

Risikoeinschätzung MDE Spillglättungskavität

Ziel der Risikoeinschätzung: Bewertung von Risiken eines gemeinsamen MDEs von Strahl diagnose (ehemals HADES) und RRF.

Ziel des MDE: Bestimmung der optimalen Parameter der Spillglättungskavität (Gapspannungen und Frequenzen). Auch im Hinblick darauf, dass über eine Weiterentwicklung der bestehenden Kavität entschieden werden muss. Aufgrund der Einschränkung auf 2 kV konnten (außer am 29.11.23) keine optimalen Spannungen bestimmt werden.

Disclaimer:

Kommunikation mit Maschinenkoordinatoren:

- >10 Arbeitsnotizen & regelmäßige Besprechungen
- Beschluss des Einbaus im Bewusstsein notwendiger Konditionierung im SIS am 25.05.2023 (VAC, SIS)
- Bestätigung des Einbaus im Bewusstsein ggf. notwendiger Konditionierung vor jedem Betrieb am 21.06.2023 (SIS)

Die vorliegende Notiz geht detailliert auf Risiken des Betriebs der Spillglättungskavität im SIS18 ein. Folgende – für den Betrieb ebenfalls relevanten Themen – sind ausgespart:

- Alternativen zum aktuellen Aufbau
- Modifikationen zum Hochstrombetrieb
- Niederleistungstests, Aufbau Regeltopologie (parallel zu den Hochleistungstests)
- Risiken bzgl. der Funktionsfähigkeit (z.B. Wegdriften der Resonanz)
- Vergleiche zu Theorie/Modellierung (Temperaturgradient, Störkörpermessung, Güte)

1 mögliche Missverständnisse

- Wir haben das Risiko eines unsererseits (RRF) engmaschig überwachten Betriebs immer als minimal betrachtet (siehe MDE-Antrag vom 28.4.23, Betrieb im Oktober 23). Die von uns kommunizierten Risiken bezogen sich auf einen unbewachten Dauerbetrieb.
- Die Keramik reagiert nicht empfindlicher auf Temperaturgradienten als andere (Machine_Meeting_Minutes-20240130).
- Es gibt keine strikte Herstellerangabe zum Temperaturgradienten (siehe Abschnitt 2.1).
- Die Temperatur kann in den Pulspausen zuverlässig gemessen werden. Für ein Interlock bzw. ein Feedback zur Kontrolle des Temperaturanstiegs fehlt die Auswerteelektronik (aktuell nur Grenztemperatur-, keine Gradienten-Überwachung). Menschliche Überwachung ist jedoch problemlos möglich (siehe Abschnitt 2.1).
- Die Grenze für das Vakuuminterlock wurde von uns am 6.2.24 festgelegt unter der Annahme, dass die Kavität wie immer gefordert vor dem Betrieb (und vor dem aktivieren des Interlock) konditioniert wird. Zum Konditionieren muss das Interlock entfernt werden. Die Konditionierung im Oktober/November 2023 ist in Rücksprache mit der Abteilung Vakuum ohne Probleme erfolgt (siehe Abschnitt 2.2).
- Wir haben nach dem Bekanntwerden der Einschränkung kurzfristig abgewogen und bewusst entschieden, die Kavität ohne Konditionierung bei 2 kV zu betreiben, weil wir dadurch Erfahrung gewinnen können, in wie weit dies möglich ist. Diese neue Erfahrung war und ist sehr wertvoll. Damit liegen aber keine Erfahrungen vor, welche Spannungen optimal wären. Dies würden wir gerne nachholen.

2 Erfahrungen

2.1 Temperatur

Bei dem alten Strahlrohr mit falscher Gapkeramik (gleiche Abmessungen, höhere dielektrische Verluste) wurde nach zweistündigem HF-Hochleistungsbetrieb (bis etwa 1,8kW) ein Gleichgewicht (Temperatur, Resonanzfrequenz, Koppelfaktor) noch nicht erreicht. Nach Beenden der Hochleistungsmessungen war die Temperatur des Isolierrohrs auf über 100°C gestiegen.

Aufgrund der unakzeptabel hohen dielektrischen Verluste in dem alten Strahlrohr wurde ein neues Strahlrohr mit verlustärmerer Gapkeramik in Auftrag gegeben und gefertigt. Durch diese neue Gapkeramik und durch Modifikationen an dem Tauchkolben sowie der Koppelschleife konnten die Probleme bzgl. Resonanzfrequenz und Koppelfaktor gelöst werden.

Berechnungen der Temperaturüberhöhung (Mitte der Gapkeramik vs. Stirnflächen) und der sich daraus ergebenden mechanischen Spannungen zeigen, dass man mit 425 W (ca. 31 kV) dielektrischer Verlustleistung (ca. 1 kW vom Verstärker) mehr als eine Größenordnung unter der Grenze der Biegebruchfestigkeit liegt.

2.1.1 Begrenzung des Temperaturgradienten

Das Strahlrohr wurde vom Hersteller auf 200 °C (0.3 °C/min) geheizt, wie es auch bei anderen Kavitäten üblich ist. Aufgrund der räumlichen Gegebenheiten wurde entschieden, an der GSI nur die Keramik auszuheizen.

Zur Abschätzung der Risiken durch den Temperaturanstieg wurde bei den Herstellern angefragt:
Keramikhersteller:

Prinzipiell ist es möglich Keramik- Metallverbundbauteile aus Aluminiumoxid und Kovar auf 400°C aufzuheizen und dort auch zu betreiben, da die Fügetemperatur bei knapp 800°C liegt.

Die Aufheizrate haben Sie mit 3-5°C die Minute sehr gut gewählt. Wir fahren hier beim Lötprozess ähnliche Kurven. Da die Keramik- Metallverbindung beim Strahlrohr auch sehr stabil ausgeführt worden ist, würde ich bei Temperaturen höher als 180°C keine Bedenken haben. Was jedoch nicht außer Acht gelassen werden darf ist, dass das Strahlrohr sehr große Abmessungen hat und hierdurch auch einige unvorhersehbare Spannungen im Strahlrohr befinden können, die sich negative auf die Fügstellen (Schweißnaht /Lotnaht) auswirken können.

Strahlrohrhersteller:

*Üblicherweise fahren wir die Ausheizzyklen für Vakuumkammern mit einer Aufheiz- und Abkühlrampe von 0,5K/min. Sind jedoch empfindliche Bauteile, wie Schaugläser, Keramiken, Durchführungen verbaut, wird eine Rampe kleiner **0,3 K/min** angewendet. Das sind einfach Erfahrungswerte, die uns garantieren sollen, dass sich in den Bauteilen möglichst keine mechanischen Spannungen aufbauen, da die einzelnen Bauteile doch recht unterschiedliche Massen und Ausdehnungskoeffizienten haben. Diese Rampen werden auch schon immer bei GSI-Bauteilen verwendet und meines Wissens nach auch Standard.*

Insofern heißt das nicht, dass die Bauteile kaputt gehen, wenn Sie mit höheren Rampen fahren, sie werden nur mehr gestresst und das genau an der eigentlichen Schwachstelle, dem Übergang von der Keramik auf die Edelstahlbauteile. Wo dann genau die Grenze liegt, ist sicher geometrie- und masseabhängig und hierfür habe ich auch keine Werte.

Bei den 5K/min wäre zu hinterfragen, ob diese an fertigen Baugruppen getestet wurden oder ob dies Werte sind, die vom Löten her kommen. Wenn nur der Adapter an die Keramik gelötet wird, dann ist das nochmal etwas ganz Anderes, als wenn am Adapter zusätzlich ein Edelstahlbauteil angeschweißt ist, das sich viel stärker ausdehnt. Die Legierungen für die Ausgleichsadapter sind so gewählt, dass die Ausdehnungskoeffizienten ähnlich zur Keramik sind und sich damit nur geringe mechanische

Spannungen zwischen Adapter und Keramik aufbauen können. Die Adapter selber müssen aber im Betrieb dann die Ausdehnungsunterschiede zum Edelstahl hin aufnehmen.

2.1.2 Temperaturmessung

An dem alten Strahlrohr mit alter Keramik haben die Messungen ohne Vakuum mit mehr Zeit (12.12.2022 -16.01.2023) stattgefunden, da nach der Lieferung des neuen Strahlrohrs auf den Einbau hingearbeitet wurde.

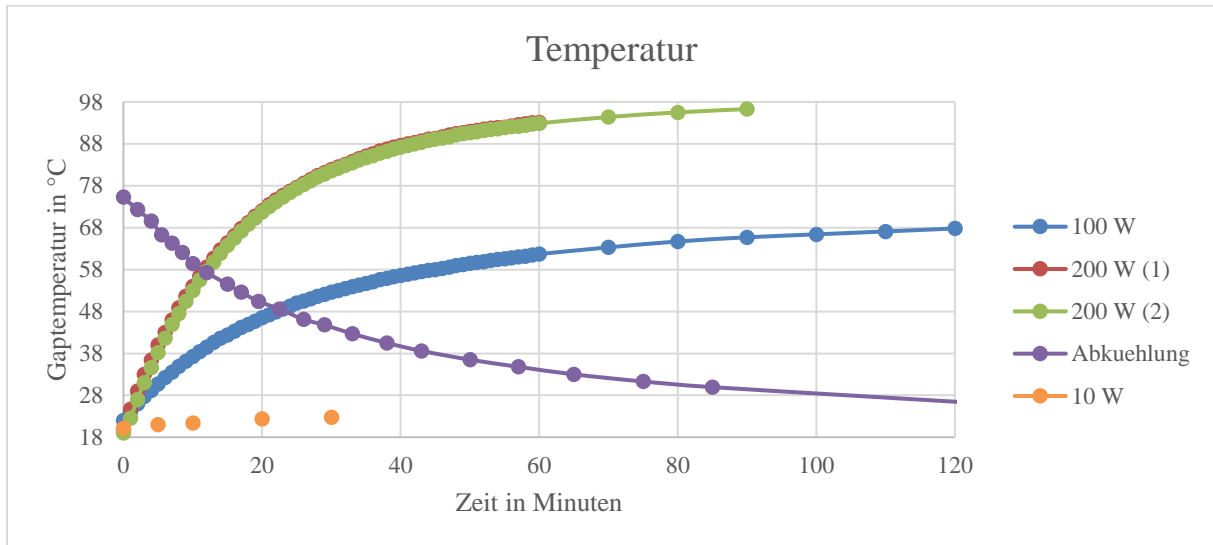


Abbildung 1: Temperaturmessung an der alten Keramik, mit deutlich höheren Temperaturgradienten und Gleichgewichtstemperaturen.

Die Temperatur wird mit einem optris IR-Tempersensor (OPTCLT20CB3) überwacht. Die Messungen wurden mehrfach verifiziert mit

- Infrarot-Thermometer Fluke 62 MAX+
- Wärmebildkamera Fluke Ti480 PRO
- Temperaturmessstreifen

und entsprechend angepassten spektralen Emissionskoeffizienten.

Das Interlock für eine vorgebbare Grenztemperatur wurde bereits vor dem Einbau ins SIS18 umgesetzt und ist immer aktiv.

Erkenntnis: Die Temperaturmessung wird durch starke HF-Felder beeinflusst.

Dadurch ist der Aufbau einer automatischen Überwachung des Temperaturgradienten mit dem aktuell verwendeten Sensor schwierig, weil die Temperatur in den Pausen zwischen den Pulsen ausgewertet werden muss. Ggf. ist langfristig auch eine bessere Abschirmung des Sensors möglich.

Dies beeinflusst nicht die menschliche Überwachung, da der Temperaturanstieg sehr gut bewertet werden kann.

Risiko: Es konnte jedoch für den Dauertestbetrieb kein Interlock aufgebaut werden, um ohne menschliche Überwachung sicherzustellen, dass der Temperaturgradient nicht über 0.3 K/min geht.

Entscheidung: Um sicherzustellen, dass - egal was in unserer Abwesenheit passiert - der Temperaturgradient nicht über 0.3 °C/min geht, wurde angenommen, dass die volle Leistung des Verstärkers in der Keramik in Wärme umgesetzt wird. Hieraus ergibt sich die Leistungsbeschränkung auf 6 W (2.5 kV).

Zum Konditionieren betreiben wir die Kavität in cw-Betrieb. Messungen im gepulsten Betrieb haben nur zum Test der Regelsysteme sowie bei hohen Leistungen zur Reduktion der mittleren Leistung stattgefunden. Bei einem MDE können wir auf Ausfälle reagieren und entweder auf cw-Betrieb oder auf vom Kontrollsystem unabhängige Trigger umsteigen.

2.2 Konditionierung und Inbetriebnahme (Hochleistungstests)

2.2.1 ohne Vakuum in Testumgebung (29.3.- 5.5.)

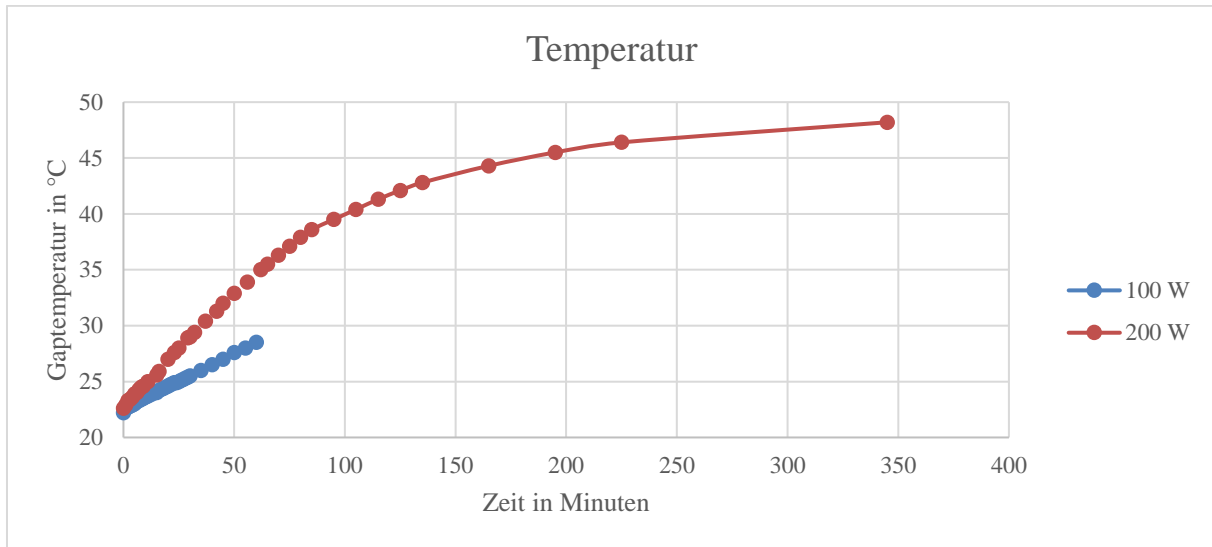


Abbildung 2: Temperaturmessung an der neuen Keramik, mit Temperaturgradienten unter 0.3 °C/min und niedrigeren Gleichgewichtstemperaturen.

2.2.2 kontrollierte Vakuumbedingungen in Testumgebung (10.5.-23.6.)

Tabelle 1: Zeitpunkte nötiger Konditionierung in der Testinghalle

Ursache	Datum	Druck / mBar		Leistung / W		Temperatur	Zeit
		min.	max.	min.	max.	max.	
Agilent TwisTorr 704 installiert	10.5.	$1,3 \cdot 10^{-8}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$	10	178	51,3 °C	6:00
Diamantfenster installiert	24./25.5.	$1,1 \cdot 10^{-8}$	$2,0 \cdot 10^{-8}$	100	200	44,4 °C	1:10
Fenster ausgebaut ¹	6./7.6.	$2,2 \cdot 10^{-9}$	ca. 10^{-7}	3	132	46,9 °C	5:00 + 6:00
nach Heizen (150 °C über WE)	20.6.				388	70 °C	4:00

Im Resonator wurde am 22.5.2023 das Leuchten erstmals beobachtet und am 1.6.2023 eine Kamera installiert, um das Aufleuchten der Keramik nicht nur aufgrund Änderungen am Vakuumdruck zu bemerken.

Am 26.6. wurde die Kavität zum Einbau im SIS an TRI übergeben.

Aufgrund Änderungen an den Spannungsanforderungen wurden 10 kV als Referenzspannung und 20 kV als Maximalspannung untersucht.

Zur Verifizierung der aufgrund von Simulationen und Theorie erwarteten Gapspannung wurde eine Gammaskopie (in Strahlrichtung mit Diamantfester) durchgeführt und somit die eingekoppelte Leistung in Bezug zur Gapspannung für 100 und 200 Watt kalibriert.

¹ Aufgrund eines offenen Belüftungsventils ist der Druck nicht unter $7,6 \cdot 10^{-8}$ gefallen und die Konditionierung daran gescheitert. Der Fehler untermauert jedoch die Erkenntnis, dass Belüftung ein Grund für die Notwendigkeit der Konditionierung ist.

2.2.3 andere Vakuumbedingungen im SIS (2.10.-23.10.2023)

Überraschung bzgl. des Verhaltens/Vakuums in SIS18:

Es hat sich gezeigt, dass für Spannungen größer als 1.5 kV nach längeren Betriebspausen im SIS18 ein erneutes Konditionieren nötig wird, was in der Testumgebung nicht der Fall war. Die Keramik verhält sich so, als würde sie immer belüftet, wenn keine HF anliegt.

Das Ziel der im folgenden aufgelisteten Messungen war, die benötigte Zeit für die Konditionierung am Tag des MDE minimal zu halten. Auch hier wurde die Kavität zum Konditionieren im cw-Betrieb betrieben. Messungen im gepulsten Betrieb haben wieder nur zum Test der Regelsysteme sowie bei hohen Leistungen zur Reduktion der mittleren Leistung stattgefunden.

Tabelle 2: Ausgewählte Informationen zur Konditionierung und Inbetriebnahme des Kavitätensystems im SIS18

Betriebsart	Datum	Druck / mBar		Leistung / W		Temperatur	Zeit
		min.	max.	min.	max.	max.	h:min
Konditionierung	Mo 2.10.	$2.2 \cdot 10^{-10}$	$1.8 \cdot 10^{-7}$	3	47	32.5 °C	5:40
Konditionierung	Mi 4.10.	$4.6 \cdot 10^{-10}$	$2.7 \cdot 10^{-8}$	26	49	36.2 °C	ca. 29 h
Konditionierung	4./5.10.			44	49	36.2 - 36 °C	
Konditionierung	Do 5.10.			44	148	34.6 - 36 °C	
Betrieb	Do 5.10.			79	204	34.8 - 40.6 °C	
IBN Regelkreise	Fr 6.10.						
Konditionierung	Mo 9.10.	$3 \cdot 10^{-10}$	$5.5 \cdot 10^{-8}$	10	42	21.5 - 35 °C	2:00
Betrieb	Di 10.10.	$3.3 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-8}$ (thermisch)	100	200	21.5 - 35.2 °C	ca. 77 h
Temp. halten	10./11.10.			117	117	35.2 - 38.8 °C	
Aufheizen	Mi 11.10.			120	457	38.8 - 55.7 °C	
Temp. halten	11./12.10.			288	288	55.7 - 61,0 °C	
Betrieb	Do 12.10.			316	708 / 1445	61 - 70.9 °C	
Temp. halten	12./13.10.					53.8 - 61 °C	
Abkühlung	Fr. 13.10.				min. 31 °C		
Konditionierung	Mo 16.10.	$2.3 \cdot 10^{-10}$	$5.8 \cdot 10^{-8}$				4:40
Konditionierung	Do 19.10.	$2.7 \cdot 10^{-10}$	$8.1 \cdot 10^{-8}$				2:20

Die Keramik wurde bewusst mit Verlusten auf bis zu 70°C geheizt, um ggf. zurückgebliebenes Wasser zu verdampfen. Die Kamera zur Überwachung der Keramik wurde auch ins SIS mitgenommen. Die Überwachung erfolgt in einem Betriebsraum der Abteilung RRF (BG1.016).

Um für einen Dauertest eine Überwachung des Leuchtens zu ermöglichen, wurde von VAC und ACO (R. Bär) ein provisorisches Vakuuminterlock in MASP zur Verfügung gestellt. Die Grenze wurde von uns anhand der Messwerte für die Kavität im konditionierten Zustand festgelegt, da das Interlock erst nach dem MDE für den Dauertest aktiviert werden sollte. Dieses Interlock ist während des aktuellen Dauerbetriebs in Funktion.

Langfristig soll das Vakuuminterlock wie bereits vorbereitet von der SPS der GS11BE6 verarbeitet werden.

2.3 MDE 29.11.2023

Das MDE war in 3 Teile unterteilt, welche der Reihe nach abgearbeitet wurden:

- 1) Konditionierung
- 2) Strahlstrommessung mit FCT im SIS
- 3) Messung der Spillstruktur in HHD

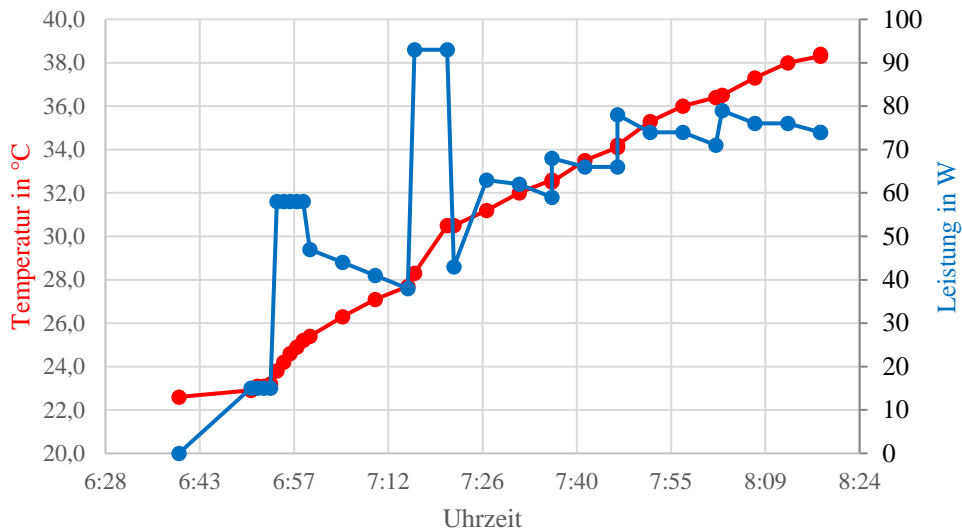


Abbildung 3: Benötigte Leistung zum Konditionieren nach diversen „Vor-Konditionierungen“ im Oktober, um Zeit und Leistung am 29.11.2023 möglichst gering zu halten. Der Temperaturgradient wurde engmaschig überwacht und unter 0.3 °C/min gehalten.

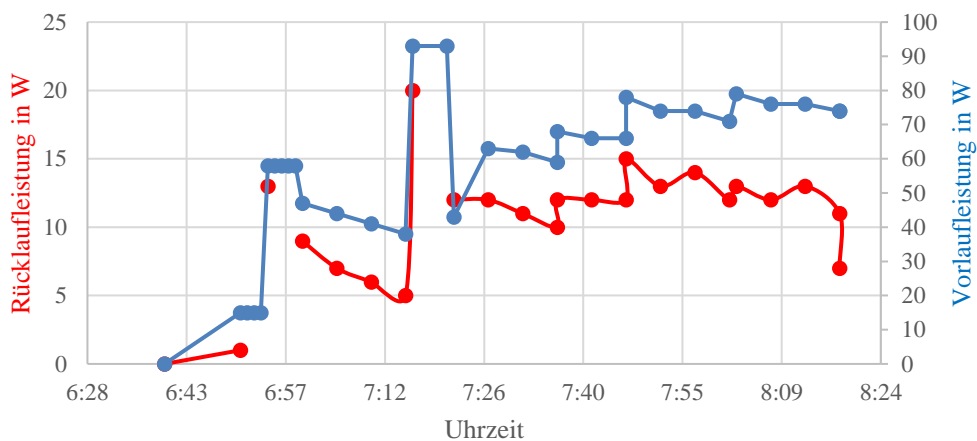


Abbildung 4: Die Leistungsabfälle ergeben sich bei der Konditionierung durch die Reduktion der Rückwärtsleistung bei Verringerung der Verluste aufgrund der Regelungen im Verstärker. Im konditionierten Zustand ist der Rücklauf vernachlässigbar.

2.4 „Dauertest“ in der HADES-Strahlzeit

Am 1.3. haben Messungen mit HADES bei 800 MeV stattgefunden, welche eine Steigerung der Datenrate bei Steigerung der Spannungsamplitude von 1 auf 1,5 kV sowie von 1,5 auf 2 kV ergeben haben. Um im nicht überwachten Betrieb nachts nicht das Vakuuminterlock zu aktivieren, wurde die Spillglättungskavität über Nacht dennoch nur mit 1,5 kV laufen gelassen.

Am 17.3. haben 3 Messungen in je ca. 40 Minuten mit Spillkavität bei mCBM stattgefunden. Hier zeigte sich, dass bei 1.2 GeV/u sehr kleine Spannungen (50 V, wenige mW) schon einen deutlichen Effekt auf die Microspillstruktur haben. Da kein Macrospill-Feedback verfügbar war, wurden die Einstellungen an der Kavität (Amplitude, Frequenz) so variiert, dass auch die Macrospill-Struktur verwendbar war.

Weitere Messungen bei HADES (18.3.) haben gezeigt, dass die Spillkavität fast unabhängig von der eingestellten Frequenz (auch für 1,2 GeV/u eingestellt und für 200 MeV/u verwendet) eine deutliche Reduzierung der benötigten Leistung für das Macrospillfeedback bewirkt.

3 Erwartete Spannungen für longitudinale Strahlbeeinflussung im SIS18

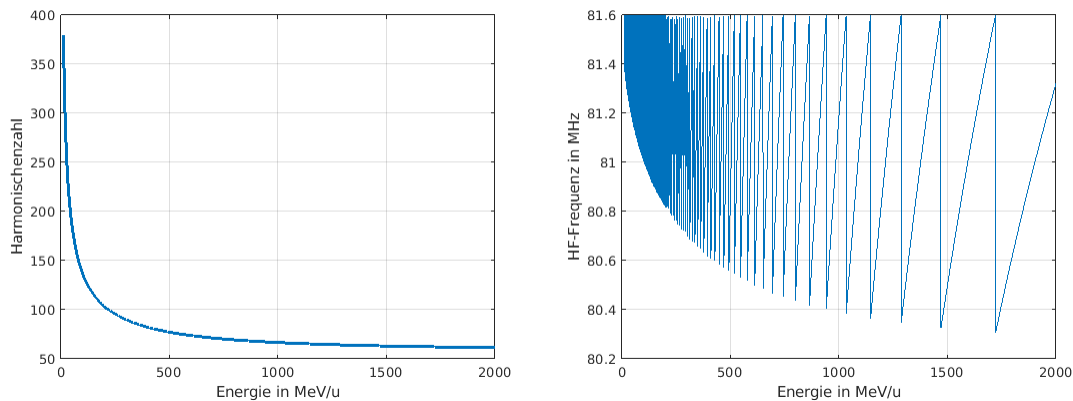


Abbildung 5: Mögliche Harmonischenzahlen (links) und HF-Frequenz der Mikrospill-Kavität (rechts) abh. von der Energie.

Die folgenden Berechnungen ermöglichen eine Abschätzung, welche Spannungen zur Beeinflussung des Strahls im SIS benötigt werden.

Neben dem zunächst getesteten Bunching des Strahls, müssen in Zukunft weitere Verfahren wie „Empty Bucket Channeling“ sowie gezieltes „Tune Wobbling“ getestet werden. Der Aufbau einer „Proof-of-Principle“-Kavität ermöglicht nun diese Tests ermöglichen.

Im SIS18 wird die Spannungsamplitude gewöhnlich so gewählt, dass die Bucketfläche erhalten bleibt, d.h. gewöhnlich der Bunchingfaktor konstant bleibt.

In <https://journals.aps.org/prab/pdf/10.1103/PhysRevAccelBeams.26.014402> wird ein Zusammenhang zwischen der Spillglättung und dem Synchrotrontune hergestellt, sodass im Folgenden die nötigen Gapspannungen für Masse-zu-Ladungsverhältnisse von 1 bis 8.5 bei konstantem Bunchingfaktor und konstantem Synchrotrontune dargestellt sind.

Die Abschätzungen sollen zeigen, dass aus den Werten kein Schluss auf die benötigte Spannungsamplitude gezogen werden kann, welcher jedoch für eine Weiterentwicklung benötigt werden.

3.1 konstanter Bunchingfaktor

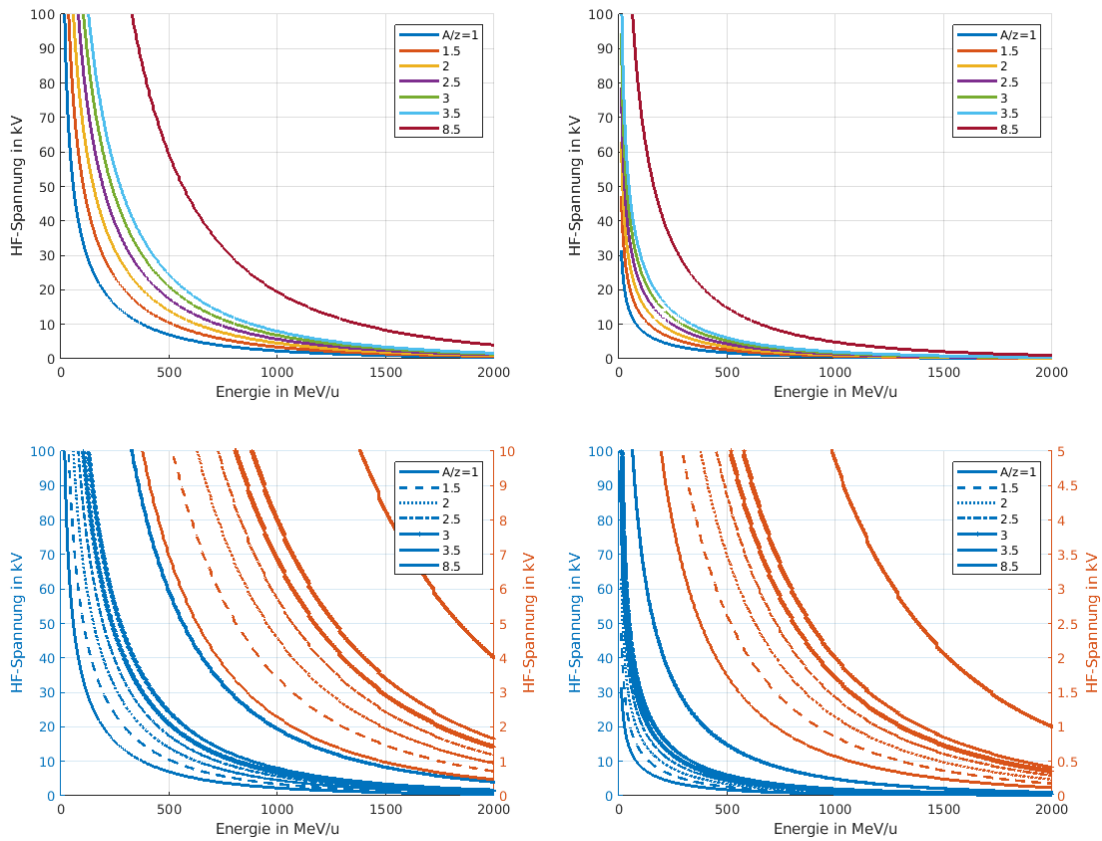


Abbildung 6: Benötigte HF-Spannung für einen bunching faktor von 0.5 (links) bzw. 1 (rechts).

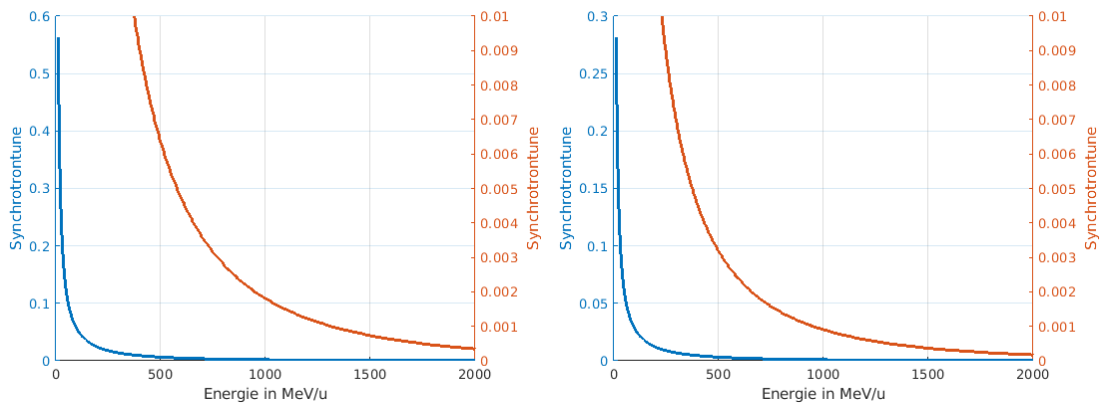


Abbildung 7: Sich aus Abbildung 6 ergebende Synchrotrontune für einen bunching faktor von 0.5 (links) bzw. 1 (rechts).

3.2 konstanter Synchrotrontune

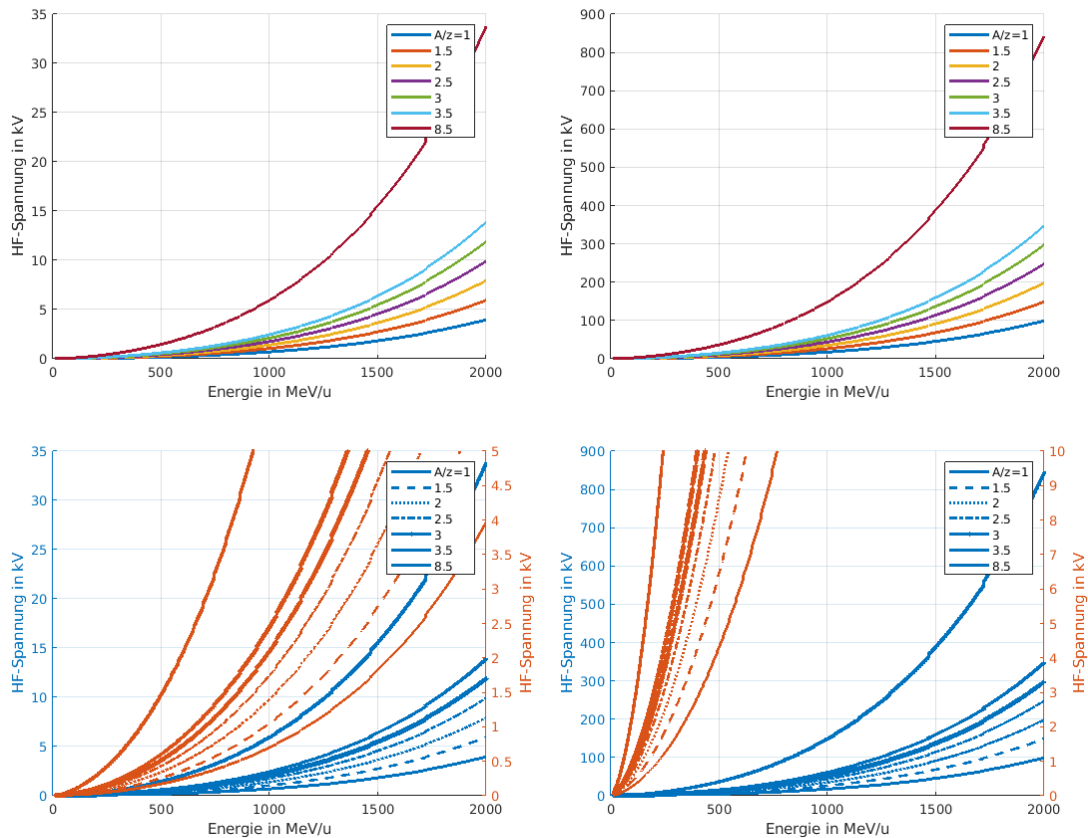


Abbildung 8: Benötigte HF-Spannung für eine Synchrotrontune von 0.001 (links) bzw. 0.005 (rechts).

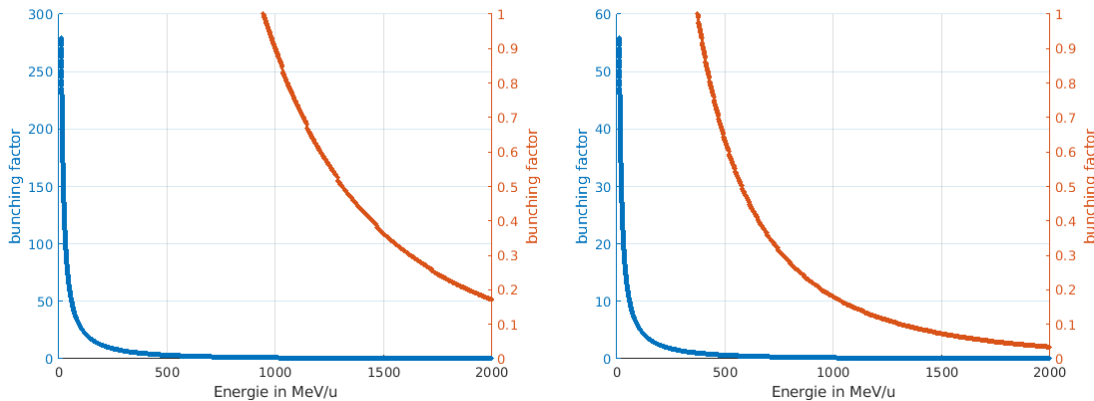


Abbildung 9: Sich aus Abbildung 8 ergebender bunching factor für einen Synchrotrontune von 0.001 (links) bzw. 0.005 (rechts). Hierbei kann bei Energien unter 900 MeV/u bzw. 400 MeV/u, nur bedingt von einer Synchrotronfrequenz geredet werden, sodass mir die Zusammenhänge nicht klar sind.

Abbildung 8 und Abbildung 9 zeigen, dass durch die Forderung eines bestimmten Synchrotrontune die Spannungen für hohe Energien extrem werden und gleichzeitig der bei niedrigen Energien der Strahl kaum gebuncht ist, sodass die extrahierten Teilchen nicht den geforderten Synchrotrontune erfahren. Überschneidungen der beiden Bereiche existieren nur für niedrige Masse-zu-Ladungsverhältnisse.

4 Zusammenfassung, Entscheidungsvorlage

Aufgrund der Begrenzung der Spillglättung auf 6W auch bei Betrieb durch die Abteilung RRF ist es nicht möglich, zuverlässig Spannungen von mehr als 1.5kV zu erreichen. Dies lässt eine systematische Untersuchung der Auswirkung der Spannung der Spillglättungskavität auf die Mikrospillstruktur nicht zu. Solche Untersuchungen sind essentiell im Hinblick auf folgende Ziele von GSI/FAIR:

- Ermitteln der besten Betriebsparameter der Spillglättungskavität im SIS18 in Abhängigkeit von der Ionensorte und Strahlenergie, um einen optimalen Strahl für die Experimente zur Verfügung stellen zu können.
- Untersuchung von verschiedenen Methoden zur Spillglättung (z.B. „Empty Bucket Channeling“ sowie gezieltes „Tune Wobbling“). Abgleich der theoretischen Vorhersagen mit den Messergebnissen.
- Festlegung der Betriebsparameter der Spillglättungskavität für den Regelbetrieb (volle Einstellung durch HKR ohne RRF Überwachung).

Um die oben genannten Fragestellungen beantworten zu können, werden mehrere Maschinenexperimente im SIS18 in Zusammenarbeit zwischen der RRF, Strahldiagnose und Experimentierabteilungen HADES und mCBM notwendig sein. In diesen Experimenten ist der Betrieb bei höheren Spannungen (> 2kV) unabdingbar, um die oben beschriebenen Ziele erreichen zu können.

Diese höheren Spannungen machen eine vorherige Konditionierung der Spillglättungskavität notwendig, wofür deutlich höhere Leistungen als 6W notwendig sein werden.

Unter der Abwägung des hohen Nutzens gegenüber den aus RRF-Sicht aufgrund der umfangreichen Analysen als sehr gering eingestuften Gefahren bei Betrieb der Spillglättungskavität durch die Abteilung RRF wird empfohlen, die aktuell eingeführten Grenzen für solch einen Betrieb anzupassen.

Konkret wird empfohlen, die Grenzen für einen Betrieb unter engmaschiger Überwachung durch die Abteilung RRF auf maximal 225W Verstärkerleistung und maximal 15kV Gapspannung anzuheben.

Es wird empfohlen, solange, bis eine vollständige Kontrolle und Überwachung der Maschinensicherheit durch den HKR aufgebaut ist, den Betrieb durch den HKR weiterhin auf 4W / 2kV zu beschränken.