{ion} , C_{ion} und γ_{ion} sind targetspezifische Parameter, welche empirisch ermittelt wurden. Diese Formel ist allerdings unabhängig vom Vorzeichen der Projektilladung und seiner Masse. Das Vorzeichen der Ladung wird nur bei Energien kleiner als ca. 2 MeV/u wichtig. Dann handelt es sich nicht mehr um eine Coulomb-Kollision der Target-Elektronen mit dem Projektil, sondern um eine Kollision der Atome als Ganzes.

Für Partikel mit Ladungszuständen $q > 1$ findet man in [GILL], dass die Ionisations-Wirkungsquerschnitte skalieren wie:

$$\sigma_i = q^2 \cdot \exp \left[-\lambda \cdot |q| \cdot \left(\frac{\alpha}{\beta} \right)^2 \right] \cdot \sigma_{Bethe} \quad (6)$$

Der Parameter λ ist wieder targetspezifisch und wird empirisch bestimmt. In Tabelle 1 sind die aus [GILL] und [CERN] bekannten Parameter aufgeführt. Die berechneten Wirkungsquerschnitte gelten für U^{28+} bei $\beta = 0,155$.

Tabelle 1: Ionisationsparameter für Moleküle und Atome

Element	Masse / u	Z	M_{ion}^2	C_{ion}	γ_{ion}	λ	σ_{Bethe} / m ²	σ_i / m ²
H ₂	2	2	0,7	8,12	-1,3	1	4,31E-22	3,176E-19
He	4	2	0,75	7,7	-1,21	2	3,84E-22	2,657E-19
CH ₄	16	10	4,2	41,85		1,5	2,05E-21	1,464E-18
H ₂ O	18	10	3,24	32,36		1,5	1,59E-21	1,134E-18
N ₂	28	14	3,74	34,84		1,5	1,64E-21	1,168E-18
CO	28	14	3,7	35,14		1,5	1,67E-21	1,193E-18
O ₂	32	16	4,2	38,84		1,5	1,81E-21	1,296E-18
Ar	40	18	4,22	37,93		1,6	1,74E-21	1,233E-18
CO ₂	44	22	5,75	56		1,5	2,71E-21	1,933E-18
Xe	131	54	8,04	72,35		0,8	3,32E-21	2,475E-18

2.2.4 Desorptionsterme

Durch Coulomb-Streuung ausgelenkte und durch Projektil-Ionisation umgeladene Partikel treffen meist, wenn sie nicht wieder zurückfokussiert werden, unter streifen- dem Winkel auf die Strahlrohrwand auf. Bei diesem Prozess wurden Desorptionsra- ten von

$$\eta_{\perp} \approx 20.000...30.000$$

beobachtet [MUST].

Ionisierte und im Strahlpotential in Richtung Strahlrohr beschleunigte Targetatome, treffen dort unter nahezu senkrechtem Einfallswinkel mit einer Energie einiger keV auf. Daraus resultiert eine Desorptionsrate im Bereich

$$\eta_{\perp} \approx 10...100 \text{ [BOINE]}.$$

2.2.5 Vakuum-Parameter

Für die Berechnung des dynamischen Drucks des Vakuums werden weitere Parameter des UHV Systems benötigt. Diese sind:

Parameter	Symbol	Einheit	Bemerkung
Anfangsdruck	p_0	PA	
Anfangs-Zusammensetzung des Vakuums	$p_{i,0}$	%	
Anteil an Desorption	WK_i	%	
Pumprate	$Q_{i,Saug}(n_i)$	m ³ /s	basiert auf der Saugleistung der diskreten Pumpen und dem Leitwert des UHV Systems
Volumen des Beschleunigers	V	m ³	ergibt sich aus der Geometrie des UHV Systems
Ausgasrate der Oberflächen	$Q_{i,Ausgas}$	s ⁻¹	kann aus statischem Anfangsdruck und Pumprate berechnet werden
Kollimations-Effizienz	$Koll_{eff}(E, q)$	%	wird aus Lattice, Kollimatorpositionen und deren Geometrien berechnet
Rückstrahlanteil der Kollimatoren (effektive Desorptionsrate)	$Koll_{Rückstrahl}$	%	wird aus Kollimatorgeometrie berechnet

2.2.6 Zusammenfassung der Verlustmechanismen

Fasst man die o. a. Verlustmechanismen zusammen, so erhält man die folgenden Gleichungen für die Verlustrate des Primärstrahls (Projektil):

$$\Gamma_P = \Gamma_{Streu}(n_i, \beta) + \Gamma_{PI}(n_i, \beta) \quad (7)$$

Analog für die Ionisationsrate des Restgases (Target):

$$\Gamma_T = \Gamma_{TI}(n_i, \beta) \quad (8)$$

Damit erhält man als zeitabhängige Teilchenzahl des Primärstrahls:

$$\dot{N} = -N \cdot \Gamma_P(n_i, \beta) \quad (9)$$

Für die im Vakuum vorhandenen Restgaspartikel gilt:

$$\begin{aligned} \dot{n}_i = & -\dot{N} \cdot WK_i \cdot \eta_{\perp}(E) \cdot (1 - Koll_{eff}(E, q) + Koll_{Rückstrahl}) \\ & + WK_i \cdot \Gamma_T(n_i, \beta) \cdot \eta_{\perp} + Q_{i,Ausgas} - Q_{i,Saug}(n_i) \end{aligned} \quad (10)$$

Gleichungen (9) und (10) beschreiben ein System von gekoppelten Differentialgleichungen, welches i. A. nicht trivial zu lösen ist (z.B. ist $\beta(t)$ und damit auch $E(t)$ zeitabhängig). Die Lösung des Gleichungssystems auf numerischem Wege ist jedoch relativ einfach.

2.2.7 Beschleunigungszyklus

Im Programm werden die charakteristischen Eigenschaften der verschiedenen Phasen des Beschleunigungszyklus berücksichtigt. So erhöht sich beispielsweise der Strom im Beschleuniger bei multi-turn-Injektion kontinuierlich, während er beim „bunch zu bucket“ Transfer sprunghaft ansteigt. Gleiches gilt für die Unterscheidung zwischen schneller und langsamer Extraktion. Die Länge des Injektions- und Extraktionsplateaus ist einstellbar, die Feldanstiegsrate kann frei gewählt werden.

Die im Programm repräsentierten Zyklusabschnitte sind:

1. Injektion
 - a. Kontinuierlicher Einschuss aus Vorbeschleuniger (MTI) oder
 - b. Mehrfache Injektion in Buckets („bunch zu bucket“ Transfer)
2. Speicherung auf Injektionsniveau
3. HF-Einfang
4. Beschleunigung auf Endenergie
5. Speicherung
6. Extraktion
 - a. Resonant (langsam) oder
 - b. Schnell

Während dieser Phasen können u. U. sehr schnell ablaufende, systematische Verluste des Primärstrahles auftreten, speziell bei der Injektion (z.B. ungewollte Füllung eines bereits belegten Phasenraumvolumens) und beim HF-Einfang (falsche Anpassung der HF-Frequenz). Abbildung 3 zeigt den im Programm repräsentierten Beschleunigungszyklus.

Beschleunigungszyklus (schematisch)

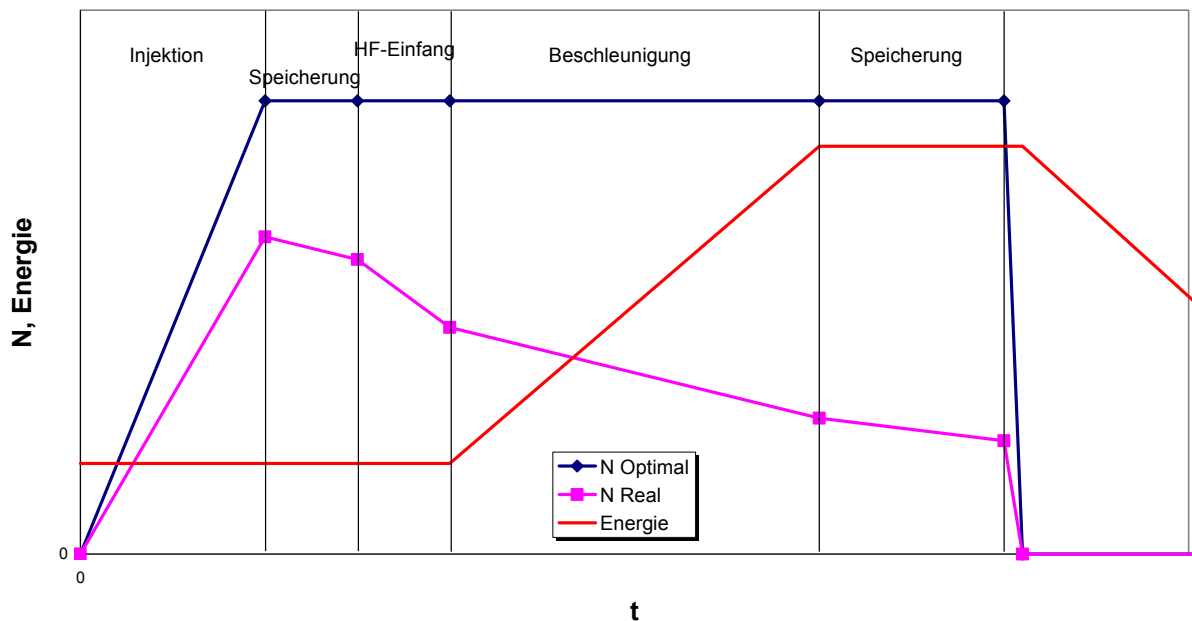


Abbildung 3: Typische, im Programm repräsentierte Phasen im Beschleunigungszyklus.

Die Änderung der relativistischen Geschwindigkeit β führt in der Berechnung zu einer Änderung der Wirkungsquerschnitte für Streuung, Projektil- und Target-Ionisation.

3 Programmoberfläche

Alle o. a. Effekte (Coulomb-Streuung, Projektil- und Target-Ionisation, Desorption, Ausgasen, Pumpen, Beschleunigungszyklus) wurden im Programm implementiert.

Als Oberfläche steht ein GUI für Windows zur Verfügung (Abbildung 4). Alle Programmteile wurden in C++ geschrieben, um die spätere Portierbarkeit auf andere Systeme zu ermöglichen. Berechnete Daten werden in Textdateien exportiert, welche z.B. von Excel gelesen werden können. Der Speicherbedarf während der Rechnungen ist minimal (<10 MB).

Je nach Umfang des Lattices und der gewünschten Genauigkeit kann eine Analyse der Kollimationseffizienz als Funktion des Abstandes Kollimator-Strahlrand bis zu einer halben Stunde in Anspruch nehmen.

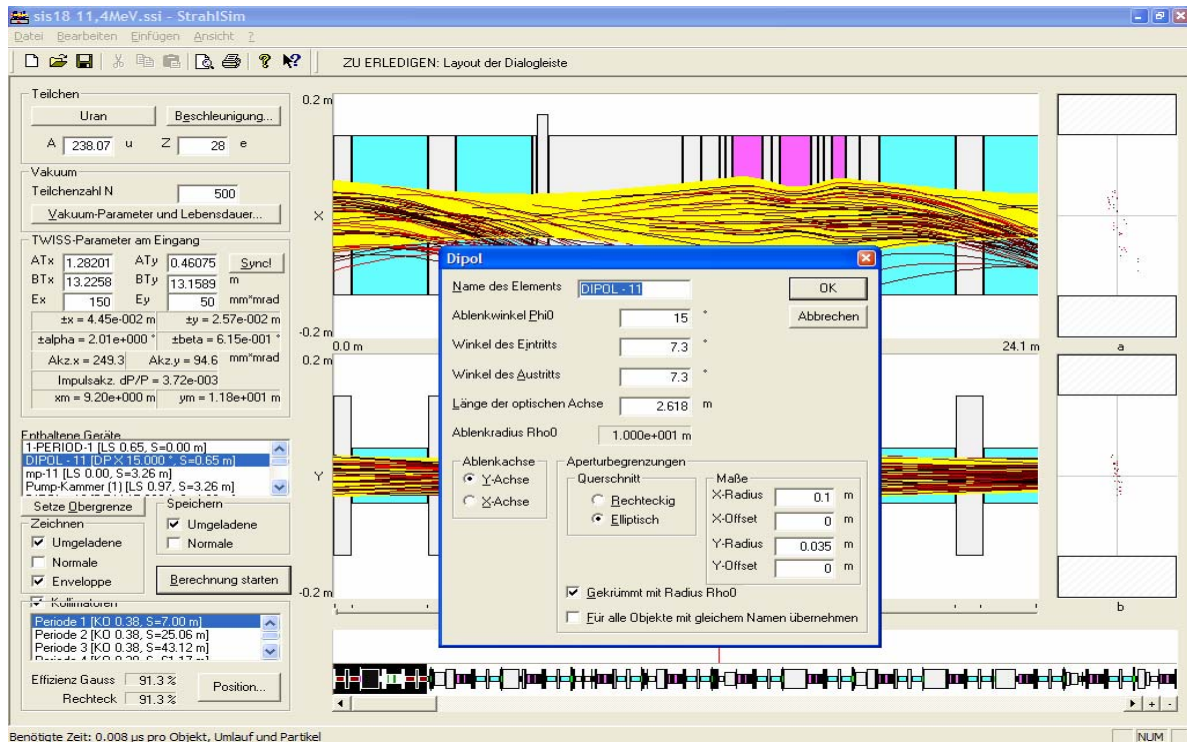


Abbildung 4: StrahlSim-Bedienungsoberfläche (Tracking)

Für einige Vakuumbestandteile (H_2 , N_2 und Ar) und einige Projektile (U^{28+} , U^{10+}) existieren berechnete bzw. experimentell bestimmte Wirkungsquerschnitte als $f(E, q)$ [OLS]. Sie werden aus einem Textfile für die Berechnung eingelesen. Nicht bekannte Wirkungsquerschnitte werden auf der Basis dieser Querschnitte approximiert.

Eine durchschnittliche Lebensdauer-Berechnung erfordert auf einem aktuellen System (2 GHz-CPU) für 1 s Realzeit ca. 1-2 s Berechnungszeit, so dass sehr schnell Erkenntnisse aus den Ergebnissen gewonnen werden können.

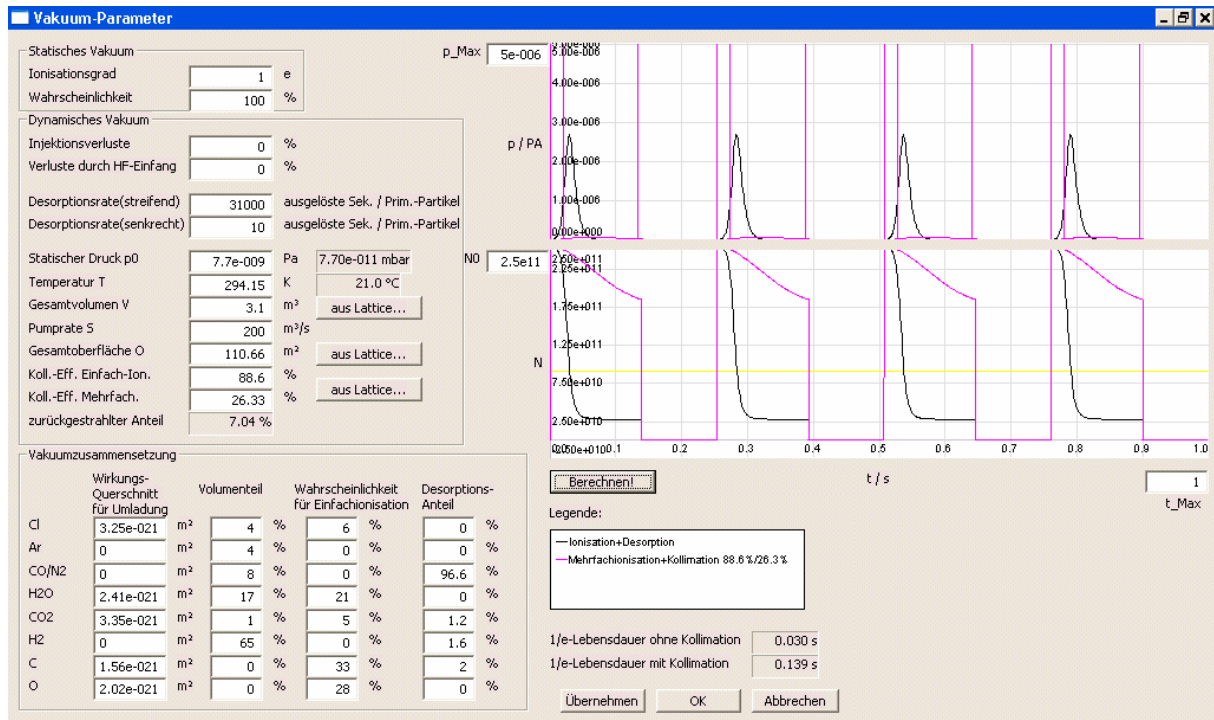


Abbildung 5: StrahlSim-Bedienungsoberfläche (Lebensdauer-Berechnung)

4 Simulationsergebnisse (SIS12/18)

Legt man die gemessenen Vakuumbestandteile des SIS18 (siehe Tabelle 3), einen Anfangsdruck von $7,7 \cdot 10^{-11}$ mbar, eine effektive Pumprate von $2 \text{ m}^3/\text{s}$ und ein Volumen von ca. $4,4 \text{ m}^3$ zu Grunde, dann erhält man als Verlust-/Ionisationsraten:

Tabelle 2: Berechnete Verlustraten im SIS18

Element	β	$\Gamma_{Streu} / \text{s}^{-1}$	$\Gamma_{PI} / \text{s}^{-1}$	$\Gamma_{TI} / \text{s}^{-1}$
U^{28+}	0,155	$5,13 \cdot 10^{-6}$	$3,51 \cdot 10^{-2}$	50,13
U^{28+}	0,430	$2,01 \cdot 10^{-7}$	$5,56 \cdot 10^{-2}$	25,57

Hierbei scheint die Projektilionisation für den dominierenden Anteil der Primärverluste verantwortlich zu sein. Die Targetionisation trägt nicht wesentlich zur Desorption und der damit verbunden Verschlechterung des Vakuums bei, da die Desorptionsrate für streifenden Einfall und hohe Energie um den Faktor 200...3.000 höher ist.

Tabelle 3: Gemessene Vakuumbestandteile des SIS12/18 [KRAEM].

Atom/Molekül	Häufigkeit
Cl	4%
Ar	4%
CO und N ₂	8%
H ₂ O	17%
CO ₂	1%
H ₂	65%

4.1 Vergleich mit experimentellen Ergebnissen

Berechnet man einen SIS18-Zyklus mit verlustbehafteter Injektion und Speicherung von U^{28+} bei 11,4 MeV/u für verschiedene Teilchenzahlen, dann decken sich die berechneten Zeitverläufe gut mit den im Dezember 2001 durchgeführten Maschinenexperimenten (Abbildung 6).

Folgende Effekte sind bisher nicht Bestandteil der Simulation:

- Druck- und Teilchenartabhängige Pumprate
 - Bisher nur Mittelwert
- Verschiedene Ausgasraten für die einzelnen Sektionen
 - Bisher nur Mittelwert
- Vakuum-Leitwerte und Position der Pumpen
 - Bisher nur effektives Saugvermögen
- η als $f(E, \theta)$
 - momentan nur senkrecht bei kleiner Energie und streifend bei hoher Energie

Weiterhin ist die Zusammensetzung der von Edelstahloberflächen desorbierten Gase nicht vollständig bekannt. Die bisher verwendeten Daten stammen vom Desorptions-Messstand der GSI [KRAEM2]. Folgende Desorptionsgas-Zusammensetzung wurde den Rechnungen zugrunde gelegt:

96 % CO/N₂, 1.2 % CO₂ und 1.6 % H₂.

Lebensdauer U^{28+} im SIS18: Experiment und Simulation
 Parameter: 20% Injektionsverluste, $\eta=31.000$

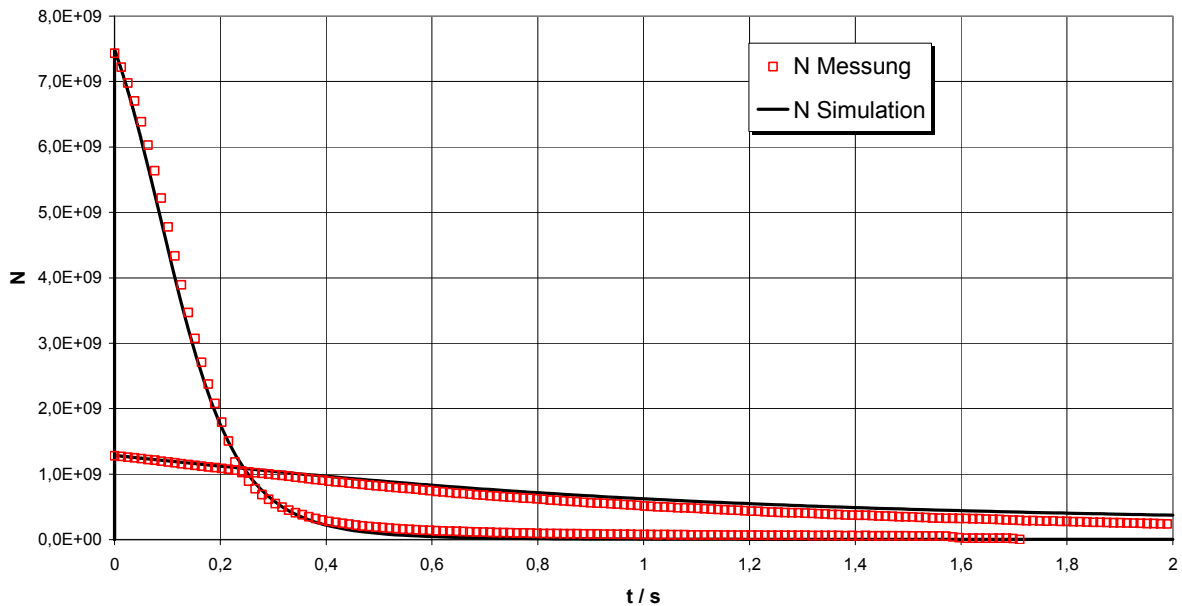


Abbildung 6: Berechnete und gemessene U^{28+} -Teilchenzahl als Funktion der Zeit im SIS18

4.2 Ausblick auf den Booster-Betrieb des SIS12/18

Mit dem in StrahlSim implementierten Algorithmus lässt sich der für das FAIR-Projekt geplante Booster-Betrieb des SIS12/18 simulieren. Folgende Zyklusparameter wurden angenommen:

- Injektion von $2,5 \cdot 10^{11}$ U^{28+} -Teilchen bei 11,4 MeV/u innerhalb 160 μ s
- Sofortiger HF-Einfang innerhalb von 20 ms
- Beschleunigen auf 100 MeV/u mit einer Ramprate 10 T/s (4 Hz-Betrieb)
- Schnelle Extraktion

Die Simulation wurde für folgende Fälle durchgeführt:

- a) das bestehende Vakuumsystem,
- b) ein durch NEG-beschichtete Strahlrohrwände verbessertes Vakuumsystem (die angenommene Saugleistung ist hier um den Faktor 100 höher) und
- c) ein durch NEG-Beschichtung und Kollimatorsystem erweitertes UHV System

Alternativ wurde ein 1Hz-Betrieb betrachtet.

Teilchenzahl von U^{28+} im SIS18 (4Hz)

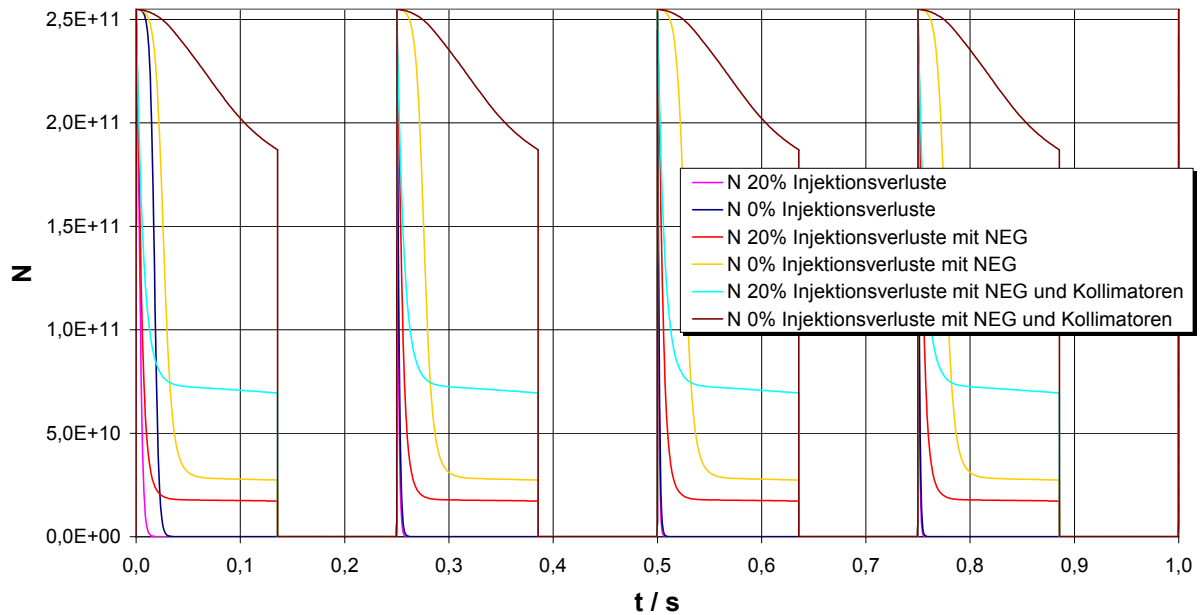


Abbildung 7: Teilchenzahl als Funktion der Zeit von U^{28+} im SIS18 bei 4Hz Wiederholfrequenz. Geplottet sind die Kurven für unterschiedliche Anfangsverluste, Pump-raten und mit und ohne Kollimationssystem.

Teilchenzahl von U^{28+} im SIS18 (1Hz)

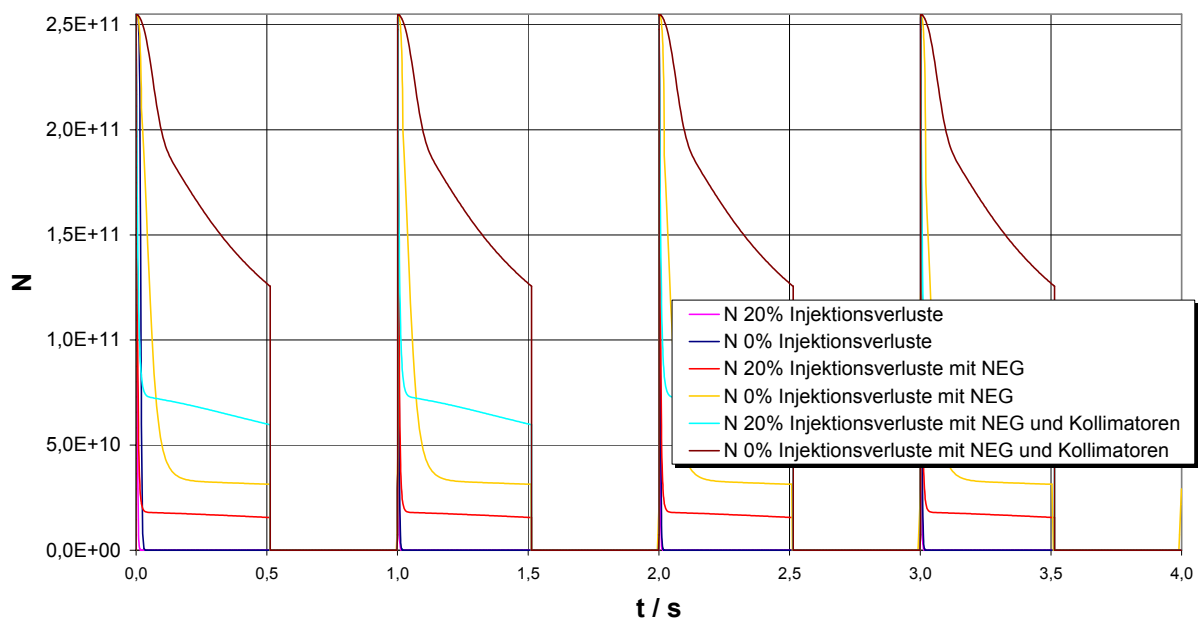


Abbildung 8: Teilchenzahl als Funktion der Zeit von U^{28+} im SIS18 bei 1Hz Wiederholfrequenz für die in Abb.7 beschriebenen Fälle.

Beim Vergleich von Abbildung 7 und Abbildung 8 fällt auf, dass bei der kürzeren Zykluszeit im 4 Hz Betrieb die Strahlverluste gegenüber dem 1 Hz Betrieb deutlich reduziert sind. Neben der Zyklusdauer ist dies auf die schnell mit der Energie sinkenden Wirkungsquerschnitte für Projektil- und Targetionisation zurück zu führen.

Weiterhin erkennt man, dass selbst bei stark erhöhter Saugleistung und beim Einsatz von Kollimatoren der Betrieb mit den angestrebten Teilchenzahlen erst durch eine drastische Reduktion der Injektionsverluste realisiert werden kann. Diese sorgen innerhalb kürzester Zeit für eine sprunghafte Verschlechterung des Vakuums – und damit für eine geringere Lebensdauer des Strahls.

Nach der Simulation erhöhen die Kollimatoren die Teilchenzahl am Ende des Zyklus (Extraktion) um das ca. 4-fache.

5 Schlussfolgerungen

Für den stabilen Betrieb des SIS12/18 im Booster-Modus mit U^{28+} sind nach der Simulation folgende Parameter unerlässlich:

- Hohe Ramprate und kurze Zykluszeit
- Geringe Injektionsverluste
- Revision des UHV-Systems
 - Drastische Erhöhung der Pumpleistung (x100)
- Verwendung von Kryo-Kollimatoren
 - Kontrolle der anfallenden Desorptionsgase
 - Weitere Erhöhung der lokalen Pumpleistung

Alle diese Anforderungen sind im TR für das FAIR-Projekt beschrieben.

6 Referenzen

[WOL]: H. Wollnik, Optics of charged particles, Academic Press (1987)

[WIL]: Wille, Physik der Teilchenbeschleuniger, Teubner Verlag (1992)

[SPILL]: P. Spiller, interner Bericht GSI-SIS18-02-02 (2002)

[RGIBS]: N. Madsen, Beam Evolution in the Antiproton Decelerator (AD) under the influence of Residual Gas and Intra Beam Scattering, Internal Note, CERN PS/DI/Note 99-06, AD Note 047 (1999)

[JACK]: J.D. Jackson, Classical Electrodynamics, (Second Edition, Wiley, New York), 1975

[OLS]: R. E. Olson, Projectile Electron Loss and Capture in MeV/u Collisions of U^{28+} with H_2 , N_2 and Ar, Phys. Lett. B (2004)

[GILL]: G. H. Gillespie, Impact Ionisation Scaling Cross Sections for Fast Highly Stripped Ions Colliding with H_2 and He, Phys. Lett. A 93, 327 (1983)

[CERN]: N. Madsen, Vacuum changes during Accumulation of Pb^{54+} in LEIR, CERN PS/DI Note 99-21 (1999)

[MUST]: E. Mustafin, et. al, A theory of the beam loss induced vacuum instability applied to the heavy ion synchrotron SIS18, Nuclear Instruments and Methods In Phys. Res. A, (2003)

[BOINE]: O. Boine-Frankenheim et. al., Estimation of beam life time in the SIS18, interne Notiz

[KRAEM]: A. Krämer et. al., Status of SIS18 Vacuum 30 Oct.2003, interne Notiz BES.101103.UHV

[KRAEM2]: A. Krämer, private Kommunikation