

Untersuchungen am MYRRHA Injektor

DISSERTATION
zur Erlangung des Doktorgrades
der Naturwissenschaften

vorgelegt am Fachbereich Physik
der Johann Wolfgang Goethe-Universität
in Frankfurt am Main

von
Klaus Peter Kümpel
geboren in Aschaffenburg



Frankfurt am Main 2022
(D30)

vom Fachbereich Physik der
Johann Wolfgang Goethe-Universität als Dissertation angenommen.

Dekan:

Prof. Dr. Harald Appelshäuser

Gutachter:

Prof. Dr. Holger Podlech

Prof. Dr. Ulrich Ratzinger

Datum der Disputation:

20.05.2022

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	6
2	Das MYRRHA-Projekt	9
2.1	Entwicklungen des MYRRHA Injektors	12
2.2	Das aktuelle MYRRHA Injektordesign	15
2.3	Der 5,9 MeV Injektor in Louvain-la-Neuve	16
3	Grundlagen	17
3.1	Hohlraummoden	20
3.2	Die IH-Struktur	23
3.3	Die CH-Struktur	24
3.4	Der Radio Frequenz Quadrupol	25
3.4.1	Der 4-Vane RFQ	28
3.4.2	Der IH-RFQ	29
3.4.3	Der 4-Rod-RFQ	31
3.5	Resonatorparameter	35
3.5.1	Gespeicherte Energie	35
3.5.2	Verlustleistung	36
3.5.3	Güte	37
3.5.4	Shuntimpedanz	40
3.6	Unterschied zwischen Simulation und Realität	46
3.6.1	Begrenzte Auflösung	46
3.6.2	Unterschiede in den Modellen	47
4	Der MYRRHA-RFQ	50
4.1	Dipolkompensation am MYRRHA RFQ	54
4.1.1	Dipolkompensation über den Stützenwinkel	55
4.1.2	Dipolkompensation über den Stützenversatz	57
4.2	Bauphase des MYRRHA RFQs	60
4.3	Low-Level-Messungen am MYRRHA RFQ	65
4.3.1	Resonanzfrequenz und Kopplungsfaktor	65
4.3.2	Güte und Dämpfung der Pickups	66
4.3.3	Tunerhub	69
4.3.4	Dipolmessungen	71

5	Die MYRRHA-CH-Strukturen	78
5.1	HF-Optimierung des MYRRHA-CH-Designs	79
5.1.1	Bestimmung der Tunerpositionen für die MYRRHA-CHs 2-7	82
5.1.2	Bestimmung der Tunerpositionen für MYRRHA-CH1	85
5.1.3	Zusammenfassung der HF-Simulationen	91
5.2	Kühlkonzept des MYRRHA-CH-Designs	95
5.2.1	Vorbemerkungen zu den Thermosimulationen	96
5.2.2	Auswirkungen des Resonatormaterials auf die Temperaturverteilung	98
5.2.3	Layout der Kühlung der MYRRHA-CHs	100
5.2.4	Kühlung der Deckel	100
5.2.5	Kühlung der Stützen	101
5.2.6	Kühlung des Tanks	103
5.2.7	Kühlung der Tauchkolben	105
5.3	Thermosimulationen an den MYRRHA-CHs	106
5.3.1	Anpassung des Kühlkonzeptes bei CH5-7	108
5.3.2	Zusammenfassung der Thermosimulationen	116
5.4	Bauphase der MYRRHA-CHs 1 und 2	117
5.5	Low-Level-Messungen an den CHs	119
5.5.1	Resonanzfrequenz und Kopplungsfaktor ohne Tuner	119
5.5.2	Güte und Dämpfung der Pickups	123
5.5.3	Bestimmung des Arbeitspunktes	126
5.5.4	Bestimmung des Tuningbereiches	127
5.5.5	Störkörpermessungen	128
6	Konditionierung	133
6.1	Grundlegender Versuchsaufbau einer Konditionierung	133
6.2	Schematischer Ablauf einer Konditionierung	137
6.3	Prozesse während der Konditionierung	139
6.3.1	Ausgasung	139
6.3.2	Multipacting	139
6.3.3	Entladung	140
6.4	Genauigkeit der Messungen während der Konditionierung	142
6.5	Konditionierung des MYRRHA-RFQs	143
6.5.1	Vorkonditionierung des MYRRHA-RFQs am IAP	143
6.5.2	Konditionierung des MYRRHA-RFQs in LLN	144
6.5.3	Bestimmung der Shuntimpedanz des MYRRHA-RFQs	150
6.6	Konditionierung der MYRRHA-CH Kavitäten	154
6.6.1	Konditionierungsaufbau	154
6.6.2	Konditionierung im niedrigen Leistungsbereich bis ca. 1 kW	156
6.6.3	Konditionierung bei höheren Leistungen	157
6.6.4	Abschließende Untersuchungen am Ende der Konditionierung von CH1	165
6.6.5	Abschließende Untersuchungen am Ende der Konditionierung von CH2	168

6.6.6	Abschließende Untersuchungen am Ende der Konditionierung von CH1newlid	172
7	Zusammenfassung	177
	Danksagung	179
	Literaturverzeichnis	180
	Abbildungsverzeichnis	187
	Tabellenverzeichnis	196

1 Einleitung

Der Umgang mit radioaktiven Abfällen ist unabhängig von dem im Juni 2011 beschlossenen Atomausstieg der Bundesrepublik Deutschland eine Aufgabe, die noch auf Jahre hinweg sowohl Politik, als auch Wissenschaft und Gesellschaft beschäftigen wird. Nach Beendigung der Stromproduktion im Jahr 2022 wird die Gesamtmenge an abgebranntem Brennstoff in Deutschland circa 10.500 t betragen. Nicht mit eingerechnet sind hierbei ungefähr 6.700 t abgebrannter Brennstoff, der in den Wiederaufbereitungsanlagen im französischen La Hague oder dem britischen Sellafield behandelt und eventuell bis dahin verlagert wurde. [1]

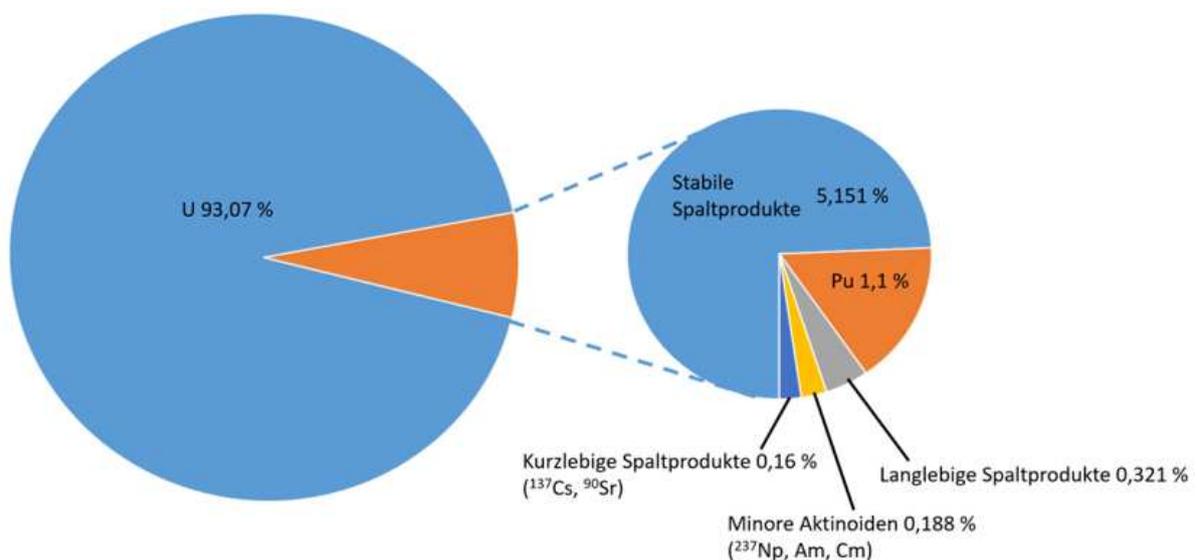


Abbildung 1.1: Prozentuale Massenanteile von abgebranntem Brennstoff. Frei nach [1].

Dieser abgebrannte Brennstoff besteht, wie in Abbildung 1.1 dargestellt, zu einem Großteil aus noch ungespaltenem Uran. Während sich der Rest aus dessen Spaltprodukten (stabilen, langlebigen und kurzlebigen) und den Transuranen zusammensetzt, deren anteilig größter Vertreter das Plutonium ist.

Mit einem Massenanteil von unter 0,2 % machen die minoren Aktinoiden zwar nur einen Bruchteil des Atommülls aus, doch sind diese für einen Großteil der Strahlung verantwortlich. Wie in Abbildung 1.2 dargestellt ist, wird die Radioaktivität in den ersten 100 Jahren ihrer Lagerung von den Spaltprodukten dominiert, auf die in diesem Zeitraum etwa 80 % der Radioaktivität entfällt, während im Zeitraum zwischen 100 und 300 Jahren sowohl die Spaltprodukte, als auch die minoren Aktinoiden signifikant zur Radioaktivität beitragen. Schließlich bestimmen die minoren Aktinoiden ab einer

Lagerungsdauer von ca. 300 Jahren die Radioaktivität beinahe vollständig [2], was sie zu den Hauptverantwortlichen der Endlagerproblematik macht.

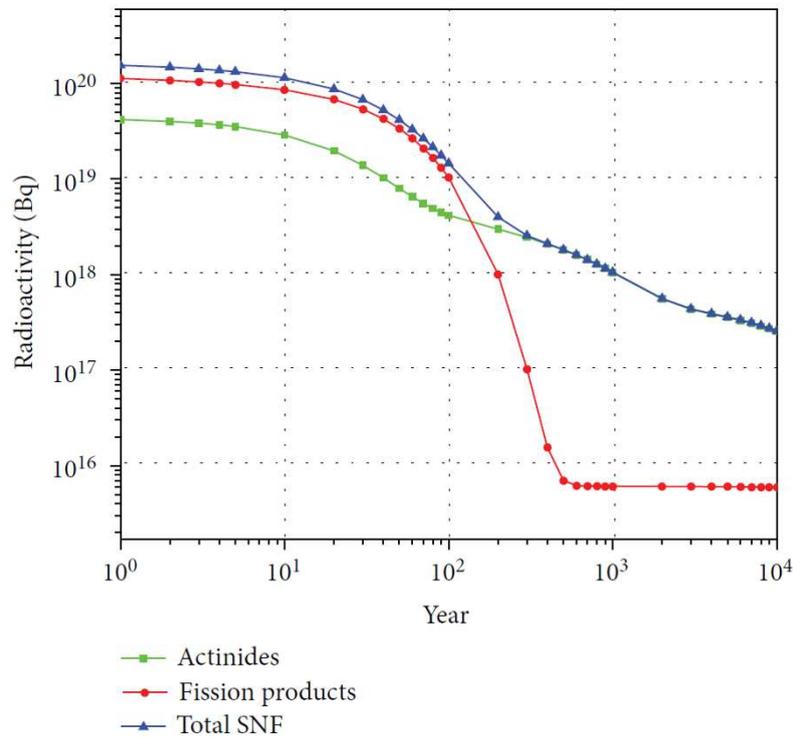


Abbildung 1.2: Radioaktivität von abgebranntem Brennstoff aufgetragen gegen die Zeit. Entnommen aus [2].

In Deutschland ist bislang vorgesehen, die gesamten abgebrannten Brennstoffe in tiefem geologischen Untergrund endzulagern [1], wobei die Wahl eines finalen Endlagerstandortes durch Aspekte des Strahlen-, Umwelt- und Gewässerschutzes, sowie der öffentlichen Meinung der umliegenden Bevölkerung erschwert wird.

Eine Alternative zur Endlagerung des gesamten abgebrannten Brennstoffes könnte in der teilweisen Partitionierung und Transmutation bestehen.

Bei der Partitionierung werden die abgebrannten Brennstäbe durch aufwändige chemische und physikalische Prozesse zerlegt, wodurch das unverbrannte Uran weiter zur Stromproduktion genutzt werden kann. Da Deutschland aufgrund des Atomausstieges dafür in Zukunft keine Verwendung mehr hat, könnte das Uran von anderen Nationen weiterverwendet werden, in denen auch weiterhin Kernkraftwerke betrieben werden, wobei in einigen Ländern (u.A. China, Indien, Russland und Großbritannien [3]) derzeit sogar neue Reaktoren geplant und gebaut werden.

Die durch die Partitionierung abgetrennten minoren Aktinoiden, können dann transmutiert werden. Hierbei werden sie durch Neutronenainfang zur Spaltung angeregt, wodurch sich sowohl deren Halbwertszeit, als auch deren Radiotoxizität signifikant reduzieren soll [1].

Zum Betrieb einer Transmutationsanlage sind zwei Konzepte denkbar.

Kernreaktoren mit schnellen Neutronen können derart konzipiert werden, dass die Transmutation der minoren Aktinoide direkt im Reaktor möglich ist. Experimente wurden hierzu beispielsweise im französischen Kernkraftwerk Phénix [4] und im amerikanischen EBR-II¹ durchgeführt. [5]

Weiter seien hier noch das ASTRID-Projekt in Frankreich und die russischen Brutreaktoren BN-800² und BN-1200 erwähnt. Bei ersterem handelt es sich um ein 600 MW Kraftwerk, das auf Transmutation und Energiegewinnung ausgelegt ist, während die beiden Brüter bereits existieren bzw. sich im Bau befinden und bei denen Transmutation im laufenden Betrieb stattfinden kann. [1]

Eine andere Art, Transmutation zu betreiben ist mit beschleunigergetriebenen Reaktoren (ADS³). In diesen werden die für die Transmutation benötigten schnellen Neutronen von einer Spallationsquelle bereitgestellt, die mit einem Teilchenbeschleuniger betrieben wird, wie es zum Beispiel am J-Parc⁴ [6] oder in dem für diese Arbeit relevanten MYRRHA⁵-Projekt [7] geplant ist.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden mehrere Kavitäten für den normalleitenden Injektor des MYRRHA-Beschleunigers geplant, Low-Level-Messungen unterzogen und anschließend konditioniert. Hierbei konnte eine neue Methode zur Dipolkompensation an 4-Rod-RFQs und mehrere alternative Kühlkonzepte für CH-Strukturen entwickelt werden, die auch in zukünftigen Beschleunigerprojekten Verwendung finden werden. Zunächst soll das MYRRHA-Projekt, für das die später beschriebenen Kavitäten vorgesehen sind, beschrieben werden, bevor in Kapitel 3 Hohlraumresonatoren und der 4-Rod-RFQ samt deren wichtigsten Resonatorparametern eingeführt werden. Die nächsten Kapitel widmen sich dann der Entwicklung und den Low-Level-Tests des MYRRHA-RFQs und anschließend den Simulationen zu den MYRRHA-CH-Kavitäten 1 - 7 und den Low-Level-Tests der CHs 1 und 2. Abschließend werden noch die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Konditionierungen des MYRRHA-RFQs und der beiden CH-Kavitäten beschrieben.

¹ **Experimental Breeder Reactor II** / Argonne National Laboratory

² Reaktor na **Bystrych Neutronach**, übersetzt: Reaktor für schnelle Neutronen

³ **Accelerator Driven System**

⁴ **Japan Proton Accelerator Research Complex**

⁵ **Multi-purpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications**

2 Das MYRRHA-Projekt

MYRRHA ist ein Forschungsprojekt, das im belgischen Mol realisiert werden soll und zwei Hauptzwecken dient. Erstens soll gezeigt werden, dass Transmutation in einem industriellen Maßstab möglich ist, und zweitens den seit den frühen 1960er Jahren betriebenen BR2-Reaktor als Neutronenquelle für eine Vielzahl von Forschungsanwendungen ersetzen. Hierunter fällt unter Anderem die Produktion von Radioisotopen für medizinische Anwendungen und Materialforschung für aktuelle und zukünftige Kern- und Fusionsreaktoren. [7]

Das Projekt gliedert sich in 4 Hauptbestandteile:

- Linearbeschleuniger
- Reaktor
- PTF¹
- FTS²

Der Linearbeschleuniger soll im cw³-Betrieb einen 4 mA Protonenstrahl auf 600 MeV beschleunigen, was einer Strahlleistung von 2,4 MW entspricht. Da die mittlere Betriebsdauer zwischen Ausfällen (MTBF⁴) mindestens 250 Stunden betragen soll, ist die Zuverlässigkeit eine besondere Herausforderung [8]. Um diese Reliabilität des Beschleunigers zu erzielen, wird dieser redundant geplant. Gleichzeitig werden die einzelnen Komponenten nicht auf ihre Effizienz, sondern auf ihre Zuverlässigkeit hin ausgelegt, indem beispielsweise das thermische Verhalten durch angepasste Kühlwasserlayouts optimiert wird. Zusätzlich wird eine leichte Reparierbarkeit der einzelnen Komponenten angestrebt, um eventuelle Ausfallzeiten zu minimieren.

Da der Injektor erfahrungsgemäß besonders störanfällig ist, soll er, wie in Abb. 2.1 dargestellt, doppelt gebaut werden, um so eine parallele Redundanz zu erzeugen. Im supraleitenden HochenergieTeil werden die Kavitäten weit unter ihren Möglichkeiten betrieben, sodass beim Ausfall einer Kavität die Umliegenden durch Erhöhung der Feldpegel, die fehlende Kavität ausgleichen können. Dies wird als serielle Redundanz bezeichnet. [10] Die Absicht einer leichten Reparierbarkeit macht sich in einigen Designentscheidungen bemerkbar. So werden, wenn möglich gleichartige Bauteile (Koppler, Pickups, Vakuumequipment, etc.) verwendet und die einzelnen Kavitäten sind derart ausgelegt, dass sie für Wartungs- und Reparaturarbeiten leicht aus dem LINAC entnommen werden können.

¹ Proton Target Facility

² Fusion Target Station

³ Continuous Wave - Dauerstrich

⁴ Mean Time Between Failures

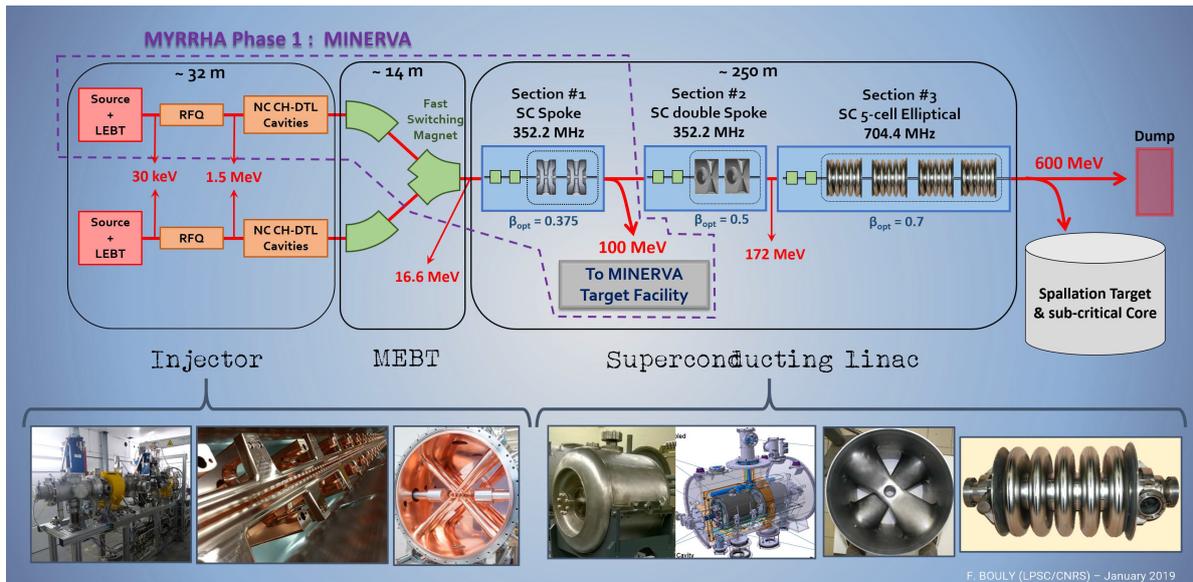


Abbildung 2.1: Übersicht über das MYRRHA-Projekt. Entnommen aus [9].

Im MYRRHA-LINAC folgt auf den 17 MeV-Injektor, der in Kapitel 2.1 noch genauer beschrieben wird, der supraleitende Beschleuniger, dessen wichtigste Parameter in Tabelle 2.1 dargestellt sind. Er besteht nach derzeitiger Planung aus insgesamt 150 phasenunabhängigen supraleitenden Kavitäten, deren Design durch konservative Beschleunigungsgradienten und eine niedrige Zellenanzahl auf eine hohe Energieakzeptanz und einen moderaten Energiegewinn pro Kavität hin ausgelegt wurden.

Durch die so erzielte hohe Flexibilität sind genügend Reserven vorhanden, um den Ausfall einzelner Kavitäten innerhalb des LINACs durch benachbarte Kavitäten zu kompensieren (serielle Redundanz) [11] [12]. Um den benötigten Energiebereich bis 600 MeV abzudecken, besteht der supraleitende LINAC aus drei Sektionen, die sich durch den Typ der jeweils verwendeten Kavität unterscheiden (Single und Double Spoke Kavitäten mit 352,2 MHz und Elliptische Kavitäten mit 704,4 MHz) [9].

Im unterkritischen Betrieb ($k_{\text{eff}} = 0.95$) trifft der 600 MeV Protonenstrahl im Reaktor auf ein Flüssigtar­get aus LBE⁵, wo durch Spallation die Neutronen für die Aufrechterhaltung der Transmutation im Reaktorkern bereitgestellt werden, wobei eine Leistung von 65 – 70 MW_{th} freigesetzt wird. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, den Reaktor kritisch mit bis zu 100 MW_{th} zu betreiben, sofern vorher die Beamline entfernt und zusätzliche Brennelemente an der Kernperipherie hinzugefügt werden, um die Kritikalität zu erhöhen [13]. Das Design der Kühlung des Reaktors umfasst einen poolartigen Primärkreislauf mit 7.600 t LBE, einen Sekundärkreislauf mit Wasser bzw. Dampf und einen Tertiärkreislauf mit Luft [7].

Parallel zum ADS-Betrieb am Reaktor werden bis zu 10% des Protonenstrahls bei einer Energie von 100 MeV in der Proton Target Facility (PTF) zur Herstellung von

⁵ Lead-Bismuth Eutectic

Sektion	# 1	# 2	# 3
E_{in} in MeV	16,6	101,4	172,3
E_{out} in MeV	101,4	172,3	600,0
Art der Kavität	Single Spoke	Double Spoke	Elliptisch
Anzahl der Zellen	2	3	5
Frequenz in MHz	352,2	352,2	704,4
Anzahl der Kavitäten	60	18	72
Länge der Sektion in m	91,2	36,3	121,0

Tabelle 2.1: Parameter des Supraleitenden Teils des MYRRHA-LINAC unterteilt in 3 Sektionen (entnommen aus [9]).

RIBs⁶ und Radionukliden verwendet. Der Hauptbestandteil des PTF bildet die Isotopentrennungsanlage ISOL⁷. In ihr werden radioaktive Isotope durch Beschuss eines Targets mit dem Protonenstrahl erzeugt. Diese können dann in einer Ionenquelle ionisiert und anschließend nach ihrer Masse (online) separiert und teilweise für niederenergetische Experimente nachbeschleunigt werden [7][14].

Die Fusion Target Station (FTS) dient der Bestrahlung von Materialien, die z.B. in der Fusions- und Kerntechnik Verwendung finden sollen. Hierfür werden bis zu 4 mA Protonen bei 100 MeV aus der Beamline ausgekoppelt. Es ist geplant, sowohl eine direkte Bestrahlung mit Protonen, als auch eine Bestrahlung mit Neutronen zu ermöglichen, die zuvor in mit einem Spallationstarget produziert werden [15] [16].

Der erste Teil des MYRRHA-Projektes, der als MINERVA⁸ bezeichnet wird, beinhaltet den Bau und die Inbetriebnahme des Injektors und der ersten supraleitenden Sektion des LINACs bis zu einer Protonenenergie von 100 MeV, sowie der Proton Target Facility und der Fusion Target Station.

Nach derzeitigem Stand ist der Bau von MYRRHA in drei Phasen gegliedert. Phase 1, die von 2019 bis 2026 dauern soll, besteht aus MINERVA und aus zusätzlicher Forschungs- und Entwicklungsarbeit für den restlichen 600 MeV LINAC und den Reaktor. Phase 2 soll 2033 mit dem Bau des 600 MeV LINAC abgeschlossen sein und während Phase 3 soll bis 2036 der Reaktor gebaut werden [7].

⁶ **R**adioactive **I**on **B**eams

⁷ **I**sotope **S**eparation **O**n-**L**ine

⁸ **M**YRRHA **I**sotopes production **N** coupling the **l**in**E**ar accele**R**ator to the **V**ersatile proton target **f**acility

2.1 Entwicklungen des MYRRHA Injektors

Der Injektor bildet den ersten Teil einer Beschleunigeranlage. In ihm werden die Teilchenstrahlen erzeugt und auf den Einschuss in nachfolgende Strukturen vorbereitet. Eine genaue Definition, bis zu welcher Teilchenenergie ein Beschleuniger als Injektor bezeichnet wird, existiert nicht. Viel mehr kann sowohl eine einzelne Ionenquelle, als auch ein mehrere Meter langer Beschleuniger als Injektor gelten.

Datum	Injektordesign	Version
März 2010	EUROTRANS Injektordesign	A
November 2012	MAX Referenzdesign 2012	B
September 2013	MAX Alternativdesign	C1
November 2013	MAX Konsolidiertes Alternativdesign	C2
April 2014	MAX Referenzdesign 2014	C3
September 2016	MYRRHA Injektordesign	D

Tabelle 2.2: Überblick über die wichtigsten Entwicklungen des MYRRHA-Injektor-Designs. Frei nach [17].

Aufgrund der hohen Ansprüche an Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit, die der Reaktor fordert, gepaart mit der Tatsache, dass Injektoren aufgrund der noch niedrigen Teilchenenergien und der damit verbundenen Problematik hoher Raumladungskräfte besonders herausfordernd sind, wurde das Layout des MYRRHA Injektors im Laufe seiner Entwicklung mehrfach überarbeitet. Eine Übersicht über die vergangenen und die aktuelle Version des Injektors samt deren Bezeichnung findet sich in Tabelle 2.2.

Im 2010 vorgeschlagenen **EUROTRANS Injektordesign (A)** wird der Protonenstrahl in einem 325 MHz 4-Vane-RFQ mit einer Elktrodenspannung von 65 kV auf 3 MeV beschleunigt. In der anschließenden normalleitenden Sektion waren zwei Rebuncher und zwei CH-Strukturen vorgesehen, die den Strahl auf 5 MeV weiterbeschleunigen und in die supraleitende Sektion, bestehend aus vier CH-Strukturen einschließen sollten. Besonders an diesem Design ist, dass alle Kavitäten mit einer Frequenz von 352 MHz geplant waren und dass sich die gesamte supraleitende Sektion in einem einzigen Kryostaten befinden sollte, was gepaart mit der verwendeten KONUS⁹-Strahldynamik für eine sehr kurze Baulänge sorgte [18][19][17].

Für das **MAX¹⁰ Referenzdesign (B)** von 2012 wurde der 4-Vane-RFQ durch einen 4-Rod-RFQ ersetzt, was für eine höhere Zuverlässigkeit, Reparierbarkeit und niedrigere Kosten sorgen sollte. Da ein 4-Rod-RFQ mit 352 MHz aber sehr kleine geometrische Abmessungen hätte, was aufgrund des geplanten cw-Betriebes und der dadurch benötigten

⁹ **K**Ombinierte **N**ull-Grad-Strukturen

¹⁰ **M**YRRHA **A**ccelerator **E**xperiment **R**esearch & **D**evelopment Programme

2.1 Entwicklungen des MYRRHA Injektors

thermischen Stabilität ein Problem hätte darstellen können, wurde die Frequenz des Injektors auf 176,1 MHz halbiert und die Elektrodenspannung reduziert. Um die dadurch notwendige Verlängerung des RFQs zu kompensieren, wurden die Ein- und Ausgangsenergien von 0,05 auf 0,03 bzw. von 3 auf 1,5 MeV reduziert. Dementsprechend wurden auch die folgenden normal- und supraleitenden Strukturen auf die neuen Energien und die halbierte Frequenz angepasst, was insgesamt zu einer Verlängerung des Injektors um 1,2 m führte [19][17][20].

Um die geforderte Zuverlässigkeit und leichte Reparierbarkeit weiter zu erhöhen, wur-

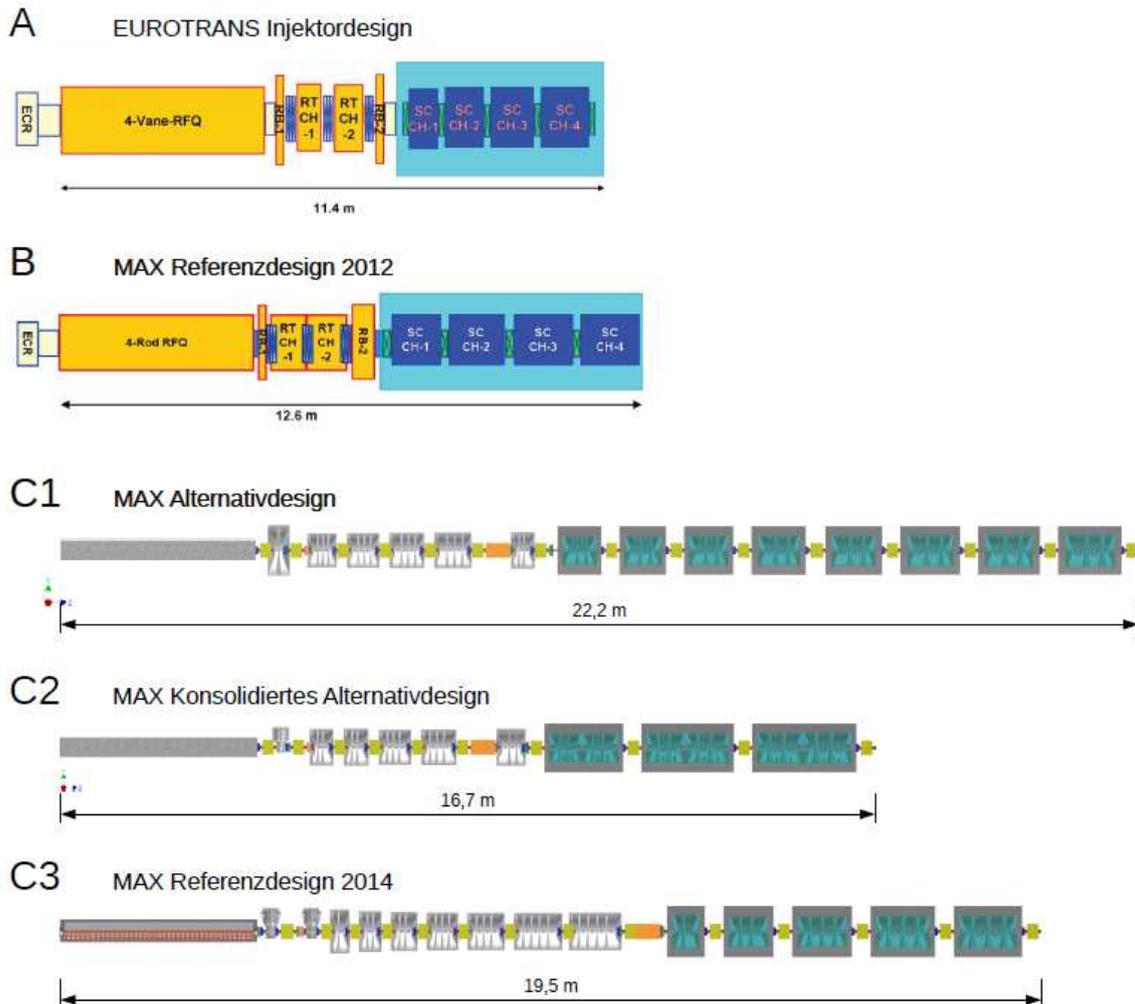


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung der verschiedenen Injektordesigns A bis C3. Entnommen aus [17].

den die Driftstrecken zwischen den Kavitäten im **MAX Alternativdesign (C1)** vergrößert um so zum einen Platz für Diagnoseelemente zu schaffen und zum anderen um den Austausch einzelner Komponenten durch eine bessere Zugänglichkeit zu vereinfachen. Zusätzlich war für jede supraleitende Kavität ein eigener Kryostat vorgesehen,

was die Verwendung von normalleitenden Fokussierelementen zwischen den Kavitäten ermöglicht. Um die Kavitäten flexibler anpassen zu können wurde deren Spaltanzahl reduziert und die KONUS- durch eine Konstant- β -Strahldynamik ersetzt. Insgesamt war die Länge des Injektors um fast 10 m auf 22,2 m ohne die Quelle und die LEBT¹¹-Sektion angewachsen [17][21].

Für das **MAX Konsolidierte Alternativdesign (C2)** konnte die Länge des Injektors verringert werden, indem u.A. die Spaltanzahl der ersten beiden normalleitenden CH-Strukturen nach dem RFQ reduziert wurde, was sich positiv auf die Qualität der Bunchstruktur auswirkte. Dadurch wurde es möglich in den folgenden Kavitäten mit einer anderen Phase zu beschleunigen, wodurch der anfangs niedrigere Energiegewinn kompensiert werden konnte. Zusätzlich teilten sich in diesem Design zwei supraleitende Strukturen einen Kryostaten, wodurch sich der Injektor weiter verkürzte [17].

Der im C2-Design verfolgte Ansatz, nach dem RFQ zunächst nur sanft zu beschleunigen, wurde im **MAX Referenzdesign (C3)** weiter vorangetrieben. So befinden sich nach dem RFQ zunächst eine MEBT¹²-Sektion bestehend aus zwei QWR-Rebunchern, einem Quadrupoltriplett magneten und Diagnoseelementen, in der der Strahl longitudinal und transversal für die nachfolgende Beschleunigung angepasst wird. Die Beschleunigungsgradienten der ersten beiden normalleitenden CH-Kavitäten wurden weiter abgesenkt um die longitudinale Bunchstruktur so weit zu erhalten, dass in den nachfolgenden Strukturen mit einer schwächeren Phasenfokussierung und wesentlich stärker beschleunigt werden kann. [17] [22]

¹¹ **Low Energy Beam Transport**

¹² **Middle Energy Beam Transport**

2.2 Das aktuelle MYRRHA Injektordesign

Das aktuelle Injektordesign wurde im September 2016 von Dominik Mäder entwickelt und entspricht im niederenergetischen Teil bis 5,9 MeV dem **MAX Referenzdesign (C3)**. Allerdings wurden die bislang vorgesehenen supraleitenden CH-Strukturen durch weitere normalleitende Kavitäten ersetzt [23].

Wie in Abbildung 2.3 dargestellt ist, besteht der Injektor in seiner jetzigen Konfiguration aus einer EZR-Ionenquelle, die einen kontinuierlichen Protonenstrahl erzeugt. Der Protonenstrahl wird von der LEBT weitertransportiert und in den 4-Rod-RFQ (vgl. Abschnitt 4) eingeschossen, wo der Strahl zu Teilchenpaketen geformt und von 0,03 auf 1,5 MeV beschleunigt wird. Darauf folgt die MEBT, die aus einem Steererpaar, zwei QWR-Rebunchern und einem Quadrupol-Triplett-Magneten besteht, bevor der Strahl in die CH-Sektion gelangt.



Abbildung 2.3: Übersicht des aktuellen geplanten MYRRHA-Injektors. Überarbeitet nach einer Vorlage von [24].

In der CH-Sektion wird der Teilchenstrahl zunächst in den ersten 7 CH-Kavitäten (CH1-7) auf eine Energie von 5,9 MeV beschleunigt, bevor der Strahl einen 5-spaltige CH-Rebuncher (CHR) durchläuft und von den anschließenden 8 CH-Kavitäten (CH8-15) auf 16,6 MeV beschleunigt wird.

Innerhalb der CH-Sektion ist vor jeder CH-Struktur ein Quadrupol-Dublett-Magnet zur transversalen Fokussierung vorgesehen. In Tabelle 2.3 sind die Anzahl der Beschleunigungsspalte der im Injektor geplanten CH-Kavitäten samt ihrer Eingangs- und Ausgangsenergien E_{in} und E_{out} zusammengefasst.

	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CHR	CH8	CH9	CH10	CH11	CH12	CH13	CH14	CH15
Anzahl Gaps	3	4	5	6	7	9	9	5	11	12	12	11	10	10	9	9
E_{in} in MeV	1,50	1,65	1,95	2,40	3,00	3,75	4,81	5,83	5,83	7,21	8,69	10,15	11,53	12,82	14,11	15,35
E_{out} in MeV	1,65	1,95	2,40	3,00	3,75	4,81	5,83	5,83	7,21	8,69	10,15	11,53	12,82	14,11	15,35	16,60

Tabelle 2.3: Anzahl der Beschleunigungsspalte (Gaps) und die Eingangs- und Ausgangsenergien E_{in} und E_{out} der im aktuellen Injektordesign vorgesehenen CH-Strukturen.

2.3 Der 5,9 MeV Injektor in Louvain-la-Neuve

Um die Funktionsweise und die Zuverlässigkeit des geplanten MYRRHA-Injektors zu erproben, wird ein verkürzter Injektor in der Experimentierhalle der Universität von Louvain-la-Neuve aufgebaut, der eine Endenergie von 5,9 MeV erreichen soll.

Dabei entspricht dieser verkürzte Injektor dem in Abschnitt 2.2 vorgestellten MYRRHA Injektordesign, endet aber mit CH7, wie es in Abbildung 2.4 dargestellt ist.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem für den Injektor in Louvain-la-Neuve vorgesehenen 4-Rod-RFQ und den ersten 7 CH-Strukturen, wobei die Erkenntnisse, die bei der Entwicklung dieser CH-Strukturen gewonnen werden konnten bereits in die Entwicklung der restlichen CHs (CHR und CH8-15) mit eingeflossen sind [25].

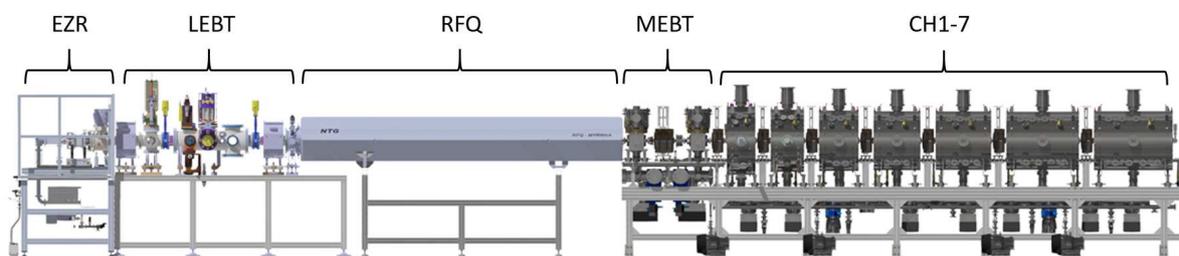


Abbildung 2.4: Übersicht des geplanten 5,9 MeV Injektors, der in Louvain-la-Neuve aufgebaut werden soll. Überarbeitet nach einer Vorlage von [24].

3 Grundlagen

In Teilchenbeschleunigern werden geladene Teilchen mit Hilfe von elektrischen Feldern beschleunigt. Das Bereitstellen dieser Felder kann auf unterschiedliche Arten erfolgen und begründet somit die Existenz verschiedener Arten von Teilchenbeschleunigern. Geschichtlich betrachtet können die bereits Ende des 19. Jahrhunderts bekannten Elektrodenstrahlröhren (Braunsche Röhre) als erste Teilchenbeschleuniger gelten. In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts begann schließlich die Entwicklung der noch heute verwendeten Beschleunigertypen, wobei diese prinzipiell danach unterteilt werden können, ob die Teilchen in einem konstanten, oder sich periodisch ändernden elektrischen Feld beschleunigt werden.

Beispiele für die sogenannten Gleichspannungsbeschleuniger sind der Cockcroft-Walton- und der Van-de-Graaff-Beschleuniger. Der erste Cockcroft-Walton-Beschleuniger wurde 1932 von J. D. Cockcroft und E. T. Walton gebaut, wobei mit einer Hochspannungskaskade eine Spannung von ca. 700 kV erzeugt wurde, mit der ein Protonenstrahl auf bis zu 600 keV beschleunigt und auf ein Li-Target geschossen werden konnte, womit die Reaktion ${}^7\text{Li} + p \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He} + \gamma$ beobachtet wurde [26], wofür Cockcroft und Walton 1951 den Nobelpreis in Physik erhielten.

Während die maximale Spannung von Cockcroft-Walton-Beschleunigern üblicherweise zwischen 200 und 1000 kV liegt [27], können Van-de-Graaf-Beschleuniger eine Spannung von bis zu 30 MV bereitstellen [28]. Der hierbei für die benötigte Hochspannung verwendete Bandgenerator wurde in den 1930er Jahren von R. J. Van de Graaf entwickelt [29]. Mit elektrostatischen Beschleunigern kann eine gute Strahlqualität mit einer sehr geringen Energieunschärfe und sehr kleinen transversalen Emittanzen erzielt werden. Außerdem sind sie je nach Bauart in der Lage, Strahlen verschiedener Energien und Intensitäten zu liefern [27]. Aufgrund ihrer großen Abmessungen und der begrenzten maximal erreichbaren Teilchenenergien werden elektrostatische Beschleuniger heutzutage nur noch für Spezialanwendungen entwickelt und bereits bestehende Anlagen langsam durch neue Beschleuniger, die mit alternierenden Feldern arbeiten, ersetzt.

Das Prinzip, hochfrequente (HF) Felder zur Beschleunigung geladener Teilchen zu benutzen, war bereits 1924 von Gustav Ising vorgeschlagen worden [30] und wird auch heute noch in aktuellen Linearbeschleunigern angewendet. HF-Beschleuniger bestehen aus einer Reihe von geladenen Driftröhren in deren Zwischenräumen (Spalten bzw. Gaps) sich elektrische Felder ausbilden in denen die Teilchenpakete (Bunche) beschleunigt werden. Auf diese Weise kann die beschleunigende Spannung mehrfach durchlaufen werden. In den meisten HF-Beschleunigern werden die Driftröhren von einer stehenden Welle geladen, die durch die resonante Struktur des Beschleunigers (Resonator) selbst erzeugt wird. Eine Ausnahme bildet hier der historisch erste Vertreter der HF-Beschleuniger. Denn die Driftröhren des 1928 von R. Wideröe vorgestellten Wideröe-Beschleunigers

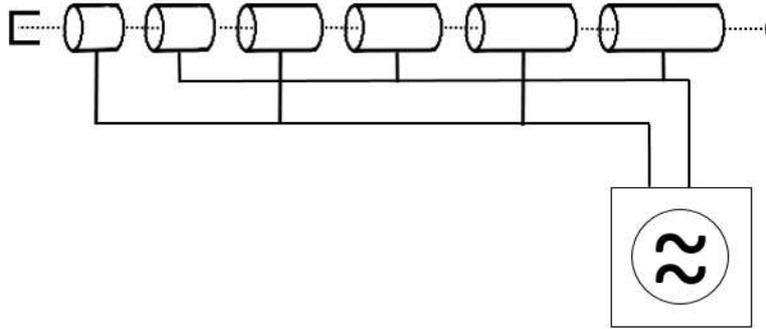


Abbildung 3.1: Skizzierter Aufbau eines Widerö Beschleunigers. Die Driftröhren sind abwechselnd mit den Polen einer HF-Quelle verbunden und ihre Länge ist an die steigende Geschwindigkeit der Teilchenpakete angepasst.

werden nicht von einem Resonator, sondern, wie in Abbildung 3.1 dargestellt, direkt von einer HF-Quelle alternierend geladen [31].

Damit die Position der Teilchenpakete und die beschleunigende Phase der HF synchron verlaufen, müssen die Längen der Driftröhren, bzw. die Längen der Spaltmittenabstände l an die Geschwindigkeit des Bunches β_B und die Wellenlänge der im Resonator erzeugten stehenden Welle λ_{HF} angepasst werden. Bei den meisten HF-Beschleunigerarten, wie z.B. den für diese Arbeit maßgeblichen RFQ- und CH-Strukturen, gilt die sog. „Wideröe-Bedingung“ (Formel 3.1).

$$l_{Wid} = \frac{\beta_B \lambda_{HF}}{2} \quad (3.1)$$

Im Gegensatz dazu gilt für den Alvarez-Beschleuniger Formel 3.2, weil in diesem die Driftröhren nicht abwechselnd geladen werden, sondern die Ladung auf den Driftröhren durch Influenz, verursacht durch das elektrische Feld der Hohlraummode des Resonators getrennt werden, wodurch die Felder in den Gaps immer die gleiche Feldrichtung aufweisen.

$$l_{Alv} = \beta_B \lambda_{HF} \quad (3.2)$$

In Abbildung 3.2 sind exemplarisch die Spaltmittenabstände für eine RFQ-, eine Driftröhrenstruktur mit Wideröe-Bedingung und eine Alvarez-Struktur mit den dazugehörigen elektrischen Feldern skizziert.

Resonatoren können danach unterschieden werden, wie die stehende Welle, die zum Betrieb als Linearbeschleuniger benötigt wird, erzeugt wird. Man spricht hier von verschiedenen Moden, in denen ein Resonator schwingen kann.

Bei den Leitungsmoden sind die inneren Aufbauten der Kavität (z.B. die Stütze samt Driftröhre bei Quarter-Wave-Resonatoren, oder die Konstruktion aus Stützen, Elektroden und Tuningplatten bei 4-Rod-RFQs) maßgeblich für die Schwingungseigenschaften der Mode, während der umgebende Vakuumtank einen eher untergeordneten Einfluss hat. Im Gegensatz dazu sind bei Hohlraummoden die Einflüsse von der Geometrie des Vakuumtanks für die Schwingungseigenschaften ausschlaggebend und die Einbauten werden

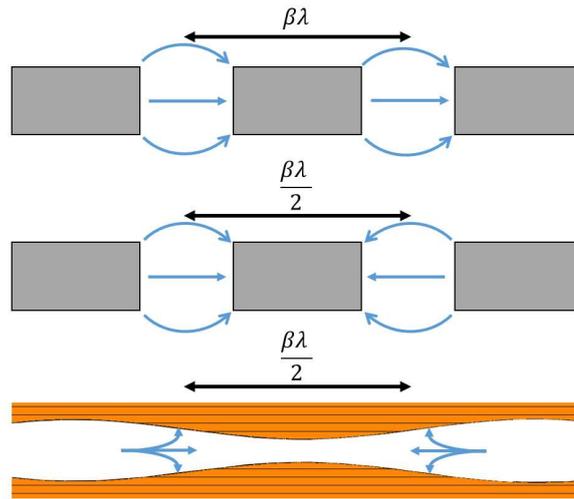


Abbildung 3.2: Skizze der Spaltmittenabstände und der elektrischen Felder innerhalb eines RFQs (unten) einer Driftröhrenstruktur nach der Wideröe-Bedingung, z.B. eine Wideröe-, CH- oder IH-Struktur (mitte) und innerhalb einer Alvarez-Struktur (oben).

dazu genutzt, die Form der Felder derart zu manipulieren, dass der Resonator als Teilchenbeschleuniger genutzt werden kann.

3.1 Hohlraummoden

Um die Feldverteilung in zylindrischen Hohlraumresonatoren herzuleiten, geht man von den Maxwellgleichungen im Vakuum (Formeln 3.3 bis 3.6) aus [32].

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0 \quad (3.3)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.4)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.5)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (3.6)$$

Wie in den Gleichungen bei 3.7 dargestellt, erhält man die Wellengleichung im Vakuum für das elektrische Feld (Formel 3.8), indem auf Gleichung 3.4 die Rotation angewendet wird [32].

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{E}) &= \vec{\nabla} \times \left(-\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) \\ \vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) - \vec{\nabla}^2 \vec{E} &= -\frac{\partial}{\partial t} (\vec{\nabla} \times \vec{B}) \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$\vec{\nabla}^2 \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (3.8)$$

Analog lässt sich auch die Wellengleichung für das magnetische Feld im Vakuum erstellen:

$$\vec{\nabla}^2 \vec{B} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = 0 \quad (3.9)$$

Für die Lösung der Wellengleichung, wie sie für Hohlraumresonatoren benötigt wird, empfiehlt es sich, die Zylinderkoordinaten ϕ , r und z zu verwenden. Wobei man die Lösungen je nach Orientierung der Felder in **T**ransversal **E**lektrische (TE- oder H-Moden) und **T**ransversal **M**agnetische (TM- oder E-Moden) unterscheidet und mit den Indizes m , n und p , die das Verhalten der jeweils longitudinalen Feldkomponente beschreiben, eindeutig charakterisiert.

m	Zahl der Knoten des longitudinalen Feldes im Bereich	$0 \leq \phi \leq \pi$
n	Zahl der Knoten des longitudinalen Feldes im Bereich	$0 \leq r \leq R$
p	Zahl der Halbwellen des longitudinalen Feldes im Bereich	$0 \leq z \leq l$

Die Gleichungen 3.10 bis 3.21 beschreiben die Feldkomponenten der TE- bzw. TM-Moden innerhalb eines idealisierten zylindrischen Resonators („Pillbox“). Wie in [33]

3.1 Hohlraummoden

und [34] genauer beschrieben ist, lassen sie sich mit Hilfe der Besselfunktionen m -ter Ordnung (J_m), deren Ableitung (J'_m) sowie deren Nullstellen (χ_{mn} bzw. χ'_{mn}) bestimmen. Hierbei ist E_0 die Amplitude des elektrischen Feldes und B_0^* eine zur Amplitude des Magnetfeldes proportionale Größe und die radiale Koordinate r steckt in $\rho = r/R$.

Für TM-Moden gilt:

$$E_z = E_0 J_m(\chi_{mn}\rho) \cos(m\phi) \cos\left(\frac{p\pi z}{L}\right) e^{i\omega t} \quad (3.10)$$

$$E_r = -\frac{p\pi R}{L\chi_{mn}} E_0 J'_m(\chi_{mn}\rho) \sin(m\phi) \sin\left(\frac{p\pi z}{L}\right) e^{i\omega t} \quad (3.11)$$

$$E_\phi = -\frac{p\pi m R^2}{L\chi_{mn}^2 r} E_0 J_m(\chi_{mn}\rho) \sin(m\phi) \sin\left(\frac{p\pi z}{L}\right) e^{i\omega t} \quad (3.12)$$

$$B_z = 0 \quad (3.13)$$

$$B_r = -i\omega \frac{mR^2}{\chi_{mn}^2 \rho c^2} E_0 J_m(\chi_{mn}\rho) \sin(m\phi) \cos\left(\frac{p\pi z}{L}\right) e^{i\omega t} \quad (3.14)$$

$$B_\phi = -i\omega \frac{R}{\chi_{mn} c^2} E_0 J'_m(\chi_{mn}\rho) \cos(m\phi) \cos\left(\frac{p\pi z}{L}\right) e^{i\omega t} \quad (3.15)$$

Für TE-Moden gilt:

$$B_z = B_0^* J_m(\chi'_{mn}\rho) \cos(m\phi) \sin\left(\frac{p\pi z}{L}\right) e^{i\omega t} \quad (3.16)$$

$$B_r = -\frac{p\pi R}{L\chi'_{mn}} B_0^* J'_m(\chi'_{mn}\rho) \cos(m\phi) \cos\left(\frac{p\pi z}{L}\right) e^{i\omega t} \quad (3.17)$$

$$B_\phi = -\frac{p\pi m R^2}{L\chi'_{mn}{}^2 r} B_0^* J_m(\chi'_{mn}\rho) \sin(m\phi) \cos\left(\frac{p\pi z}{L}\right) e^{i\omega t} \quad (3.18)$$

$$E_z = 0 \quad (3.19)$$

$$E_r = i\omega \frac{mR^2}{\chi'_{mn}{}^2 \rho c^2} B_0^* J_m(\chi'_{mn}\rho) \sin(m\phi) \cos\left(\frac{p\pi z}{L}\right) e^{i\omega t} \quad (3.20)$$

$$E_\phi = i\omega \frac{R}{\chi'_{mn} c^2} B_0^* J'_m(\chi'_{mn}\rho) \cos(m\phi) \sin\left(\frac{p\pi z}{L}\right) e^{i\omega t} \quad (3.21)$$

Die Resonanzfrequenzen von TE- und TM-Moden idealisierter, zylindrischer Hohlraumresonatoren in abhängigkeit der Indizes m , n und p ist durch die Gleichungen 3.22 und 3.23 gegeben.

$$f_{\text{TE}}(m, n, p) = c \cdot \sqrt{\left(\frac{\chi'_{mn}}{2\pi R}\right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{p}{L}\right)^2} \quad (3.22)$$

$$f_{\text{TM}}(m, n, p) = c \cdot \sqrt{\left(\frac{\chi_{mn}}{2\pi R}\right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{p}{L}\right)^2} \quad (3.23)$$

3.1 Hohlraummoden

Abbildung 3.3 zeigt die Feldverteilungen und Oberflächenstromdichten der in Linearbeschleunigern verwendeten TM_{010} -, TE_{111} und TE_{211} -Mode. Wie an den elektrischen Feldverteilungen zu erkennen ist, besitzt nur die TM_{010} -Mode eine elektrische Feldkomponente in Strahlrichtung, die direkt zur Beschleunigung genutzt werden kann, während bei den beiden TE-Moden zusätzliche Einbauten notwendig sind, um die Felder auf die Strahlachse zu "biegen", was im folgenden Abschnitt noch näher beschrieben wird.

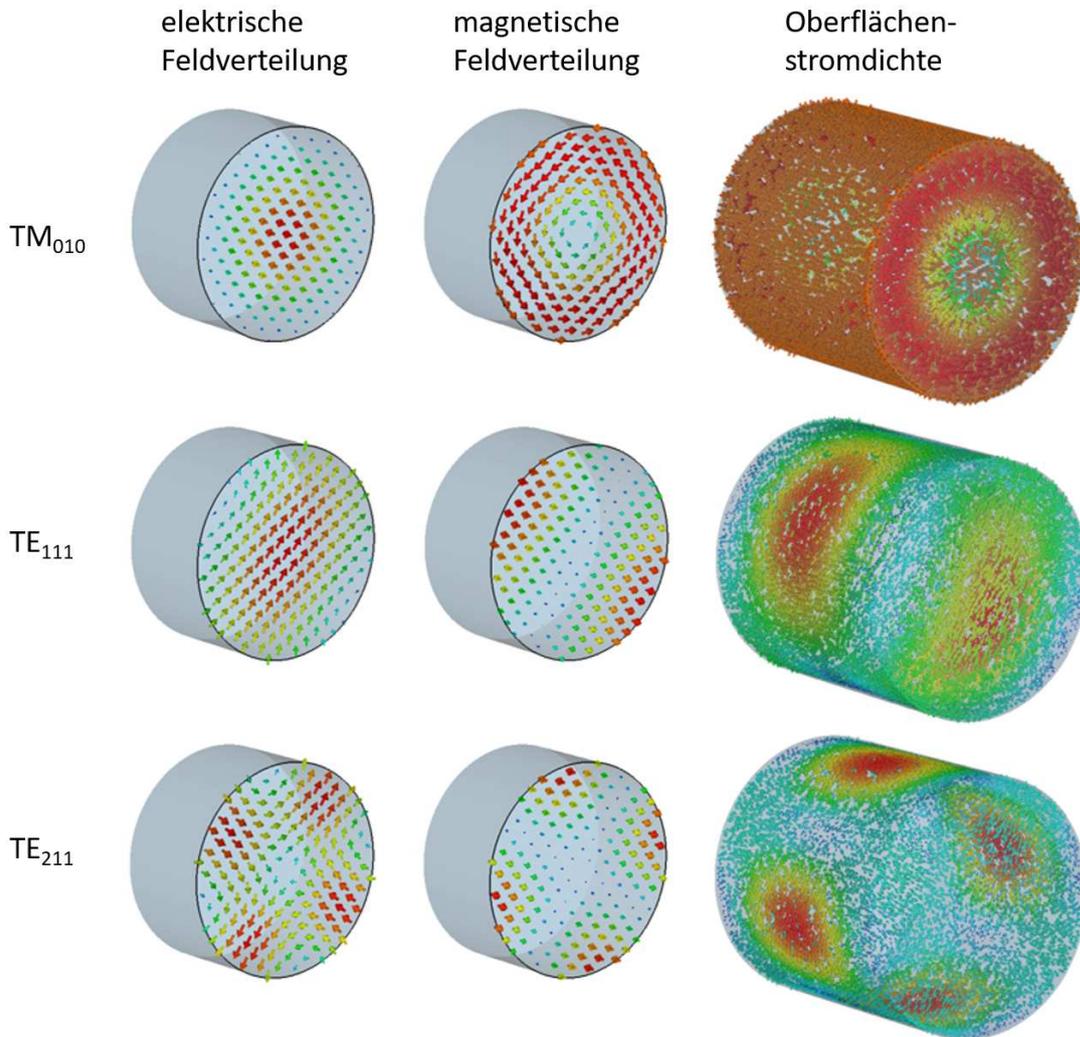


Abbildung 3.3: Feldverteilungen und Oberflächenstromdichten der TM_{010} -, TE_{111} und der TE_{211} -Mode in einer Pillbox-Kavität.

3.3 Die CH-Struktur

CH-Driftröhrenbeschleuniger werden üblicherweise im niedrigen bis mittleren Energiebereich verwendet [36]. Im MYRRHA Injektor werden normaleitende CHs nach dem RFQ für die Beschleunigung von 1,5 bis 16,6 MeV verwendet. Der prinzipiellen Funktion der IH-Struktur folgend, werden auch die durchgängigen Stützen der CH-Driftröhrenstruktur von den magnetischen Feldern der angeregten TE_{211} -Mode alternierend aufgeladen, wodurch sich ein longitudinales elektrisches Feld ausbildet, das der „Wideröe-Bedingung“ (Formel 3.1) unterliegt. Da die auf den Stützen induzierte Spannung dem sinusförmigen Potentialverlauf der angeregten Mode folgt, kann die Spannung auf den äußeren Stützen dadurch erhöht werden, dass der Tank an den Rändern longitudinal verlängert wird. Abbildung 3.5 zeigt zwei Versionen von MYRRHA-CH5 mit den gleichen Spaltmittenabständen aber unterschiedlichen longitudinalen Längen an den Rändern. Wie sich anhand der unterschiedlichen Potentialverläufe (grüne Kurve für die unverlängerte und die rote Kurve für die verlängerte Kavität) erkennen lässt, liegen die äußeren Stützen bei der verlängerten Variante von CH5 auf einem höheren Potential, was für eine gleichmäßigere Spannungsverteilung entlang der Strahlachse sorgt.

Ein anderer Erklärungsansatz ergibt sich analog zu dem Effekt den die Girder in der bereits besprochenen IH-Struktur haben. Dadurch, dass sich in dem zusätzlichen Volumen, das durch die longitudinale Verlängerung in der Kavität existiert, mehr magnetisches Feld ausbilden kann, erhöht sich die induzierte Spannung auf den äußeren Stützen.

Im Vergleich zu IH-Strukturen zeichnen sich CH-Kavitäten durch eine höhere Shuntimpedanz (siehe Abschnitt 3.5.4) und durch geringere geometrische Abmessungen aus, was sie für den Einsatz bei höheren Frequenzen prädestiniert [36]. Zusätzlich zeigen sie aufgrund ihrer durchgängigen Stützen eine höhere mechanische Stabilität [37].

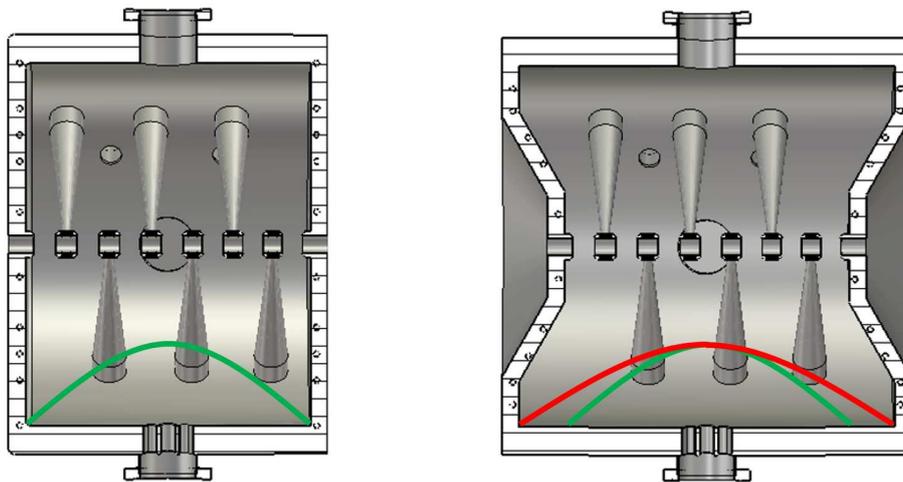


Abbildung 3.5: Zwei Versionen von MYRRHA-CH5, bei denen die rechte an den Rändern longitudinal verlängert wurde, wodurch sich der Potentialverlauf (grüne bzw. rote Kurve) verlängert wird, wodurch sich die äußeren Stützen auf einem höheren Potential befinden.

3.4 Der Radio Frequenz Quadrupol

Ionenquellen erzeugen üblicherweise einen kontinuierlichen Ionenstrahl mit niedriger Energie, der in der nachfolgenden LEBT-Sektion meist nur fokussiert, nicht aber beschleunigt wird. Solch ein Strahl ist für die Beschleunigung in einer Driftröhrensektion bestehend aus DTLs und Quadrupolmagneten aus den folgenden drei Gründen ungeeignet:

1. **Mangelnde Effizienz:** Aufgrund des Zusammenhangs zwischen den Spaltmittenabständen und der Teilchengeschwindigkeit (Gleichungen 3.1 und 3.2) wären die longitudinalen Abmessungen von DTLs bei niedrigen Geschwindigkeiten sehr kurz wodurch das Feld nur schlecht auf die Achse gelangt.
2. **Ineffektive Fokussierung:** Die defokussierenden Raumladungskräfte haben aufgrund der Coulombkräfte zwischen den geladenen Teilchen eine $1/\gamma^2$ -Abhängigkeit [38], wobei γ dem Lorentzfaktor entspricht, wodurch sie bei niedrigen Teilchenenergien stärker wirken. Auch ist die Lorentzkraft, wie sie in Quadrupolmagneten zur Fokussierung genutzt wird, proportional zur Teilchengeschwindigkeit, wodurch sie bei langsameren Teilchen weniger effektiv ist. Zusätzlich ist aufgrund der bereits erwähnten geringen longitudinalen Abmessungen von DTL-Strukturen bei geringen Teilchenenergien kaum Platz zum Einbau magnetischer Quadrupole vorhanden.
3. **Geringe Akzeptanz:** Damit Teilchen in einem DTL beschleunigt werden können, muss die Teilchenbewegung mit der beschleunigende Phase innerhalb des Spaltes synchron laufen, was dazu führt, dass nur ein geringer Anteil eines kontinuierlichen Strahls von einem DTL beschleunigt werden kann. Zwar steigt die mögliche Akzeptanz und mit ihr der Anteil der eingefangenen Teilchen mit sinkender Spaltanzahl der Kavität, aber sie bleibt dennoch weit unter 100 %.

Um also den Strahl aus der Ionenquelle möglichst effektiv in einer Driftröhrenkavität beschleunigen zu können, muss dieser zuvor beschleunigt, fokussiert und zu Teilchenpaketen geformt werden. In den meisten aktuellen Beschleunigeranlagen wird diese Aufgabe von einem RFQ erfüllt.

1969 schlugen I. Kapchinsky und V. Teplyakov vor, der geschwindigkeitsunabhängigen transversalen Fokussierung des elektrischen HF-Quadrupols eine longitudinale Feldkomponente durch eine periodische Modulation der Elektrodengeometrie hinzuzufügen, mit der sowohl eine Beschleunigung, als auch ein Bunchen möglich war [39]. In Abbildung 3.6 ist das transversale Feld eines Quadrupols dargestellt. Wie anhand der zusätzlich markierten Ebenen (rote und grüne Pfeile) zu erkennen ist, wirkt auf die Teilchen in einer Achse das Feld fokussierend (rote Pfeile), während es senkrecht dazu defokussierend wirkt (grüne Pfeile). Da sich die Ladung der Elektroden nach jeder halben HF-Periode ändert, werden die Teilchen in jeder Achse abwechselnd fokussiert und defokussiert. Da aber die Feldstärke des Quadrupols, nach außen hin zunimmt, folgt auf eine Defokussierung eine stärkere Fokussierung, wodurch der Strahl eine Nettokokussierung erfährt. Dies wird als AG-Fokussierung (**A**lternierende **G**radienten-Fokussierung) bezeichnet und kann

3.4 Der Radio Frequenz Quadrupol

mit einer FODO-Anordnung, wie sie etwa in magnetischen Quadrupollinsen verwendet und in Abbildung 3.8 dargestellt ist, verglichen werden.

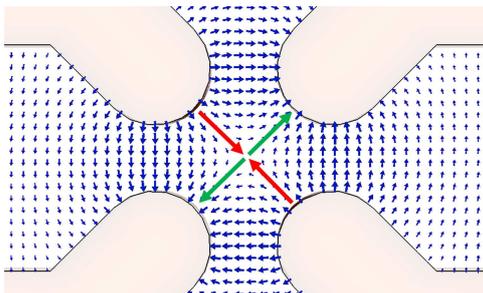


Abbildung 3.6: Transversal elektrisches Quadrupolfeld simuliert an einem Modell des MYRRHA-RFQs. Die roten Pfeile markieren die fokussierende und die grünen Pfeile die defokussierende Ebene für einen positiv geladenen Teilchenstrahl.

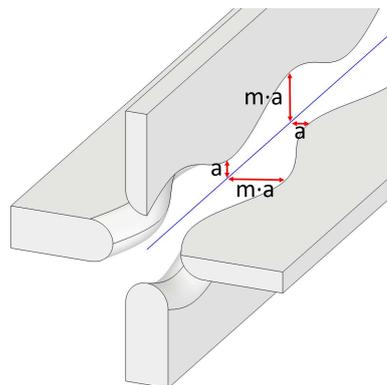


Abbildung 3.7: Elektrodenmodulation mit der minimalen und maximalen Apertur a und $m \cdot a$. Frei nach [40].

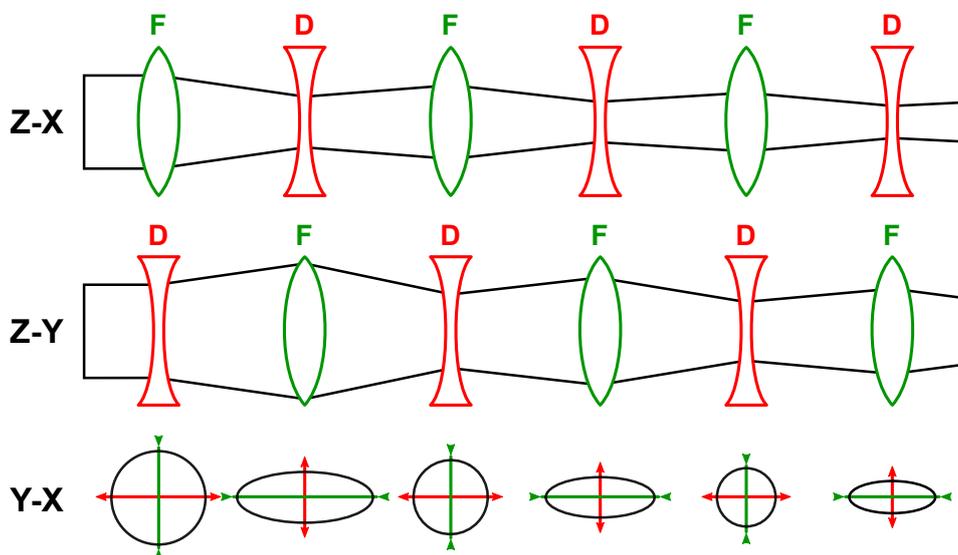


Abbildung 3.8: AG-Fokussierung in einer FODO-Anordnung. Entnommen aus [41].

Um dem fokussierenden transversalen Feld eine longitudinale Komponenten zum Beschleunigen und Bunchen hinzuzufügen, werden die Elektroden mit einer sinusförmigen Modulation versehen, wobei die Modulation nebeneinanderliegender Elektroden, wie in Abbildung 3.7 dargestellt, phasengleich und nebeneinanderliegender Elektroden um 180° phasenverschoben ist. Hierbei ist a der minimale und $m \cdot a$ der maximale Abstand zwischen Elektrode und Strahlachse, wobei m als Modulationsfaktor bezeichnet wird.

Da das elektrische Feld \vec{E} senkrecht auf leitenden Oberflächen steht, lässt es sich, wie in Abbildung 3.9 dargestellt, in eine transversale, fokussierende Feldkomponente \vec{E}_r und eine longitudinale, beschleunigende Feldkomponente \vec{E}_z aufteilen. Die Länge der einzelnen Beschleunigungszellen, die durch die Modulierung gebildet werden, nimmt mit der

Teilchengeschwindigkeit β zu und erfüllt die Wideröe-Bedingung (Gleichung 3.1). Da die beiden Feldanteile entlang der Modulation nicht konstant sind, ist der fokussierende Anteil bei maximaler und minimaler Apertur am größten, während der longitudinale Anteil dazwischen maximal wird und dabei stark vom Modulationsparameter m abhängt. Das Bunchen, also das longitudinale Komprimieren des Gleichstromstrahls zu einzelnen Teilchenpaketen, erfolgt in RFQs über die Variation der Sollphase und des Parameters m .

Die typischerweise verwendeten Strahldynamikprogramme gehen von einer gleichmäßigen Spannungsverteilung entlang der gesamten Elektrodenlänge aus. Da dies aber bauartbedingt bei den meisten gebauten RFQs nur durch spezielle Tuningmaßnahmen zu erzielen ist, wird die sog. Flatness bestimmt. Diese beschreibt die Abweichung von der idealen Spannungsverteilung und kann auf verschiedene Arten definiert werden. Für die in dieser Arbeit verwendeten Definition wird die Flatness als die maximale prozentuale Abweichung von der gemittelten Elektronenspannung definiert.

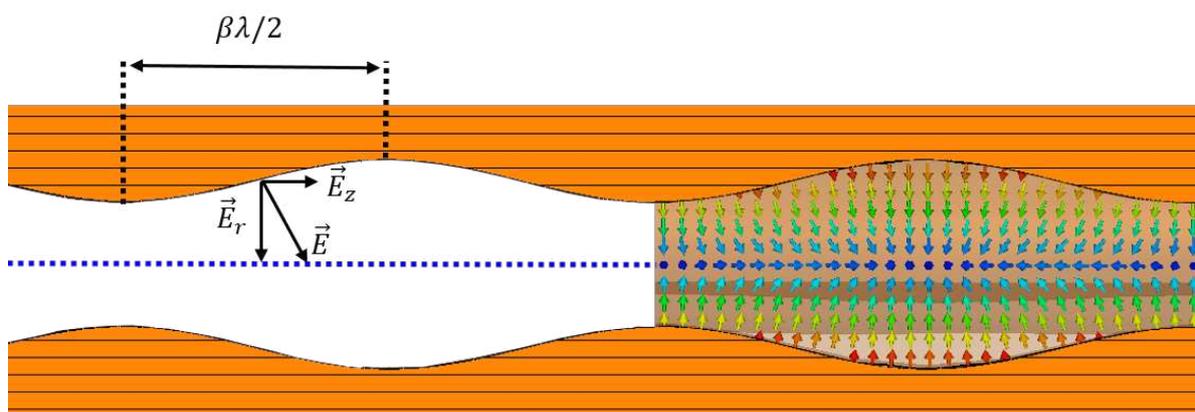


Abbildung 3.9: Links: Zerlegung des senkrecht auf der Elektrodenoberfläche stehenden E-Feldvektors \vec{E} in seine transversalen und longitudinalen Anteile \vec{E}_r und \vec{E}_z . Rechts: Simulierte elektrische Feldverteilung zwischen schräg gegenüberliegenden Elektroden des MYRRHA-RFQ-Modells.

Der erste experimentelle Test des RFQ-Konzeptes erfolgte 1974, als I. Kapchinsky und V. Teplyakov am Institut für Hochenergiephysik im sowjetischen Protwino mit Hilfe eines 148,5 MHz RFQs 100 keV Protonen mit 50 % Transmission auf 620 keV beschleunigen konnten [40]. 1980 konnten am Los Alamos National Laboratory (LANL) mit einem 425 MHz 4-Vane-RFQ (siehe Abbildung 3.11) ein 100 keV Protonenstrahl auf 640 keV beschleunigt werden, wobei eine Transmission von 90 % erreicht werden konnte, wie es auch mit einem am LANL entwickelten Code vorhergesagt wurde [42]. Seitdem ist der RFQ in vielen Beschleunigeranlagen ein wichtiger Bestandteil und liefert sowohl Strahlen für die direkte wissenschaftliche und kommerzielle Anwendung, als auch als Vorbeschleuniger für nachgeschaltete Linear- und Ringbeschleuniger. Im Laufe der letzten Jahrzehnte wurden verschiedene Konzepte entwickelt, RFQs zu realisieren, von denen die gängigsten in den folgenden Kapiteln kurz vorgestellt werden sollen.

3.4.1 Der 4-Vane RFQ

Der 4-Vane-RFQ ist ein Hohlraumresonator in dem sich vier Tankrippen (die namensgebenden Vanes) befinden, auf denen die Elektrodenmodulation aufgefräst ist. Wie in Abbildung 3.10 dargestellt, werden durch die longitudinalen Magnetfelder der angeregten TE_{211} -Mode Stromflüsse induziert, die innerhalb eines Tankquadranten hin und herfließen und dabei die Elektroden alternierend aufladen. Da das Magnetfeld longitudinal nicht konstant ist und in der Mitte der Kavität ein Maximum hat, werden die Vanes an den Tankenden mit sog. Undercuts versehen (vergleichbare Undercuts sind in den Abbildungen 3.14 und 3.15 dargestellt), die lokal die Magnetfeldstärke und dadurch die Spannung an den Elektrodenenden erhöhen um eine gleichmäßige Spannungsverteilung entlang der Elektroden zu erzielen. Da nun das Feld des 4-Vane-RFQs entlang der Strahlachse idealisiert als konstant angesehen wird, spricht man von einer $TE_{21(0)}$ -Mode. Ausgehend von der in Kapitel 3.1 beschriebenen Radiusabhängigkeit der Resonanzfre-

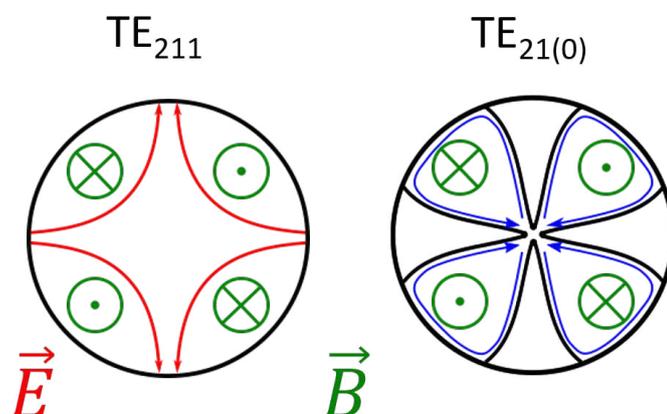


Abbildung 3.10: Elektrisches und magnetisches Feld der TE_{211} - und der TE_{111} -Mode.

quenzen von TM-Moden, ist auch die Frequenz des 4-Vane-RFQs stark vom Radius des Vakuumentanks abhängig, wobei sie durch die zusätzliche Kapazität zwischen den Elektroden deutlich verringert wird, was dazu führt, dass der Tankradius im Vergleich zur leeren Pillbox bei gleicher Frequenz deutlich kleiner sein muss. 4-Vane-RFQs werden üblicherweise über 200 MHz betrieben [33] und auch bei höheren Frequenzen sind ihre Abmessungen noch nicht zu klein, um vernünftig hergestellt zu werden. Darüber hinaus verfügen sie üblicherweise über eine für RFQs hohe Shuntimpedanz, was sich dadurch erklären lässt, dass sich die Oberflächenströme relativ gleichmäßig auf der Struktur verteilen [41].

Allerdings sind sie sehr empfindlich gegenüber parasitären Dipolmoden und Fehlern in der Quadrupolsymmetrie, wie sie etwa durch eine abweichende Positionierung der Vanes, oder durch überschrittene Toleranzen in der Produktion hervorgerufen werden können. Um dem entgegenzuwirken können beispielsweise mehrere radialsymmetrische, individuell bewegliche Tuner installiert werden, um Asymmetrien auszugleichen, oder es können gegenüberliegende Vanes mit Koppelringen verbunden werden, um Spannungsdif-

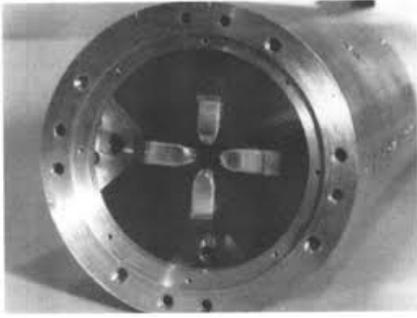


Abbildung 3.11: Der 425 MHz 4-Vane-RFQ vom Los Alamos National Laboratory hat einen Durchmesser von 150 mm und war ca. 1,1 m lang. Entnommen aus [43].



Abbildung 3.12: Ein Modul des 325 MHz 4-Vane-RFQs am CERN LINAC4. Entnommen aus [44].

ferenzen auszugleichen. Diese Maßnahmen, gepaart mit hohen Ansprüchen an Fertigung und Montage machen den 4-Vane-RFQ vergleichsweise teuer.

3.4.2 Der IH-RFQ

Der IH-RFQ wird in der $TE_{11(0)}$ -Mode betrieben. Wie in den Abbildungen 3.14 und 3.15 dargestellt ist, befinden sich im IH-RFQ zwei gegenüberliegende Tankrippen (sog. Girder) auf denen sich Stützen mit den Elektrodenhaltern befinden. Es sind immer zwei gegenüberliegende Elektroden mit jeder zweiten Stütze verbunden, wodurch die Elektrodenpaare unterschiedlich geladen werden. An den Tankenden befinden sich, wie auch bei 4-Vane-RFQs, Einschnitte (Undercuts) in den Tankrippen, um die lokale Magnetfelddichte und dadurch eine induzierte Spannung an den äußeren Elektrodenhaltern zu erhöhen, was sich positiv auf die Flatness auswirkt.

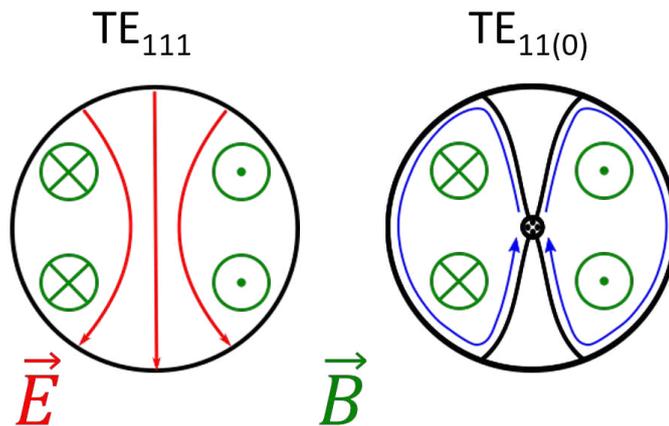


Abbildung 3.13: Elektrisches und magnetisches Feld der TE_{211} - und der TE_{111} -Mode.

Da sich die Länge der induzierten Strompfade von einem Elektrodenpaar zum anderen

3.4 Der Radio Frequenz Quadrupol

über den halben Tankumfang erstrecken, sind diese bei gleichem Tankradius viel länger, als bei 4-Vane-RFQs. Das sorgt dafür, dass IH-RFQs auch für Betriebsfrequenzen im Bereich von 25 bis 100 MHz geeignet sind, ohne durch einen zu großen Radius unpraktisch in Herstellung und Montage zu werden. Auch der IH-RFQ hat aufgrund seiner gleichmäßigen Verteilung der Oberflächenströme eine vergleichsweise hohe Shuntimpedanz. Eine genauere Betrachtung des IH-RFQs samt eines analytischen Modells findet sich in [45].

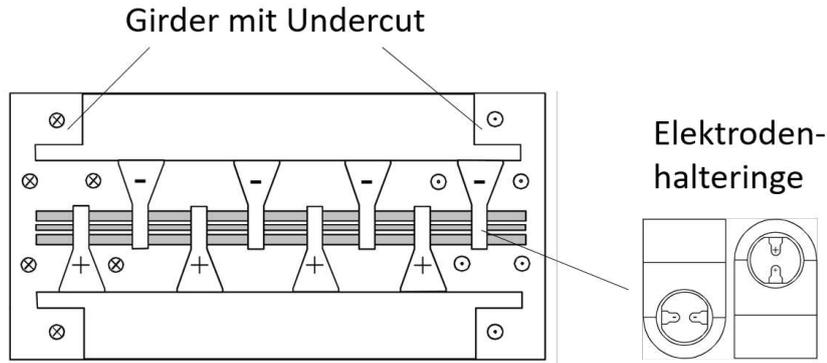


Abbildung 3.14: Skizzierter Aufbau eines IH-RFQ (links) mit vergrößerter Darstellung der Elektrodenhalteringe (rechts)[45].

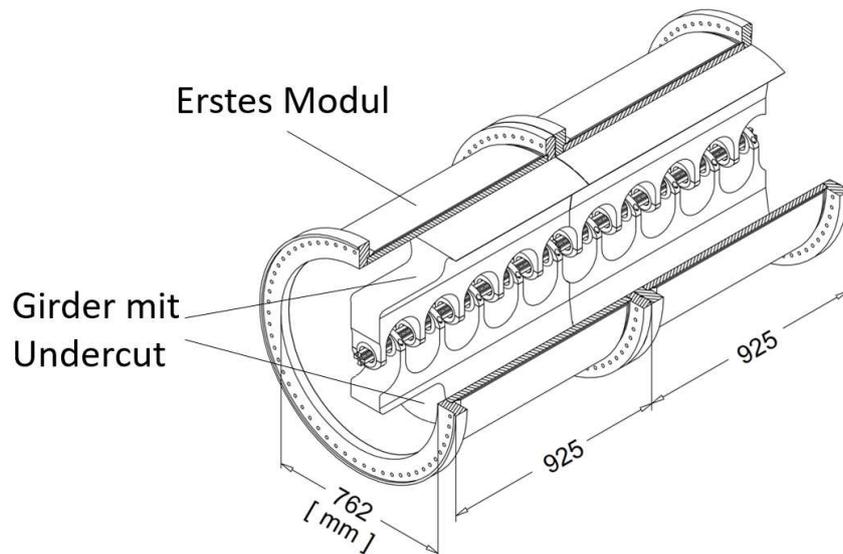


Abbildung 3.15: Skizze der ersten beiden Module des 36 MHz IH-RFQs [46].

3.4.3 Der 4-Rod-RFQ

Beim 4-Rod-RFQ handelt es sich um einen Leitungsresonator, dessen schwingungsfähige Struktur aus einer Reihe von am Tankboden befestigten Stützen besteht, auf denen jeweils 2 Quadrupolelektroden alternierend befestigt sind. Jede der Stützen kann als $\lambda/4$ -Resonator betrachtet werden, wobei deren Höhe aufgrund des kapazitiven Abchlusses an den Elektroden signifikant reduziert ist. Zwischen den Stützen befinden sich sog. Tuning- oder Abstimmplatten, deren Höhe während der Montage des RFQs individuell eingestellt werden kann. Jedes Paar von benachbarten Stützen kann zusammen mit der Tuningplatte und den Elektroden als ein eigener Schwingkreis betrachtet werden, der als HF-Zelle bezeichnet wird. Die einzelnen Schwingkreise eines RFQs sind über die Elektroden kapazitiv und über die Stützen induktiv gekoppelt. In Abbildung 3.16 sind die Strompfade und die Ersatzschaltbilder der einzelnen Schwingkreise eines 4-Rod-RFQs mit vier Stützen skizziert. Über die vertikale Position der Tuningplatte kann die Induktivität innerhalb einer HF-Zelle verändert werden, wodurch sich die Frequenz der Zelle ändert. Die veränderte Frequenz einer HF-Zelle bewirkt zusätzlich zur globalen Veränderung der Resonanzfrequenz des gesamten RFQs eine lokale Änderung der Elektrodenspannung. Hierbei führt eine nach oben versetzte Tuningplatte zu einer Erhöhung der Zellenfrequenz und zu einer Verringerung der lokalen Elektrodenspannung und umgekehrt.

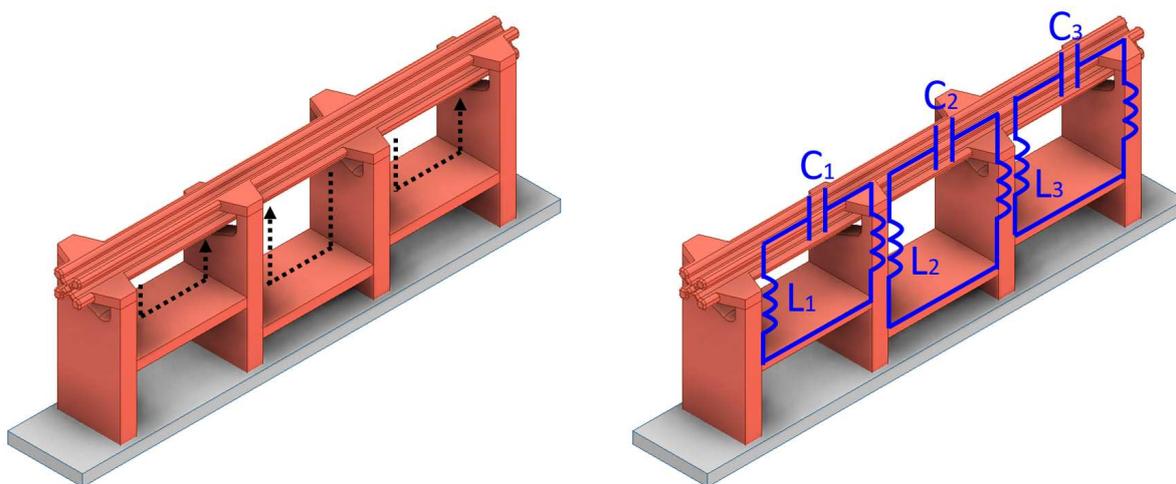


Abbildung 3.16: Links: 4-Rod-RFQ-Modell mit skizzierten Strompfaden (schwarze gestrichelte Linie). Rechts: Ersatzschaltbild der HF-Zellen.

Beim 4-Rod-RFQ fließen die Ströme, mit denen die Elektroden geladen werden, nur über die Stützen und Tuningplatten. Dies hat zur Folge, dass die HF-Eigenschaften des Resonators nicht vom Vakuumtank abhängen, sofern die Tankwände so weit von der RFQ-Struktur entfernt sind, dass sie dessen Kapazität und Induktivität nicht signifikant beeinflussen. Da sich die Oberflächenstromdichten auf den Stützen und Tuningplatten konzentrieren, führt dies zu erhöhten ohmschen Verlusten und zu einer im Vergleich zu 4-Vane- und IH-RFQ verminderten Shuntimpedanz [41].

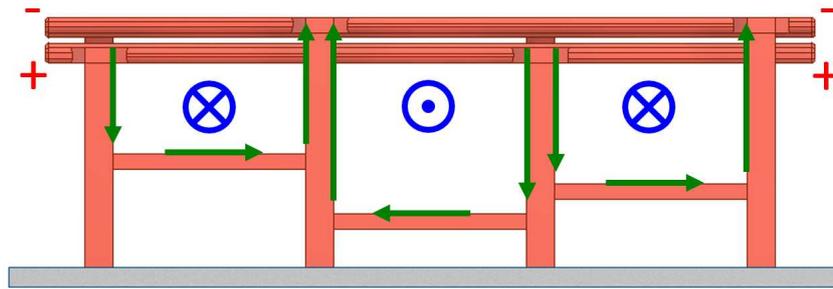


Abbildung 3.17: Strompfade (grün) und Magnetfelder (blau) innerhalb der drei HF-Zellen eines 4-Rod-RFQs mit vier Stützen. Die positiven und negativen Ladungen (rot) beziehen sich nur auf die Elektroden, die im Vordergrund zu sehen sind.

In Abbildung 3.17 sind die Strompfade und die dazugehörigen Magnetfeldrichtungen innerhalb der einzelnen HF-Zellen, sowie die Ladungen der Elektroden im Vordergrund dargestellt.

4-Rod-RFQs zeichnen sich durch verhältnismäßig geringe Produktionskosten und eine leichte Reparierbarkeit aus. Zusätzlich lassen sich Resonanzfrequenz und Flatness aufgrund der beweglichen Abstimmplatten gut tunen.

Der Dipolanteil

Bei der Planung eines RFQs wird davon ausgegangen, dass an allen Elektroden das betragsmäßig gleiche Potential anliegt, wobei nebeneinanderliegende Elektroden entgegengesetzt geladen sind. In einem solchen Quadrupol bildet sich eine symmetrische Feldverteilung zwischen den Elektrodenspitzen aus, in dessen geometrischem Mittelpunkt idealerweise die Strahlachse verläuft, da hier der Anteil der fokussierenden Feldkomponente \vec{E}_r gegen Null geht und nur noch die beschleunigende Komponente \vec{E}_z auf den Strahl wirkt. Wenn aber die oberen Elektroden auf einem betragsmäßig höheren Potential liegen, als die unteren, ist die Quadrupolsymmetrie gestört und die ideale Position der Strahlachse wird vertikal aus der geometrischen Mitte nach unten verschoben, wie es in Abbildung 3.18 dargestellt ist.

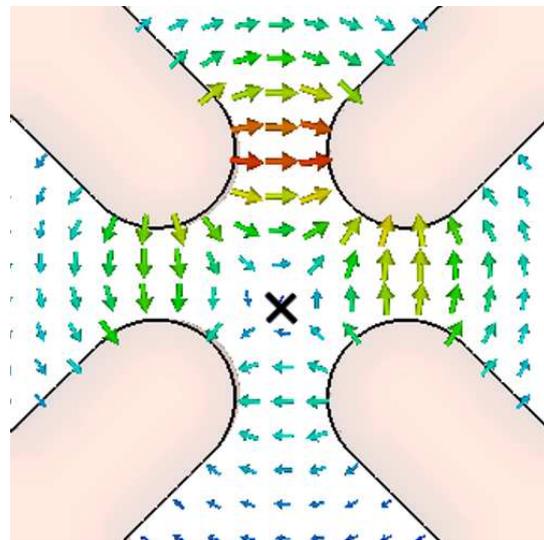


Abbildung 3.18: Nach unten verschobene ideale Position der Strahlachse bei starkem Dipolanteil.

Während dieser bei RFQs unerwünschte Dipolanteil bei 4-Vane-RFQs auftreten kann,

3.4 Der Radio Frequenz Quadrupol

wenn sich in der Nähe der gewünschten $TE_{21(0)}$ -Mode noch eine parasitäre $TE_{11(0)}$ -Mode befindet, lässt er sich bei 4-Rod-RFQs auf das asymmetrische Design der Stützen zurückführen.

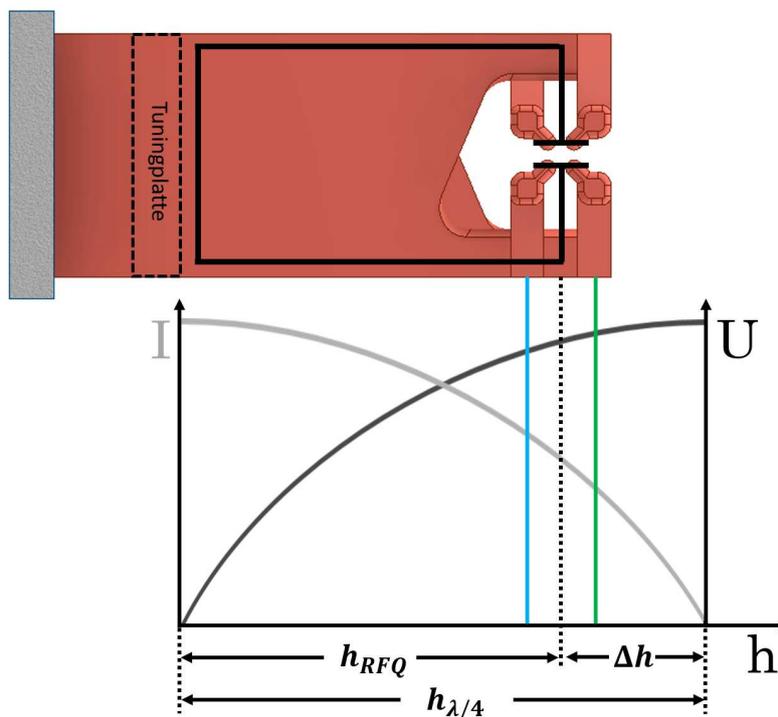


Abbildung 3.19: Vergleich der Spannungs- und Stromverteilung an einer RFQ-Stütze und einem theoretischen $\lambda/4$ -Resonator ohne kapazitiven Abschluss.

Bei $\lambda/4$ -Resonatoren erhöht sich die Spannung, wie in Abbildung 3.19 dargestellt mit der Länge der Strompfade [47]. Da der Strompfad zu der unteren Elektrode kürzer, als zu der oberen Elektrode ist, ergibt sich eine höhere Spannung zwischen dem oberen Elektrodenpaar und ein daraus resultierender Dipolanteil. Da mit kleiner werdender Wellenlänge der relative Wegunterschied des Strompfades zwischen oberer und unterer Elektrode zunimmt, steigt der Dipolanteil tendentiell mit der Frequenz.

Abbildung 3.19 zeigt den Verlauf der Spannung und des Stroms entlang der Höhe $h_{\lambda/4}$ eines $\lambda/4$ -Resonators ohne zusätzlichen kapazitiven Abschluss. Zusätzlich werden die unterschiedlich hohen Spannungen an den unteren (blaue Linie) und an den oberen Elektroden (grüne Linie) einer RFQ-Stütze gezeigt. Aufgrund des kapazitiven Abschlusses der HF-Zelle ist die Höhe der Stütze h_{RFQ} gegenüber dem $\lambda/4$ -Resonator um Δh verkürzt.

Da keine einheitliche mathematische Definition des Dipolanteils existiert, wird dieser in der vorliegenden Arbeit auf zwei unterschiedliche Arten bestimmt die bereits in [48] benutzt wurden. Hierbei definiert Gleichung 3.24 den Dipolanteil als eine Abweichung der unteren zur oberen Elektrodenspannung, während Gleichung 3.25 die Differenz beider

3.4 Der Radio Frequenz Quadrupol

Spannungen zum gemeinsamen Mittelwert betrachtet.

$$\text{Def}_{\text{oben}} = \frac{|U_{\text{oben}}| - |U_{\text{unten}}|}{|U_{\text{oben}}|} \quad (3.24)$$

$$\text{Def}_{\text{Mittel}} = \frac{|U_{\text{oben}}| - |U_{\text{unten}}|}{\frac{|U_{\text{oben}}| + |U_{\text{unten}}|}{2}} \quad (3.25)$$

3.5 Resonatorparameter

Im folgenden Abschnitt sollen allgemeine Hochfrequenzparameter zur Charakterisierung von Resonatoren vorgestellt werden. Wobei soweit möglich auch auf deren Anwendung und auf die Unterschiede von einzelnen Resonatortypen eingegangen wird.

3.5.1 Gespeicherte Energie

Die in dieser Arbeit betrachteten Resonatoren sind schwingungsfähige Systeme, bei denen wie in einem Schwingkreis die gespeicherte Energie in den magnetischen und elektrischen Feldern gespeichert ist.

Da die gespeicherte Energie in beiden Feldern gleich verteilt ist, lässt sie sich folgendermaßen durch Integration über das Resonatorvolumen V ausdrücken:

$$W = \frac{1}{2}\mu_0 \int_V |H_0|^2 dV = \frac{1}{2}\epsilon_0 \int_V |E_0|^2 dV \quad (3.26)$$

Slater Theorem

Unter Zuhilfenahme der gespeicherten Energie lässt sich das in späteren Kapiteln beschriebene Frequenz tuning mittels Tauchkolben und die Messmethoden zur Bestimmung der Feldverteilungen erklären.

Hierzu wird zunächst auf den klassischen eindimensionalen harmonischen Oszillator mit der Auslenkung q , dem Impuls p und der Masse m verwiesen [33]:

$$H(q, p) = \frac{p^2}{2m} + \frac{m\omega_0^2 q^2}{2} = W \quad (3.27)$$

Da die Energie im System erhalten ist, spannen q und p eine Ellipse der Form

$$\frac{p^2}{2mW} + \frac{m\omega_0^2 q^2}{2W} = 1 \quad (3.28)$$

mit den Halbachsen

$$q_0 = \sqrt{\frac{2W}{m\omega_0^2}} \quad (3.29)$$

und

$$p_0 = \sqrt{2mW} \quad (3.30)$$

auf.

Der Flächeninhalt dieser Ellipse ist konstant bezüglich einer adiabatischen Änderung und lässt sich mit

$$A = \pi q_0 p_0 = \pi \sqrt{\frac{4mW^2}{m(2\pi f_0)^2}} = \frac{W}{f_0} \quad (3.31)$$

3.5 Resonatorparameter

bestimmen, wobei $\omega = 2\pi \cdot f$ gesetzt wurde.

Aus Gl. 3.31 folgt, dass sich bei einer kleinen Störung der gespeicherten Energie ΔW auch die Frequenz des Systems ändert.

$$A = \frac{\Delta W}{\Delta f_0} \quad (3.32)$$

Woraus sich das „Boltzmann-Ehrenfest Theorem“ bilden lässt (Gleichung 3.33), welches besagt, dass für periodische und linear ablaufende, verlustfreie Prozesse das Verhältnis aus der Energie und der Frequenz bei adiabatischen Deformationen konstant ist. Adiabatische Prozesse dürfen in diesem Zusammenhang nicht in ihrer thermodynamischen Bedeutung verstanden werden, sondern als Prozesse, bei denen die von Außen verursachten Frequenzänderungen um mehrere Größenordnungen kleiner ist, als die ursprüngliche Resonanzfrequenz.

$$\frac{\Delta W}{\Delta f_0} = \frac{W}{f_0} \quad (3.33)$$

Aus Gleichung 3.26 ist bekannt, dass die im zeitlichen Mittel gespeicherte Energie eines HF-Resonators gleichmäßig auf elektrische und magnetische Felder verteilt ist. Die in Gleichung 3.32 gezeigte Störung in der Gesamtenergie ΔW beschreibt in diesem Fall eine ungleichmäßige Veränderung von elektrischen und magnetischen Feldern, wie sie etwa durch eine Geometrieänderung des Tanks oder das Einbringen eines Fremdkörpers entsteht. Dadurch ist die Gesamtenergie nicht mehr gleichmäßig auf beide Felder verteilt und die Frequenz muss sich nach Gl. 3.33 ändern um dies wieder auszugleichen. In der praktischen Anwendung bedeutet das, dass die Resonanzfrequenz je nach dem, ob man vorwiegend elektrische oder magnetische Felder verdrängt, sinkt oder steigt. Die allgemeine Beschreibung der Frequenzänderungen von HF-Resonatoren durch ungleichmäßige Veränderung der Felder liefert das sog. „Slater-Theorem“ frei nach [49]:

$$\frac{\Delta f_0}{f_0} = \frac{\Delta W_m - \Delta W_e}{W_m + W_e} \quad (3.34)$$

3.5.2 Verlustleistung

Das sich ändernde magnetische Feld eines Wechselstroms (oder einer HF-Anregung) induziert Gegenströme im Leiter, die mit zunehmender Frequenz die stromführende Schicht aus dem Inneren des Leiters verdrängt [32]. Im Falle der hier betrachteten HF-Kavitäten bedeutet dies, dass nur eine dünne Schicht an der Oberfläche für den Ladungstransport verantwortlich ist. Dieses Phänomen wird als Skineffekt bezeichnet und die dazugehörige Skintiefe δ beschreibt die Eindringtiefe, bei der die Feldstärke des elektrischen Feldes auf $1/e$ abgefallen ist [50].

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\sigma \pi f \mu_0 \mu_r}} \quad (3.35)$$

Hierbei hängen der spezifische Widerstand σ und die Permeabilität μ_r vom Material der stromführenden Schicht ab, während es sich bei der Vakuumpermeabilität μ_0 um

eine Konstante handelt.

Zur einfacheren Betrachtung wird meist kein exponentiell abklingender Stromverlauf innerhalb der Materialoberfläche angenommen, sondern ein gleichmäßiger Stromfluss mit einer Schichtdicke entsprechend der Skintiefe δ . Durch die hier fließenden Ströme wird bei jeder Schwingung des Resonators ein Teil der Feldenergie durch ohmsche Verluste in thermische Energie umgewandelt, die durch das Kühlsystem kompensiert werden muss. Der Oberflächenwiderstand R_s setzt sich hierbei aus der Dicke der stromführenden Schicht δ und der elektrischen Leitfähigkeit σ zusammen.

Es sei hier darauf hingewiesen, dass die Skintiefe δ nicht dem tatsächlichen Verlauf der Stromdichte $j(x)$ mit der Eindringtiefe x aus Formel 3.36 entspricht, sondern nur der „Äquivalenzschichtdicke“ des Verlaufs der Oberflächenstromdichte entspricht, in der die Feldstärke auf $1/e$ abgefallen ist.

$$j(x) = \cos\left(\frac{x}{\delta}\right) \cdot e^{-\frac{x}{\delta}} \quad (3.36)$$

$$R_s = \frac{1}{\delta\sigma} \quad (3.37)$$

Da hohe lokale Magnetfelder hohe lokale Ströme induzieren, kann die Verlustleistung einer Kavität berechnet werden, indem das Magnetfeld über die innere Oberfläche des Resonators integriert werden.

$$P_c = \frac{1}{2} R_s \int_S |H|^2 dS \quad (3.38)$$

3.5.3 Güte

Ein wichtiges Bewertungsmerkmal bei einem schwingungsfähigen System ist die Aussage darüber, wie „gut“ es schwingt. Oder in anderen Worten, wie viele Schwingungen aufrecht erhalten werden können, bis die gespeicherte Energie auf den e -ten Teil abgefallen ist. Hierfür wird die Güte Q verwendet. Sie ist ein Maß für die Dämpfung und ist definiert über die Energie, die pro Schwingungsdauer dissipiert wird.

$$Q = \frac{\omega_0 W}{P} \quad (3.39)$$

Für die Beurteilung einer Kavität wird meist die intrinsische Güte Q_0 betrachtet, in der nur die ohmschen Verluste innerhalb des Resonators ohne die Einflüsse von Pickups und Koppler betrachtet werden.

$$Q_0 = \frac{\omega_0 W}{P_c} \quad (3.40)$$

Da die intrinsische Güte sehr stark von der Verlustleistung P_c abhängt, hat alles, was den Stromfluss innerhalb der Kavität beeinflusst einen direkten Einfluss auf die Güte. Darunter fällt z.B. die Oberflächenbeschaffenheit bzw. der daraus resultierende Oberflächenwiderstand (die Güte von supraleitenden Kavitäten liegt üblicherweise 4 bis 6

3.5 Resonatorparameter

Größenordnungen über der von normalleitenden Kavitäten) und das Verhältnis von leitender Oberfläche zum Volumen der Kavität, da eine größere leitende Oberfläche zu längeren Strompfaden führt, durch die die ohmschen Verluste (und dadurch P_c) ansteigen.

Da Kavitäten im Leistungs- und Strahlbetrieb mit Pickups und mindestens einem Koppler ausgestattet sind, die mit dem Feld und damit mit der gespeicherten Energie interagieren, wird die belastete Güte Q_L gebildet, die das Gesamtsystem bestehend aus Kavität samt Pickups und Kopplern beschreibt.

$$Q_L = \frac{\omega_0 W}{P_{\text{ges}}} \quad (3.41)$$

Die hier mit P_{ges} bezeichneten Gesamtverluste setzen sich aus den ohmschen Verlusten der Kavität P_c und den an Koppler bzw. Pickups anfallenden Verlusten² P_e und P_t zusammen.

$$P_{\text{ges}} = P_c + P_t + P_e \quad (3.42)$$

Teilt man nun Gl. 3.42 durch W und ω_0 so erhält man mit der Definition der Güte:

$$\frac{1}{Q_L} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_t} + \frac{1}{Q_e} \quad (3.43)$$

Um nun beschreiben zu können, wie stark die Pickups und der Koppler mit dem Feld der Kavität interagieren, werden die Kopplungsfaktoren β_t und β_e eingeführt,

$$\beta_t = \frac{Q_0}{Q_t} \quad (3.44)$$

$$\beta_e = \frac{Q_0}{Q_e} \quad (3.45)$$

mit denen man Gl. 3.43 zu

$$\frac{1}{Q_L} = \frac{1}{Q_0}(1 + \beta_t + \beta_e) \quad (3.46)$$

umformen kann. Ein Kopplungsfaktor, der zwischen 0 und 1 liegt, beschreibt eine sog. schwache Kopplung und wird in der Praxis für Pickups gewählt, weil diese das Feld nur wenig beeinflussen sollen. Ist $\beta = 1$, so spricht man von kritischer Kopplung und beide Güten sind gleich groß. Der Koppler wird meist so eingestellt, dass er im Strahlbetrieb kritisch an das Feld der Kavität koppelt, da in diesem Fall die reflektierte Leistung minimal ist und so die gesamte Vorwärtsleistung des Verstärkers in den Resonator eingekoppelt werden kann. Bei $\beta > 1$ wird die belastete Güte von der Güte des Kopplers dominiert und man spricht von starker Kopplung.

² Bei den Leistungen P_e und P_t handelt es sich um die Anteile der Hochfrequenzleistung, die durch die Pickups bzw. den Koppler aus der Kavität ausgekoppelt werden.

3.5 Resonatorparameter

Da β_t aufgrund der schwachen Kopplung der Pickups vernachlässigt werden kann, lässt sich Gl. 3.46 zu

$$Q_0 = Q_L(1 + \beta_e) \quad (3.47)$$

umformen, woraus im Fall der kritischen Kopplung des Kopplers

$$Q_0 = 2Q_L \quad (3.48)$$

wird.

Um den Kopplungsfaktor β_e zu bestimmen können zwei Verfahren angewendet werden. Beim ersten wird über einen Signalgenerator ein Rechteckpuls in die Kavität gegeben und P_f und P_r am Oszilloskop betrachtet. Am Beginn des Pulses entspricht die Vorwärtsleistung der reflektierten Leistung $P_f = P_r$. Nach dem Einschwingen ist die reflektierte Leistung im Fall von $\beta = 1$ minimal, weil die gesamte Vorwärtsleistung in die Kavität eingekoppelt wird, während in den anderen Fällen ein Teil der Leistung reflektiert wird. Auffällig ist hier noch, dass bei der starken Kopplung P_r ebenfalls kurz minimal wird, da aufgrund der starken Interaktion des Kopplers mit dem Feld zumindest kurzzeitig die Vorwärtsleistung komplett aufgenommen werden kann, bis das Feld innerhalb der Kavität aufgebaut ist, bevor ein Teil reflektiert wird. Nach dem Ausschalten der Vorwärtsleistung wird die Feldenergie über den Koppler aus der Kavität ausgekoppelt und ein zweiter Reflexionspeak entsteht, dessen Höhe bei kritischer Kopplung gleich hoch, bei schwacher Kopplung kleiner und bei starker Kopplung größer, wie der erste Reflexionspeak ist, wie es in Abb. 3.20 für drei unterschiedliche Kopplungsfaktoren schematisch dargestellt ist.

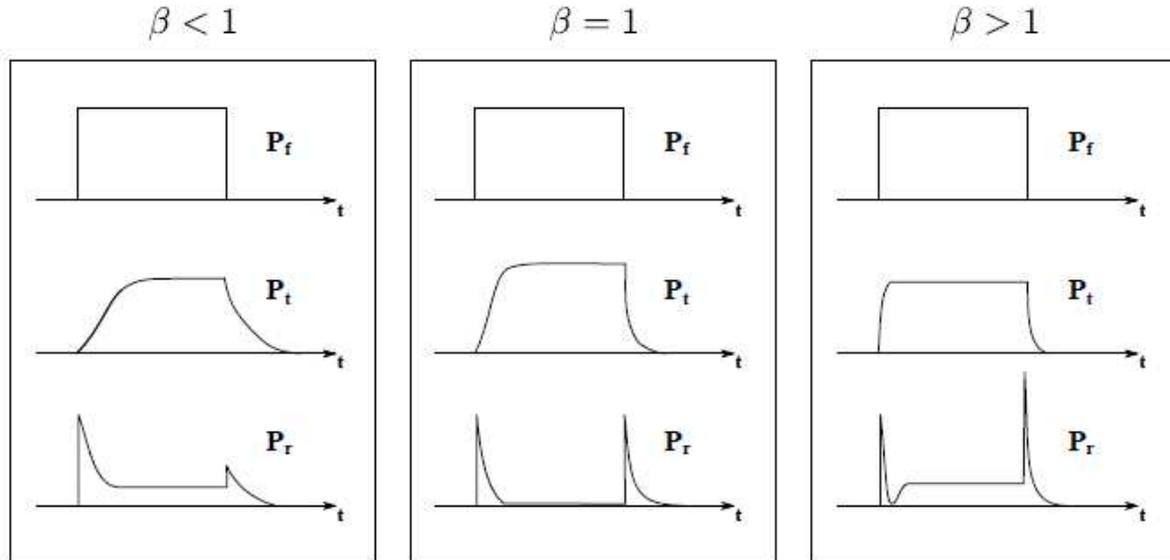


Abbildung 3.20: Verhalten von HF-Pulsen bei unterschiedlichen Kopplungsfaktoren. Entnommen aus [51].

3.5 Resonatorparameter

Aus der Höhe der beiden Peaks lässt sich β_e über Gl. 3.49 bestimmen.

$$\beta_e = \frac{1}{2\sqrt{\frac{P_{r, \text{ein}}}{P_{r, \text{aus}}} - 1}} \quad (3.49)$$

Das zweite Verfahren zur Bestimmung von β_e kommt ohne ein gepulstes Signal aus und wird statt dessen mit einem kontinuierlichen Signal durchgeführt, da hier nur das Verhältnis aus Vorwärtsleistung P_f und reflektierter Leistung P_r betrachtet wird (siehe Gleichung 3.50). Allerdings muss für diese Methode bekannt sein, ob der Koppler über- oder unterkoppelt ist, da entweder die oberen (für $\beta > 1$) oder die unteren Vorzeichen (für $\beta < 1$) verwendet werden.

$$\beta_e = \frac{1 \pm \sqrt{\frac{P_r}{P_f}}}{1 \mp \sqrt{\frac{P_r}{P_f}}} \quad (3.50)$$

Wenn die Kopplungsfaktoren β_e und β_t bekannt sind, kann Q_0 experimentell bestimmt werden.

Üblicherweise wird die Güte eines Resonators über die Breite der Resonanzkurve bestimmt, wie es in Abb. 3.21 dargestellt ist. Hierbei werden ausgehend von der Resonanzfrequenz des Resonators die Frequenzen der Lorentzkurve betrachtet, bei denen die Amplitude um 3 dB, also die gespeicherte Leistung auf 50 %, abgesunken ist. Danach lässt sich über 3.51 die Güte bestimmen.

$$Q = \frac{\omega_0}{\omega_2 - \omega_1} \quad (3.51)$$

3.5.4 Shuntimpedanz

Während die Güte eine Aussage darüber trifft, wie gut eine Schwingung innerhalb der Kavität aufrecht erhalten werden kann, gibt die Shuntimpedanz Auskunft darüber, wie effektiv die eingekoppelte Leistung in „nutzbare“ Spannung umgesetzt wird. Daher ist die grundlegende Definition der Shuntimpedanz für Driftröhrenbeschleuniger und RFQs wie in Gl. 3.52 dargestellt:

$$R = \frac{U^2}{P_c} \quad (3.52)$$

Da die Spannung in Driftröhrenbeschleunigern nur zur Beschleunigung genutzt wird, während sie in RFQs zusätzlich auch der transversalen Fokussierung dient, ist eine Unterscheidung sinnvoll.

Shuntimpedanz für Driftröhrenbeschleuniger

Bei der Betrachtung der Shuntimpedanz in Driftröhrenkavitäten ist es ratsam den Laufzeitfaktor T zu berücksichtigen. Dieser beschreibt, welchen Anteil der maximal aufgebauten Spaltspannung U_0 zur Beschleunigung genutzt werden kann.

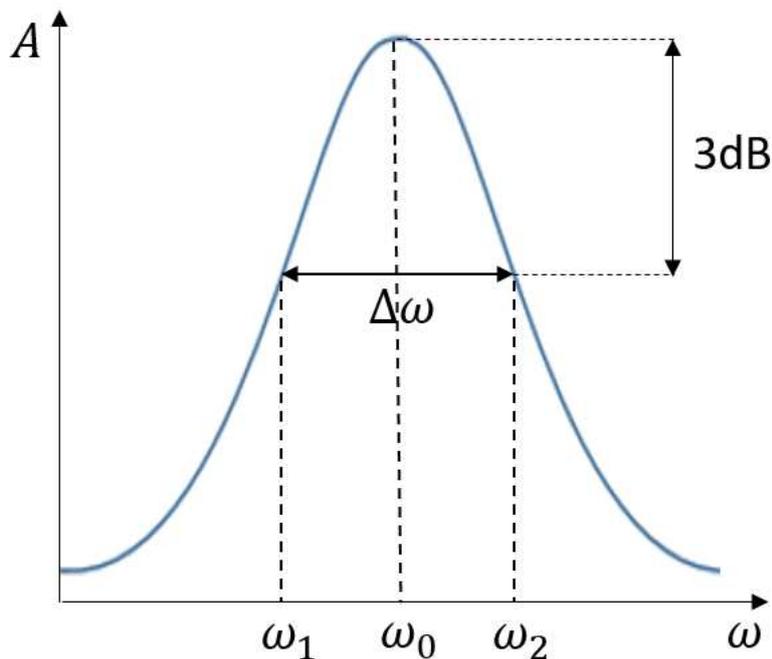


Abbildung 3.21: Bestimmung der Güte über die Resonanzkurve.

Die Spannung, die sich zwischen den Driftröhren aufbaut, resultiert aus dem zeitlich veränderlichen Wechselfeld des Resonators. Da sich die Spannung auf- und wieder abbaut, während das Teilchenpaket den Spalt passiert, erfährt es am Spalteingang die Spannung $U_{\text{ein},i}$, in der Mitte die maximale Spannung $U_{0,i}$ und am Spaltausgang die Spannung $U_{\text{aus},i}$, woraus sich die effektive Spannung $U_{\text{eff},i}$ für den i -ten Beschleunigungsspalt ergibt. Die dazu korrespondierenden Verläufe des elektrischen Feldes sind in Abbildung 3.22 zu sehen. Die Teilchen sehen also selbst wenn sie bei maximalem Feldpegel in der Mitte des Spaltes sind, nicht die maximale Spannung $U_{0,i}$, sondern nur die effektive Spannung $U_{\text{eff},i}$.

$$U_{0,i} = \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} E_z(z) dz \quad (3.53)$$

$$U_{\text{eff},i} = \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} E_z(z) \cos\left(\frac{\omega z}{\beta c}\right) dz \quad (3.54)$$

Für die effektive Gesamtspannung einer Kavität U_{eff} gilt:

$$U_{\text{eff}} = \sum_i U_{\text{eff},i} \quad (3.55)$$

3.5 Resonatorparameter

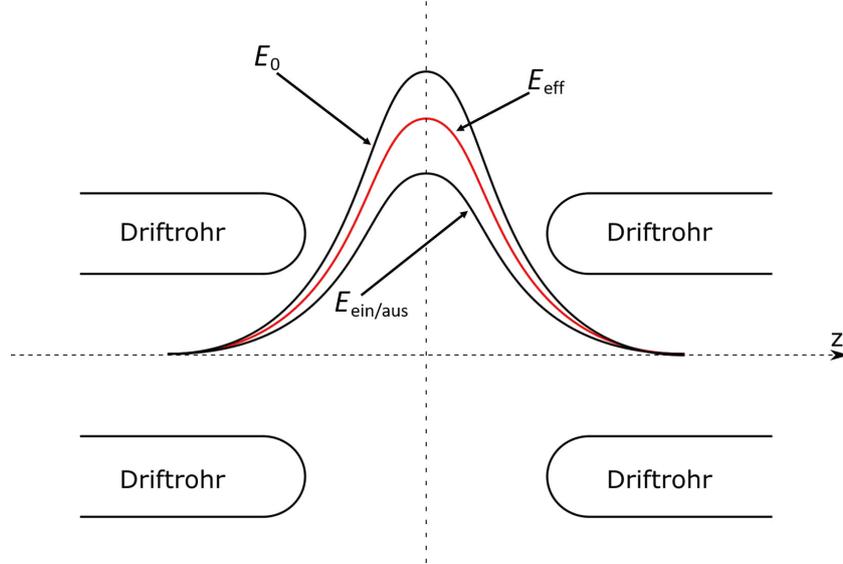


Abbildung 3.22: Zeitabhängiger Verlauf des elektrischen Feldes innerhalb einer Spalts.

Mit U_{eff} kann die effektive Shuntimpedanz R_a bestimmt werden.

$$R_a = \frac{U_{\text{eff}}^2}{P_c} \quad (3.56)$$

Der Laufzeitfaktor T (Time Transit Factor) ergibt sich aus dem Verhältnis aus U_0 und U_{eff} . Er befindet sich üblicherweise zwischen 0,7 und 0,9.

$$T = \frac{U_{\text{eff}}}{U_0} = \frac{\int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} E_z(z) \cos\left(\frac{\omega z}{\beta c}\right) dz}{\int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} E_z(z) dz} \quad (3.57)$$

Da R_a mit der Länge des Beschleunigers skaliert, wird die längenunabhängige Shuntimpedanz Z_a herangezogen, um eine Vergleichbarkeit verschiedener Strukturen herzustellen. Hierfür wird R_a durch die Länge L dividiert:

$$Z_a = \frac{R_a}{L} = \frac{U_{\text{eff}}^2}{P_c L} \quad (3.58)$$

Beim Vergleich verschiedener Strukturen muss allerdings darauf geachtet werden, dass die gleiche Längendefinition für L verwendet wird.

Prinzipiell lassen sich beliebig viele unterschiedliche Längen innerhalb einer Kavität definieren, mit denen man Z_a klein- oder großrechnen kann. Durchgesetzt haben sich in der praktischen Anwendung zwei Arten von Längendefinitionen. Die erste und auch die geläufigste, basiert auf der $\frac{\beta\lambda}{2}$ -Definition, bei der die relative Geschwindigkeit der Teilchen $\beta = \frac{v}{c}$ und die Wellenlänge der Resonatorfrequenz λ benutzt werden. Hierbei wird entweder das über den Resonator gemittelte $\beta_{\text{gemittelt}}$ verwendet und mit der Anzahl der

3.5 Resonatorparameter

Gaps n multipliziert (Gl. 3.59) oder es wird mit dem mittleren β jedes einzelnen Gaps eine Länge gebildet und diese dann aufsummiert (Gl. 3.60).

$$L_{\beta,\text{mittel}} = n \frac{\beta_{\text{gemittelt}} \lambda}{2} \quad (3.59)$$

$$L_{\beta,\text{einzel}} = \sum_n \frac{\beta_n \lambda}{2} \quad (3.60)$$

Die zweite Art der Längendefinition basiert auf den geometrischen Ausmaßen der Kavität, indem z.B. die Einbaulänge der Kavität (L_{Einbau}) oder die größte Länge in Strahlrichtung innerhalb der Kavität (L_{Innen}) verwendet wird.

Vor allem bei kürzeren Kavitäten können sich so, je nach Definition der Länge L unterschiedliche Werte für Z_a ergeben, weswegen eine Angabe der Längendefinition unverzichtbar ist.

Shuntimpedanz für RFQs

Da die Spannung in einem RFQ nicht nur zur Beschleunigung, sondern auch zur Fokussierung genutzt wird (siehe Kapitel 3.4), entspricht die für die Shuntimpedanz R_p verwendete Spannung der Elektrodenspannung U_{el} . Es wird also kein Laufzeitfaktor verwendet.

Auch die Längennormierung zur Vergleichbarkeit verschiedener RFQs wird anders gebildet. Da entlang der gesamten Elektrodenlänge Felder zur Fokussierung auf die Teilchen wirken, wird die Elektrodenspannung mit der Länge der Elektroden multipliziert:

$$R_{pL} = \frac{U_{el}^2}{P_c} L = R_p L \quad (3.61)$$

Um die Shuntimpedanz eines Resonators experimentell zu bestimmen, gibt es mehrere Möglichkeiten.

Bestimmung der Kapazität

Mit der gespeicherten Energie $W = \frac{1}{2}CU^2$ kann Gl. 3.40 zu

$$P_c = \frac{1}{2} \frac{\omega_0 C U^2}{Q_0} \quad (3.62)$$

umgeformt werden, womit aus Gl. 3.52

$$R = 2 \frac{Q_0}{\omega_0 C} \quad (3.63)$$

wird. Dadurch lässt sich die Shuntimpedanz über eine Messung von Q_0 bestimmen, sofern die Kapazität des Resonators bekannt ist. Dies ist neben der Verwendung einer Simulationssoftware auf zwei weitere Arten möglich:

1. Analytische Berechnung der Kapazität.

Dieses Vorgehen ist sehr aufwändig und empfiehlt sich nur für RFQ-Prototypen mit unmodulierten Elektroden, da diese den Großteil der Kapazität des Resonators bilden. RFQs mit modulierten Elektroden oder Driftröhrenresonatoren sind aufgrund ihrer Komplexität für einen analytischen Ansatz ungeeignet.

2. Messung mit einem Störkondensator

Es lässt sich mit der Thompsonschen Schwingungsgleichung $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$ zeigen, dass man die Kapazität C über eine Frequenzmessung bestimmen kann, wenn man die Kapazität mit einem Störkondensator verändert, sofern die Kapazität des Kondensators klein gegenüber der Kapazität des Resonators ist.

Bestimmung des R/Q-Wertes

Der R/Q-Wert wird als geometrische Shuntimpedanz bezeichnet und ist unabhängig vom Oberflächenwiderstand, der Frequenz und den linearen Dimensionen des Resonators.

$$\frac{R}{Q_0} = \frac{U^2}{P_c} \left(\frac{U^2}{\omega_0 W} \right)^{-1} = \frac{U^2}{\omega_0 W} \quad (3.64)$$

3.5 Resonatorparameter

Da sich Q_0 relativ einfach am Resonator messen lässt und der R/Q-Wert aus der Simulation unabhängig von der Höhe der Verlustleistung ist, kann die Shuntimpedanz R_{Messung} über Gl. 3.65 bestimmt werden.

$$R_{\text{Messung}} = \frac{R_{\text{Simulation}}}{Q_{0,\text{Simulation}}} Q_{0,\text{Messung}} \quad (3.65)$$

Messung des Röntgenspektrums

Wenn sowohl die Verlustleistung P_c , als auch die Spannung innerhalb des Resonators (U_0 für Driftröhrenkavitäten, bzw. U_{el} für RFQs) bekannt sind, kann über Gl. 3.52 die Shuntimpedanz bestimmt werden. Zu diesem Zweck kann das Röntgenspektrum der Kavität herangezogen werden.

Durch Feldemission entstandene freie Elektronen werden durch U_0 , bzw. U_{el} beschleunigt und setzen beim Aufprall auf die Resonatoroberfläche (die benachbarte Driftröhre, bzw. die benachbarte Elektrode) Röntgenstrahlung frei. Das Spektrum der so entstehenden Bremsstrahlung reicht bis hinauf zur maximalen Elektronenenergie. Unter der Bedingung, dass die größte Spannung innerhalb der Kavität die Spalt-, bzw. Elektrodenspannung ist und, dass die Zeit, die ein Elektron braucht, um beschleunigt und an der Oberfläche wieder abgebremst zu werden kleiner ist, als eine halbe HF-Periode, kann die Spannung nach Gl. 3.66 bestimmt werden.

$$U_{0/\text{el}} = \frac{E_{\gamma,\text{max}}}{e} \quad (3.66)$$

3.6 Unterschied zwischen Simulation und Realität

In den folgenden Kapiteln wird das Design der im Rahmen dieser Arbeit entstandenen Resonatoren für das MYRRHA-Projekt beschrieben. Da sich, bis auf wenige Ausnahmen, wie z.B. eine einfache Pillbox, moderne Teilchenbeschleuniger nur schwer analytisch berechnen lassen, erfolgt der Designprozess üblicherweise über numerische Simulationen. Für diesen Zweck wird am IAP Frankfurt CST Studio Suite [52] eingesetzt, wobei, je nach Anwendung auch andere Programme, wie beispielsweise Comsol [53] oder ANSYS [54] benutzt werden.

Eine Simulation stellt immer nur eine Annäherung an die Realität dar, deren Genauigkeit von mehreren Faktoren beeinflusst wird.

3.6.1 Begrenzte Auflösung

Innerhalb der Simulation wird das zu simulierende Modell bzw. der Hohlraum, in dem sich die elektrischen und magnetischen Felder ausbilden können, in kleine vierseitige Untervolumen eingeteilt (Tetraeder, kurz: Tets), an deren Grenzlinien die Maxwellgleichungen gelöst werden. Je mehr Tets in einem gegebenen Volumen berechnet werden, desto genauer ist das Ergebnis, wobei die Anzahl der Tets durch die Leistungsfähigkeit des verwendeten Simulationsrechners (hauptsächlich von der Größe des Arbeitsspeichers) und einer steigenden Simulationsdauer begrenzt wird. Die Anzahl der verwendeten Tets kann entweder für das gesamte Volumen gleichmäßig, oder für einzelne Untervolumen separat variiert werden, wobei es innerhalb der vorliegenden Arbeit je nach Struktur unterschiedlich gehandhabt wurde. Dabei wurde darauf geachtet, dass vor allem an Stellen, die kritisch für die HF-Eigenschaften der Struktur sind (z.B. wegen hoher Feldpegel), ein dichtes Mesh existiert.

Bei der Betrachtung von CH-Strukturen fällt auf, dass nur sehr wenige Stellen, wie z.B. die Bereiche um Strahlachse, Driftröhren und Schweißnähte eine besonders hohe Anzahl Tets erfordern, während der restliche Hohlraum mit einer niedrigeren Auflösung simuliert werden kann. Ein 4-Rod-RFQ hingegen besitzt entlang seiner gesamten Struktur rechte Winkel und Übergänge verschiedener Bauteile (z.B. Stütze zu Tuningplatte oder Stütze zu Elektrodenhalterung), die die Simulationsergebnisse (z.B. die ohmschen Verluste und damit auch Güte, Shuntimpedanz etc.) stark beeinflussen. Außerdem wird ein RFQ meist mit unmodulierten Elektroden simuliert, wodurch sich eine zusätzlich erhöhte Auflösung in diesem Bereich ohnehin erübrigt. Daher wurde für die Simulationen des MYRRHA-RFQ ein konstantes Mesh gewählt, während für die CHs mit Untervolumen gearbeitet wurde.

Wie wichtig die Auflösung der Simulation ist, zeigt Abbildung 3.23, in der exemplarisch der Verlauf der simulierten Frequenz des MYRRHA-RFQ-Simulationsmodells (vgl. Kapitel 4) bei einer unterschiedlichen Anzahl von Meshzellen gezeigt wird. Wie gut zu erkennen ist, ändert sich die simulierte Frequenz vor allem im Bereich weniger Tets sehr stark, während sich sowohl im Bereich von $2 - 3,5 \cdot 10^6$, als auch über $4 \cdot 10^6$ Meshzellen eine annähernd konstante Frequenz beobachten lässt. Für die Simulation des MYRRHA-RFQs wurde der Bereich von $4,5 - 5 \cdot 10^6$ Zellen gewählt, da hier annähernd konstante

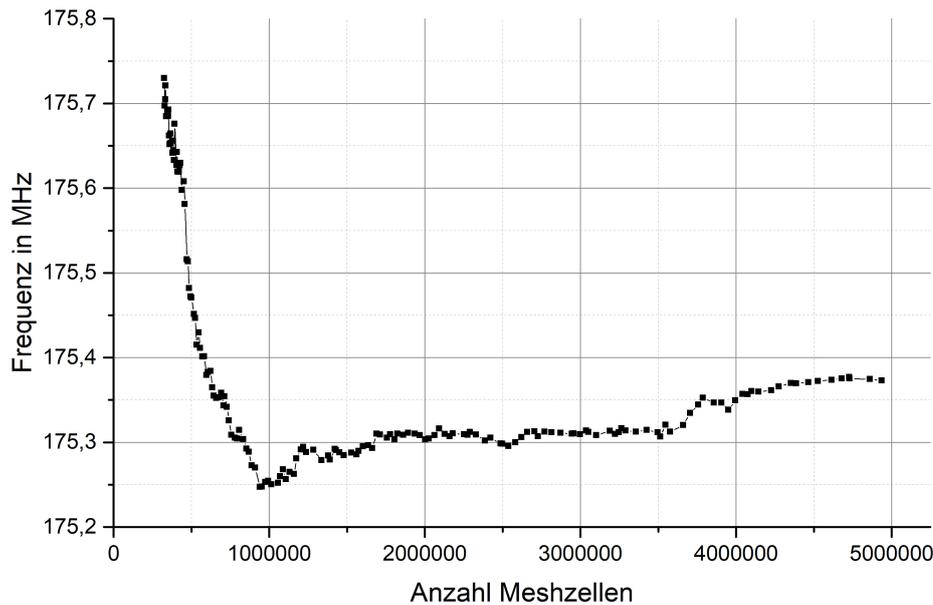


Abbildung 3.23: Verhalten der Frequenz des MYRRHA-RFQ-Simulationsmodells bei einer unterschiedlichen Anzahl von Meshzellen.

und daher genaue Werte zu erwarten sind, und eine weitere Erhöhung des generierten Meshs die Möglichkeiten der verwendeten Simulationsrechner überstieg.

3.6.2 Unterschiede in den Modellen

Prinzipiell muss bei jeder Kavität von mindestens drei verschiedenen Kavitäten gesprochen werden, wobei von den ersten beiden meist mehrere Iterationen notwendig sind, bis sie als „final“ bezeichnet werden können. Diese wären:

- das Simulationsmodell,
- das CAD-Modell und
- die fertig gebaute Kavität

Das Simulationsmodell entsteht während des Designs und dient dazu, die verschiedenen mechanischen, thermischen und HF-Eigenschaften nach den Anforderungen, wie sie z.B. aus der Strahldynamik hervorgehen, zu optimieren. Hierzu wird meist ein vereinfachtes Modell verwendet, bei dem bautechnische Einzelheiten, wie sie beispielhaft in Abbildung 3.24 dargestellt sind, nicht, oder nur stark vereinfacht vorhanden sind, da sie ungeachtet ihrer geometrisch meist geringen Außenmaße den Optimierungsprozess sehr viel aufwändiger machen und zu größeren Problemen bei der Simulation führen können.

3.6 Unterschied zwischen Simulation und Realität

Diese Simulationsprobleme treten meist schon beim Erstellen des Meshs auf und können zu einem enormen Anstieg der benötigten Rechenzeit und -ressourcen, bis hin zum Abbruch der Simulation führen.

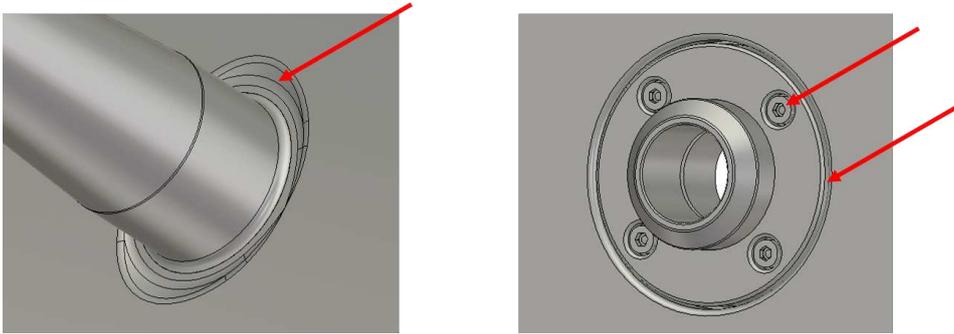


Abbildung 3.24: Detailaufnahmen aus dem CAD-Modell von CH1. Die roten Pfeile markieren beispielhafte Einzelheiten, wie Schrauben und Vertiefungen, die in dem Simulationsmodell nicht vorhanden sind. Das CAD-Modell wurde von der NTG [55] zur Verfügung gestellt.

Besonders groß sind die Unterschiede zwischen dem simulierten und dem gebauten Resonator bei RFQs, was hauptsächlich daran liegt, dass die Simulationen üblicherweise mit unmodulierten Elektroden durchgeführt werden. Da aber, wie in Abschnitt 3.4.3 bereits besprochen, die Elektroden den Großteil der Kapazität bilden, kann eine Simulation ohne modulierte Elektroden nur eine Annäherung darstellen. Darüber hinaus unterscheidet sich die Höhe der Tuningplatten, mit denen der RFQ auf die gewünschte Frequenz getunt wird. Abbildung 3.25 zeigt beispielhaft die Position der Tuningplatten, wie sie im Simulationsmodell eingestellt wurden (oben) und wie sie im realen Resonator eingestellt wurden (unten), um jeweils eine Frequenz von 174,88 MHz zu erzielen. Bei einem Simulationsmodell, bei dem sich die Tuningplatten auf den Positionen des echten Resonators befinden wird hingegen eine Frequenz von 167,51 MHz simuliert. Als Gründe für die

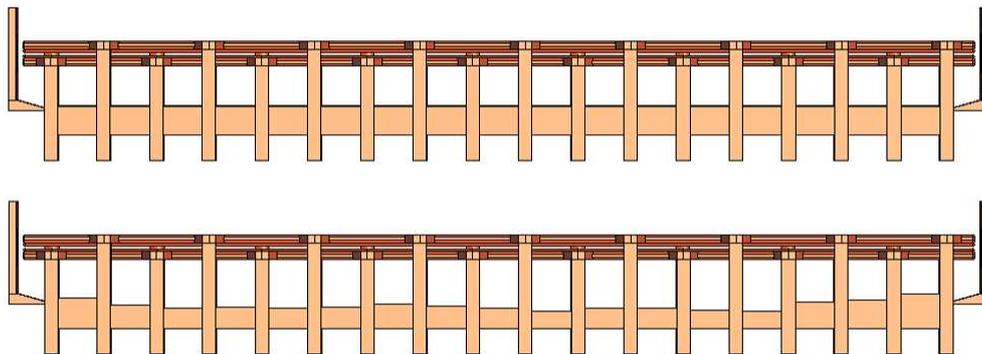


Abbildung 3.25: Oben: FRANZ-RFQ-Simulationsmodell mit gleichmäßiger Tuningplattenhöhe und einer Frequenz von 174,88 MHz. Unten: FRANZ-RFQ-Simulationsmodell mit den Tuningplattenhöhen des echten RFQs und einer Frequenz von 167,51 MHz.

3.6 Unterschied zwischen Simulation und Realität

unterschiedliche Positionierung der Tuningplatten kann wieder die im Simulationsmodell fehlende Modulation der Elektroden, aber auch die Summe der übrigen Toleranzen, die beim Bau der einzelnen RFQ-Komponenten toleriert werden, herangezogen werden. Außerdem ist es bei Simulationen von 4-Rod-RFQs üblich, sämtliche Tuningplatten auf gleicher Höhe zu halten, um die Optimierungen während des Simulationsprozesses zu vereinfachen. In der Realität hingegen befinden sich die Platten nach dem Tuningprozess für gewöhnlich auf unterschiedlichen Positionen, was ebenfalls in Abbildung 3.25 gesehen werden kann.

Das CAD-Modell verfügt im Gegensatz zum Simulationsmodell über alle baulich notwendigen Einzelheiten, wie Dichtungen, Schrauben, Schweißnähte etc. und wird üblicherweise vom Hersteller als Vorlage zur Produktion erstellt und soll daher der später gebauten Kavität so gut es geht entsprechen. Obwohl die Unterschiede zwischen Simulations- und CAD-Modell einzeln betrachtet meist nur geringe Auswirkungen auf die Simulationsergebnisse haben, können sich diese doch zu größeren Abweichungen aufsummieren, die entweder durch eine Anpassung des Modells, oder durch Tuningmöglichkeiten kompensiert werden müssen, weswegen das CAD-Modell zumindest bei Hohlraumresonatoren üblicherweise vor Baubeginn noch einmal nachsimuliert wird.

4 Der MYRRHA-RFQ

Innerhalb des MYRRHA-Injektors soll der Radio-Frequenz-Quadrupol als erstes beschleunigendes Bauteil nach der Ionenquelle den Strahl derart beschleunigen, bündeln und fokussieren, dass er von den nachfolgenden Driftröhrenbeschleunigern akzeptiert und gut weiterbeschleunigt werden kann, wobei er den hohen Anforderungen an die Zuverlässigkeit genügen muss, die in Kapitel 2 bereits beschrieben wurden.

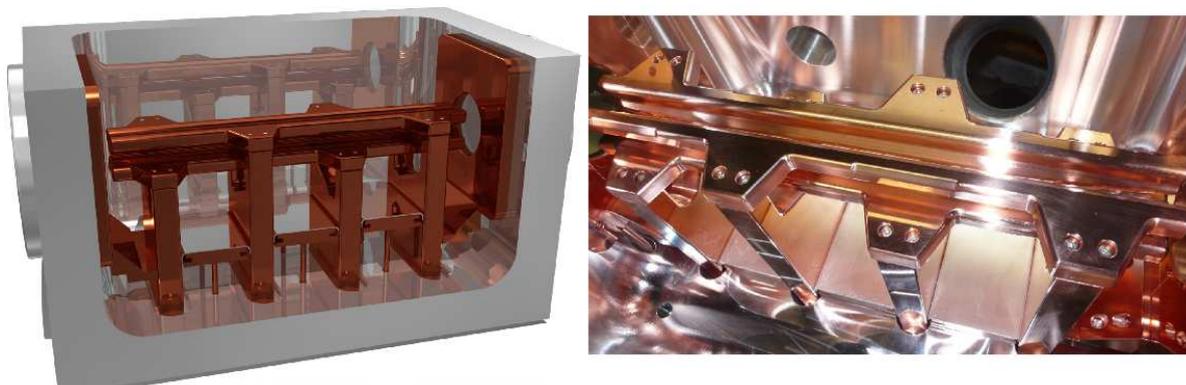


Abbildung 4.1: Simulationsmodell (links) und fertig zusammengebauter MAX-Prototyp vor den Tests mit hoher Leistung. Bilder entnommen aus [56].

Eine besondere Herausforderung für einen störungsfreien Betrieb ist das Kühlsystem. Dies ist wichtig, da es durch die Erwärmung der RFQ-Bauteile während des cw-Betriebes zu thermischen Ausdehnungen, also zu geometrischen Veränderungen der Struktur kommen kann, die die HF-Eigenschaften negativ beeinflussen können. Zusätzlich kann eine ungenügend ausgelegte Kühlung dazu führen, dass der RFQ nicht für den cw-Betrieb geeignet ist, da die Frequenzveränderungen pro transmittierter Leistung sehr groß werden kann und da der Resonator zusätzlich durch eine zu starke Erwärmung beschädigt werden würde.

Um die thermische Stabilität noch vor Baubeginn des MYRRHA-RFQs zu gewährleisten, wurde im Rahmen des MAX-Projektes am IAP ein Prototyp mit einem neuen Kühlsystem entwickelt und von der NTG gefertigt, für das ein neues Herstellungsverfahren benutzt wurde [56]. Bei dem sogenannten Dickschichtverkupfern werden zuerst die Kühlkanäle in einen Kupferrohling eingefräst. Danach werden die Kanäle mit einem Dielektrikum aufgefüllt und der gesamte Rohling galvanisch mit einer bis zu mehrere mm dicken Schicht verkupfert. Durch Erwärmen und Spülen wird anschließend das Dielektrikum entfernt und der Rohling kann zum fertigen Bauteil (z.B. einer Stütze) verarbeitet werden [55]. Abbildung 4.2 zeigt das Kühllayout der Stütze, wie es im SARAF¹-RFQ ver-

3.6 Unterschied zwischen Simulation und Realität

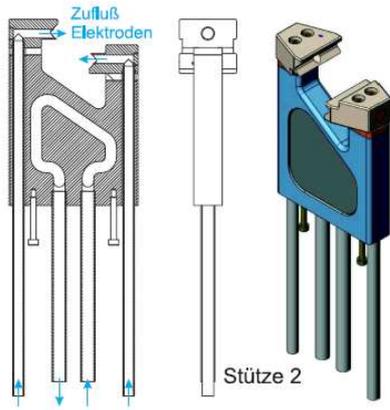


Abbildung 4.2: Kühlkanäle in den Stützen des SARAF-RFQs. Entnommen aus [57].

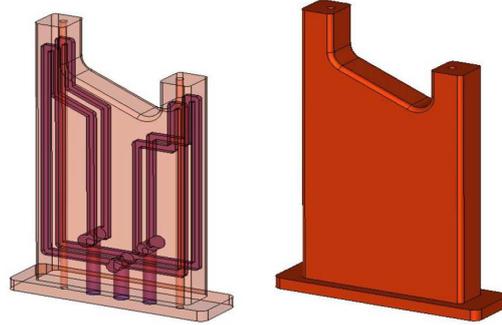


Abbildung 4.3: Kühlkanäle in den Stützen des MAX-Prototypen. Dieses Layout wird auch im MYRRHA-RFQ verwendet. Entnommen aus [56].

wendet wird. Es besteht aus einem Kanal, der die Form des Winkelcuts nachahmt aber nicht in die Elektrodenarme und in die Mitte des Kupferkörpers reicht. Die neue Kühlung in Abbildung 4.3 verfügt über einen mittigen Eingang, von dem aus sich der Kanal schließlich in vier einzelne Kanäle verzweigt. Jede Stütze verfügt über zwei Kühlwasserausgänge. Durch den mittigen Wassereingang und die Aufteilung in einzelne Kanäle soll verhindert werden, dass sich durch die Erwärmung des Kühlwassers entlang des Kanals ein Temperaturgradient entlang der Stütze einstellt. Die vier einzelnen Kanäle werden somit parallel gekühlt, statt in Reihe. Der Verlauf der Kühlkanäle wurde derart geplant, dass die gesamte Stütze inklusive der Elektrodenarme möglichst gleichmäßig von Kühlwasser durchflossen ist.

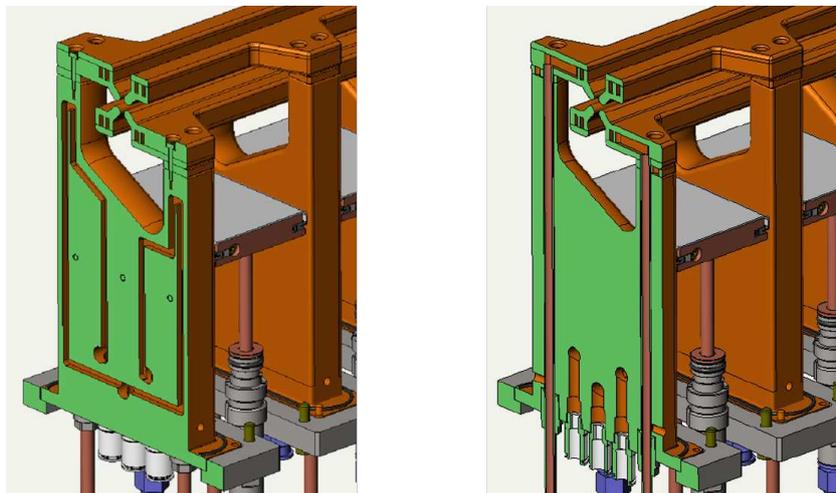


Abbildung 4.4: Schnitte durch eine RFQ-Stütze mit dem neuen Kühlsystem. Links sind zwei der vier Kühlkanäle zur Kühlung der Stütze und rechts die Durchgangsbohrungen für die Kühlung der Elektroden zu erkennen. Die Bilder wurden von der NTG [55] zur Verfügung gestellt.

3.6 Unterschied zwischen Simulation und Realität

Die beiden Darstellungen in Abbildung 4.4 zeigen unterschiedliche Schnitte durch eine RFQ-Stütze des FRANZ²-RFQs, dessen Kühllayout dem des MAX-Prototypen und dem des MYRRHA-RFQs entspricht. Auf dem linken Bild sind zwei der vier Kühlkanäle der Stütze und auf dem rechten die Durchgangsbohrungen für die Kühlung der Elektroden zu erkennen. Der Verlauf der Kühlkanäle in den Elektroden ist in Abbildung 4.5 dargestellt.

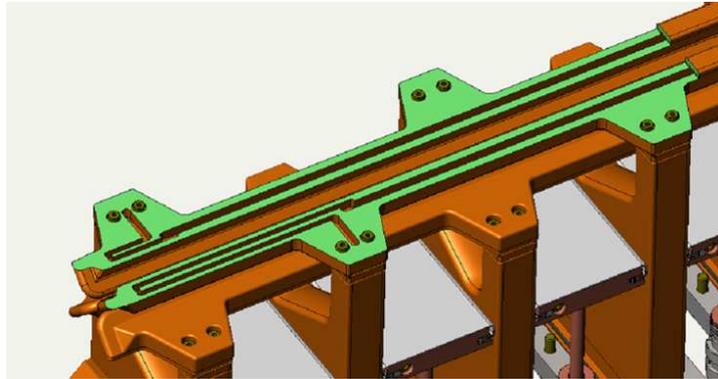


Abbildung 4.5: Verlauf der Kühlkanäle in den Elektroden des MAX-Prototypen. Dieses Kühllayout wurde auch im MYRRHA-RFQ verwendet. Die Bilder wurden von der NTG [55] zur Verfügung gestellt.

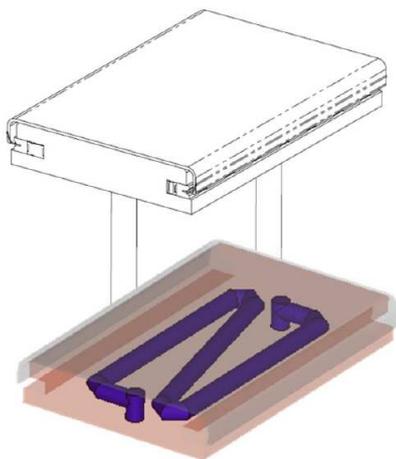


Abbildung 4.6: Verlauf des Kühlkanals in den Tuningplatten des MAX-Prototyps. Dieses Kühllayout wurde auch im MYRRHA-RFQ verwendet. Entnommen aus [56].



Abbildung 4.7: Tuningplatte des MYRRHA-RFQs mit Silberplatte zur besseren elektrischen Kontaktierung zur Stütze.

Da sich bei früheren RFQs herausgestellt hatte, dass die bislang zur Kontaktierung zwischen Tuningplatte und Stütze verwendeten Kontaktfedern den teilweise hohen Stromdichten nicht standhielten [56], wurden diese durch massive Silberplatten ersetzt, die die

² Frankfurter Neutronenquelle am Stern-Gerlach-Zentrum [59]

3.6 Unterschied zwischen Simulation und Realität

gesamte Tuningplatte bedecken (siehe Abbildung 4.7). Zusätzlich wurde das Kühllayout der Tuningplatten, wie in Abbildung 4.6 dargestellt, überarbeitet.

Nach der Fertigstellung und den Niederleistungstests, deren genaue Beschreibung in [56] zu finden ist, wurde der MAX-Prototyp am IAP mit hoher Leistung getestet, wobei ein stabiler Betrieb mit konstanten 46,5 kW möglich war. Die hierbei erzielte Längensleistungsdichte von 116 kW/m entspricht mehr als dem 4-Fachen von dem, was für den MYRRHA-RFQ angenommen wird [56].

Basierend auf den Erfahrungen mit dem MAX-Prototypen und dem FRANZ-RFQ wurde beschlossen, am bereits vorhandenen HF-Design samt Kühllayout des RFQs so wenig wie möglich zu ändern. Lediglich Anpassungen bezüglich der Dipolkompensation, wie sie in Kapitel 4.1 dargestellt sind, sollten noch in das Design des MYRRHA-RFQs mit einfließen.

4.1 Dipolkompensation am MYRRHA RFQ

Die Ursache des Dipolanteils beim 4-Rod-RFQ liegt, wie in Kapitel 3.4.3 beschrieben, daran, dass der Strompfad zur oberen Elektrode länger ist, als zur Unteren. Um also den Dipolanteil zu reduzieren muss entweder der Strompfad zur oberen Elektrode verkürzt, oder der zur unteren Elektrode verlängert werden und genau darauf basieren die beiden Methoden der Kompensation, die für den MYRRHA-RFQ in den Abschnitten 4.1.1 und 4.1.2 untersucht wurden.

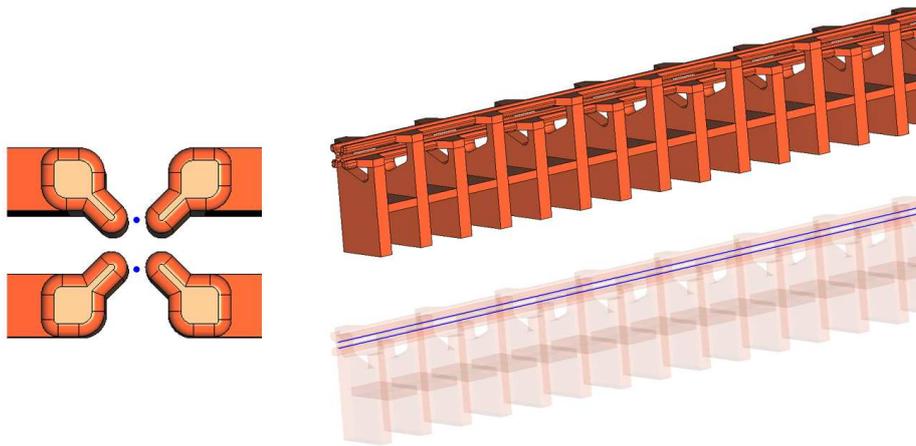


Abbildung 4.8: Verlauf der beiden Linien parallel zur Strahlachse, die beim ersten Verfahren zur Bestimmung des Dipols im Simulationsmodell benutzt wurden (V_{Achse}).

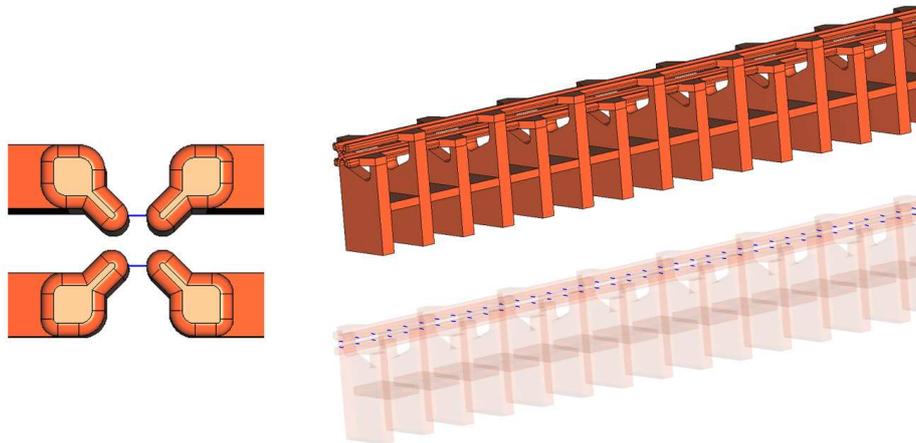


Abbildung 4.9: Verlauf und Position der Linien zwischen den Elektroden, die beim zweiten Verfahren zur Bestimmung des Dipols im Simulationsmodell benutzt wurden (V_{Curve}).

Um den Dipol innerhalb der Simulationen zu bestimmen, wurden zwei verschiedene

Verfahren angewendet. Für das erste wurde das elektrische Feld entlang zweier Linien integriert, die parallel zur Strahlachse zwischen den oberen und unteren Elektroden verlaufen, wie es in Abbildung 4.8 dargestellt ist und nachfolgend als V_{Achse} bezeichnet wird. Beim zweiten Verfahren (siehe Abbildung 4.9) wurde das elektrische Feld an mehreren gleichmäßig verteilten Stellen entlang der Elektroden jeweils zwischen dem oberen und unteren Elektrodenpaar integriert und die aufsummierten Spannungen anschließend gemittelt. Da die hierfür im Simulationsprogramm benutzten Integrationspfade als „Curves“ bezeichnet werden, wird dieses zweite Verfahren im Folgenden mit V_{Curve} gekennzeichnet. Prinzipiell kann V_{Achse} als das genauere Verfahren angesehen werden, da der Spannungsverlauf gleichmäßig über die gesamte Elektrodenlänge betrachtet wird. Trotz dessen werden nachfolgend die Ergebnisse beider Messmethoden dargestellt, da V_{Curve} aufgrund seiner definierten Messpunkte Ähnlichkeiten mit der in Kapitel 4.3.4 dargestellten Messmethode des Dipols besitzt.

4.1.1 Dipolkompensation über den Stützenwinkel

Eine Möglichkeit den Dipolanteil in 4-Rod-RFQs zu verringern ist das Verändern des Winkels zwischen den beiden Elektrodenarmen (auch als „Cut“ bezeichnet), wie es in Abbildung 4.11 und 4.10 dargestellt ist. Dabei wird die Länge des Strompfades zur oberen Elektrode und damit auch die dortige Spannung verringert. Allerdings kann der Winkel des Cuts nicht beliebig gewählt werden, da folgende Bedingungen zu beachten sind:

- Es muss ein Mindestabstand zwischen der vorbeilaufenden unteren Elektrode und der Stütze vorhanden sein (roter Pfeil in Abbildung 4.11), da es ansonsten an dieser Stelle zu einer ungewollten Feldüberhöhung bis hin zu Überschlägen kommen kann.
- Je größer der Winkel gewählt wird, umso geringer ist der Bereich, in dem die Tuningplatten bewegt werden können (grüner Pfeil in Abbildung 4.11), was die Möglichkeiten der Frequenz- und Flatnessanpassung stark begrenzt.
- Mit dem Winkel verändert sich das Layout der Kühlkanäle und die Größe der stromführende Oberfläche auf der Stütze, was bei größeren Winkeln die Kühleigenschaften negativ beeinflussen kann.

Daher erfolgte die Simulation der Dipolkompensation durch den Stützenwinkel so, dass für die Winkel, die kleiner sind als die im MAX-Prototypen verwendeten $21,8^\circ$ die Höhe des unteren und für größere Winkel die Höhe des oberen Elektrodenarmes konstant gehalten wurde (siehe Abbildung 4.10). Simulationen mit größeren Stützenwinkeln als 50° zeigten, dass es mit dem dann immer kleiner werdenden Tuningbereich nicht mehr möglich war, die Zielfrequenz von 176,1 MHz zu erreichen. Allerdings heißt das nicht, dass alle Winkel zwischen 0 und 50° baulich sinnvoll wären. Denn da die Position sämtlicher Tuningplatten in der Simulation auf gleicher Höhe gehalten wurde, kann nicht sichergestellt werden, dass ein in der Realität notwendiges Tuning der Flatness bei größeren Winkeln überhaupt möglich ist.

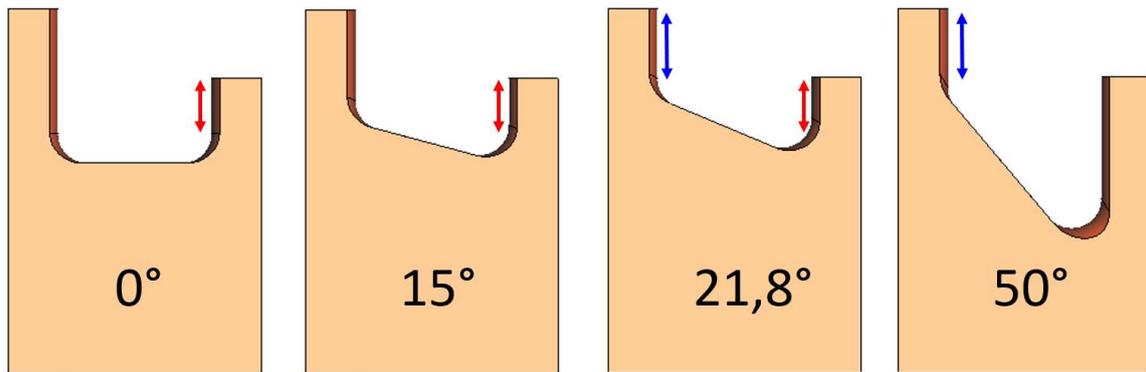


Abbildung 4.10: Stützen des MYRRHY-RFQ-Simulationsmodells mit verschiedenen Stützenwinkeln. Die roten Pfeile markieren die im Bereich von 0-21,8° konstant gehaltene Höhe des unteren Elektrodenarms und die blauen Pfeile die im Bereich von 21,8-50° konstante Höhe des oberen Elektrodenarms.

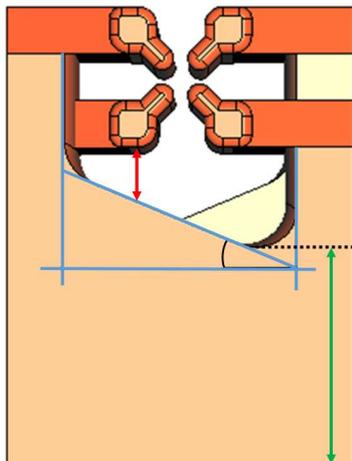


Abbildung 4.11: Definition des Stützenwinkels zur Dipolkompensation. Der Abstand zwischen der Stütze und der vorbeilaufenden Elektode und der Platz für die Tuningplatte sind mit dem roten und grünen Pfeil markiert.

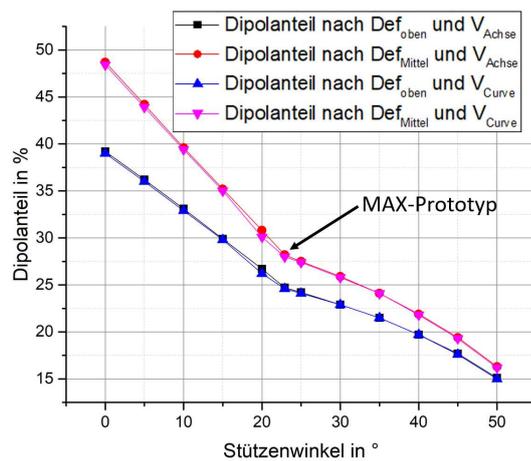


Abbildung 4.12: Simulierter Dipolanteil bei verschiedenen Stützenwinkeln.

Die Ergebnisse der Simulationen sind in Abbildung 4.12 dargestellt. Wie anhand der beiden unterschiedlichen Berechnungsmethoden des Dipols (siehe Formeln 3.24 und 3.25) zu erwarten war, liegen die nach Def_{Mittel} ermittelten Werte über denen, die nach Def_{oben} ermittelt wurden, wobei sie sich bei kleiner werdendem Dipol annähern. Auch lässt sich klar erkennen, dass die simulierten Dipole im Bereich kleiner Winkel einen anderen Verlauf haben, als im Bereich größerer Winkel, was auf die oben erwähnte unterschiedliche Konstruktion des Stützenwinkels ab 21,8° zurückzuführen ist.

Obwohl sich eine Reduzierung des Dipols, je nach Definition und Verfahren, auf bis zu 15 % erzielen lässt, ist dies nur über die weiter oben erwähnten Nachteile einer reduzierten Anpassungsmöglichkeiten bei Frequenz und Flatness und den schlechteren Kühl-eigenschaften möglich, wie sie mit einem Winkel von 50° und dem damit verbundenen „Schnitt“ in der Stütze einher gehen. Dies führt dazu, dass die Dipolkompensation allein über die Variation des Stützenwinkels, für den MYRRHA-RFQ nicht ausreichend ist.

4.1.2 Dipolkompensation über den Stützenversatz

Während die im vorherigen Abschnitt dargestellte Variation des Stützenwinkels auf einer Verkürzung des Strompfades zu den oberen Elektroden basiert, ist es auch möglich, den Strompfad zur unteren Elektrode zu verlängern. Dadurch wird die Spannung zwischen dem unteren Elektrodenpaar erhöht und der Dipol verringert.

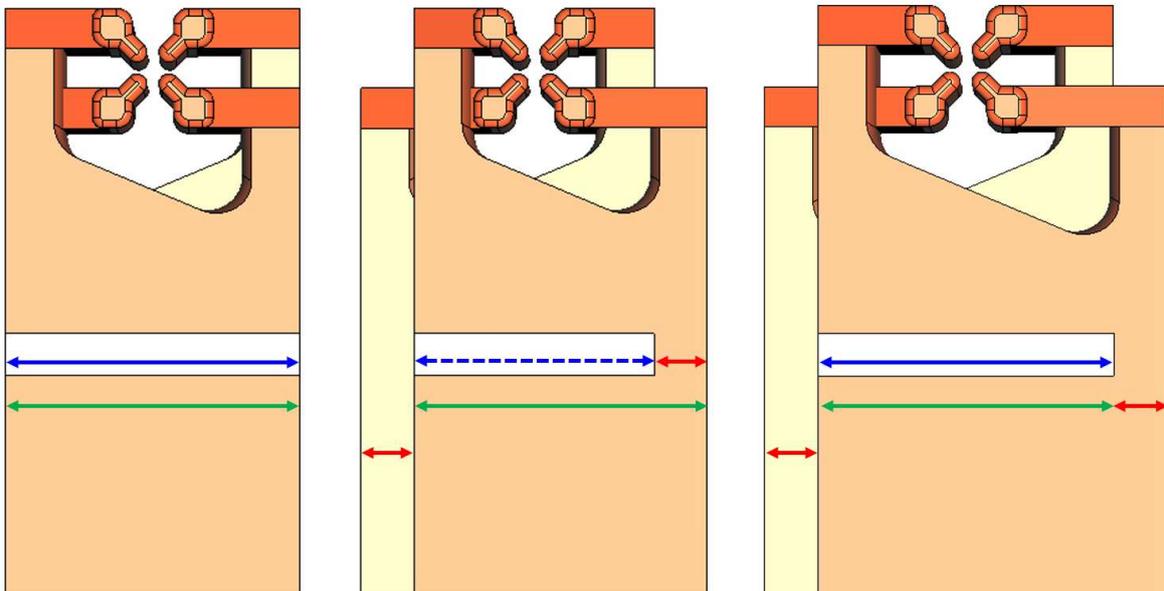


Abbildung 4.13: Links: Originalstütze ohne Versatz. Die Breite der Stütze (grüner Pfeil) entspricht der Breite der Tuningplatte (blauer Pfeil). Mitte: Stützen, die alternierend nach außen versetzt wurden. Die Stützenbreite entspricht dem Original, während die Breite der Tuningplatte (gestrichelter blauer Pfeil) um die Größe des Versatzes (roter Pfeil) schmaler geworden ist. Rechts: Stützen, die alternierend nach außen verbreitert wurden, wobei die Breite der Tuningplatte konstant bleibt, während die Stützenbreite um den Versatz zunimmt.

Eine Möglichkeit hierfür ist der transversale Versatz der Stützen. Hierbei werden die Stützen abwechselnd alternierend auf der Seite der unteren Elektrode nach außen versetzt, wie es in Abbildung 4.13 dargestellt ist. Allerdings ist ein reiner transversaler Versatz der Stütze nicht zu empfehlen, da sich sonst der Abstand zwischen der Stütze und der vorbeilaufenden Elektrode um das Maß des Versatzes verringert, was zum einen

4.1 Dipolkompensation am MYRRHA RFQ

zu Spannungsüberhöhungen, bis hin zu Überschlagen führen kann und zum anderen das Maß des maximalen Versatzes beschränkt. Zusätzlich wird bei einem reinen Versatz der Stützen die Tuningplatte immer schmaler, was zu einer Erhöhung der Stromdichte und damit zu einer größeren thermischen Belastung sowohl an den Übergängen zwischen Stütze und Tuningplatte, als auch auf der Platte selbst führt. Daher werden die Stützen nicht alternierend transversal versetzt, sondern verbreitert. So bleiben die Abstände zwischen Stütze und vorbeilaufender Elektrode und die Breite der Tuningplatte konstant, während trotzdem der Strompfad zur unteren Elektrode verlängert wird. Ein weiterer Vorteil dieses Konzeptes ist, dass sich die thermischen Eigenschaften einer verbreiterten Stütze verbessern, da sich die dissipierte Leistung auf eine größere Oberfläche verteilt.

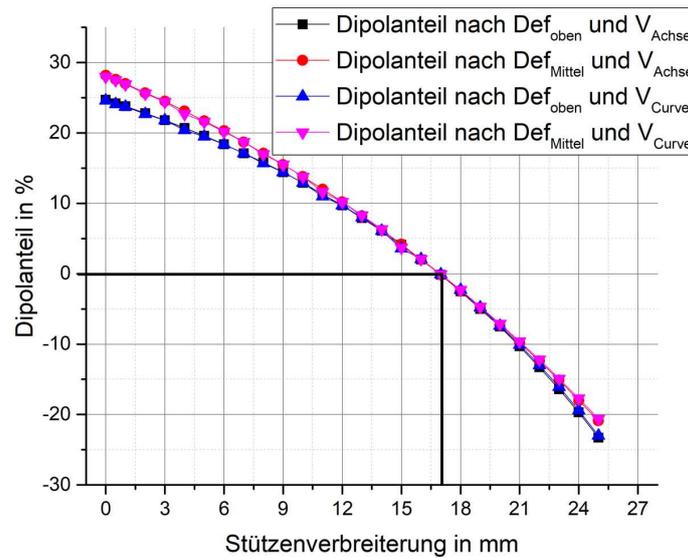


Abbildung 4.14: Simulierter Dipolanteil bei verschiedenen Stützenverbreiterungen.

Für das Simulationsmodell wurde entschieden, dass die Stützenverbreiterung zusätzlich zum bereits im MAX-Prototypen etablierten Winkel zu implementieren. Die in Abbildung 4.14 dargestellten Simulationsergebnisse zeigen, dass sowohl eine vollständige Kompensation ($Dipolanteil = 0$; Spannung zwischen den oberen Elektroden und zwischen den unteren Elektroden ist gleich), als auch eine Überkompensation ($Dipolanteil < 0$; Spannung zwischen den unteren Elektroden ist höher, als zwischen den oberen Elektroden) möglich ist, wobei die nach Def_{oben} errechneten Ergebnisse wie auch schon bei der Auswertung der in Abschnitt 4.1.1 beschriebenen Dipolkompensation über den Stützenwinkel aufgrund der unterschiedlichen Berechnungsmethode leicht unter den Ergebnissen nach Def_{Mittel} liegen, was sich aber, je weiter sich der Dipolanteil dem Wert 0 annähert, relativiert.

Für das endgültige HF-Design des MYRRHA-RFQs wurde entschieden, eine Stützenverbreiterung von 18 mm zu wählen, um für eine leichte Überkompensation des Dipolanteils zu sorgen. Laut Simulationsergebnis, sollte der Dipolanteil dann je nach gewählter

4.1 Dipolkompensation am MYRRHA RFQ

Definition des Dipols, bzw. nach dem gewähltem Verfahren der Berechnung zwischen -2,7 und -3,3% betragen. Abbildung 4.15 zeigt das endgültige Simulationsmodell und das darauf basierende, von der NTG zur Verfügung gestellte .stp-Modell, jeweils mit einer Stützenverbreiterung von 18 mm. Die in Tabelle 4.1 dargestellten Werte wurden mit dem Simulationsmodell erstellt, wobei der Leistungsbedarf ohne das Beam Loading, also ohne die Leistung bestimmt wurde, die für die Beschleunigung der Teilchen benötigt wird. Der hier angegebene Leistungsbedarf beschreibt daher nur die Leistung, die rechnerisch notwendig ist, um die geforderte Elektrodenspannung zu erzeugen.

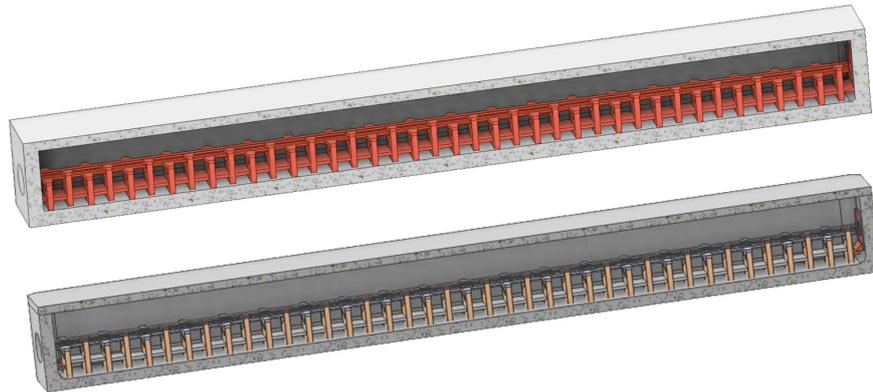


Abbildung 4.15: Oben: Finales Simulationsmodell des MYRRHA-RFQs. Unten: Darauf basierendes CAD-Modell mit nachträglich eingesetzten Tuningplatten. Das CAD-Modell wurde von der NTG [55] zur Verfügung gestellt.

simulierte Größe	MYRRHA-RFQ-Simulationsmodell
Frequenz in MHz	176,1
intrinsische Güte Q_0	5580
Shuntimpedanz R_{pL} in $k\Omega m$	96,4
Leistungsbedarf in kW	80,5
Dipol nach Def_{oben} und V_{Achse}	-3,3 %
Dipol nach Def_{Mittel} und V_{Achse}	-3,2 %
Dipol nach Def_{oben} und V_{Curve}	-2,8 %
Dipol nach Def_{Mittel} und V_{Curve}	-2,7 %

Tabelle 4.1: Simulationsergebnisse des MYRRHA-RFQ-Simulationsmodells

4.2 Bauphase des MYRRHA RFQs

Nachdem in der Designphase die für die HF relevanten Abmessungen des RFQs bestimmt worden waren, konnte er bei der Firma NTG gefertigt werden

Im Gegensatz zu vielen anderen Resonatoren, deren wichtigste, für die HF relevanten Bauteile nach der Konstruktion kaum noch verändert werden können, weil sie, wie z.B. Stützen und Tank bei CH-Strukturen fest verschweißt sind, wird ein 4-Rod-RFQ in Einzelteilen gebaut und anschließend derart zusammengesetzt, dass er selbst nach jahrelangem Strahlbetrieb wieder zerstörungsfrei demontiert werden kann. Dies ermöglicht den Austausch einzelner Teile, sei es zur Reparatur, oder zur Anpassung des RFQs, beispielsweise an ein neues Elektrodendesign, wie es beispielsweise beim SARAF-RFQ erfolgt ist [60].

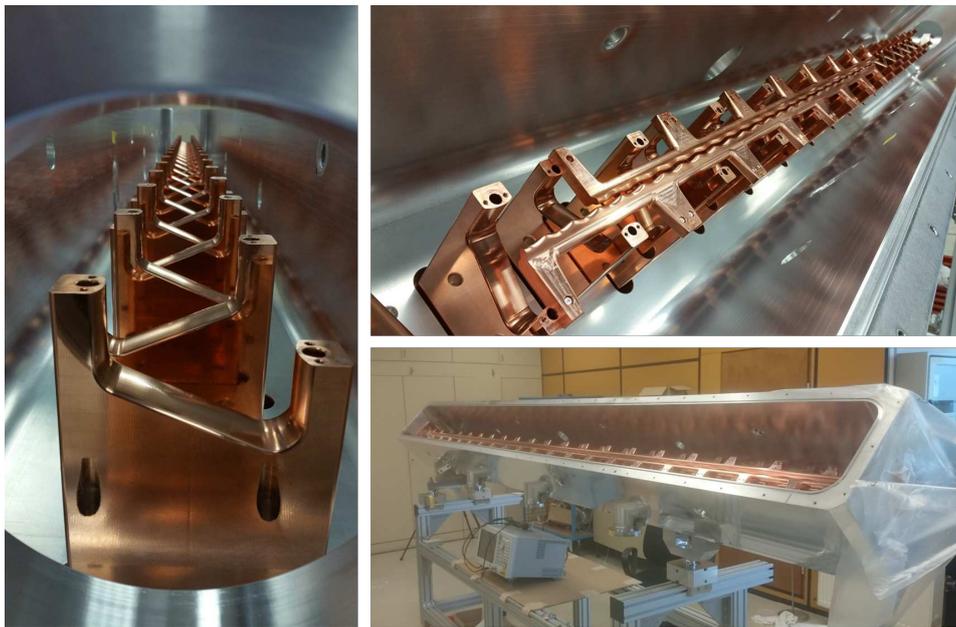


Abbildung 4.16: Verschiedene Montageschritte des MYRRHA-RFQs. Die Photos wurden im Labor der NTG [55] aufgenommen.

Der Bau der 40 Stützen, 39 Tuningplatten und 4 Elektroden, die aufgrund ihrer Länge von 4 m nicht an einem Stück gefertigt werden konnten und aus je 3 Teilstücken bestehen, erfolgte mit Hilfe des Dickschichtverkupferns. Hierbei wurden zuerst die Kühlkanäle in einen Rohling eingefräst, bevor diese mit einem Dielektrikum gefüllt wurden. Anschließend wurde galvanisch eine mehrere Millimeter dicke Kupferschicht aufgebracht, bevor das Dielektrikum wieder entfernt wurde. Aus den so bearbeiteten Rohlingen wurden dann die einzelnen Bauteile des MYRRHA-RFQs herausgefräst. Da die Elektrodengeometrie aufgrund ihres direkten Einflusses auf die Strahldynamik des RFQs einen besonderen Anspruch an die Genauigkeit des Fräsvorganges stellt, wurden zusätzliche Aluminiumdummys produziert.

4.2 Bauphase des MYRRHA RFQs

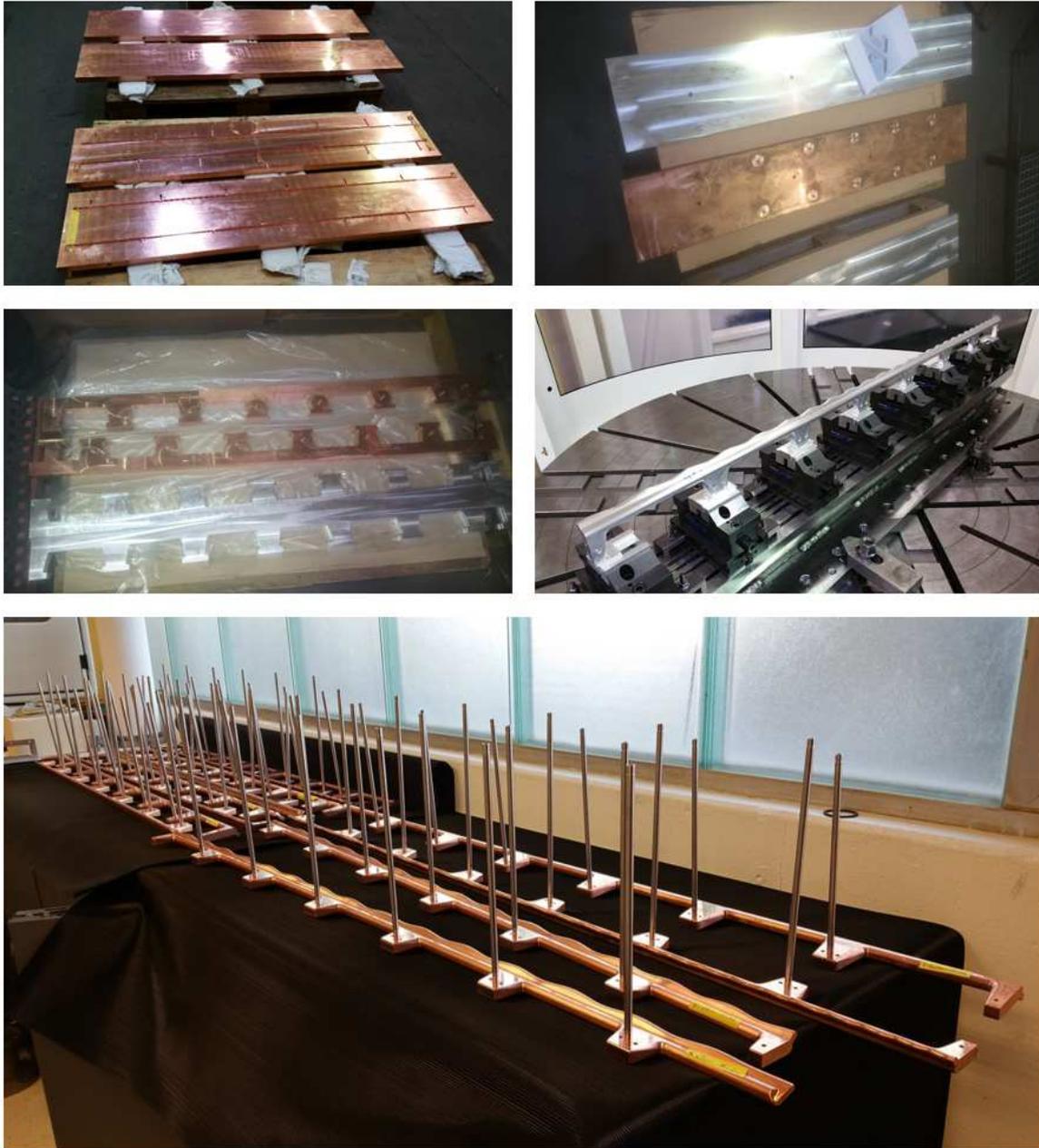


Abbildung 4.17: Produktionsschritte der Elektrodenteilstücke des MYRRHA-RFQs. Oben links: Kupferrohlinge mit eingefrästen Kühlkanälen, bevor sie dickschichtverkupfert werden. Oben rechts: Die Rohlinge nach der Dickschichtverkupferung und das Rohmaterial für die Aluminiumdummys. Mitte links: Die grobe Form der Elektrodenteilstücke wird aus den Rohlingen geschnitten. Mitte rechts: Die Elektrodengeometrie wird aufgefästä. Unten: Die 12 fertigen Elektrodenteilstücke vor der Montage. Die Photos wurden bei der NTG [55] aufgenommen.

Auf diesen wurde das Elektrodenprofil zuerst aufgefräst und vermessen, bevor die realen Elektrodenteilstücke bearbeitet wurden. Abbildung 4.17 zeigt exemplarisch die Zwischenschritte bei der Produktion der Elektrodenteilstücke.

Der Zusammenbau erfolgte in mehreren Schritten. Zuerst wurden die Stützen montiert und die Tuningplatten so eingesetzt, dass sie auf den Tankboden auflagen. Anschließend folgten die Elektroden und die beiden Endplatten samt deren Kontaktstücken. Da das Befestigen bzw. das Lösen der Tuningplatten mit einem enormen Zeitaufwand verbunden ist und deren exakte Position experimentell bestimmt werden muss, was ein mehrmaliges Versetzen der Platten nötig macht, werden für diesen Zweck sogenannte Dummy-Tuningplatten verwendet, von denen eine in Abbildung 4.18 dargestellt ist.

Diese bestehen aus einer einfachen Stahlplatte, die an den Seiten mit Kontaktfedern versehen sind, die sowohl für den Anpressdruck, als auch für die elektrische Kontaktierung zwischen Platte und Stütze sorgen. Diese Platten können im Rahmen von Niederleistungsmessungen als den echten Tuningplatten äquivalent betrachtet werden, eignen sich aber aufgrund der fehlenden Kühlung keinesfalls für Experimente mit hoher Leistung.



Abbildung 4.18: Dummytuningplatte, die zum Einstellen der Frequenz und der Flatness verwendet wird.

Das Tuning des RFQs, also das Einstellen der Frequenz und der Flatness, erfolgt über die Positionen der Tuningplatten. Hierfür wird zunächst iterativ die Frequenz eingestellt. D.h. die Frequenz wird über eine kalibrierte S_{11} -Messung mit einem Netzwerkanalysator gemessen und anschließend werden die Dummytuningplatten gleichmäßig nach oben oder unten versetzt und erneut gemessen. Dies wird so lange wiederholt, bis die Zielfrequenz erreicht ist. Um den Zugang zu den Tuningplatten zu ermöglichen wurde der massive Aluminiumdeckel entfernt und ein provisorischer Deckel, aus mit Aluminiumfolie bespanntem Karton, auf den Tank aufgesetzt, der wesentlich einfacher geöffnet und geschlossen werden konnte und dabei aufgrund der Aluminiumfolie vergleichbare Ergebnisse liefert, wie der echte Deckel.

Das Einstellen der Flatness erfolgt ebenfalls iterativ. Es wird die Spannung zwischen dem oberen Elektrodenpaar durch das Auflegen eines Dielektrikums lokal beeinflusst, was sich durch eine Verschiebung der Frequenz Δf nach Gleichung 4.67 messen lässt.

$$\Delta U \sim \sqrt{\Delta f} \quad (4.67)$$

Dies wird an der Position jeder Tuningplatte durchgeführt und die Ergebnisse werden graphisch ausgewertet, wie es in Abbildung 4.20 dargestellt ist. Basierend auf der graphischen Auswertung werden anschließend einzelne Tuningplatten um die Höhe Δs_n , wobei n die Nummer der Tuningplatte ist, versetzt um die lokale Spannung zu erhöhen oder zu verringern, wobei dringend darauf geachtet werden muss, dass die Frequenz konstant bleibt. D.h., dass für jede Platte, die um ein Δs_i nach oben verschoben wird, was die lokale Spannung verringert, eine andere Platte um Δs_j , mit $\Delta s_i \approx -\Delta s_j$, nach unten

versetzt werden muss, wodurch sich die lokale Spannung an dieser Stelle erhöht. Als Faustregel kann angenommen werden, dass die Summe der Positionsänderungen aller Tuningplatten des RFQs in etwa 0 ergeben muss, um die Frequenz konstant zu halten.

Die Größe des Dielektrikums muss so klein gewählt werden, dass $\Delta f \ll f$ ist und dabei so groß, dass die Frequenzänderungen noch klar zu messen sind. Die mit dem in Abbildung 4.19 dargestellten Teflonklötzchen gemessenen Frequenzveränderungen lagen zwischen 33 und 36 kHz, was einen guten Kompromiss zwischen kleiner Veränderung und Messbarkeit darstellt.

Da sich die einzelnen HF-Zellen des RFQs gegenseitig beeinflussen, kann die Position einer einzelnen Tuningplatte sich auch auf die Flatness eines größeren Bereiches auswirken, was das Einstellen einer möglichst gleichmäßigen Spannungsverteilung entlang der Elektroden zusätzlich verkompliziert. Es zeigte sich, dass vor allem die äußeren Tuningplatten einen großen Einfluss auf die Gesamtverteilung des MYRRHA-RFQs hatten, sodass jeder weitere Verbesserungsversuch, ab einem gewissen Iterationsschritt, zu einer Verschlechterung der Flatness führte.

In einem nächsten Schritt mussten die Dummytuningplatten durch die echten Tuningplatten ersetzt werden. Die Bestimmung der exakten Höhen der Dummyplatten ist hierbei nur als Hilfestellung anzusehen, da ein genügend genaues Messergebnis nur mit einem großen Aufwand erzielt werden kann. Es sei hier bemerkt, dass der gesamte Tuningprozess „von Hand“ durchgeführt wurde, was mit minimalen Verkippungen



Abbildung 4.19: Teflonklötzchen zwischen den oberen Elektroden während einer Flatnessmessung.

der Dummyplatten zwischen den Stützen einherging, während die echten Tuningplatten aufgrund ihrer starren Verbindung zu der Kühlwasserversorgung als annähernd „gerade“ betrachtet werden können. Zusätzlich darf nicht außer Acht gelassen werden, dass sich die beiden Tuningplattentypen aufgrund der unterschiedlichen Kontaktierung (Kontaktfedern vs Silberplatte) auch an minimal unterschiedlichen Positionen befinden müssen, um den selben Effekt auf den Resonator zu erzielen.

Aus diesen Gründen wurde die richtige Position der Tuningplatte durch eine Frequenzmessung (S_{11}) mit dem Netzwerkanalysator bestimmt. Hierbei macht man sich die Abhängigkeit der Frequenz des Resonators von den Tuningplattenpositionen zu nutze, indem man die Frequenz des RFQs genau misst und dann die Dummyplatte entfernt. Wenn man nun die echte Tuningplatte so in den RFQ einsetzt, dass die ursprüngliche Frequenz wieder gemessen wird, befindet sich die Platte an der richtigen Position.

Um eine gute Kontaktierung zwischen den Stützen und der Tuningplatte zu gewährleisten, wird die Silberplatte mit zwei Keilen, die seitlich in die Tuningplatte geschoben werden, gegen die Stütze gepresst. Nachdem die Tuningplatten befestigt waren, konnte die in Abbildung 4.20 dargestellte Flatnessmessung durchgeführt werden. Die größte

4.2 Bauphase des MYRRHA RFQs

gemessene Abweichung vom Mittelwert beträgt etwa $\pm 3\%$.

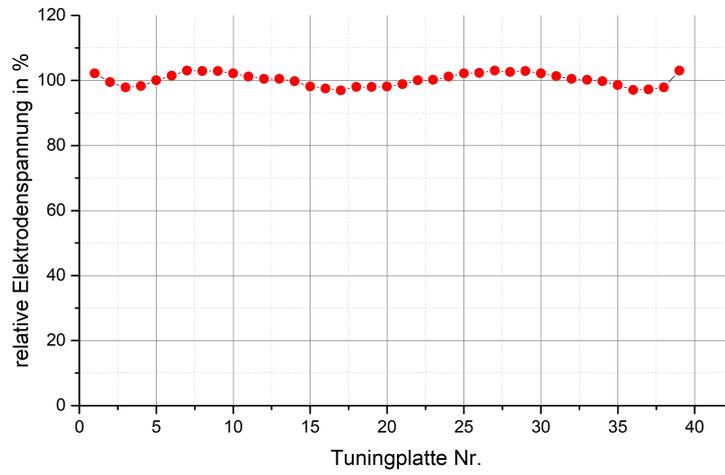


Abbildung 4.20: Flatness des MYRRHA-RFQs. Gemessen nach dem Befestigen der Tuningplatten.

4.3 Low-Level-Messungen am MYRRHA RFQ

Nach der Montage und dem Tuning, wurde der MYRRHA-RFQ an das IAP geliefert, wo die Low-Level-Messungen durchgeführt wurden. Hauptaufgabe dieser Messungen ist die Charakterisierung des Resonators durch die Bestimmung der grundlegenden HF-Parameter, wie Frequenz f , Güte Q_0 und Dipolanteil. Darüber hinaus wird die Kavität in diesem Schritt auf die anschließenden High-Power-Tests vorbereitet, indem die Einkoppelschleife, die Pickups und der Tuningbereich des dynamischen Tuners eingemessen werden.

4.3.1 Resonanzfrequenz und Kopplungsfaktor

Die Einkoppelschleife, die in Abbildung 4.22 dargestellt ist, wurde bereits für den Tuningprozess bei der NTG eingesetzt und besteht aus zwei wasserdurchflossenen Kupferrohrchen, von denen das eine als Wasserzuluß und das andere als Wasserabfluß zur Kühlung des Innenleiters dient. Obwohl man bislang gute Erfahrungen damit gemacht hat, diese beiden Kupferrohrchen zu einer Wicklung parallel zusammenzulöten, blieben sie für den MYRRHA-RFQ getrennt und wurden bei der Montage der Schleife in den RFQ-Tank vorsichtig so gebogen, dass die beiden Schleifenanteile neben der Stütze verlaufen, wodurch eine bessere Ankopplung erzielt werden sollte.

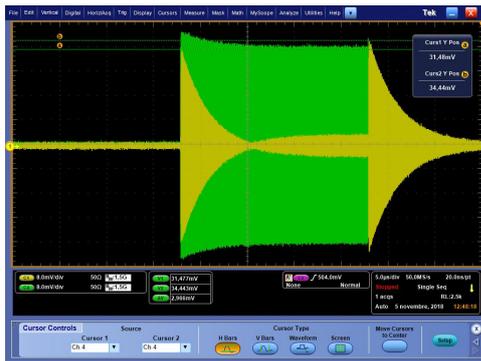


Abbildung 4.21: Messung der Reflexionspeaks von vorlaufender und rücklaufender Welle.



Abbildung 4.22: Montierte Einkoppelschleife im MYRRHA-RFQ.

Zur Bestimmung der Ankopplung wurde der in Abbildung 4.25 gezeigte kalibrierte Messaufbau verwendet, bei dem der Netzwerkanalysator über ein N-Kabel mit der Einkoppelschleife verbunden wird. Der in Abbildung 4.23 dargestellte Verlauf der Resonanzkurve zeigt, dass die Schleife bei einer Frequenz von 176,1 MHz mit -23,35 dB an das Feld des RFQs ankoppelt. Da über eine solche Messung zwar Frequenz und Ankopplung bestimmt werden können, nicht aber ob $\beta < 0$ oder $\beta > 0$ ist, wurde zusätzlich die in Abbildung 4.21 gezeigte Messung durchgeführt, deren Aufbau in Abbildung 4.24 schematisch dargestellt ist und bereits in Abschnitt 3.5.3 beschrieben wurde. Da die mit dem Oszilloskop ermittelten Höhen der reflektierten Pulse deutlichen Schwankungen unterworfen waren, konnte β nicht über Formel 3.49 ermittelt werden. Trotz der

4.3 Low-Level-Messungen am MYRRHA RFQ

Schwankungen ist aber zu erkennen, dass $\beta > 1$ ist, da die reflektierte Leistung (gelber Verlauf in Abbildung 4.21) ein Minimum mit $P_r = 0$ hat und da der erste Peak kleiner ist als der zweite.

Damit lässt sich nach Formel 3.50 der Kopplungsfaktor über die gemessene Reflektion von $-23,35$ dB zu $\beta = 1,15$ bestimmen.

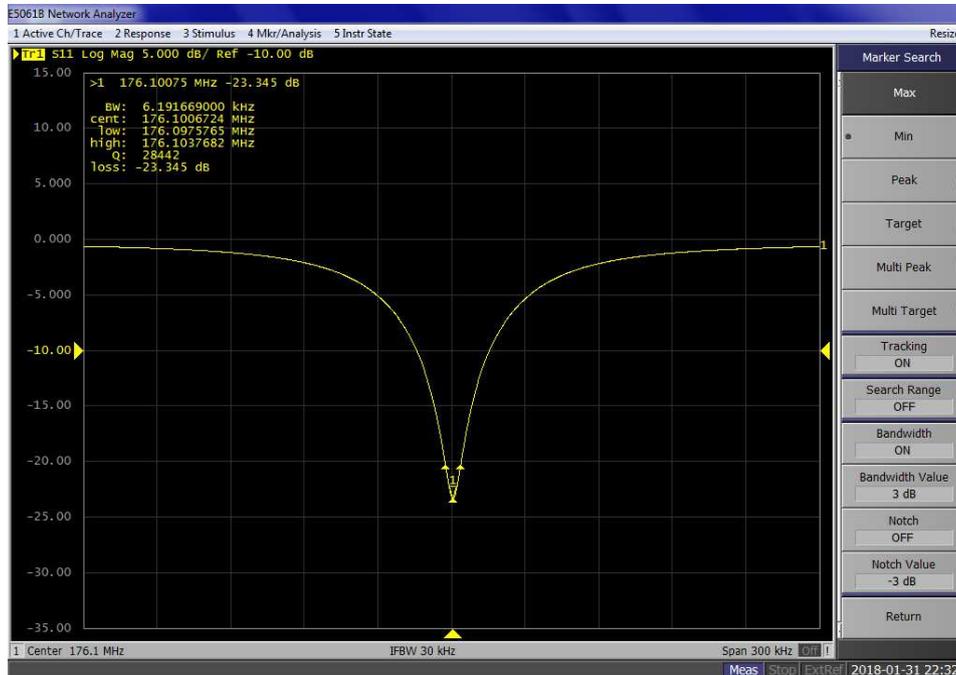


Abbildung 4.23: Per S_{11} -Messung ermittelte Anpassung der Einkoppelschleife des MYRRHA-RFQs.

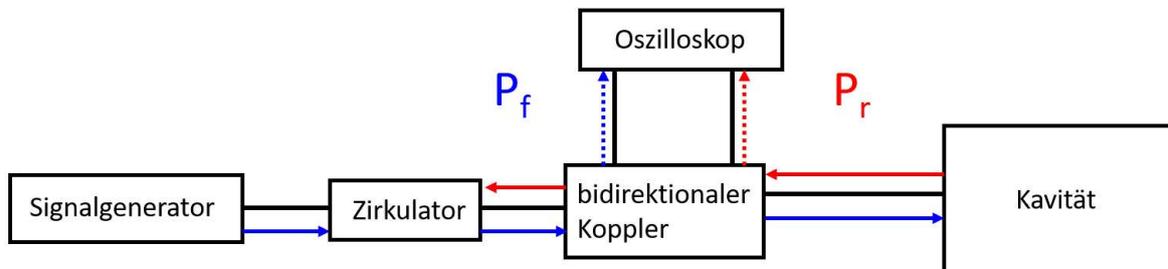


Abbildung 4.24: Schematischer Messaufbau zur Bestimmung des Kopplungsfaktors β .

4.3.2 Güte und Dämpfung der Pickups

Zur Überwachung des Feldpegels und zur Steuerung der LLRF während des Strahlbetriebes verfügt der MYRRHA-RFQ über 3 Pickups, die entlang des Tanks verteilt sind. Die Dämpfung der Pickups soll so eingestellt werden, dass das Feld des Resonators nur vernachlässigbar beeinflusst wird (große Dämpfung), während das ausgekoppelte Signal

aber doch stark genug sein muss, um sich deutlich vom Rauschen abzuheben, um so eine saubere Messung zu ermöglichen. Die Dämpfung eines Pickups hängt von der senkrecht

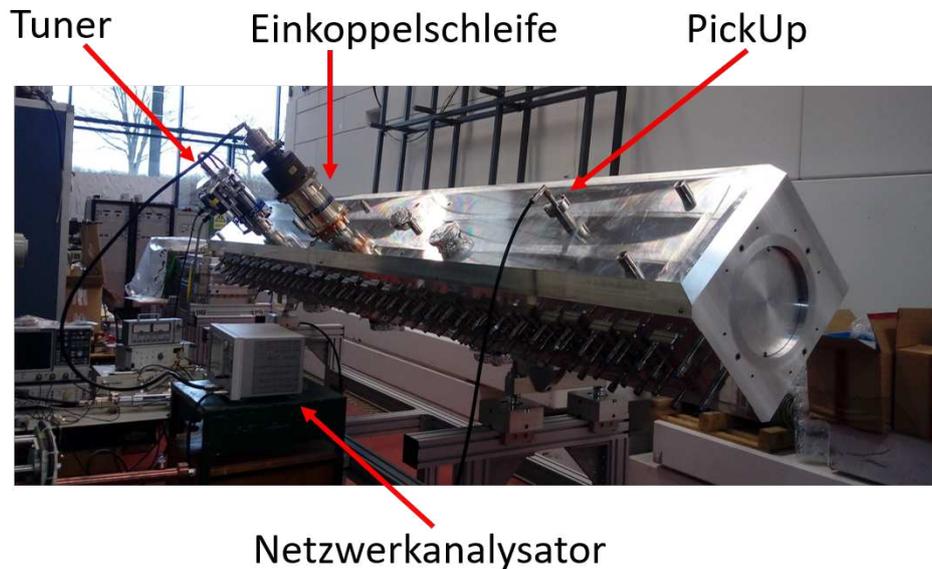


Abbildung 4.25: Messaufbau für die in der Experimentierhalle des IAP.

zum magnetischen Feld stehenden Schleifenfläche ab und kann sowohl von der Größe der Pickup-Schleife an sich, als auch von der Positionierung der Schleife innerhalb des Resonators beeinflusst werden. Die Pickups des MYRRHA-RFQs wurden alle mit der gleichen Schleifengröße gefertigt und ihre Dämpfung konnte individuell durch Rotation des Pickups eingestellt werden. Hierfür wurden der einzustellende Pickup und die Einkoppelschleife mit einem N-Kabel, wie in Abbildung 4.25 dargestellt, mit dem Netzwerkanalysator verbunden und eine kalibrierte S_{21} -Messung durchgeführt. Die Dämpfung kann durch Drehen des Pickups eingestellt und am NWA abgelesen werden. Tabelle 4.2 gibt die eingestellten Dämpfungen der 3 Pickups und die erwarteten ausgekoppelten Signalstärken bei einer Leistung von 11 und 108 kW wieder. 11 kW entspricht der Leistung, die während der Konditionierungen am IAP erwartet wird und 108 kW entspricht dem erwarteten Leistungsbedarf, sofern die Shuntimpedanz des RFQ bei 75 % des Simulationsergebnisses liegt.

Die so gemessene belastete Güte $Q_L \approx 2000$ kann mit dem in Abschnitt 4.3.1 bestimmten Kopplungsfaktor nach Gleichung 3.47 in die intrinsische Güte Q_0 umgerechnet werden.

$$Q_0 = Q_L(1 + \beta) = 2000 \cdot (1 + 1,15) = 4300 \quad (4.68)$$

Diese entspricht $\approx 77\%$ der intrinsischen Güte des Simulationsmodells (vgl. Tabelle 4.1), woraus man eine Vorhersage über die Shuntimpedanz R_{pL} des RFQs von $\approx 74 \text{ k}\Omega\text{m}$ treffen kann.

4.3 Low-Level-Messungen am MYRRHA RFQ

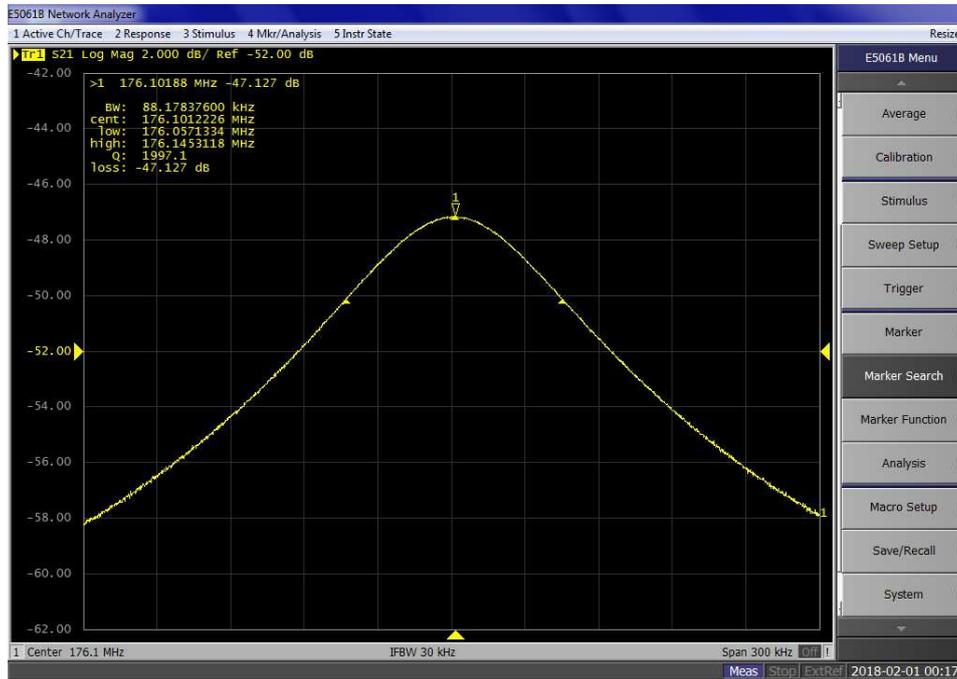


Abbildung 4.26: S_{21} -Messung an Pickup 2 des MYRRHA-RFQs zur Bestimmung der Dämpfung des Pickups und der Güte.

	Dämpfung	Signalstärke bei 11 kW	Signalstärke bei 108 kW
Pickup 1	-58,1 dB	0,02 W	0,17 W
Pickup 2	-47,1 dB	0,21 W	2,1 W
Pickup 3	-53,7 dB	0,05 W	0,46 W

Tabelle 4.2: Eingestellte Dämpfungen und erwartete Signalstärken der 3 Pickups des MYRRHA-RFQs.

4.3.3 Tunerhub

Während des Betriebes einer Kavität muss die eingekoppelte Leistung von dem Kühlwasser abgeführt werden, sodass sich ein Gleichgewicht zwischen der zugeführten Leistung, der Erwärmung der Struktur und der vom Kühlwasser abtransportierten Wärmemenge ergibt. Da sich Schwankungen sowohl der Durchflussmenge, als auch der Temperatur des Kühlwasservorlaufs nicht vermeiden lassen, ist selbst bei einer konstanten in den Resonator eingekoppelten Leistung mit thermisch bedingten Frequenzschwankungen zu rechnen, die von einem dynamischen Tuner ausgeglichen werden müssen.

Obwohl davon auszugehen ist, dass der mögliche Tuningbereich eines einzelnen Tuners beim MYRRHA-RFQ ausreicht, befinden sich am Tank des MYRRHA-RFQs zwei DN100cf-Flansche (jeweils auf Höhe der 10. und der 30. Tuningplatte) zur Befestigung von dynamischen Tunern.

Die Installation des dynamischen Tauchkolbens erfolgte nach dem Tunen des RFQs. Hierzu wird zuerst die Resonanzfrequenz des Resonators gemessen und anschließend die Tuningplatte, an deren Position der Tuner installiert werden soll - im Fall

des MYRRHA-RFQs wurde der Tauchkolben an der Position von Tuningplatte 30 installiert - nach unten versetzt. Anschließend wird der Tauchkolben so weit zwischen die Stützen gefahren, bis sich die ursprüngliche Resonanzfrequenz wieder einstellt. Diese Position des Tauchkolbens wird als „Arbeitspunkt“ oder „Working Point“ bezeichnet. Da der Tauchkolben nur über eine baulich begrenzten Strecke von ≈ 88 mm bewegt werden kann, definiert das Zusammenspiel aus der Höhe der versetzten Tuningplatte und dem Working Point den möglichen Frequenzbereich, der mit dem Tauchkolben eingestellt werden kann. Abbildung 4.28 zeigt den gemessenen Tunerhub für zwei verschiedene Positionen der versetzten Tuningplatte. Es fällt auf, dass obwohl bei Tunerhub 1 ein größerer Tuningbereich nach unten und bei Tunerhub 2 ein größerer Tuningbereich nach oben gewählt wurde, der Verlauf der Frequenz annähernd der gleichen Form folgt und in beiden Fällen ein Tunerhub von etwa $\approx 0,29$ MHz abgefahren werden kann.

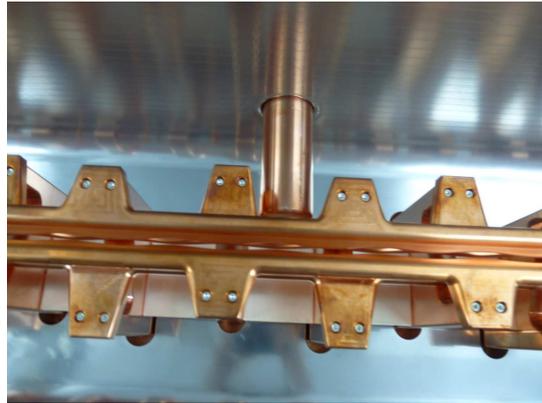


Abbildung 4.27: Montierter Tauchkolben im MYRRHA-RFQ.

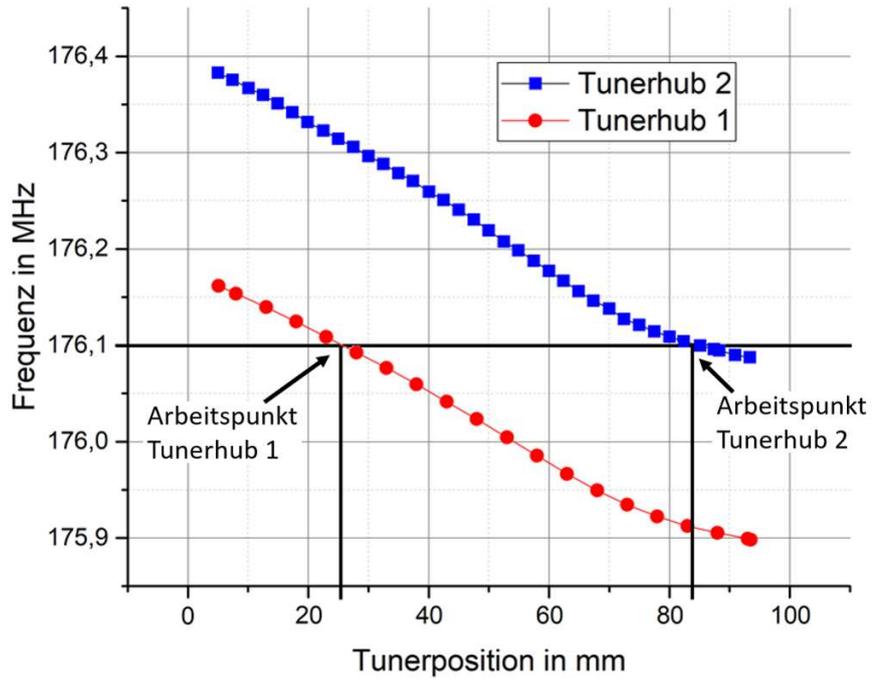


Abbildung 4.28: Beispiele gemessener Tuningbereiche, die mit einem Tauchkolben auf Höhe der 10. Tuningplatte möglich sind. Die Versatz zwischen den beiden Verläufen resultiert aus verschiedenen Einbauhöhen der 10. Tuningplatte.

4.3.4 Dipolmessungen

Schon während der MYRRHA-RFQ und seine Dipolkompensation geplant wurden, begannen die ersten Überlegungen, wie der Dipolanteil an einem 4-Rod-RFQ gemessen werden kann. Naheliegender ist dabei das gleiche Vorgehen, wie es auch bei der Bestimmung der Flatness angewendet wird.

E

Wie in Abschnitt 4.2 beschrieben wurde, lässt sich die relative Spannung zwischen den Elektroden bestimmen, indem man das elektrische Feld dazwischen beeinflusst und dann über eine S_{11} -Messung an einem Netzwerkanalysator die dadurch entstandene Frequenzverschiebung Δf misst. Hierbei kann sowohl ein Dielektrikum (Störkörper), wie in Abbildung 4.30, als auch ein Kondensator (Störkondensator) (Abbildung 4.29 verwendet werden. Diese Messung wird nun an festgelegten Punkten entlang der Elektroden sowohl zwischen den oberen, als auch zwischen den unteren Elektroden durchgeführt. Anschließend wird für jedes gemessene Δf ein $\sqrt{\Delta f}$ errechnet. Da die so er-

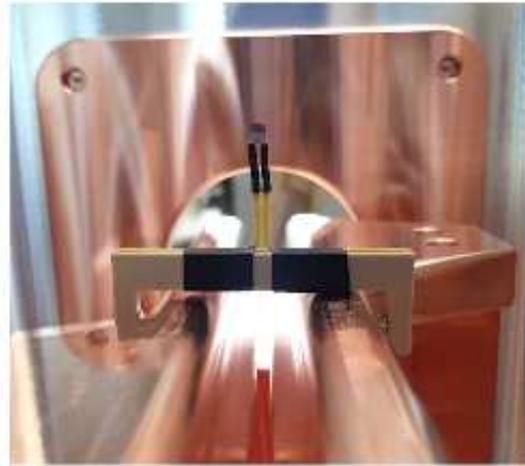


Abbildung 4.29: Messung der Frequenzverstimung durch einen Störkondensator an den oberen Elektroden des HLI-Prototypen. Entnommen aus [41].



Abbildung 4.30: Messung der Frequenzverstimung des RFQs mit einem Störkörper (jeweils in der roten Markierung).

mittelten Werte nach Gleichung 4.67 den lokal zwischen den Elektroden anliegenden Spannungen entsprechen, kann der Dipolanteil nach den in Kapitel 3.4.3 vorgestellten Formeln 3.24 und 3.25 für jede Position lokal berechnet und anschließend für die gesamten Elektrodenlänge gemittelt werden.

Dipolmessung am FRANZ-RFQ

Um die Funktionsweise der oben beschriebenen Messmethode zu erproben, während sich der MYRRHA-RFQ noch im Bau befand, wurde sie am FRANZ-RFQ überprüft. Hierfür wurde ein Simulationsmodell des FRANZ-RFQs erstellt und durch eine gleichmäßige Positionierung der Tuningplatten auf 174,88 MHz getunt, was der ohne Störkörper gemessenen Resonanzfrequenz des FRANZ-RFQs während der Dipolmessungen entsprach. Anschließend wurden die in Abschnitt 4.1 beschriebenen Dipolsimulationen durchgeführt, deren Ergebnisse in Tabelle 4.3 zusammen mit den Ergebnissen der Dipolmessung dargestellt sind.

	Dipol gemessen	Dipol Sim. V_{Achse}	Dipol Sim. V_{Curve}
Dipol nach Def_{oben}	23,2 %	25,3 %	19,1 %
Dipol nach Def_{Mittel}	26,2 %	29,0 %	21,1 %

Tabelle 4.3: Vergleich der Ergebnisse der Dipolsimulationen am FRANZ-RFQ-Simulationsmodell mit der Dipolmessung am realen Resonator.

Für die Frequenzverstimmung wurde ein PVC-Zylinder mit $\epsilon_r = 3,3$ [61], einer Länge von 20,35 mm und einem Durchmesser von 15,55 mm verwendet. Für die Messung wurde der Störkörper, wie in Abbildung 4.30 dargestellt, an der Position jeder Tuningplatte zwischen dem oberen bzw. unteren Elektrodenpaar mittig platziert und die Frequenz per kalibrierter S_{11} -Messung am Netzwerkanalysator abgelesen und notiert. Für die Auswertung wurden die jeweiligen Werte für Δf bestimmt, deren Wurzel gebildet und nach den Gleichungen 3.24 und 3.25 für jede Position ausgewertet. Dabei betrug die durch den Störkörper verursachte Frequenzverschiebung ≈ 120 kHz (oben) bzw. ≈ 70 kHz (unten). Die für jede Position bestimmten Dipolanteile sind in Abbildung 4.31 dargestellt.

In der grafischen Darstellungen der lokal gemessenen Dipolanteile, sowohl für den FRANZ-RFQ (Abbildung 4.31), als auch für den MYRRHA-RFQ (Abbildungen 4.33 und 4.34) ist kein Vergleich mit den simulierten lokalen Dipolwerten vorhanden. Wie bereits in Abschnitt 3.6 besprochen, werden HF-Simulationen an 4-Rod-RFQs üblicherweise mit einem Modell simuliert, bei dem sich die Tuningplatten auf der gleichen Höhen befinden und bei dem die Elektroden keine Modulation besitzen. Das resultiert darin, dass bei einem simulierten 4-Rod-RFQ keine Flatness eingestellt ist, wodurch sich die lokalen Spannungen und damit auch die lokalen Dipolwerte entlang der Elektrode beim Simulationsmodell stärker unterscheiden, als bei einem RFQ, bei dem die Flatness eingestellt wurde. Daher wird auf einen grafischen Vergleich der lokal bestimmten Dipolwerte in den entsprechenden Abbildungen verzichtet.

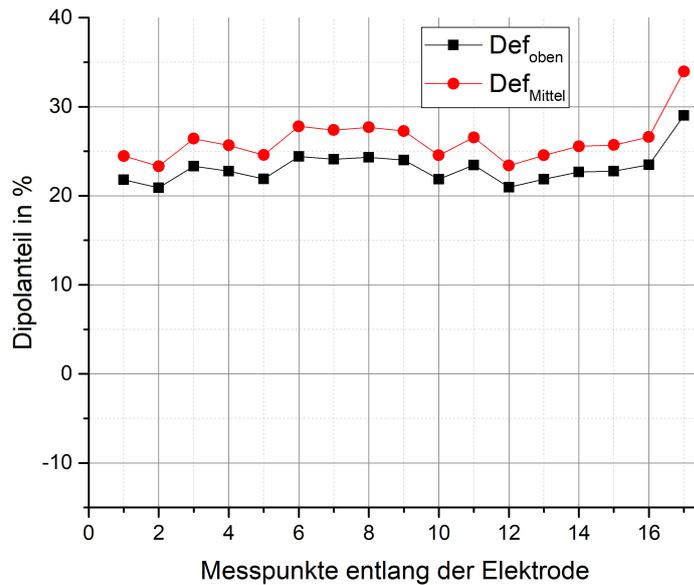


Abbildung 4.31: Lokal bestimmte Dipolwerte entlang der Elektroden des FRANZ-RFQ.

Beim Vergleich der simulierten mit den experimentell bestimmten Werten, die in Tabelle 4.3 zusammengefasst sind, fällt auf, dass die Abweichung sich je nach Simulationsverfahren unterscheidet, wobei die experimentellen Werte näher an den mit V_{Achse} liegen. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass beim Verfahren V_{Achse} , wie bereits in Abschnitt 4.1 beschrieben, die simulierten Spannungen entlang der gesamten Elektrodenlänge für die Bestimmung des Dipols genutzt werden, während bei V_{Curve} die Spannung zwischen den Elektrodenpaaren nur an diskreten Punkten ermittelt und anschließend gemittelt wird, wodurch das Simulationsergebnis von V_{Achse} als genauer angesehen werden kann.

Dipolmessungen am MYRRHA-RFQ

Die Messung des Dipols am MYRRHA-RFQ erwies sich als weitaus aufwändiger, als am FRANZ-RFQ, was nur teilweise daran liegt, dass der MYRRHA-RFQ mehr als doppelt so lang ist, wie der FRANZ-RFQ und daher auch mehr als doppelt so viele Messpunkte nötig sind, um die gleiche „Auflösung“ zu erzielen. Viel größer war der Aufwand, der für die einzelnen Messungen betrieben werden musste.

Es war bereits aus dem Tuningprozess und aus den übrigen Low-Level-Messungen bekannt, dass reproduzierbare Messungen am MYRRHA-RFQ mit einem Netzwerkanalysator bei geöffnetem Tank nicht möglich waren, was den Einsatz von einem provisorischen Deckel nötig machte, wie er in Abbildung 4.32 zu sehen ist. Allerdings zeigte sich, dass die Konstruktion des provisorischen Deckels anfällig für Vibrationen ist, die schon durch einen Lufzug in der Halle entstehen können, oder dadurch, dass Personen am RFQ vorbei gehen. Diese Vibrationen des provisorischen Deckels äußerten sich

durch Schwankungen in der gemessenen Resonanzfrequenz in der Größenordnung von wenigen kHz. Um diese Schwankungen auszuschließen konnte entweder der Deckel mit zusätzlichen Gewichten beschwert werden, oder es musste nach dem Schließen des Deckels so lange gewartet werden, bis sich eine konstante Frequenz eingestellt hatte. Um



Abbildung 4.32: MYRRHA-RFQ in der Experimentierhalle des IAP mit provisorischem Deckel während der Dipolmessungen.

weitere Fehlerquellen auszuschließen wurde überprüft, wie genau der Störkörper bzw. -kondensator positioniert werden muss, um eine reproduzierbare Messung zu erhalten. Für die Messungen wurde jeweils versucht, den Störkörper bzw. -kondensator möglichst genau in der Mitte zwischen den Stützen zu platzieren. Um einen Messfehler, hervorgerufen durch einen longitudinalen Versatz der Position des Störkörpers bzw. -kondensators, abschätzen zu können, wurden an mehreren Stellen entlang des RFQs Testmessungen durchgeführt, bei denen die gemessene Frequenz verglichen wurde, wenn der Störkörper bzw. -kondensator an der richtigen Stelle und entgegen oder in Strahlrichtung versetzt wurde. Mit dem Ergebnis, dass erst dann Unterschiede in der gemessenen Frequenz im kHz-Bereich messbar sind, wenn der Störkörper bzw. -kondensator so weit von seiner Idealposition verschoben ist, dass es mit bloßem Auge deutlich sichtbar ist. Ebenso verhielt es sich für andere Arten den Störkörper bzw. -kondensator „fehlerhaft“ zu positionieren (z.B. verdreht oder verkantet). Resultierend aus diesen Tests kann davon ausgegangen werden, dass bei einer gewissenhaften Versuchsdurchführung ein Messfehler aufgrund einer fehlerhaften Positionierung ausgeschlossen werden kann.

Die Messungen zur Bestimmung des Dipols am MYRRHA-RFQ wurden sowohl mit einem zylindrischen Störkörper aus PVC (20,35 mm lang mit einem Durchmesser von 15,55 mm), als auch mit einem Störkondensator (1 pF, montiert auf einer Halteklammer

4.3 Low-Level-Messungen am MYRRHA RFQ

	Störkörper	Störkondensator
$\Delta f_{\text{gemittelt}}$ (oberes Elektrodenpaar)	37 kHz	438 kHz
$\Delta f_{\text{gemittelt}}$ (unteres Elektrodenpaar)	42 kHz	473 kHz

Tabelle 4.4: Gemittelte Frequenzverstimmungen Δf bei der Dipolmessung mit dem Störkörper und dem Störkondensator.

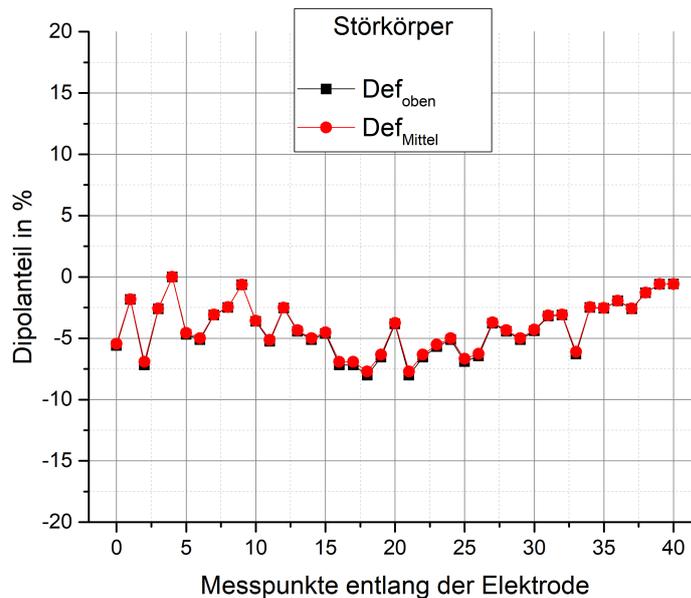


Abbildung 4.33: Lokal mit dem Störkörper bestimmte Dipolwerte entlang der Elektroden des MYRRHA-RFQs.

aus PEEK; vgl. Abbildung 4.29) durchgeführt, wobei die gemittelten Frequenzverschiebungen Δf in Tabelle 4.4 zusammengestellt sind.

Die lokal bestimmten Dipolwerte sind in den Abbildungen 4.33 und 4.34 dargestellt. Beim Vergleich der beiden Verläufe fällt auf, dass die mit dem Störkondensator ermittelten Werte wesentlich näher beieinanderliegen, als die, die mit dem Störkörper gemessen wurden. Dies ist ein klares Indiz dafür, dass die vom Störkondensator hervorgerufene Frequenzverschiebung von 438 bzw. 473 kHz zu groß gegenüber der Resonanzfrequenz des RFQs ist und dadurch die Messung bereits beeinflusst ist. Daher wird für die weitere Betrachtung der Dipol des MYRRHA-RFQs aus den mit dem Störkörper ermittelten lokalen Dipolwerten gemittelt. Wie auch schon bei dem Vergleich zwischen dem gemessenen und simulierten Dipol am FRANZ-RFQ in Abschnitt 4.3.4 zeigt sich auch beim

4.3 Low-Level-Messungen am MYRRHA RFQ

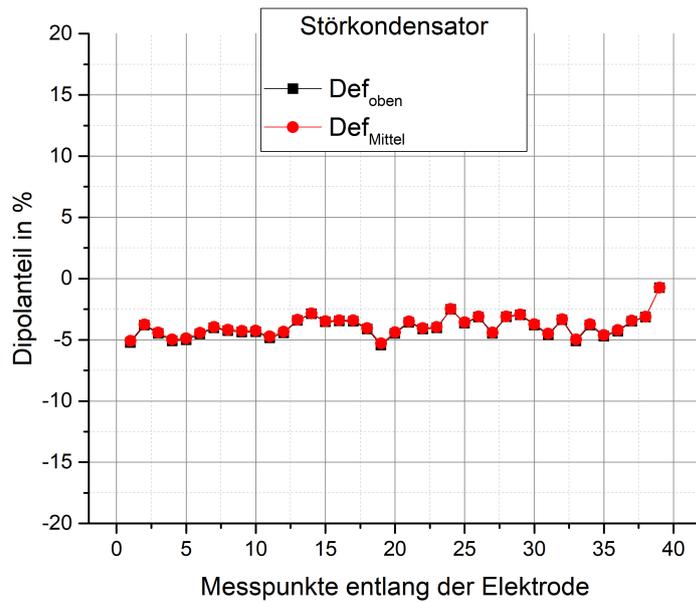


Abbildung 4.34: Lokal mit dem Störkondensator bestimmte Dipolwerte entlang der Elektroden des MYRRHA-RFQs.

	Dipol gemessen	Dipol Sim. V_{Achse}	Dipol Sim. V_{Curve}
Dipol nach Def_{oben}	-4,2 %	-3,3 %	-2,8 %
Dipol nach Def_{Mittel}	-4,1 %	-3,2 %	-2,7 %

Tabelle 4.5: Ergebnisse der Dipolsimulationen am MYRRHA-RFQ-Simulationsmodell und der Dipolmessung am realen Resonator, gemessen mit dem Störkörper.

Vergleich am MYRRHA-RFQ, dass der gemessene Dipol näher an den mit Verfahren V_{Achse} simulierten Ergebnissen liegt. Dass dennoch eine Differenz von 0,9 % besteht ist in Anbetracht der in Abschnitt 3.6 angesprochenen Unterschiede zwischen dem Simulationsmodell und dem realen RFQ, vor allem der nicht betrachteten Modulation innerhalb der Simulation, nicht weiter verwunderlich.

In der nachfolgenden Tabelle 4.6 sind die Ergebnisse der Low-Level-Messungen am MYRRHA-RFQ zusammengefasst.

4.3 Low-Level-Messungen am MYRRHA RFQ

	MYRRHA RFQ	Simulations- werte	Bemerkung
Resonanzfrequenz	176,1 MHz		durch Tauchkolben und Tuningplatten verstellbar
Kopplungsfaktor β	1,15		auch kleinere möglich; ausreichend
intrinsische Güte Q_0	4300	5580	reale Güte entspricht $\approx 77\%$ des Simulationswertes
Tunerhub	0,29 MHz		Position des Tunerhubs einstellbar; Größe ausreichend
Flatness	$\pm 3\%$		akzeptabel
Dipol nach Def_{oben}	-4,2 %	-3,3 %	
Dipol nach Def_{Mittel}	-4,1 %	-3,2 %	

Tabelle 4.6: Ergebnisse der LL-Messungen am MYRRHA-RFQ mit Vergleichswerten aus der Simulation und Bemerkungen.

5 Die MYRRHA-CH-Strukturen

Das grundlegende Design der MYRRHA-CH-Strukturen basiert auf dem des FRANZ-CH-Rebunchers, der im Rahmen der Masterarbeit von Anja Seibel [62] geplant und gebaut wurde. Später wurde dann eine erste Version des Designs der MYRRHA-CHs von Dominik Mäder in seiner Dissertation [17] vorgestellt, die im weiteren Verlauf dieser Arbeit als „Rohform“ bezeichnet wird. Abbildung 5.1 zeigt einen Querschnitt durch die FRANZ-CH und durch die Rohform von MYRRHA-CH3.

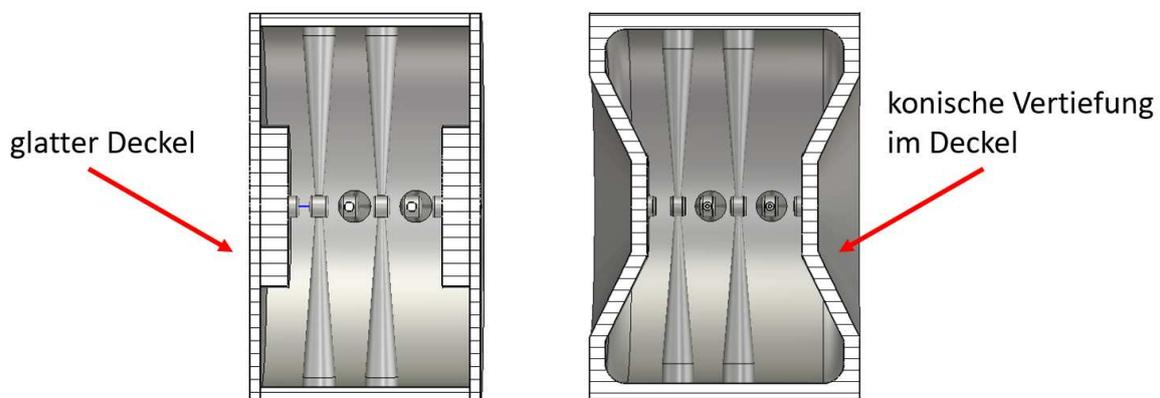


Abbildung 5.1: Schnitt durch die Simulationsmodelle der FRANZ-CH und der Rohform von MYRRHA-CH3.

Um die Spannung auf den äußeren Driftröhren zu erhöhen, ist die Tankinnenlänge der FRANZ-CH verlängert worden und die Deckel besitzen zylinderförmige Vertiefungen in den Innenraum, auf dem die Enddriftröhren sitzen. Da die Driftstrecke möglichst gering gehalten werden muss, wurde das Design der Deckel für die Rohform der MYRRHA-CHs dahingehend verändert, dass die zylinderförmige Vertiefung der FRANZ-CH durch eine konische Vertiefung ersetzt wurde. Diese Vertiefungen erlauben die teilweise Versenkung der benachbarten Diagnoseelemente und verringern so die Driftstrecke [17]. Darüber hinaus wurden die Rundungen an den Driftröhren, wie in Abbildung 5.2 dargestellt, derart verändert, dass das Feld besser auf der Strahlachse konzentriert ist, wodurch eine höhere Shuntimpedanz erzielt werden soll.

Aufbauend auf die in [17] vorgestellten MYRRHA-CH-Rohformen, konnte im Rahmen der vorliegenden Arbeit das aktuelle Design der MYRRHA-CHs erstellt werden. Die hierfür notwendigen Anpassungen in Bezug auf das HF- und Kühl-Design sollen in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben werden.

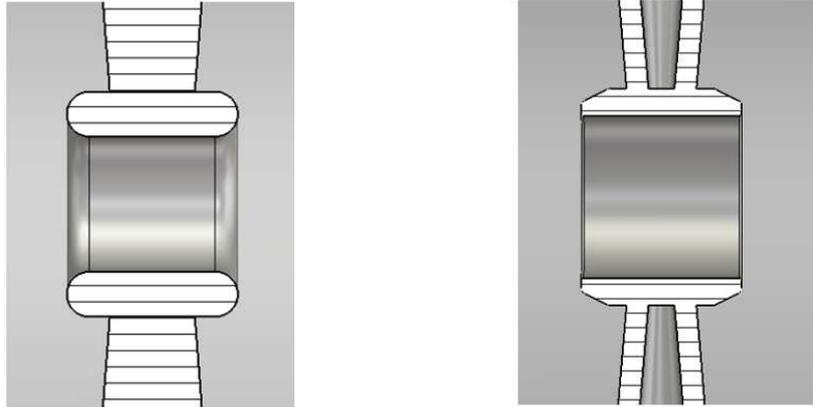


Abbildung 5.2: Schnitt durch die Driftröhren der Simulationsmodelle der FRANZ-CH und der Rohform von MYRRHA-CH3.

5.1 HF-Optimierung des MYRRHA-CH-Designs

Wichtig für aussagekräftige Simulationsergebnisse während der HF-Optimierung ist, dass die Unterschiede zwischen den Simulationsmodellen und den darauf basierenden, gebauten Kavitäten möglichst gering sind (vgl. Abschnitt 3.6). Daher wurde versucht, die Simulationsmodelle der bisherigen MYRRHA-CH-Rohformen derart zu verändern, dass sie ein möglichst genaues Vorbild zu den später gebauten Kavitäten bilden können. Zuerst wurden die longitudinalen Abmessungen der Driftröhren und Beschleunigungs-

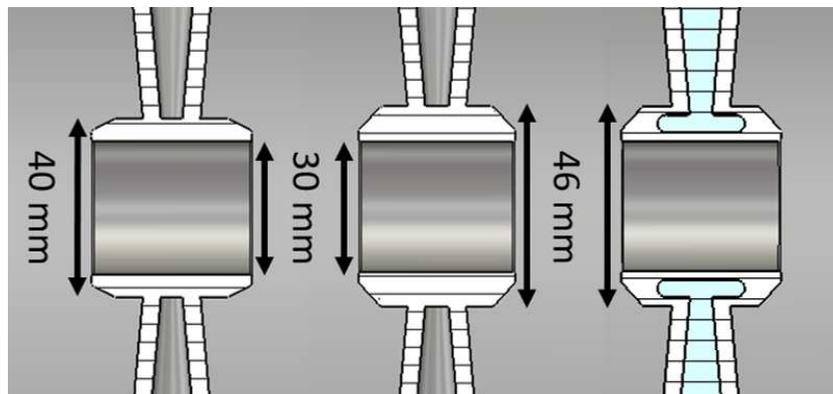


Abbildung 5.3: Verschiedene Versionen der Driftröhren der MYRRHA-CH5. Links: Driftröhre aus der Rohform; Mitte: Neue Driftröhre mit vergrößertem Außenradius; Rechts: Neue Driftröhre mit inneliegender (direkter) Kühlung.

spalte an das neue Strahldynamikdesign angepasst, wobei sich diese Anpassungen für die MYRRHA-CHs 1-7 im Vergleich zu dem vorherigen Strahldynamikdesign nur in wenigen zehntel Millimeter unterschieden. In einem nächsten Schritt musste der äußere Driftröhrenradius, wie in Abbildung 5.3 am Beispiel der Driftröhren von MYRRHA-CH5 dargestellt, vergrößert werden, um Platz für eine direkte Kühlung zu schaffen, ohne die mechanische Stabilität zu gefährden. Da eine Verdickung der Driftröhren eine massive Zunahme der

5.1 HF-Optimierung des MYRRHA-CH-Designs

Kapazität bedeutet, wird die Frequenz des Resonators deutlich abgesenkt, In Abbildung 5.4 ist beispielhaft der Einfluss verschiedener Vergrößerungen des Driftrohraußenradius auf die Resonanzfrequenz von MYRRHA-CH5 dargestellt. Wie dort zu sehen ist, wird die Frequenz bei einer Vergrößerung um 3 mm von 176,10 auf 173,13 MHz abgesenkt.

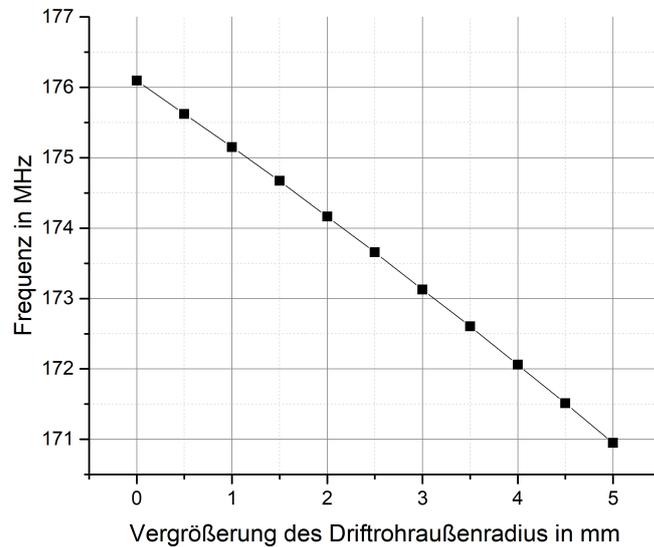


Abbildung 5.4: Veränderung der Frequenz bei einer Vergrößerung des Außenradius der Driftröhren am Beispiel von MYRRHA-CH5.

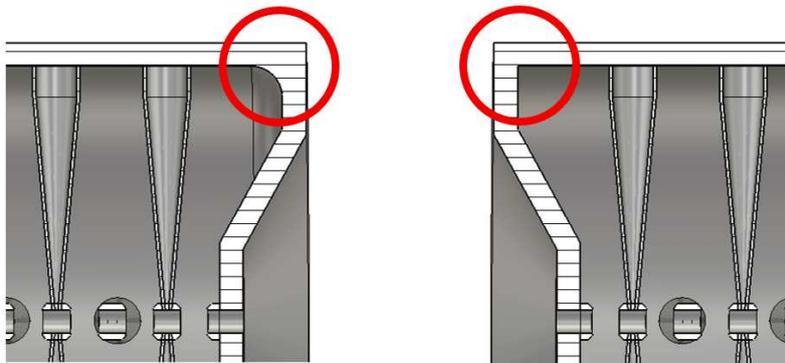


Abbildung 5.5: Links: Rohform der MYRRHA-CH5 mit Verrundung am Übergang zwischen Tank und Deckel; Rechts: Überarbeitetes Modell ohne Verrundung.

Zusätzlich wurde die in den CH-Rohformen vorhandene Verrundung am Übergang zwischen dem Tank und den Deckeln mit einem Radius von 40 mm, wie in Abbildung 5.5 anhand der roten Markierung zu sehen ist, entfernt. Wie in Abschnitt 3.5.3 bereits erklärt wurde, hat jede Veränderung des Stromflusses einen Einfluss auf die Verlustleistung,

5.1 HF-Optimierung des MYRRHA-CH-Designs

die Güte und dadurch auch auf die Shuntimpedanz. Diesem Gedanken folgend, sollten die ursprüngliche Verrundungen zwischen dem Tank und den Deckeln den Stromfluss in diesem Bereich verbessern und dadurch eine positive Auswirkung auf die oben genannten Resonatorparameter haben. Allerdings sind die zu erwartenden positiven Auswirkungen

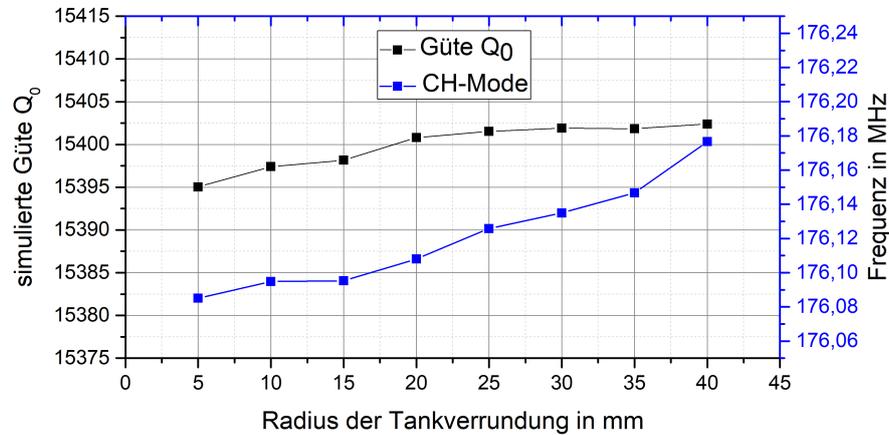


Abbildung 5.6: Auswirkung des Verrundungsradius auf die Güte und die Resonanzfrequenz von MYRRHA-CH5.

verhältnismäßig gering. In Abbildung 5.6 ist beispielhaft der Verlauf der Güte und der Resonanzfrequenz von CH5 bei verschiedenen Verrundungsradien dargestellt. Wie dort zu sehen ist, erhöht sich durch die Verrundung die simulierte Güte der Kavität um weniger als 0,1%. Dem gegenüber steht ein zusätzlicher Produktionsaufwand, der mit signifikant höheren Kosten verbunden ist, weswegen die Verrundungen entfernt wurden. Die durch den Wegfall der Verrundung entstehende zusätzliche Induktivität führt zu einer geringen Absenkung der Frequenz von ≈ 100 kHz, was in einem späteren Schritt zusammen mit den anderen designbedingten Frequenzveränderungen durch eine Anpassung des Radius kompensiert werden muss.

Anschließend wurden die Modelle mit je sechs DN40cf-Flanschen (u.A. für Pickups und Vakuummessröhren) und vier DN100cf-Flanschen (für den statischen und dynamischen Tuner, die Einkoppelschleife und die Vakuumpumpe) ausgestattet, wobei sich die großen Flansche auf der geometrisch halben Länge der Kavität befinden und der untere Flansch mit einem dreikammrigen Vakuulgitter versehen wurde, das das Vakuumssystem vor HF-Feldern schützen soll.

Außerdem wurde die Dicke des Tanks von 30 auf 50 mm erhöht, was zwar keinerlei Auswirkungen auf die HF-Eigenschaften der Kavität hat, aber die mechanischen Stabilität verbessert und zusätzlichen Platz für Kühlkanäle im Tank schafft.

5.1.1 Bestimmung der Tunerpositionen für die MYRRHA-CHs 2-7

Wie bereits in Abschnitt 4.3.3 erklärt wurde, lassen sich Temperatur- und dadurch auch Frequenzschwankungen einer Kavität im laufenden Betrieb kaum vermeiden, weswegen ein dynamischer Tuner notwendig ist, um diese Schwankungen auszugleichen. Zusätzlich erfüllen die Tuner bei CH-Strukturen den Zweck, Frequenzabweichungen, die während des Baus aufgetreten sind, zu kompensieren. Daher ist es zwingend erforderlich, die finalen Positionen der Tuner erst nach der Fertigstellung der Kavitäten während der Low-Level-Messungen zu bestimmen.

Trotz dessen wird schon während der Simulationsphase sowohl ein Arbeitspunkt, also die Position der beiden Tuner, bei der die Designfrequenz von 176.1 MHz erreicht ist, als auch ein Tuningbereich bestimmt. Idealerweise umfasst der Tuningbereich mindestens $\pm 0,2$ MHz um die Designfrequenz, wobei ein größerer Bereich nach oben wünschenswert ist, weil im Strahlbetrieb tendenziell eher mit einer Erwärmung, als mit einer Abkühlung der Kavität zu rechnen ist, welche nach Formel 5.69 mit einer Verringerung der Resonanzfrequenz einher geht, die nur von der ursprünglichen Frequenz f_0 , der Temperaturveränderung ΔT und dem Längenausdehnungskoeffizienten des Resonatormaterials α abhängt [63].

$$\Delta f = f_0 \cdot \left(\frac{1}{\alpha \cdot \Delta T + 1} - 1 \right) \quad (5.69)$$

Des Weiteren soll der Tuningbereich so gelegt werden, dass der benötigte Tunerhub, also der geometrische Bereich, in dem sich der Tauchkolben bewegt, eine Länge von 90 mm nicht übersteigt, da die üblicherweise verwendeten dynamischen Tauchkolben bauartbedingt über diesen maximalen Hub verfügen.

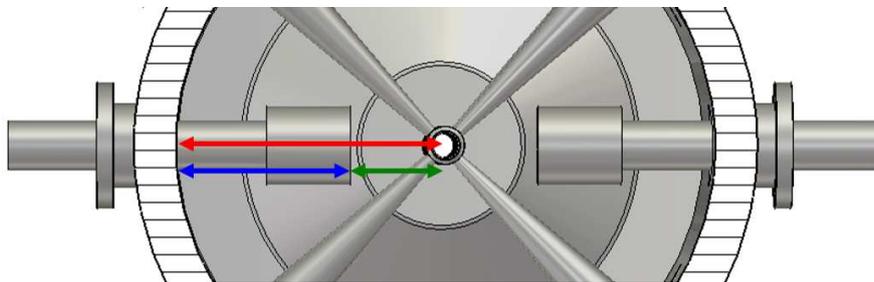


Abbildung 5.7: Der Abstand zwischen dem Tauchkolben und der Strahlachse (grüner Pfeil) entspricht 35 % des Tankinnenradius (roter Pfeil).

Die Arbeitspunkte und Tuningbereiche der MYRRHA-CHs 2-7 konnten mit der gleichen Vorgehensweise ermittelt werden, der im Folgenden für CH2 beschrieben wird.

Zuerst wurden die beiden Tauchkolben auf 35 % des Tankradius gesetzt, wie es in Abbildung 5.7 dargestellt ist. Anschließend wurde der Tankradius so angepasst, dass die jeweilige Kavität eine Frequenz von 176.1 MHz hat. Bei MYRRHA-CH2 ist dies bei einem Innenradius von 359,9 mm der Fall. Danach wurde ein Tuner-Sweep durchgeführt. Dies bezeichnet eine Reihe von Simulationen, bei denen die Position des dynamischen Tuners variiert wird, während der statische Tuner bei 35 % des Tankradius fixiert wird. Exemplarisch ist der Verlauf eines solchen „Tuner-Sweeps“ für MYRRHA-CH2 in Abbildung

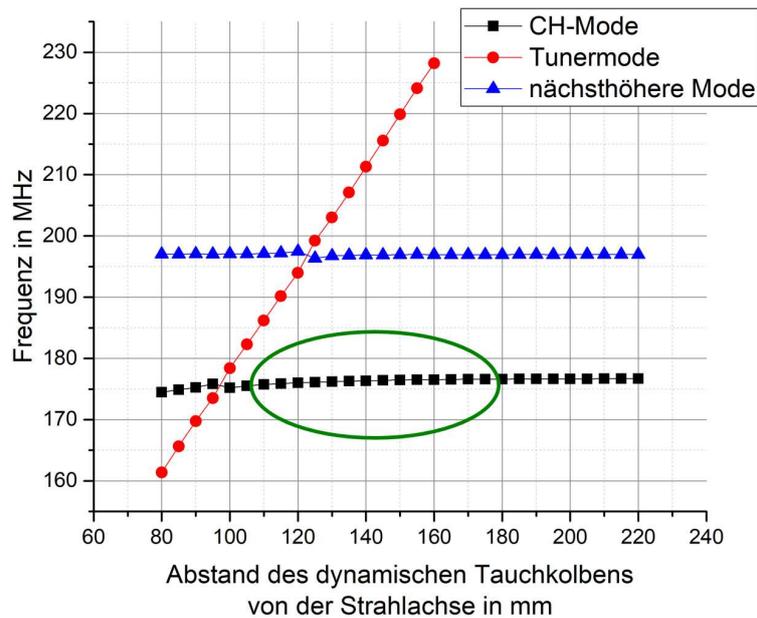


Abbildung 5.8: Verlauf der CH-Mode (schwarz), der nächsthöheren Mode (blau) und der Tuner mode (rot) für MYRRHA-CH2.

5.8 dargestellt, wobei der Verlauf der CH-Mode (schwarze Kästchen), der Tuner mode (rote Punkte) und der nächsthöheren Mode (blaue Dreiecke) zu sehen ist. Ebenfalls ist in dieser Abbildung zu erkennen, dass im Bereich des Schnittpunktes der Tuner mode mit den beiden abgebildeten Moden ein Sprung in der geschnittenen Mode existiert, der sich darauf zurückführen lässt, dass die beiden Moden an dem Schnittpunkt so nah beieinanderliegen, dass sie sich gegenseitig beeinflussen.

Der grün markierte Bereich zeigt den Tuningbereich, bei dessen Wahl auf folgendes geachtet werden muss:

- Der Verlauf der CH-Mode darf sich nicht innerhalb des geplanten Tuningbereiches mit dem einer anderen Mode schneiden.
- Zwischen der CH-Mode und jedweder anderen Mode muss innerhalb des Tuningbereiches ein Abstand von mindestens 1 MHz liegen.
- Innerhalb des gesamten Tuningbereiches dürfen sich außer der Resonanzfrequenz die HF-Parameter nicht signifikant ändern. Insbesondere die Spannungsverteilung darf nicht beeinflusst werden.

Abbildung 5.9 zeigt eine Vergrößerung dieses simulierten Tuningbereiches, wobei die roten Linien den Arbeitspunkt markieren. Der simulierte Tuningbereich von MYRRHA-CH2 erstreckt sich hierbei von 175,74 bis 176,63 MHz, wobei ein Bereich von 70 mm abgefahren wird und der minimale Abstand zwischen dem dynamischen Tauchkolben und der Strahlachse 110 mm beträgt.

5.1 HF-Optimierung des MYRRHA-CH-Designs

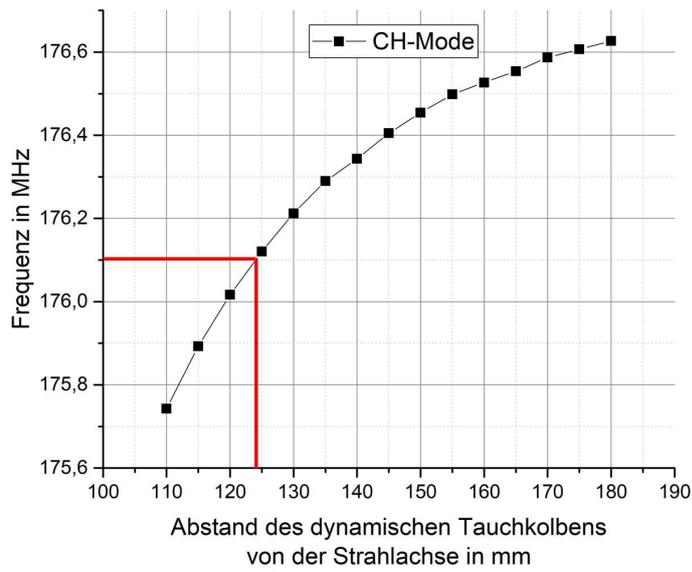


Abbildung 5.9: Aus Abbildung 5.8 vergrößerter simulierter Tuningbereich der MYRRHA-CH2 mit rot markiertem Working Point.

Dieses exemplarisch für MYRRHA-CH2 vorgestellte Verfahren wurde auch bei den CHs 3-7 erfolgreich angewendet. Die Ergebnisse hierzu sind in Abschnitt 5.1.3 zusammengefasst.

5.1.2 Bestimmung der Tunerpositionen für MYRRHA-CH1

Wenn das in Abschnitt 5.1.1 dargestellte Verfahren auf MYRRHA-CH1 angewendet wird, zeigt sich, wie in Abbildung 5.10 zu sehen ist, dass die Tunermode die CH-Mode innerhalb des gewünschten Tuningbereiches schneidet.

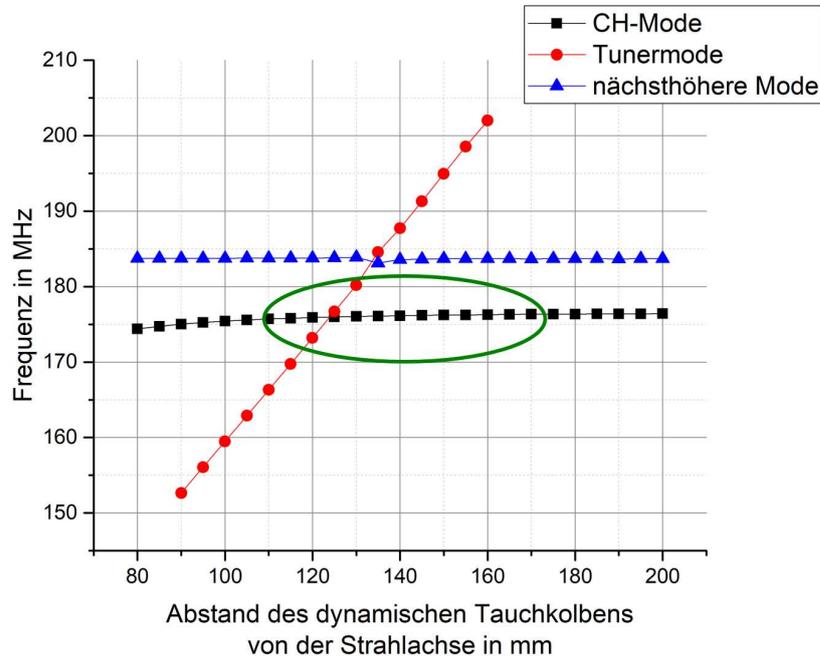


Abbildung 5.10: Verlauf der CH-Mode (schwarz), der nächsthöheren Mode (blau) und der Tunermode (rot) für MYRRHA-CH1, wenn sich der Arbeitspunkt der beiden Tuner bei 35 % des Tankradius befindet.

Bei der Tunermode handelt es sich um eine Leitungsmode, bei der der Tauchkolben als Struktur eines $\lambda/4$ -Resonators dient. Anschaulich betrachtet fließen Ströme von der Tankwand den Tauchkolben entlang bis zu dessen Spitze und wieder zurück. Hierbei ist die Länge des Strompfades (vgl. Abbildung 5.12), also des Tuners an sich maßgeblich für die Frequenz der Tunermode, wobei kapazitive Effekte, wie sie durch den Tank, die Stützen und auch den zweiten Tauchkolben verursacht werden, die Frequenz zusätzlich herabsetzen. Abbildung 5.11 zeigt exemplarisch die Feldverteilung innerhalb einer CH-Kavität, wenn die Tunermode angeregt wird, was sich sehr gut an der Feldkonzentration um den Tunerkopf erkennen lässt.

Die Frequenz der Tunermode ohne zusätzliche kapazitive Einflüsse kann mit Gleichung 5.70 abgeschätzt werden. Hierbei ist l_{Tuner} die Länge des Tuners im Vakuum und l_{tan} die Summe der zusätzlichen tangentialen Längen, die aufgrund der Verdickung des Tunerkopfes miteinbezogen werden.

$$f_{\text{Tuner}} \approx \frac{c}{4 \cdot (l_{\text{Tuner}} + l_{\text{tan}})} \quad (5.70)$$

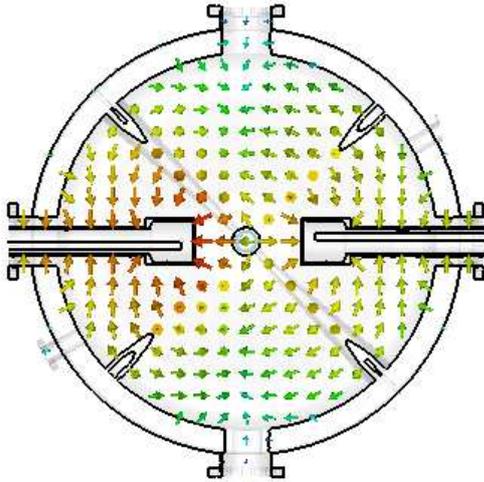


Abbildung 5.11: Feldverteilung der Tunermode in einem CH1-Simulationsmodell.

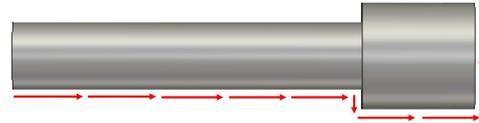


Abbildung 5.12: Skizzierter Strompfad der Tunermode entlang des Tauchkolbens.

Abbildung 5.13 zeigt den Einfluss der kapazitiven Effekte auf die Tunermode. Dargestellt wird:

- in blau: Der simulierte Verlauf der Tunermode in MYRRHA-CH1 mit einem Innenradius von 382,55 mm.
- in schwarz: Der simulierte Verlauf der Tunermode im leeren Tank (ohne Stützen, Driftröhren und zweitem Tauchkolben) von MYRRHA-CH1 mit einem Innenradius von 382,55 mm.
- in rot: Die mit Gleichung 5.70 abgeschätzte Tunermode ohne kapazitive Einflüsse.

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Frequenz der Tunermode in der CH1-Kavität aufgrund der zusätzlichen Kapazitäten, die durch Stützen samt Driftröhren hervorgerufen werden, am niedrigsten ist und dass dieser Effekt für einen geringeren Abstand des Tauchkolbens zur Strahlachse noch zunimmt. Im Allgemeinen lässt sich sagen, dass eine Abschätzung des Verlaufs der Tunermode über Gleichung 5.70 nicht geeignet ist, um die in Teilchenbeschleunigern auftretenden Tunermoden vorherzusagen.

Da die Frequenz der Tunermode hauptsächlich von der Länge des Tuners innerhalb der Kavität abhängt, lässt sich das Problem der auftretenden Tunermode innerhalb des notwendigen Tuningbereiches bei MYRRHA-CH1 dadurch umgehen, dass der Tuningbereich entweder „vor“ oder „hinter“ den Schnittpunkt gelegt wird, an dem die Tunermode 176.1 MHz schneidet. Hierfür wurden zwei Ansätze untersucht, die nachfolgend beschrieben werden.

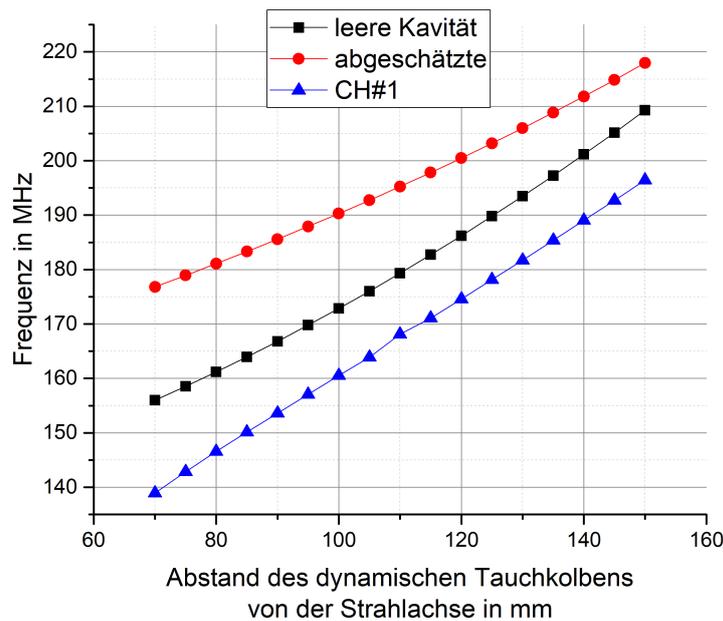


Abbildung 5.13: Verlauf der Tunermode (schwarz), der nächsthöheren Mode (blau) und der Tunermode (rot) für MYRRHA-CH1, wenn sich der Arbeitspunkt der beiden Tuner bei 35 % des Tankradius befindet.

Symmetrische Verschiebung des Arbeitspunktes

Wie in Abschnitt 5.1.1 beschrieben, wurden MYRRHA-CH2-7 so geplant, dass sich der Arbeitspunkt der beiden Tauchkolben symmetrisch auf 35 % des Tankinnenradius befindet. Da diese Positionierung bei CH1 dazu führt, dass der Verlauf der CH-Mode innerhalb des notwendigen Tuningbereiches von der Tunermode geschnitten wird, kann dieses Vorgehen nicht angewendet werden. Daher wurde untersucht, ob sich ein Schnitt mit der Tunermode umgehen lässt, wenn sich der Arbeitspunkt auf einer anderen Position innerhalb der Kavität befindet.

Um verschiedene symmetrische Positionierungen der beiden Tauchkolben innerhalb der Kavität zu untersuchen, wurden Simulationsmodelle erstellt, bei denen diese sich bei einer Resonanzfrequenz von 176.1 MHz auf 20, 25, 30 und 40 % des inneren Tankradius befinden. Anschließend wurden Tuner-Sweeps durchgeführt, bei denen sich zeigte, dass sich die CH-Mode auch für die Positionierung der Tuner bei 30 und 40 % des Innenradius mit der Tunermode schneidet (siehe Abbildung 5.14). Darüber hinaus hat der Tauchkolben bei der 40 %-Variante nicht mehr genügend Frequenzhub, um überhaupt einen ausreichenden Tuningbereich zu garantieren.

Bei dem Verlauf von CH- und Tunermode der 20 und 25 %-Variante hingegen ist ein Tuningbereich möglich, ohne dass die Tunermode die CH-Mode schneidet (vgl. Abbildung 5.15). Allerdings bewegt sich der dynamische Tuner bei der 20 %-Variante in einem Bereich von nur 10 mm. Dies hat zur Folge, dass die Bewegungen des Tauchkolbens während des Strahlbetriebes der Kavität sehr präzise und in kleinen Schritten erfolgen muss,

5.1 HF-Optimierung des MYRRHA-CH-Designs

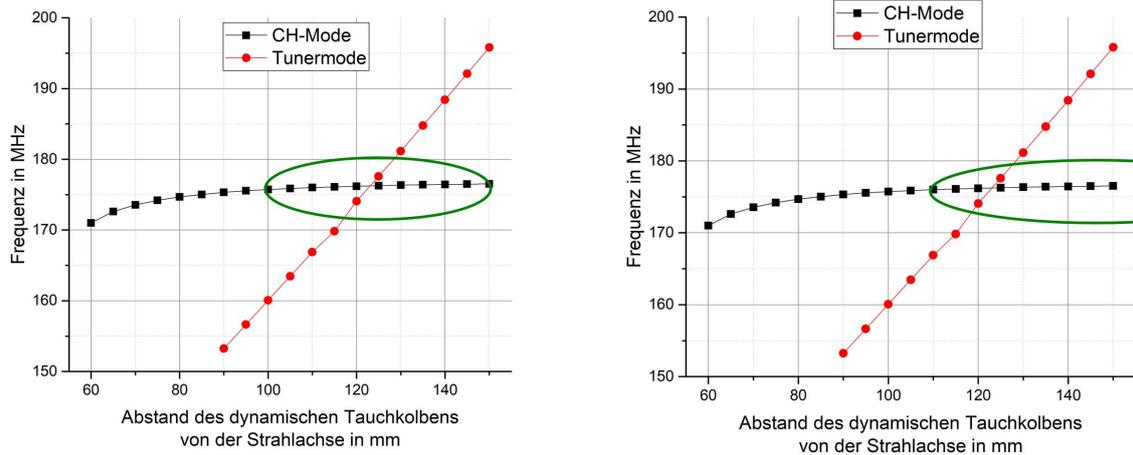


Abbildung 5.14: Verlauf der CH-Mode (schwarz) und der Tuner mode (rot) für MYRRHA-CH1, wenn sich der Arbeitspunkt der beiden Tuner symmetrisch bei 30 % (links) bzw. 40 % (rechts) des Tankradius befindet. Im beabsichtigten Tuningbereich (in grün) wird in beiden Fällen die CH-Mode von der Tuner mode geschnitten. Zusätzlich ist der mögliche Tuningbereich im rechten Bild nicht ausreichend, was durch den nicht geschlossenen grünen Bereich dargestellt ist.

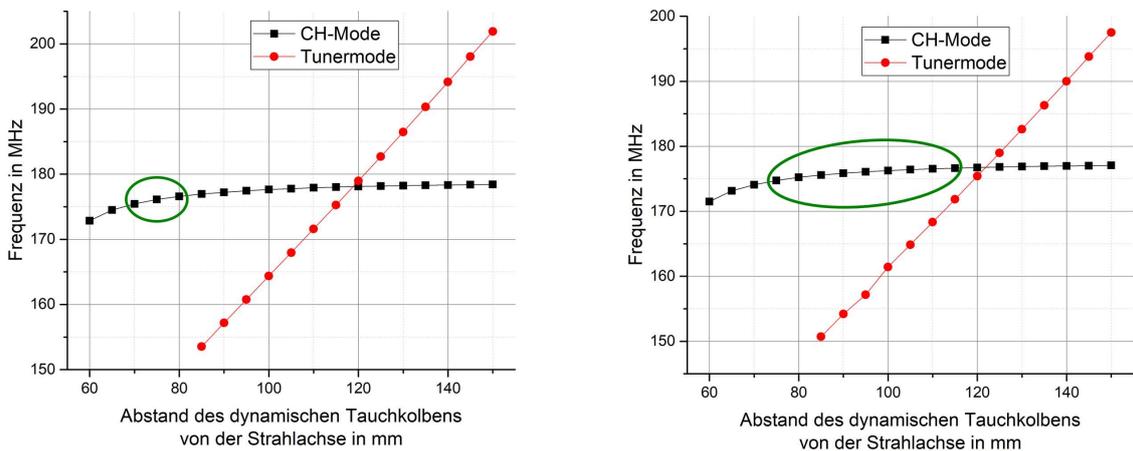


Abbildung 5.15: Verlauf der CH-Mode (schwarz) und der Tuner mode (rot) für MYRRHA-CH1, wenn sich der Arbeitspunkt der beiden Tuner symmetrisch bei 20 % (links) bzw. 25 % (rechts) des Tankradius befindet. In beiden Fällen schneidet die Tuner mode nicht innerhalb des Tuningbereichs (in grün) die CH-Mode.

was zusätzliche Ansprüche an die Konstruktion des dynamischen Tauchkolbens stellt.

Asymmetrische Arbeitspunkte der beiden Tuner

Eine weitere Möglichkeit, ein Schneiden der Tuner mode mit der CH-Mode innerhalb des Tuningbereiches zu verhindern, ist die asymmetrische Positionierung der beiden Tauchkolben. Auf diese Weise soll verhindert werden, dass sich die „kritische Länge“ des Tauchkolbens, also die Länge, bei der die Tuner mode sich in der Nähe der Zielfrequenz von 176,1 MHz befindet, nicht Teil des Tunerhubs ist. Es wurden Versionen der

5.1 HF-Optimierung des MYRRHA-CH-Designs

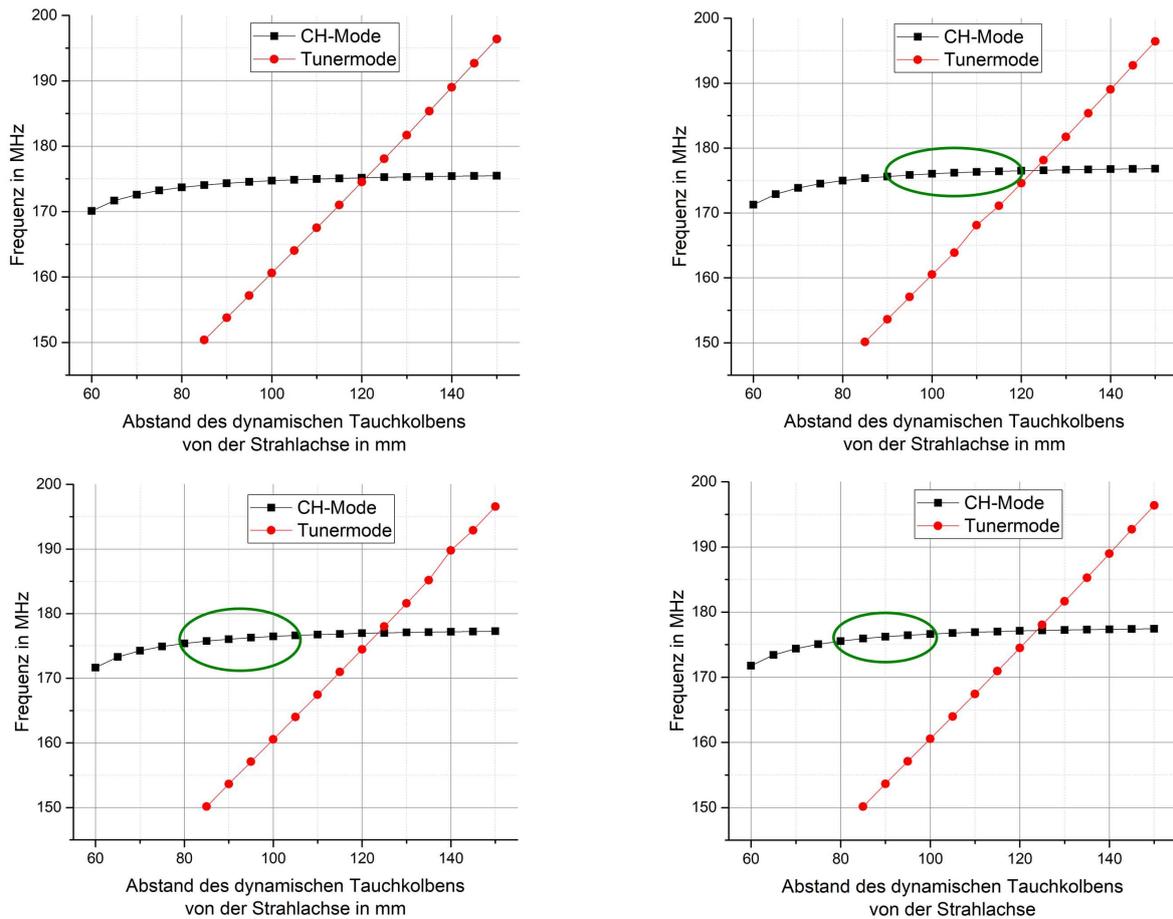


Abbildung 5.16: Verlauf der CH-Mode (schwarz) und der Tuner mode (rot) für MYRRHA-CH1-Kavitäten mit einem Innenradius von 382,55 mm und verschiedenen Abständen des statischen Tuners zur Strahlachse. Die Tuningbereiche (soweit vorhanden) sind in grün eingezeichnet. Oben links: Abstand gleich 80 mm; Oben rechts: Abstand gleich 110 mm; Unten links: 140 mm; Unten rechts befindet sich kein statischer Tuner innerhalb der Kavität.

MYRRHA-CH1-Kavität mit verschiedenen Tankinnenradien untersucht, bei denen die Arbeitspunkte der Tuner asymmetrisch sind. Hierbei zeigte sich, dass der statische Tuner in einer CH1-Kavität mit einem Innenradius von 382,55 mm an mehreren Stellen positioniert werden kann, sodass der resultierende Tuningbereich nicht von der Tuner mode geschnitten wird.

Abbildung 5.16 zeigt exemplarisch drei Verläufe der CH- und der Tuner mode bei verschiedenen Arbeitspunkten des statischen Tuners und einen Verlauf, bei dem auf den statischen Tuner komplett verzichtet und nur der dynamische Tuner verwendet wird.

Wie oben links in Abbildung 5.16 zu sehen ist, hat der kapazitive Einfluss des statischen Tuners bei einem Abstand von 80 mm zur Strahlachse die Frequenz bereits so stark verringert, dass durch das Bewegen des dynamischen Tauchkolbens eine maximale Frequenz von $\approx 175,5$ MHz erreicht werden kann. Ab einem Abstand des statischen Tauchkolbens von 110 mm zur Strahlachse befindet sich aber der Schnittpunkt außerhalb

des Tuningbereiches, sodass die anderen drei Versionen von CH1 in Frage kommen.

Vergleich der verschiedenen CH1-Versionen

Wie in den vorangegangenen Abschnitten gezeigt wurde, existieren mehrere Möglichkeiten MYRRHA-CH1 so auszulegen, dass ein genügender Tuningbereich möglich ist, ohne dass die CH-Mode von der Tunermode geschnitten wird. Um diese verschiedenen Versionen vergleichen zu können, sind in Tabelle 5.1 die wichtigsten HF-Parameter aus den Simulationen zusammengestellt, wobei die angegebenen Werte der Güte Q_0 und der Shuntimpedanz Z_a jeweils bei einer Frequenz der Kavität von 176,1 MHz ermittelt wurden.

	Tankinnen- radius in mm	Tuning- bereich in mm	Tuning- bereich in MHz	Güte Q_0	Shuntimpedanz Z_a in $M\Omega/m$
symmetrisch WP bei 20 %	374,20	10	175,45 - 176,59	12790	51,93
symmetrisch WP bei 25 %	380,89	25	175,58 - 176,64	12960	54,45
asymmetrisch stat 110 mm	382,55	30	175,62 - 176,50	13010	55,17
asymmetrisch stat 140 mm	382,55	25	175,40 - 176,63	13020	55,27
asymmetrisch kein stat	382,55	20	175,56 - 176,63	13100	55,84

Tabelle 5.1: Vergleich der Simulationsergebnisse verschiedener CH1-Versionen.

Aufgrund der deutlich schlechteren Shuntimpedanz und des mit 10 mm sehr kleinen Bereiches, in dem der dynamische Tauchkolben bewegt werden soll, ist die symmetrische 20 %-Variante nicht zu empfehlen. Und obwohl die Ergebnisse der symmetrischen 25 %-Variante vergleichbar zu denen der asymmetrischen Varianten sind, wird dennoch diesen der Vorzug gegeben.

Da Abweichungen, zwischen dem Simulationsmodell und der gefertigten Kavität zu erwarten sind und da bei CH1 aufgrund ihres großen Durchmessers die Gefahr der auftretenden Tunermode gegeben ist, scheint es vorteilhaft, ein Design zu wählen, bei dem mehrere Möglichkeiten existieren, die beiden Tauchkolben zu positionieren, ohne dass die Tunermode die CH-Mode schneidet. Daher wird für die nachfolgenden Simulationen und Vergleiche die asymmetrische 140 mm-Variante betrachtet, da bei dieser der Tauchkolben über einen größeren Weg bewegt wird, als bei der Variante ohne statischen

Tuner und weil deren Tuningbereich, wie in Abbildung 5.16 zu sehen ist, weiter vom Schnittpunkt mit der Tunermode entfernt ist, als bei der 110 mm-Variante. Bei der gewählten 140 mm-Variante beträgt der Abstand des Arbeitspunktes des dynamischen Tauchkolbens 90,9 mm zur Strahlachse.

5.1.3 Zusammenfassung der HF-Simulationen

Durch die Überarbeitungen am grundlegenden Design der MYRRHA-CH-Strukturen und der Positionierung der beiden Tauchkolben, wurden in der Summe zusätzliche Induktivitäten und Kapazitäten in die Modelle eingebracht, die die Resonanzfrequenz nach unten verschoben haben, was durch eine Verringerung des Radius kompensiert wurde. In Tabelle 5.2 sind die Radien der Rohformen aus [17] und die neuen Radien samt der notwendigen Radiusveränderung angegeben. Wie anhand dieser Daten ersichtlich ist, nimmt die notwendige Radiusverringerng mit der Nummer der CH-Kavität ab. Anschaulich

	Radius Rohform in mm [17]	Radius nach Überarbeitung in mm	Radiusver- änderung in mm
CH1	392,22	382,55	-9,67
CH2	359,9	351,72	-8,18
CH3	340,29	332,66	-7,63
CH4	330,08	323,59	-6,49
CH5	326,39	320,71	-5,68
CH6	323,42	318,53	-4,89
CH7	329,82	325,03	-4,79

Tabelle 5.2: Innenradien der MYRRHA-CH-Strukturen 1-7 vor und nach der Überarbeitung.

lässt sich das dadurch erklären, dass die Anzahl der Spalten und damit die Länge der Kavitäten entlang des Injektors ansteigt, während der Radius abnimmt. Da die Feldkonzentration bei der angeregten CH-Mode radial nach außen geringer wird, ergibt sich für Kavitäten mit kleinerem Radius eine größere Abhängigkeit der Frequenz vom Radius, wodurch nur geringere Radiusänderungen notwendig sind um vergleichbare Änderungen an der Geometrie zu kompensieren. Eine Ausnahme bildet hier der Sprung von CH6 auf CH7, bei dem zwar aufgrund der energiereicheren Teilchen die Spaltmittenabstände und dadurch die Gesamtlänge der Kavität leicht ansteigt, nicht jedoch die Anzahl der Spalte, was dafür sorgt, dass sich der Radius von CH7 zu den vorherigen CHs 4 - 6 wieder vergrößert und trotzdem eine geringere Radiusanpassung notwendig ist.

In Tabelle 5.3 sind die Arbeitspunkte der dynamischen Tuner und die Tuningbereiche als Abstand zur Strahlachse (atsa) und deren Frequenzbereiche dargestellt. Aufgrund der asymmetrischen Arbeitspunkte bei CH1 unterscheiden sich deren Werte für den

5.1 HF-Optimierung des MYRRHA-CH-Designs

Arbeitspunkt und den geometrischen Tuningbereich signifikant von denen der anderen Kavitäten.

	WP bei atsa in mm	Tuningbereich atsa in mm	Tuningbereich Frequenz in MHz
CH1	90,9	80 - 105	175,4 - 176,59
CH2	123,11	110 - 175	175,74 - 176,61
CH3	116,43	100 - 175	175,65 - 176,71
CH4	113,30	100 - 170	175,75 - 176,72
CH5	112,23	90 - 180	175,54 - 176,66
CH6	111,49	90 - 180	175,66 - 176,57
CH7	113,76	90 - 180	175,66 - 176,52

Tabelle 5.3: Simulierte Arbeitspunkte (WP), Tunerhübe und Tuningbereiche der MYRRHA-CHs 1-7, wobei atsa den Abstand zwischen dem dynamischen Tuner und der Strahlachse bezeichnet.

Die Spannungsverteilung gibt an, wie sich die Gesamtspannung einer Kavität auf die einzelnen Spalte verteilt. Da nur die Höhe der Spannungen, nicht aber deren Verteilung von der eingekoppelten Leistung abhängt, wird die Spannungsverteilung in Prozent angegeben.

Um die spätere Funktion der einzelnen Kavitäten innerhalb des Injektors zu gewährleisten, muss sichergestellt werden, dass die Spannungsverteilung der simulierten Strukturen der in der Strahldynamik angenommenen entspricht. Daher wurde während der HF-Simulationen darauf geachtet, dass sich die simulierten prozentualen Spannungen nur unwesentlich von denen der Strahldynamiksimulationen unterscheiden. Als maximale Abweichung werden üblicherweise 5 % pro Spalt angegeben, wobei die Abweichungen, zwischen den HF-Simulationen und den Werten aus der Strahldynamiksimulation unter 1,5 % bleiben, wie in Tabelle 5.4 zu sehen ist, was als sehr gutes Ergebnis zu werten ist. Abschließend sind in Tabelle 5.5 die wichtigsten Werte der HF-Simulationen von CH1-7 zusammengefasst. Die für die simulierten Shuntimpedanzen $Z_{a,sim}$ benötigten effektive Längen L_{eff} wurde nach der $\frac{\beta\lambda}{2}$ -Definition aus Gleichung 3.60 berechnet.

5.1 HF-Optimierung des MYRRHA-CH-Designs

	Gap 1	Gap 2	Gap 3	Gap 4	Gap 5	Gap 6	Gap 7	Gap 8	Gap 9
CH1									
aus DD	24,9 %	49,2 %	26,1 %						
aus CST	26,1 %	48,0 %	25,9 %						
CH2									
aus DD	17,3 %	32,7 %	33,4 %	16,5 %					
aus CST	16,5 %	33,2 %	33,4 %	17,0 %					
CH3									
aus DD	11,6 %	25,0 %	27,2 %	24,9 %	11,3 %				
aus CST	11,6 %	24,7 %	27,7 %	24,8 %	11,3 %				
CH4									
aus DD	8,4 %	19,0 %	22,7 %	22,8 %	18,9 %	8,2 %			
aus CST	8,5 %	18,9 %	22,9 %	22,9 %	18,8 %	8,0 %			
CH5									
aus DD	6,8 %	14,8 %	18,2 %	21,2 %	18,2 %	14,8 %	6,0 %		
aus CST	6,4 %	15,0 %	19,0 %	20,4 %	18,8 %	14,5 %	6,0 %		
CH6									
aus DD	4,1 %	9,6 %	14,3 %	15,7 %	15,9 %	15,0 %	12,9 %	8,9 %	3,7 %
aus CST	4,2 %	10,1 %	13,6 %	15,6 %	16,2 %	15,1 %	12,6 %	9,1 %	3,6 %
CH7									
aus DD	3,8 %	9,9 %	13,7 %	14,6 %	16,4 %	16,3 %	12,8 %	8,8 %	3,7 %
aus CST	4,0 %	9,9 %	13,5 %	15,7 %	16,3 %	15,3 %	12,7 %	9,0 %	3,6 %

Tabelle 5.4: Vergleich der Spannungsverteilungen aus der Strahldynamiksimulation (DD) und den simulierten Modellen der MYRRHA-CH-Kavitäten (CST).

5.1 HF-Optimierung des MYRRHA-CH-Designs

	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7
R_{innen} in mm	382,55	351,72	332,66	323,59	320,71	318,53	325,03
L_{eff} in mm	148,73	213,17	292,08	389,20	506,48	732,14	814,36
L_{Einbau} in mm	373,89	436,49	512,84	606,74	720,30	941,46	1019,30
$Q_{0,\text{sim}}$	13020	13540	15130	15820	16600	17270	17520
$Z_{a,\text{sim}}$ in $M\Omega/\text{m}$	55,27	69,48	71,04	72,96	74,62	73,64	69,95
$P_{c,\text{sim}}$ in kW	6,10	8,75	12,83	15,33	18,06	24,11	21,61
$P_{c,\text{sim}}/L_{\text{Einbau}}$ in kW/m	16,31	20,05	25,02	25,27	25,07	25,61	21,20

Tabelle 5.5: Zusammenstellung der Ergebnisse der HF-Parameter der Simulationen der MYRRHA-CHs 1-7.

5.2 Kühlkonzept des MYRRHA-CH-Designs

Wie bereits in früheren Abschnitten beschrieben, führt eine Erwärmung der Kavität zu thermischen Ausdehnungen, welche sich auf die HF-Eigenschaften auswirken. Im einfachsten Fall äußern sich diese durch eine Verschiebung der Frequenz, welche durch den dynamischen Tauchkolben ausgeglichen werden muss. Um aber diese Effekte so gering wie möglich zu halten und dadurch eine hohe Zuverlässigkeit, wie sie für den Betrieb des MYRRHA-Reaktors notwendig ist (hier ein Zitat einfügen), gewährleisten zu können, müssen die CH-Kavitäten mit einem effektiven Kühllayout ausgestattet werden.

Die Verlustleistungen $P_{c,sim}$, die von den jeweiligen Kühlungen abgeführt werden müssen wurden bereits in Abschnitt 5.1.3 simuliert und in Tabelle 5.5 dargestellt. Wobei es sich bei diesen Werten um die reinen Simulationenwerte handelt. Da sich die später gebauten Kavitäten jedoch von den Simulationsmodellen hinsichtlich ihrer Effektivität unterscheiden, ist es sinnvoll, davon auszugehen, dass sich in der Realität nur 90 % der simulierten Güte $Q_{0,sim}$ und Shuntimpedanz $Z_{a,sim}$ erzielen lassen, wodurch sich auch die zu erwartende Verlustleistung P_c erhöht. In Tabelle 5.6 befinden sich diese 90 %-Werte für die MYRRHA-CHs 1-7.

	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7
$Q_{0,sim,0,9}$	11720	12190	13620	14240	14940	15540	15770
$Z_{a,sim,0,9}$ in $M\Omega/m$	49,74	62,53	63,94	65,66	67,16	66,28	62,96
$P_{c,sim,0,9}$ in kW	6,78	9,72	14,26	17,03	20,07	26,79	24,01
$P_{c,sim,0,9}/L_{Einbau}$ in kW/m	18,12	22,28	27,80	28,08	27,86	28,46	23,56

Tabelle 5.6: Zusammenstellung der erwarteten HF-Parameter der Simulationen der MYRRHA-CHs 1-7 unter der Annahme, dass sie 90 % der Effizienz der Simulationsmodell erreichen.

Darüber hinaus ist es für die Dimensionierung und Positionierung der einzelnen Kühlkanäle wichtig, an welchen Bauteilen wie viel Leistung abfällt. Hierfür sind in Tabelle 5.7 sowohl die prozentualen als auch die absoluten Verluste pro Bauteil angegeben, wobei die absoluten Verluste mit den 90 %-Werten ermittelt wurden. Die Nummerierung der Deckel und der Stützen erfolgt in Strahlrichtung. Bei Betrachtung von CH1 ist zu bemerken, dass Tuner 1 der dynamische Tuner ist, welcher sich bei dieser Kavität näher an der Strahlachse befindet, was sich allerdings nicht an der Menge der dissipierten Leistung bemerkbar macht. Bei genauerer Betrachtung der Tabelle lassen sich mehrere Verläufe herauslesen, die sich aus der Form der angeregten Mode und den Geometrien der Kavitäten erklären lassen:

- Die an den Deckeln anfallende Leistung fällt mit Nummer der Kavität, da sich die Deckel mit zunehmender Länge der Kavität immer weiter vom Maximum des sich

longitudinal ausbildenden sinusförmigen Feldverlaufs der angeregten TE_{211} -Mode entfernen.

- Die Verlustleistungen an Deckel 1 sind höher, als an Deckel 2, da die Spaltabstände sich der steigenden Energie der Teilchen anpassen, wodurch die Kapazität zwischen letzter Driftröhre und Deckel 2 geringer ist, als zwischen Deckel 1 und der ersten Driftröhre. Das gleiche gilt für die jeweils erste und letzte Stütze usw.

5.2.1 Vorbemerkungen zu den Thermosimulationen

Die in den nachfolgenden Abschnitten gezeigten Thermosimulationen wurden mit CST Studio Suite [52] erstellt. Bei diesen Simulationen werden die Kühlkanäle als Oberflächen mit einer konstanten Temperatur angenähert. Das Kühlwasser selbst erwärmt sich also durch das Abführen der Verlustleistung nicht. Auch die Fließeigenschaften, wie z.B. Fließgeschwindigkeit oder Verwirbelungen werden nicht berücksichtigt. Diese Näherung ist nur dann zu vertreten, wenn die Kühlkanäle entweder in Bauteilen verbaut werden, in denen mit keiner großen Erwärmung zu rechnen ist (z.B. an den Deckeln, an denen laut Tabelle 5.7 maximal 0,63 kW anfallen), oder wenn gewährleistet ist, dass die Kühlkanäle mit einer hohen Durchflussmenge an Kühlwasser versorgt werden können. Prinzipiell wird das Kühlsystem der MYRRHA-CHs mit der Vorgabe ausgelegt, dass alle Kanäle zunächst parallel geschaltet werden und erst nach Inbetriebnahme der Kavität eine Reihenschaltung einzelner Kühlkanäle in Frage kommt. Um diese Näherung zusätzlich zu kompensieren, wird die Temperatur des Kühlwassers auf 293 K oder 19,85 °C gesetzt, was ca. 2 °C über der tatsächlich verwendeten Kühlwassertemperatur liegt. Die Umgebungstemperatur wird auf den gleichen Wert gesetzt.

Die für die Thermosimulationen benötigten HF-Feldverteilungen werden aus den HF-Simulationen importiert, wobei bedacht werden muss, dass die Feldpegel und dadurch auch die Verlustleistungen in der Simulation wesentlich höher liegen, als sie in der Realität später vorherrschen. Daher erfolgt der Import der Feldverteilungen in die Thermosimulation über einen Skalierungsfaktor, der aus dem Verhältnis der „realen“ Verlustleistungen (zum Beispiel den 90 %-Werten aus Tabelle 5.6) und den Verlusten der Eigenmode-Simulation errechnet wird und mit jeder Änderung der Resonatorgeometrie neu bestimmt werden muss.

Es werden zwei verschiedene Verlustleistungen für die Thermosimulationen verwendet. Hierbei werden die bereits erwähnten 90 %-Werte aus Tabelle 5.6 benutzt, die im Folgenden als „erwartete“ Verlustleistungen $P_{c,erw}$ bezeichnet werden und eine „120 %-Variante, die mit $P_{c,120}$ bezeichnet wird und bei der die erwarteten Verlustleistungen um 20 % erhöht wurden, wobei die zusätzliche Leistung als Sicherheitsmarge dient.

Das Ziel des neuen Kühlkonzzeptes des MYRRHA-CH-Designs ist, dass der Großteil der Resonatoroberfläche bei Simulationen, die mit $P_{c,120}$ durchgeführt werden deutlich unter 70 °C bleibt und nur vereinzelte Hotspots existieren, die zwar darüber liegen dürfen, aber eine Temperatur von 100 °C nicht überschreiten sollen.

5.2 Kühlkonzzept des MYRRHA-CH-Designs

		CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7
Tank	in %	15,5	18,8	22,2	25,4	27,3	30,2	29,4
	in kW	1,05	1,83	3,17	4,33	5,48	8,09	6,93
Deckel 1	in %	7,3	6,0	4,4	3,0	1,9	1,0	0,7
	in kW	0,50	0,57	0,63	0,51	0,39	0,27	0,18
Deckel 2	in %	7,0	5,6	3,9	2,5	1,5	0,6	0,5
	in kW	0,47	0,54	0,55	0,42	0,30	0,17	0,12
Tuner 1	in %	0,8	1,9	2,7	3,1	3,1	2,8	2,5
	in kW	0,05	0,18	0,38	0,52	0,62	0,74	0,58
Tuner 2	in %	0,8	1,9	2,7	3,1	3,1	2,8	2,5
	in kW	0,05	0,18	0,38	0,53	0,62	0,75	0,58
Stütze 1	in %	34,7	20,5	12,8	8,6	5,9	3,3	3,0
	in kW	2,35	1,99	1,83	1,46	1,18	0,89	0,70
Stütze 2	in %	33,9	25,4	19,7	14,7	11,4	7,13	6,9
	in kW	2,30	2,47	2,81	2,50	2,29	1,91	1,62
Stütze 3	in %		19,9	19,6	17,5	14,6	10,3	10,1
	in kW		1,93	2,79	2,98	2,93	2,76	2,39
Stütze 4	in %			11,9	14,2	14,8	12,3	12,7
	in kW			1,70	2,42	2,97	3,30	2,92
Stütze 5	in %				7,7	10,5	12,3	12,7
	in kW				1,32	2,11	3,30	2,99
Stütze 6	in %					5,6	8,9	10,05
	in kW					1,12	2,38	2,37
Stütze 7	in %						5,7	6,3
	in kW						1,54	1,48
Stütze 8	in %						2,4	2,5
	in kW						0,63	0,59

Tabelle 5.7: Vergleich der Spannungsverteilungen aus der Strahldynamiksimulation (DD) und den simulierten Modellen der MYRRHA-CH-Kavitäten (CST).

5.2.2 Auswirkungen des Resonatormaterials auf die Temperaturverteilung

Die MYRRHA-CHs werden aus Edelstahl gefertigt, und anschließend werden die inneren Oberflächen mit einer Schichtdicke von mindestens $50\ \mu\text{m}$ galvanisch verkupfert. Wie in Abschnitt 3.5.2 erklärt wurde, fallen die ohmschen Verluste nur innerhalb der Skintiefe an, in welcher die Oberflächenströme fließen. Für die Auslegung der Kühlung bedeutet das, dass zwar die Wärmeerzeugung innerhalb des Kupfers geschieht, der Wärmetransport zu den Kühlkanälen hin jedoch im Stahl. Die für die CHs vorgesehene Stahlsorte „1.4301“ verfügt wie in Tabelle 5.8 dargestellt mit $15\ \text{W/Km}$ über eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zu anderen Metallen und besonders zu Kupfer, aus welchem beispielsweise die thermisch belasteten Bauteile des MYRRHA-RFQs bestehen.

	spez. Wärmekapazität in J/kgK	Wärmeleitfähigkeit in W/Km
Edelstahl 1.4301 [64]	500	15
Stahl unlegiert [65]	490	48 - 58
Gusseisen [65]	500	58
Kupfer [65]	390	384
Silber [65]	230	407

Tabelle 5.8: Simulierte Arbeitspunkte (WP), Tunerhübe und Tuningbereiche der MYRRHA-CHs 1-7, wobei atsa den Abstand zwischen dem dynamischen Tuner und der Strahlachse bezeichnet.

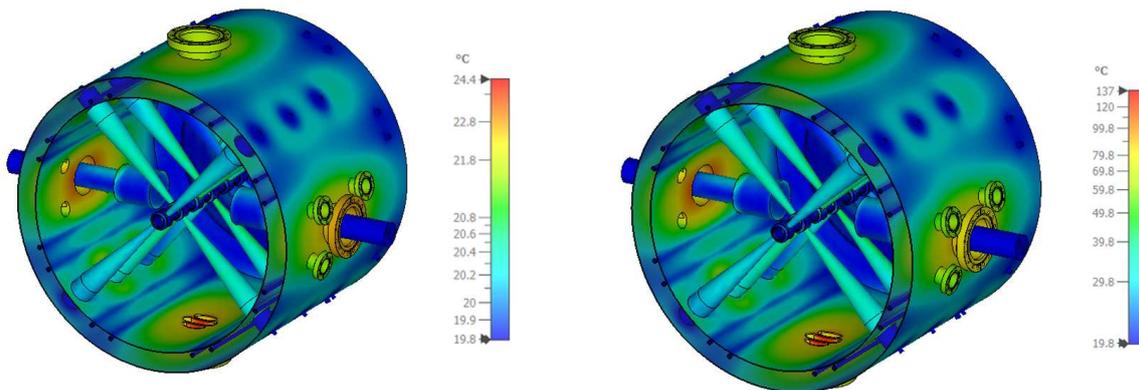


Abbildung 5.17: Simulierte Temperaturverteilung in zwei geometrisch identischen Kavitäten, aber aus unterschiedlichem Material (links = Kupfer, rechts = Edelstahl 1.4301).

Wie groß die Auswirkungen des Resonatormaterials auf die Temperaturen ist, zeigt Abbildung 5.17, in der die Temperaturverteilungen zweier geometrisch identischer Kavitäten einmal aus Kupfer (links) und einmal aus Edelstahl 1.4301 (rechts) dargestellt sind.

Auf den ersten Blick erscheinen die beiden Bilder nahezu identisch, was daran liegt, dass sich die heißesten Stellen innerhalb der Kavität bei Wärmeleitfähigkeiten > 0 an den gleichen Positionen ausbilden. Aber die beiden unterschiedlichen Temperaturskalen zeigen, dass sich die entstandenen Temperaturgradienten innerhalb des Materials sehr wohl unterscheiden. So befindet sich zwar bei beiden Simulationen die heißeste Stelle am Vakuumgitter, aber während sich dort bei der Kupfervariante eine Temperatur von $24,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ einstellt, was einer Erwärmung von $4,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ gegenüber der Kühlwasser- und Umgebungstemperatur von $19,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ entspricht, beträgt die Temperatur bei der Stahlvariante 137 ° , also eine Erwärmung von $117,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ gegenüber der simulierten Kühlwasser- und Umgebungstemperatur.

Da die Wahl des verwendeten Materials die thermischen Eigenschaften der Resonatoren sehr stark beeinflusst, wird ab hier für die nachfolgenden Simulationen, sofern nicht anders vermerkt, festgelegt, dass die Kavitäten aus Edelstahl 1.4301 gefertigt sind.

5.2.3 Layout der Kühlung der MYRRHA-CHs

Als Vorlage für das Design des Kühllayouts dient das Kühlkonzept der FRANZ-CH, welches in [62] genauer erklärt und in Abbildung 5.18 dargestellt ist. Allerdings muss beachtet werden, dass dieses Kühlkonzept für eine Verlustleistung P_c von 5 kW [62] bei einer Einbaulänge¹ von 462,47 mm konzipiert wurde, was einer Längenleistungsdichte $P_{c,erw}/L_{Einbau}$ von 10,81 kW/m entspricht. Da dieser Wert signifikant unter den zu erwartenden Längenleistungsdichten der MYRRHA-CHs von 18,12 - 28,46 kW/m liegt (vgl. Tabelle 5.6) ist eine Überarbeitung der FRANZ-Kühlung für die MYRRHA-Kavitäten notwendig.

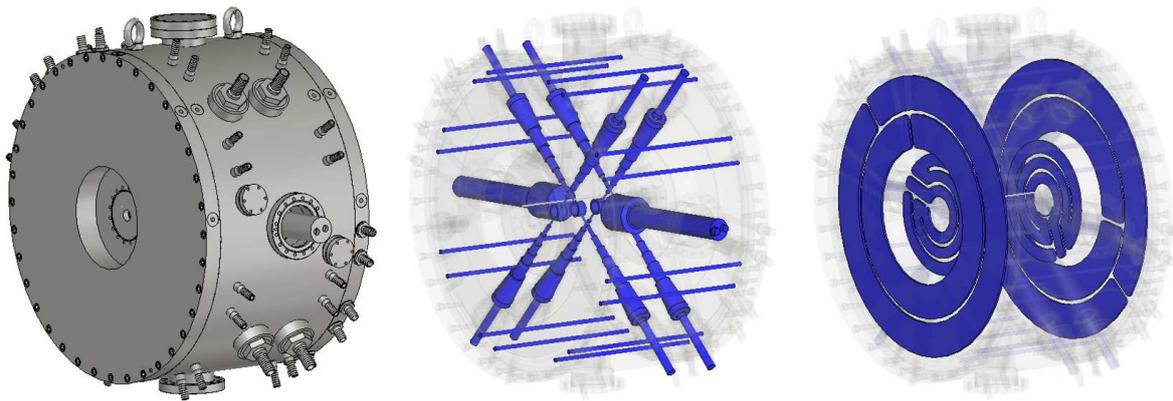


Abbildung 5.18: Abbildung des FRANZ-CH .stp-Modells (links) und dessen Kühlkanälen (mitte: Kühlung des Tanks, der Stützen und der Tuner; rechts: Kühlung der beiden Deckel).

5.2.4 Kühlung der Deckel

Die Kühlung der Deckel im FRANZ-CH-Design besteht, wie in Abbildung 5.18 dargestellt aus drei Kühlkanälen je Deckel, von denen sich der Innerste in der zylinderförmigen Vertiefung befindet, wodurch beinahe die gesamte Oberfläche gleichmäßig gekühlt werden kann.

Da die Deckel der MYRRHA-CHs anstatt einer zylinderförmigen über eine konische Vertiefung verfügen, wie es in Abbildung 5.1 dargestellt ist, sind die breiten Kühlkanäle der FRANZ-CH nur schwer technisch zu realisieren. Außerdem zeigte sich bereits während der Konditionierung der FRANZ-CH, die in [66] beschrieben ist, dass eine Aufteilung der Deckelkühlung in drei separate Kanäle nicht notwendig ist, weswegen diese in Reihe geschaltet werden konnten. Zusätzlich zeigt Tabelle 5.7, dass der maximale Leistungsabfall auf einem MYRRHA-Deckel 0,63 kW beträgt, was den Einsatz von kleineren Kühlkanälen rechtfertigt. Aus diesen Gründen wurde das in Abbildung 5.19 dargestellte neues

¹ Die Einbaulänge der FRANZ-CH wurde anhand des .stp-Modells bestimmt und diese Länge an der echten Kavität verifiziert.



Abbildung 5.19: Abbildung des MYRRHA-CH5-Simulationsmodells (links) und den neuen Kühlkanälen in den Deckeln (rechts).

Kühllayout für die Deckel entwickelt. Dieses besteht aus mehreren zirkularen Bahnen innerhalb des Deckels, die zu einem einzigen Kanal verbunden sind.

Die Art der technischen Realisierung der Deckel soll den jeweiligen Herstellern überlassen werden.

5.2.5 Kühlung der Stützen

Idealerweise sind die Stützen samt der Driftröhren hohl. D.h. dass der Kühlkanal, wie in Abbildung 5.20 oben dargestellt mit einer gleichmäßigen Wandstärke durch die gesamte Stütze samt Driftröhre verläuft.



Abbildung 5.20: Vergleich der konischen Kühlung (oben) mit der schrittweise kleiner werdenden Kühlung einer CH-Stütze.

In der Realität ist eine solche konische Bohrung durch die Stützen mit großem technischem Aufwand verbunden, was die Baukosten signifikant erhöht, weswegen bei den

bisher gebauten CH-Strukturen (FRANZ-CH, MYRRHA-CH1 und MYRRHA-CH2) die Bohrungen schrittweise mit kleiner werdenden Bohrköpfen durchgeführt wurden, wie es in Abbildung 5.20 unten dargestellt ist.

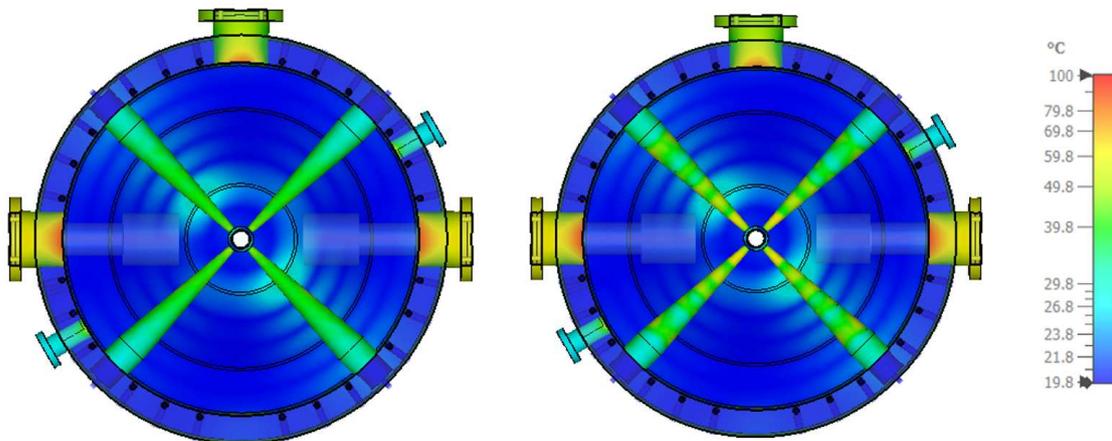


Abbildung 5.21: Vergleich der Temperaturverteilung auf den Stützen simuliert MYRRHA-CH6 mit $P_{c,120}$. Links: konische Stützenkühlung. Rechts: abgestufte Stützenkühlung.

Da diese Stufen in der Kühlung dafür sorgen, dass die Wandstärke stellenweise dicker ist, als bei einer konischen Kühlung, stellt sich eine wesentlich inhomogenere Temperaturverteilung entlang der Stütze mit stellenweise höheren Temperaturen ein, wie in Abbildung 5.21 zu sehen ist. Die dort dargestellten Simulationen wurden an CH6 durchgeführt, weil unter den ersten sieben CH-Strukturen, des MYRRHA-Injektors, die im Rahmen dieser Arbeit genauer betrachtet werden, die vierte und fünfte Stütze von CH6 diejenigen sind, an denen mit 3,30 kW die meiste Leistung abfällt. Abbildung 5.21 gibt einen Blick auf genau jene Stützen, wobei mit den 120 %-Verlustleistungen simuliert wurde, wodurch nicht 3,30 sondern 3,96 kW an besagten Stützen abfallen, während die Kühlwasser und Umgebungstemperatur 19,8 °C beträgt.

In der rechts dargestellten Simulation mit abgestufter Kühlung sind mehrere wärmere Ringe um die Stütze zu erkennen, an denen jeweils eine neue Bohrung mit kleinerem Radius beginnt, wodurch der Stahl an dieser Stelle dicker wird. Besonders auffällig ist dies am schmalsten Stück der Stütze, der direkt an die Driftröhre anschließt. An dieser Stelle ist die Temperatur im Gegensatz zur konischen Kühlung um ca. 10 °C erhöht. Allerdings muss beachtet werden, dass hier zum einen mit 20 % mehr Leistung simuliert wurde, und dass es sich zum anderen um die beiden Stützen handelt, die mit Abstand am meisten Leistung abführen müssen. Unter diesen Bedingungen ist eine Erwärmung um maximal 40 °C gegenüber der Ursprungstemperatur und um ca. 10 °C gegenüber dem konischen Kühlungsdesign vertretbar.

5.2.6 Kühlung des Tanks

Für die Kühlung der Tanks der CH-Kavitäten werden longitudinale Bohrungen in den Tank eingebracht, deren Enden anschließend wieder zugeschweißt werden. Der Zu- und Ablauf des Wassers erfolgt über radiale Bohrungen, die mit 3/8"-Gewinden versehen sind. Um die richtige Anzahl der benötigten Kanäle und deren radiale Verteilung zu ermitteln,

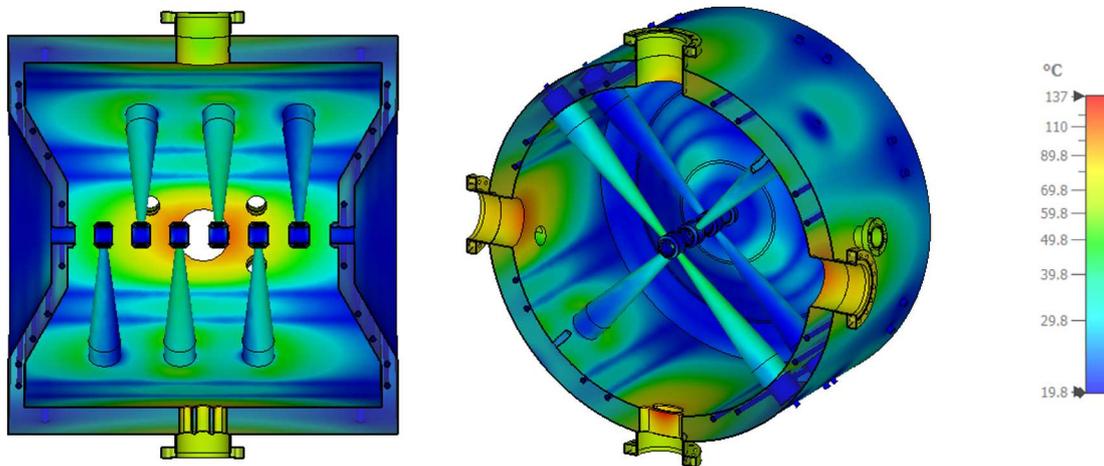


Abbildung 5.22: Thermosimulation der MYRRHA-CH5 mit der Tankkühlung der FRANZ-CH und $P_{c,120}$.

wurde zunächst das Layout der FRANZ-CH-Kühlung verwendet. Dieses besteht aus 16 Kühlkanälen mit einem Durchmesser von je 10 mm. Eine Simulation mit diesem Layout integriert in MYRRHA-CH5 zeigt Abbildung 5.22, wobei mit der 120 %-Verlustleistung simuliert wurde. Aufgrund der dort deutlich dargestellten thermischen Inhomogenitäten entlang der Tankoberfläche und der starken Erwärmungen im Bereich um die Flansche und um die Stützen, wurde ein neues Layout der Tankkühlung für die MYRRHA-CHs entwickelt.

Für das neue Kühldesign wurde die Anzahl der Kühlkanäle von 16 auf 24 erhöht. Zusätzlich wurde deren Winkelverteilung mehrfach angepasst, in dessen Zuge auch die radiale Position der DN40cf-Flansche versetzt wurde. Auf diese Weise konnten die Kühlkanäle näher an den Stützen und den Flanschen positioniert werden, was eine homogene Temperaturverteilung auf der Tankoberfläche begünstigt. So konnte der Winkelabstand zwischen den Kühlkanälen und der Mitte der DN100cf-Flansche von 20° beim FRANZ-Design auf 13° beim MYRRHA-Design verringert werden und der Abstand zwischen Kühlkanal und Mitte der Stütze von 15° auf 9° . Eine Übersicht der radialen Verteilung der Kühlkanäle im ursprünglichen FRANZ- und dem neuen MYRRHA-Tankkühlungsdesign zeigt Abbildung 5.23, wobei jeweils in den .stp-Modellen² der FRANZ-CH und von

² Das .stp-Modell der FRANZ-CH wurde von der Firma NTG [55] und das .stp-Modell von MYRRHA-CH2 von der Firma PINK [67] zur Verfügung gestellt.

5.2 Kühlkonzept des MYRRHA-CH-Designs

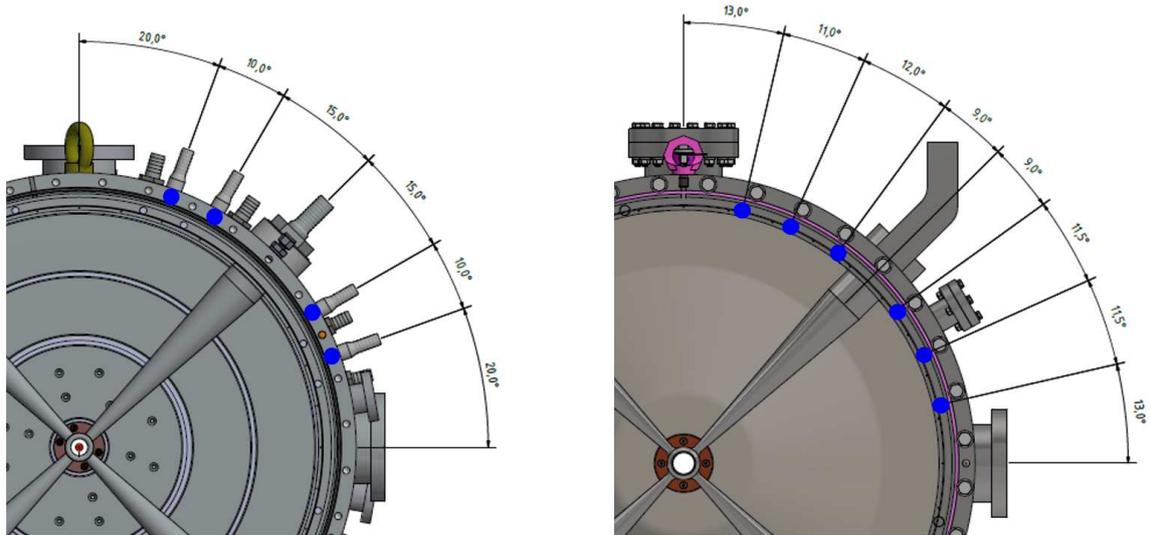


Abbildung 5.23: Vergleich der Winkelverteilungen der Kühlkanäle im Tank bei der FRANZ-CH (links) und bei den MYRRHA-CHs (rechts). Die Positionen der Kühlkanäle wurden zur besseren Übersicht mit blauen Punkten markiert.

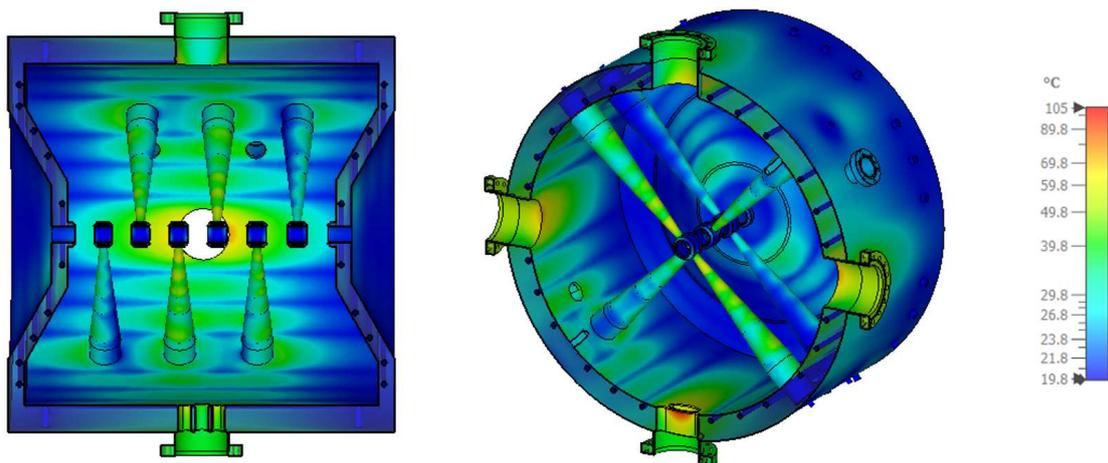


Abbildung 5.24: Thermosimulation der MYRRHA-CH5 mit der neu entwickelten Tankkühlung und $P_{C,120}$.

MYRRHA-CH2 die Kühlkanäle blau markiert und markante Winkelangaben ergänzt wurden.

Die Vorzüge der neuen Tankkühlung zeigen sich in Abbildung 5.24, wo eine Thermosimulation von CH5 mit der neuen Tankkühlung dargestellt ist. Diese zeigt im Vergleich mit der in Abbildung 5.22 gezeigten Simulation mit der FRANZ-Tankkühlung eine deutlich homogenere Temperaturverteilung und eine um mehr als 30 °C reduzierte Maximaltemperatur, wobei die simulierte Verlustleistung in beiden Simulationen identisch ist.

5.2.7 Kühlung der Tauchkolben

Sowohl die dynamischen, als auch die statischen Tauchkolben werden aus 5 mm dickem Stahl gefertigt und anschließend verkupfert. Durch diese Konstruktionsweise sind sie zum einen sehr leicht, was die Montage an der Kavität erleichtert, und zum anderen sind sie im Betrieb komplett mit Kühlwasser gefüllt, wodurch eine weitere Optimierung der Kühlung der Tauchkolben nicht mehr notwendig ist. Wie in Abbildung 5.25 rechts dargestellt ist, befindet sich in den Tauchkolben eine lange Kühlwasserzuleitung, die eine gleichmäßige Verteilung des Kühlwassers gewährleistet.



Abbildung 5.25: .stp-Modell eines Tauchkolbens (links) und Schnittansicht mit Blick auf dessen innenliegende Kühlwasserzuleitung (rechts).

5.3 Thermosimulationen an den MYRRHA-CHs

Das in den Abschnitten 5.2.4 bis 5.2.7 erstellte Kühlkonzept A wurde in die Simulationsmodelle der MYRRHA-CHs eingebaut und anschließend wurden Thermosimulationen sowohl mit $P_{c,erw}$, als auch mit $P_{c,120}$ durchgeführt.

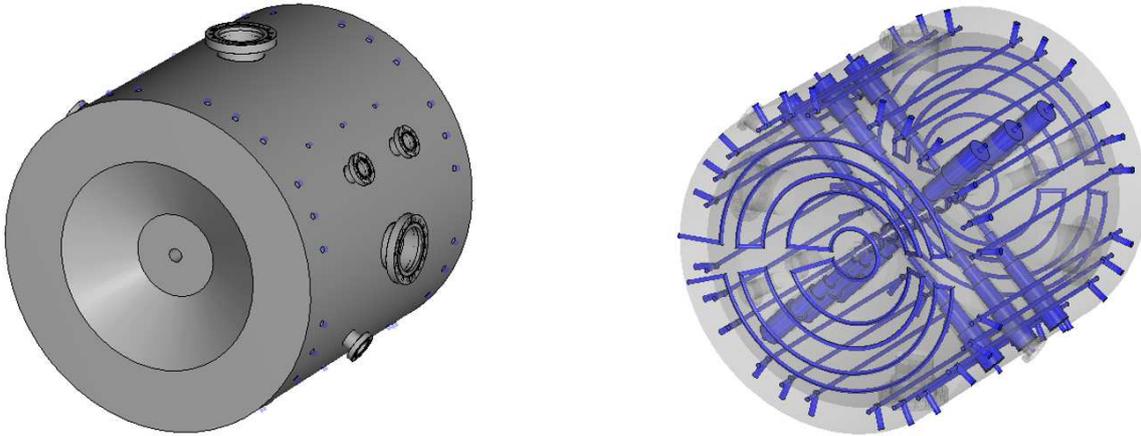


Abbildung 5.26: Simulationsmodell von CH5 (links) und die darin eingebauten Kühlkanäle nach Kühlkonzept A (rechts). In beiden Bildern wurden die Tauchkolben und deren Kühlungen zur besseren Übersicht unsichtbar.

	$T_{\max,erw}$ in °C	$T_{\max,120}$ in °C
CH1	41,1	45,4
CH2	46	51,2
CH3	52,4	58,9
CH4	71,8	82,2
CH5	90,4	105
CH6	113	131
CH7	97,2	113

Tabelle 5.9: Simulierte Maximaltemperaturen mit Kühlkonzept A. Simuliert mit den Verlustleistungen $P_{c,erw}$ und $P_{c,120}$.

Die hierbei erhaltenen Maximaltemperaturen, die in Tabelle 5.9 zusammengestellt sind zeigen, dass nur bei den CHs 1-4 die Kriterien aus Abschnitt 5.2.1 erfüllt sind,

5.3 Thermosimulationen an den MYRRHA-CHs

nach denen die Maximaltemperaturen auch bei den Simulationen mit den erhöhten Verlustleistungen nicht über 100 °C steigen sollen. Hierbei lassen sich die Kavitäten in drei Gruppen einteilen:

- Gruppe 1 CHs 1-3: Bei diesen Kavitäten befinden sich die Hotspots an den dünnsten Stellen der Stützenkühlung, während jeweils die restliche Kavität in geringerem Maße relativ gleichmäßig erwärmt wird.
- Gruppe 2 CH4: Bei CH4 ist die heißeste Stelle ein kleiner Bereich am Vakuulgitter mit 82,2 °C, wobei diese Temperatur mit 120 % Leistung bestimmt wurde. Mit der erwarteten Leistung aus Tabelle 5.6 liegt dieser Maximalwert bei 71,8 °C. Da dieser Bereich räumlich sehr begrenzt ist und sich die restliche Oberfläche auch mit der 120 %-Verlustleistung in einem Temperaturbereich von deutlich unter 60 °C befindet, ist diese Temperaturverteilung noch vertretbar.
- Gruppe 3 CHs 5-7: Bei diesen Kavitäten liegen die Hotspots ebenfalls, wie in Abbildung 5.27 am Beispiel von CH6 dargestellt, am Vakuulgitter. Die simulierten Maximaltemperaturen, die von 90,4 bis 131 °C reichen sind nicht mehr vertretbar. Da aber bei genauer Betrachtung der Temperaturverteilungen ersichtlich ist, dass die Temperaturen der Kavität an sich im vertretbaren Bereich liegen und sich nur Teile des Vakuulgitters übermäßig erwärmen, scheint das erstellte Kühlsystem an sich ausreichend, während lediglich das Vakuulgitter überarbeitet werden muss.

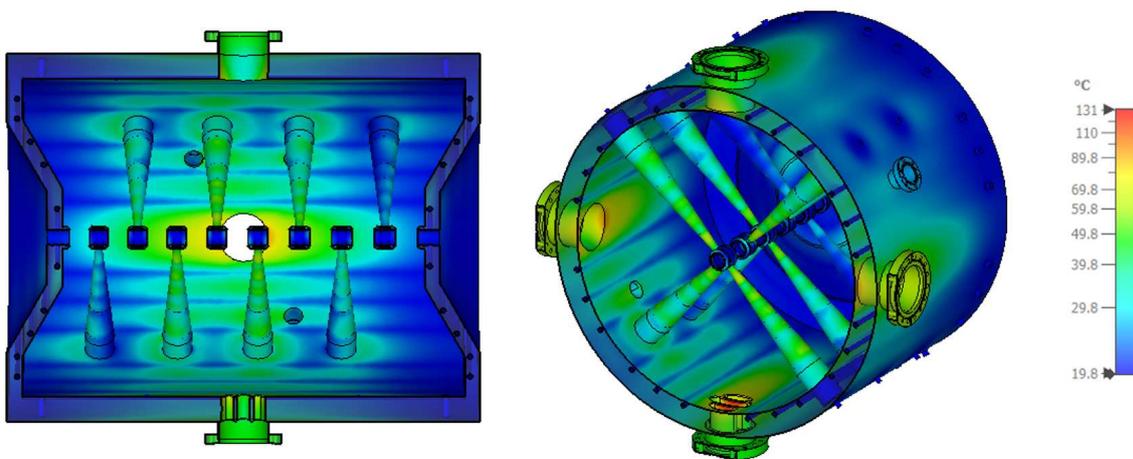


Abbildung 5.27: Thermosimulation der MYRRHA-CH6 mit neuem Kühlkonzept. Simuliert mit 120 % Verlustleistung.

5.3.1 Anpassung des Kühlkonzeptes bei CH5-7

Der Grund für die verhältnismäßig starke Erwärmung des Vakuulgitters bei den CHs 5-7 setzt sich aus dessen Form, Material und Position zusammen. Die Balken des bisher verwendeten Vakuulgitters, wie es in Abbildung 5.28 zu sehen ist, sind mit 7 mm an ihrer schmalsten Stelle sehr dünn, was das Auftreten höherer Temperaturen begünstigt. Gleichzeitig erschwert der geringe Querschnitt der Balken den Wärmetransport zur restlichen Kavität. Das Vakuumgitter ist kein separates Bauteil, sondern wird aus dem Tankmaterial herausgefräst. Der Flanschstutzen, der in den Abbildungen 5.28 und 5.32 zu sehen ist, wird nach dem Fräsvorgang von außen aufgeschweißt. Wie auch der Rest der Kavität besteht das Vakuumgitter aus Edelstahl 1.4301, mit verkupfelter Oberfläche. Wie in Abschnitt 5.2.2 bereits erläutert wurde und in Tabelle 5.8 dargestellt ist, besitzt dieses Material eine vergleichsweise schlechte Wärmeleitfähigkeit, wodurch der Wärmetransport hin zu den Kühlkanälen erschwert wird und sich eine höhere Maximaltemperatur einstellt.

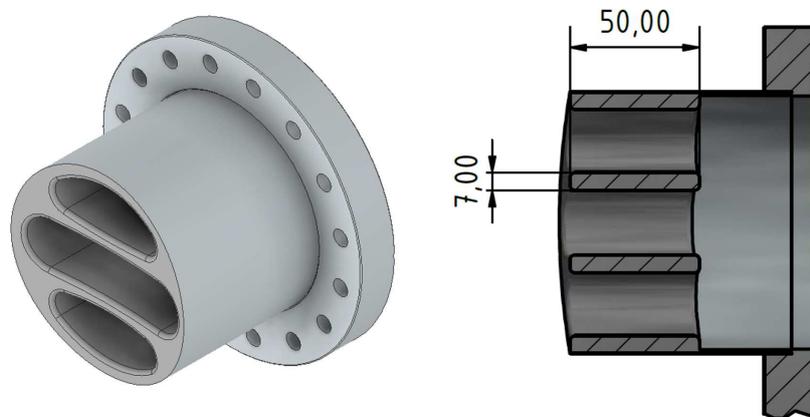


Abbildung 5.28: Darstellung des bislang verwendeten dreikammrigen Vakuulgitters, bei dem der restliche Tank für die bessere Sichtbarkeit entfernt wurde. Die beiden Balken sind an ihrer dünnsten Stelle 7 mm stark, was die übermäßig starke Erwärmung der Balken bei den CHs 5-7 begünstigt.

Die Position des Vakuulgitters beeinflusst ebenfalls dessen Temperatur. Die Längenleistungsdichte, die sich aus der gesamten Verlustleistung der Kavität und z.B. der Einbaulänge oder der effektiven Länge der Kavität bestimmen lässt, erweckt den Eindruck, dass sich die ohmschen Verluste gleichmäßig auf die Länge der Kavität verteilen. Da die Verteilung der ohmschen Verluste aber proportional zum magnetischen Feld ist, existieren aufgrund der angeregten TE_{211} Mode Maxima auf halber Länge der Kavität an den Positionen, an denen sich die DN100cf-Flansche - also auch das Vakuumgitter - befinden. Abbildung 5.29 zeigt das Modell einer CH-Kavität und die simulierten Oberflächenstromdichten einer leeren Pillbox-Kavität, die in der TE_{211} -Mode angeregt ist. Wie deutlich zu erkennen ist, befinden sich die Maxima der Oberflächenstromdichten und damit die Stellen mit den verhältnismäßig größten ohmschen Verlusten an den Positionen, an denen sich die DN100cf-Flansche befinden. Ebenso erkennen lässt sich dieser Umstand, wenn man sich die longitudinalen Spannungsverteilungen der MYRRHA-CHs

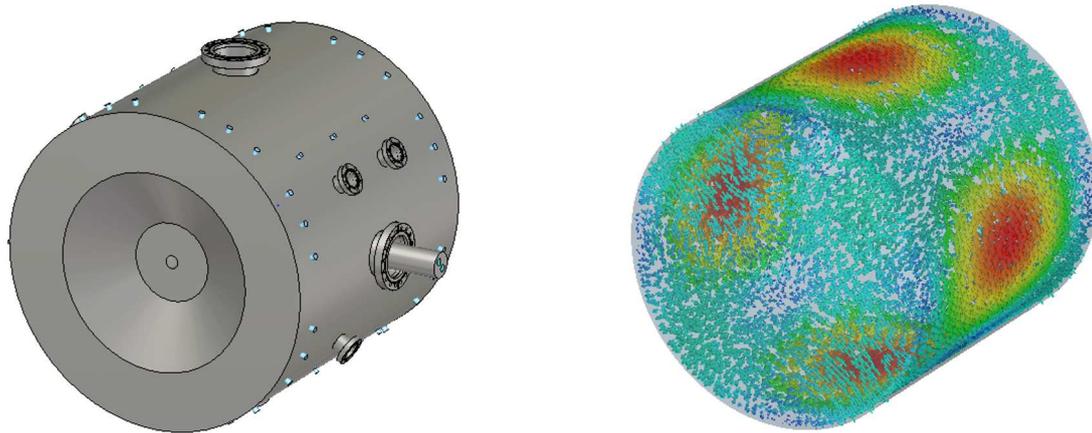


Abbildung 5.29: Simulationsmodell von CH5 (links) und die Oberflächenströme einer leeren Pillboxkavität, die in der TE_{111} -Mode schwingt (rechts).

betrachtet, die ebenfalls in der longitudinalen Mitte ein Maximum aufweisen. Da das Material, aus dem die CHs und damit auch deren Vakuulgitter gefertigt werden, bereits festgelegt ist, kann entweder dessen Form, oder dessen Position innerhalb der Kavität verändert werden, um eine übermäßige Erwärmung zu verhindern, was in den nachfolgenden Unterkapiteln einzeln besprochen wird.

Versatz des Vakuulgitters

Wenn das Vakuulgitter longitudinal versetzt wird, verlässt es den Bereich mit den verhältnismäßig größten ohmschen Verlusten, wodurch es sich deutlich weniger erwärmen sollte. Um dies zu überprüfen, wurde in den Simulationsmodellen der CHs 5-7 die Position des Vakuulgitters und des dazugehörigen DN100cf-Flansches longitudinal um $1/6$ der Tankinnenlänge versetzt, wie es in Abbildung 5.30 dargestellt ist.

Bei den anschließenden Thermosimulationen konnten deutlich verringerte Maximaltem-

	$T_{\max, \text{erw}}$ in °C	$\Delta T_{\max, \text{erw}}$ zu Tabelle 5.9 in °C	$T_{\max, 120}$ in °C	$\Delta T_{\max, 120}$ zu Tabelle 5.9 in °C
CH5	74,6	-15,8	85,5	-19,5
CH6	86,8	-26,2	100	-31
CH7	76,8	-20,4	88,2	-24,8

Tabelle 5.10: Simulierte Maximaltemperaturen mit dem neuen Kühlkonzept und verschobenem Vakuulgitter. Simuliert mit den erwarteten Verlustleistungen $P_{c, \text{erw}}$ und den 120 % Verlustleistungen $P_{c, 120}$, sowie die Temperaturdifferenzen zu den Simulationen mit unverändertem Vakuulgitter aus Tabelle 5.9.

5.3 Thermosimulationen an den MYRRHA-CHs

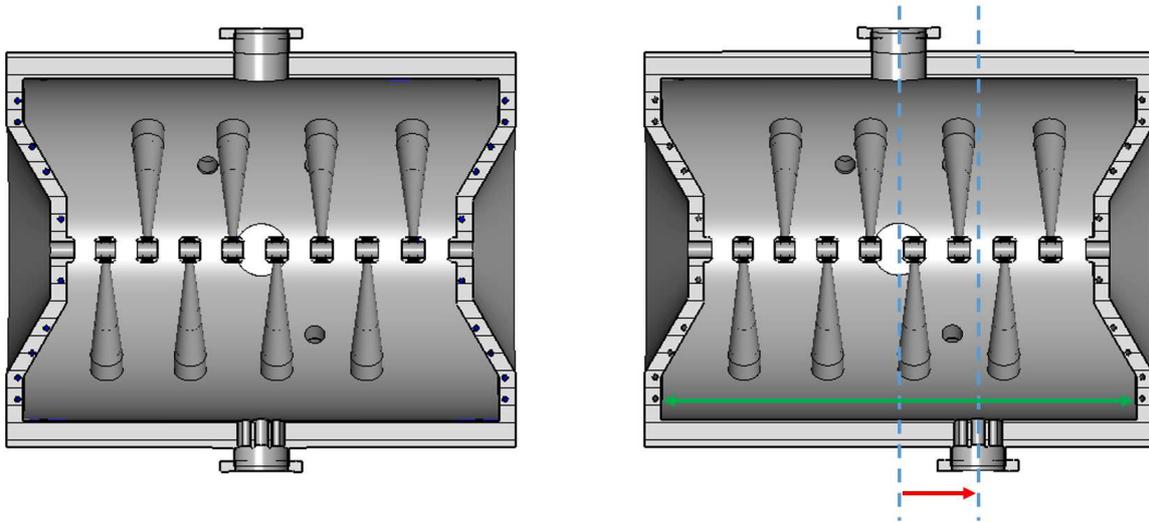


Abbildung 5.30: CH6 mit normalem (links) und longitudinal versetztem Vakuulgitter (rechts). Der Versatz (roter Pfeil) entspricht $1/6$ der Tankinnenlänge (grüner Pfeil).

peraturen ermittelt werden, die in Tabelle 5.10 zusammengefasst sind. Wie auch bei den vorherigen Simulationen, bei denen die Vakuulgitter nicht versetzt wurden, finden sich die Hotspots wieder an den Vakuulgittern. Allerdings ist bei Betrachtung der Temperaturverläufe erkennbar, dass sich weitere Hotspots an den Innenrändern der anderen DN100cf-Flansche ausbilden (vgl. Abbildung 5.31). Da aber die Maximaltemperaturen von CH5 und CH7 die Kriterien aus Abschnitt 5.2.1 klar erfüllen, wäre das versetzte Gitter zumindest für diese beiden Kavitäten eine mögliche Alternative.

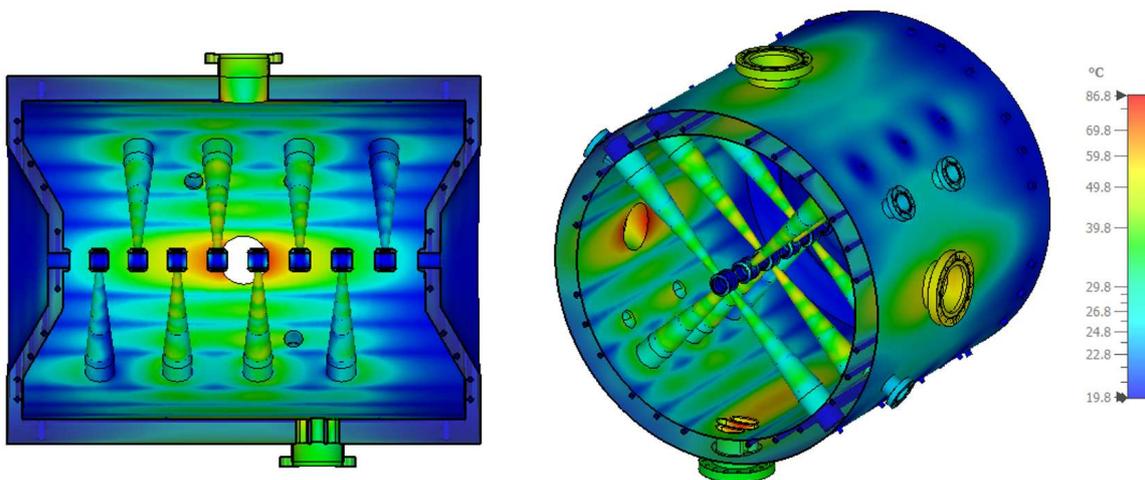


Abbildung 5.31: Temperaturverteilung von MYRRHA-CH6 mit versetztem Vakuulgitter, simuliert mit $P_{c,erw}$.

Verwendung des neuen Vakuulgitters B

Es wurde ein neues Vakuulgitter entworfen und an die ursprüngliche Position in der Mitte der Kavität gesetzt. Bei diese neuen Vakuulgitter werden, wie in Abbildung 5.32 dargestellt, nur noch zwei, statt der vorherigen drei Kammern in die Tankwand gefräst. Dadurch kann der Balken zwischen den Kammern mit 16 mm an seiner dünnsten Stelle mehr als doppelt so dick gebaut werden, wie beim alten Gitter, wodurch sich die am Balken entstehende Wärmemenge auf eine größere Menge Material verteilen und besser an die restliche Kavität abfließen kann.

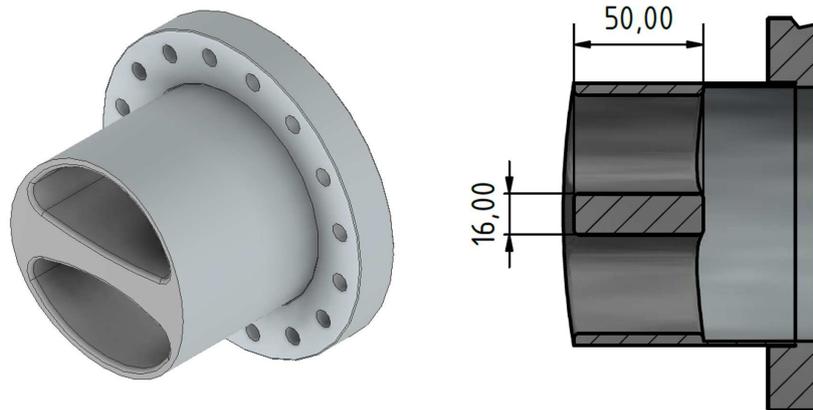


Abbildung 5.32: Darstellung des neu entwickeltesn zweikammrigen Vakuulgitters B. Der Balken ist an seiner dünnsten Stelle mit 16 mm mehr als doppelt so dick, wie die Balken beim alten Vakuulgitter.

	$T_{\max,erw}$ in °C	$\Delta T_{\max,erw}$ zu Tabelle 5.9 in °C	$T_{\max,120}$ in °C	$\Delta T_{\max,120}$ zu Tabelle 5.9 in °C
CH5	80,5	-9,9	92,6	-12,4
CH6	98,7	-14,3	115	-16
CH7	83,9	-13,3	96,7	-16,3

Tabelle 5.11: Simulierte Maximaltemperaturen mit dem neuen Kühlkonzept und Vakuulgitter B. Simuliert mit den erwarteten Verlustleistungen $P_{c,erw}$ und den 120 % Verlustleistungen $P_{c,120}$, sowie die Temperaturdifferenzen zu den Simulationen mit Vakuulgitter A aus Tabelle 5.9.

Die mit mittig platziertem Vakuulgitter B durchgeführten Simulationen zeigen deutlich verringerte Maximaltemperaturen gegenüber den mit mittig platziertem Vakuulgitter A durchgeführten Simulationen, sodass auch diese Variante für CH5 und CH7 eine mögliche Alternative darstellt (vgl. Tabelle 5.11). Trotz dessen muss bemerkt werden, dass die Maximaltemperaturen höher sind, als bei den Simulationen, die mit dem versetzten dreikammrigen Vakuulgitter A durchgeführt wurden. Zwar liegen die ermittelten

Maximaltemperaturen deutlich unter den Werten, die mit Vakuulgitter A simuliert wurden.

Versatz von Vakuulgitter B

Eine Kombination aus den vorherigen zwei Varianten ergibt sich, wenn das neu entwickelte zweikammrige Vakuulgitter B longitudinal versetzt in die Kavitäten eingebaut wird. Auf diese Weise können die Effekte, die aus der veränderten Position und dem breiteren Balken resultieren, verbunden werden.

Wie in Tabelle 5.12 dargestellt, liefert diese Variante die bislang niedrigsten Temperaturen, sodass alle drei Kavitäten die Kriterien aus Abschnitt 5.2.1 erfüllen.

	$T_{\max, \text{erw}}$ in °C	$\Delta T_{\max, \text{erw}}$ zu Tabelle 5.9 in °C	$T_{\max, 120}$ in °C	$\Delta T_{\max, 120}$ zu Tabelle 5.9 in °C
CH5	64	-26,4	73,3	-31,7
CH6	83,2	-29,8	96,2	-34,8
CH7	69,3	-27,9	79	-34

Tabelle 5.12: Simulierte Maximaltemperaturen mit dem neuen Kühlkonzept und dem verschobenen Vakuulgitter B. Simuliert mit den erwarteten Verlustleistungen $P_{c, \text{erw}}$ und den 120 % Verlustleistungen $P_{c, 120}$, sowie die Temperaturdifferenzen zu den Simulationen mit Vakuulgitter A aus Tabelle 5.9.

Gekühltes Vakuumgitter B

Bei dem bisherigen Design von Vakuumgitter A wäre eine Kühlung des Gitters aufgrund der schmalen Balken nur unter Verwendung von sehr feinen Bohrern möglich gewesen, was zwar technisch machbar, aber sehr aufwändig ist, da lange Bohrungen mit dünnen Bohrern immer mit der Gefahr einer Verkantung, oder dem Abbrechen des Bohrkopfes einher gehen. Wie in Abbildung 5.33 dargestellt, erlaubt die Verwendung von Vaku-

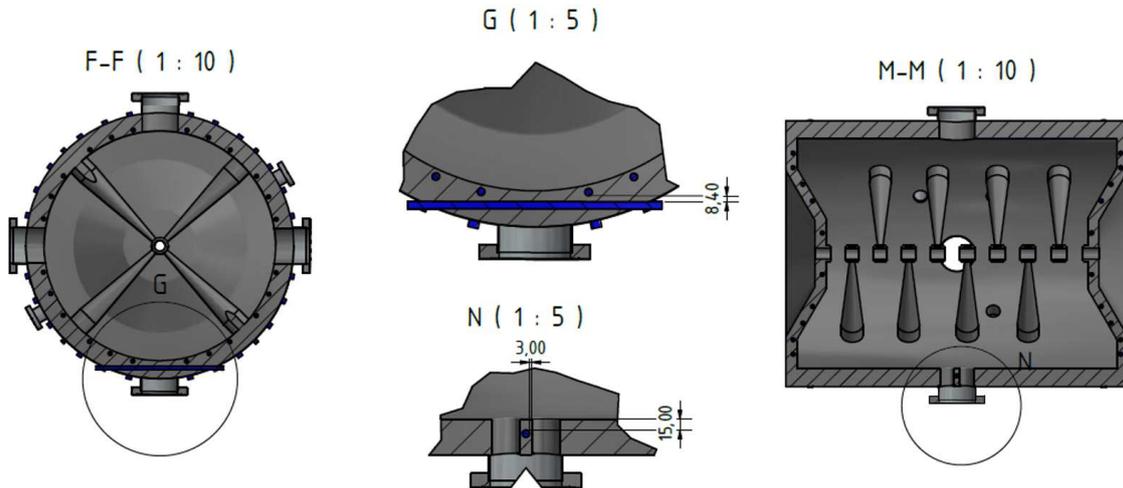


Abbildung 5.33: Position des zusätzlichen Kühlkanals in Vakuumgitter B.

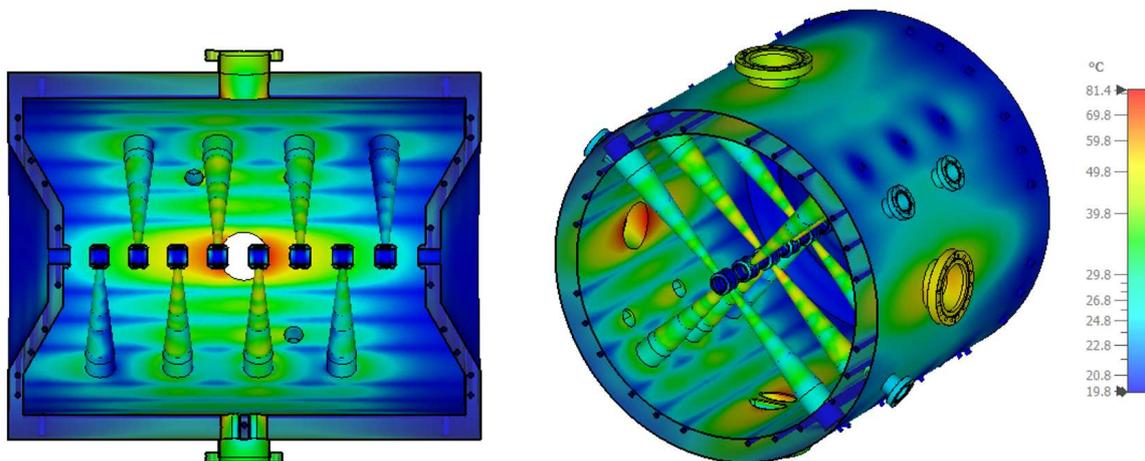


Abbildung 5.34: Thermosimulation der MYRRHA-CH6 mit neuem Kühlkonzept und gekühltem neuem Vakuumgitter. Simuliert mit der Verlustleistung aus Tabelle 5.6.

umgitter B mit seinem breiteren Balken den Einbau eines Kühlkanals mit 10 mm

5.3 Thermosimulationen an den MYRRHA-CHs

	$T_{\max, \text{erw}}$ in °C	$\Delta T_{\max, \text{erw}}$ zu Tabelle 5.9 in °C	$T_{\max, 120}$ in °C	$\Delta T_{\max, 120}$ zu Tabelle 5.9 in °C
CH5	65,1	-25,3	74,1	-30,9
CH6	81,4	-31,6	93,4	-37,6
CH7	69,4	-27,8	79,4	-33,6

Tabelle 5.13: Simulierte Maximaltemperaturen mit dem neuen Kühlkonzept und dem gekühlten Vakuumgitter B. Simuliert mit den erwarteten Verlustleistungen $P_{c, \text{erw}}$ und den 120% Verlustleistungen $P_{c, 120}$, sowie die Temperaturdifferenzen zu den Simulationen mit Vakuumgitter A aus Tabelle 5.9.

Durchmesser, wobei die Wandstärke an der schmalsten Stelle des Balkens noch 3 mm beträgt. Der Kühlkanal muss dabei so positioniert werden, dass er nicht mit den Kanälen der Tankkühlung kollidiert. Bei der in Abbildung 5.33 gezeigten CH6 beträgt der minimale Abstand zwischen der Tankkühlung und dem Kühlkanal des Gitters 8,40 mm. Da diese Kavität über den geringsten Radius der sieben innerhalb dieser Arbeit betrachteten CH-Kavität besitzt, wird dieser Abstand auch bei den anderen Kavitäten nicht unterschritten.

Abbildung 5.34 zeigt eine Thermosimulation von CH6 mit der erwarteten Verlustleistung $P_{c, \text{erw}}$. Wie auf dem Rechten Bild zu sehen ist, hat der gekühlte Balken des Vakuumgitters jetzt mit unter 40 °C eine deutlich niedrigere Temperatur als die Ränder der DN100cf-Flansche.

Kühlung der Flansche

Wie sich bei vorangegangenen Simulationen mit den verschiedenen Varianten des Vakuulgitters gezeigt hat, sind, sobald die Temperatur des Gitters reduziert werden kann, die inneren Kanten der anderen DN100cf-Flansche die heißesten Stellen der CH-Kavitäten 5-7. Der Grund hierfür ist ebenfalls die Positionierung an der longitudinalen Mitte der Kavität, an der ein Maximum an ohmschen Verlusten anfällt.

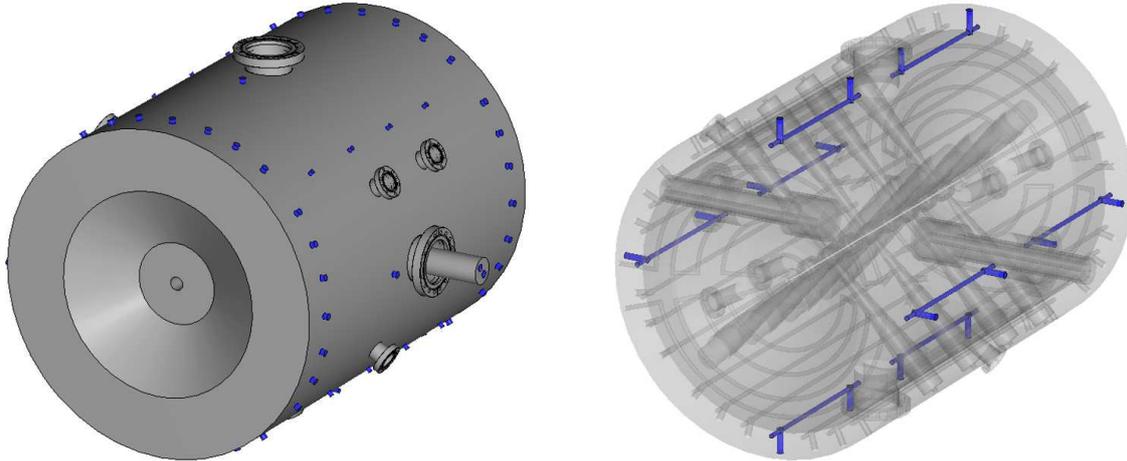


Abbildung 5.35: Simulationsmodell von CH6 (links) mit zusätzlichen verkürzten Kühlkanälen beidseitig der DN100cf-Flansche, welche auf dem rechten Bild samt Zu- und Abläufen hervorgehoben sind.

Um diese verbliebenen Hotspots zu kühlen wurden zusätzliche verkürzte Kühlkanäle entwickelt, die von beiden Seiten auf Höhe der DN100cf-Flansche in den Tankzylinder gebohrt werden und über separate Zu- und Abläufe verfügen (siehe Abbildung 5.35). Tabelle 5.14 zeigt die Ergebnisse der Thermosimulationen den CHs 5-7, die sowohl mit dem gekühlten Vakuulgitter B, als auch mit den Flanschkühlungen ausgestattet sind.

	$T_{\max,erw}$ in °C	$\Delta T_{\max,erw}$ zu Tabelle 5.9 in °C	$T_{\max,120}$ in °C	$\Delta T_{\max,120}$ zu Tabelle 5.9 in °C
CH5	54,7	-35,7	61,7	-43,3
CH6	60,7	-52,3	68,9	-62,1
CH7	53,6	-43,6	60,3	-52,7

Tabelle 5.14: Simulierte Maximaltemperaturen mit gekühlten Vakuulgitter B und den Flanschkühlungen. Simuliert mit den erwarteten Verlustleistungen $P_{c,erw}$ und den 120% Verlustleistungen $P_{c,120}$, sowie die Temperaturdifferenzen zu den Simulationen mit Vakuulgitter A aus Tabelle 5.9.

5.3.2 Zusammenfassung der Thermosimulationen

Für die Kühlung der MYRRHA-CHs 1-7 wurde zunächst das Kühlkonzept A entwickelt, welches im Vergleich zu seiner Vorlage, der Kühlung der FRANZ-CH, über zusätzliche Kühlkanäle und eine andere Winkelverteilung der Kanäle im Tank, sowie ein neues Kühldesign für die Deckel verfügt.

Die damit erzielten Simulationsergebnisse zeigen eine ausreichende Kühlung für die CHs 1-3, während ab CH4 stark erhöhte Temperaturen, vor allem im Bereich des Vakuulgitters, aber auch im Bereich der übrigen DN100cf-Flansche, simuliert wurden. Zwar sind die ermittelten Maximaltemperaturen für CH4 gerade noch vertretbar, aber für die CHs 5-7 nicht.

Mit dem daraufhin entwickelten Kühlkonzept B, das das zuvor entwickelte Kühlkonzept A um ein neues gekühltes Vakuulgitter und zusätzliche Kühlkanäle auf Höhe der DN100cf-Flansche ergänzt, konnten schließlich sowohl die Hotspots am Vakuulgitter, als auch an den übrigen DN100cf-Flanschen gekühlt werden.

Um zu überprüfen, ob Kühlkonzept B auch bei den anderen CHs zu signifikanten Verbesserungen hinsichtlich der Temperaturverteilungen führt, wurden auch die CHs 1-4 mit mit Kühlkonzept B simuliert.

	$T_{\max, \text{erw}}$ Kühlkonzept A in °C	$T_{\max, 120}$ Kühlkonzept A in °C	$T_{\max, \text{erw}}$ Kühlkonzept B in °C	$T_{\max, 120}$ Kühlkonzept B in °C
CH1	41,1	45,4	41,5	45,9
CH2	46,0	51,2	46,8	52,2
CH3	52,4	58,9	52,6	59,2
CH4	71,8	82,2	53	59,7
CH5	90,4	105,0	54,7	61,7
CH6	113,0	131,0	60,7	68,9
CH7	97,2	113,0	53,6	60,3

Tabelle 5.15: Simulierte Maximaltemperaturen von CH1-7 mit den Kühlkonzepten A und B. Simuliert mit den erwarteten Verlustleistungen $P_{c, \text{erw}}$ und den 120% Verlustleistungen $P_{c, 120}$.

Wie anhand von Tabelle 5.15 zu sehen ist, ändern sich die simulierten Maximaltemperaturen der CHs 1-3 nur unwesentlich bei Verwendung von Kühlkonzept B, während sich die simulierten Temperaturen der Hotspots bei CH4 um 18,8 bzw. 22,5 °C verringern. Die geringfügigen Temperaturänderungen, die beim Vergleich der beiden Kühlkonzepte bei CH1-3 auffallen können aus dem Mesh resultieren. Da aufgrund der minimal veränderten Geometrie am Vakuulgitter ein anderes Mesh während den Eigenmode- und Thermosimulationen mit Kühlkonzept B verwendet wird, kann es punktuell zu minimalen Temperaturunterschieden kommen, die sich in der Größenordnung von bis zu 1-2 °C

bewegen können. Daher kann davon ausgegangen werden, dass sich keine signifikanten Temperaturveränderungen zwischen Kühlkonzept A und B bei den CHs 1-3 ergeben. Dies lässt sich auch dadurch erklären, dass sich die heißesten Stellen bei den CHs 1-3 nicht am Vakuumgitter, sondern an den Stützen befanden, weswegen nicht anzunehmen ist, dass sich die Maximaltemperatur durch Kühlkonzept B deutlich verringert.

Da Kühlkonzept A aber aufgrund der geringeren Anzahl an Kühlkanälen eine kostengünstigere Produktion verspricht, wird trotz der vergleichbaren Maximaltemperaturen für die MYRRHA-CH1-3 empfohlen, diese mit Kühlkonzept A zu fertigen. CH4-7 sollten hingegen aufgrund der deutlich niedrigeren Maximaltemperaturen mit Kühlkonzept B gefertigt werden.

5.4 Bauphase der MYRRHA-CHs 1 und 2

Wie bereits in Abschnitt 3.6 beschrieben wurde, bestehen geometrisch kleine Unterschiede zwischen dem Simulationsmodell und der tatsächlich gebauten Kavität. Daher ist zu erwarten, dass sich deren Resonanzfrequenzen auch dann noch unterscheiden, wenn sie mit dem exakt gleichen Innenradius gefertigt werden. Erschwerend kommt hinzu, dass die angesprochenen geometrischen Unterschiede bei verschiedenen Herstellern unterschiedlich stark ausgebildet sein können, weswegen eine pauschale Korrektur des Innenradius zwischen Simulations- und .stp-Modell wenig erfolgversprechend ist. Zwar wäre es mög-

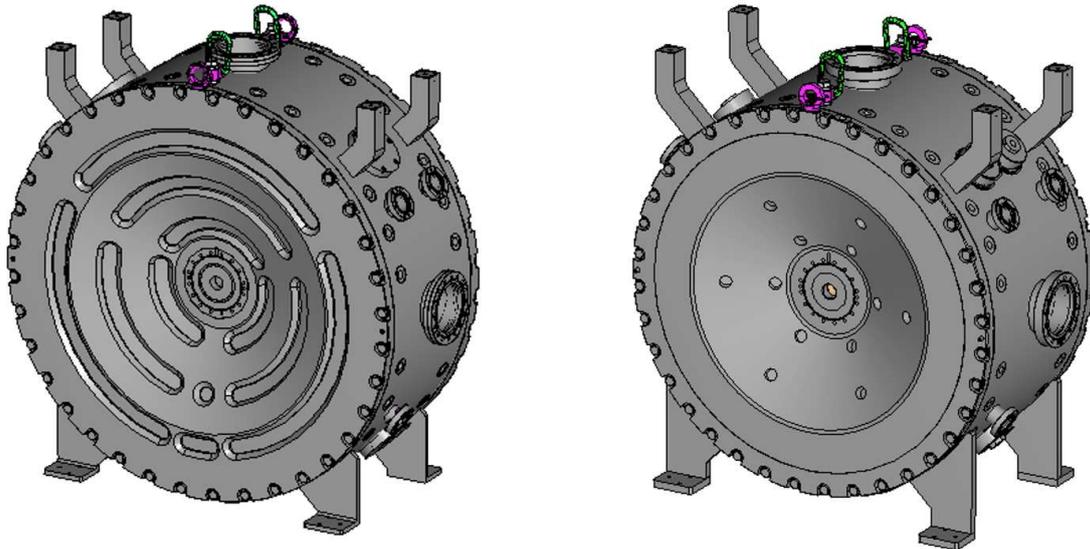


Abbildung 5.36: CAD-Modelle von CH1 (links) und CH2 (rechts).

lich, von den Herstellern das Einhalten von exakten geometrischen Abmessungen auch bei Schweißnähten etc. vorzuschreiben, doch wäre die dadurch geforderte hohe Präzision mit einem enormen Kostenzuwachs verbunden, weswegen darauf verzichtet wird.

5.4 Bauphase der MYRRHA-CHs 1 und 2

Für die MYRRHA-CHs ist daher vorgesehen, dass für jede Kavität eine vom Hersteller erstellte Datei mit CST nachsimuliert wird und anschließend in seinem Radius derart angepasst wird, dass sowohl die Zielfrequenz, als auch ein geeigneter Tuningbereich erzielt werden kann. Die so überprüften CAD-Modelle können dann gefertigt werden.

Zunächst sollten nur CH1 und 2 von jeweils einer anderen Firma produziert werden. Basierend auf den Erfahrungen, die sowohl während der Planungs- und Bauphase, als auch durch die anschließenden Low-Level- und High-Power-Messungen gesammelt wurden, sollen anschließend in eine weitere Ausschreibung mit einfließen, die den Bau der restlichen 13 CH-Kavitäten des MYRRHA-Injektors umfasst.

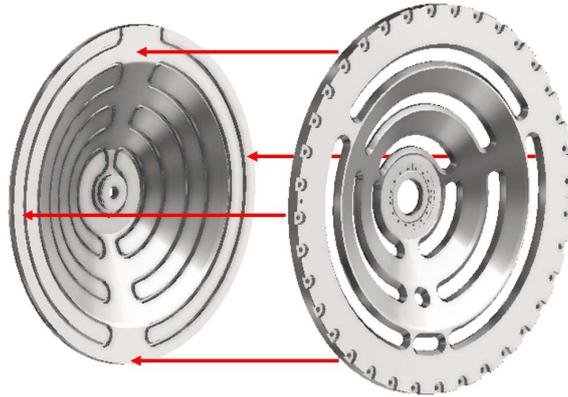


Abbildung 5.37: Schematische Konstruktion des geschweißten Deckels von CH1. Der äußere Deckel wird auf den inneren Deckel, der die Kühlkanäle enthält, aufgesetzt und sowohl am Rand, als auch entlang der Aussparungen verschweißt.

CH1 wurde von der Firma NTG und CH2 von der Firma PINK aus Edelstahl 1.4301 gefertigt. Hierbei sollten die Deckel aus zwei Teilen bestehen. Wie bereits in Kapitel 5.2.4 beschrieben, blieb die Konstruktion der Deckel den ausführenden Firmen überlassen. Bei den beiden in Abbildung 5.36 gezeigten Versionen bestehen die Deckel aus einer inneren Schale, in die der Kühlkanal eingefräst wird und einer äußeren Schale, die von außen aufgeschweißt wird, wie es in Abbildung 5.37 schematisch dargestellt ist. Die länglichen (bei CH1) bzw. runden Aussparungen (bei CH2), in den äußeren Schalen ermöglichen es, die beiden Schalen durch zusätzliche Schweißnähte besser miteinander zu verbinden. Zusätzlich wurde von der NTG ein Deckel für CH1 mit einem alternativen Herstellungsverfahren hergestellt. Für diesen „New Lid“ werden die Kühlkanäle in einen Stahldeckel eingefräst, der anschließend mehrere mm dick verkupfert wird, wie es bereits für die Herstellung der RFQ-Bauteile (vgl. Kapitel 4.2) angewendet wird. Da für dieses Verfahren nur ein Deckelteil gefertigt werden muss und der aufwändige Schweißprozess entfällt, können diese dickschichtverkupferten Deckel kostengünstiger produziert werden, als ihre verschweißten Pendanten.

Um einen möglichen Einfluss der unterschiedlichen Deckelkonstruktionen auf das Verhalten der MYRRHA-Kavitäten zu untersuchen, wurde CH1 zunächst mit zwei verschweißten Deckeln den Low-Level-Messungen unterzogen und anschließend konditioniert. Danach wurde einer der Deckel durch den dickschichtverkupferten Deckel aus-

getauscht und sowohl die Low-Level-Messungen, als auch die Konditionierung wurde wiederholt. In den nachfolgenden Abschnitten 5.5 und 6 wird daher in „CH1“ und „CH1newlid“ unterschieden, obwohl es sich nur um eine Kavität handelt.

Nach dem Bau wurden die inneren Oberflächen von CH1 und CH2 bei GalvanoT [68] verkupfert, bevor die Kavitäten in die Experimentierhalle des IAP geliefert wurden.

Da die finale Position der beiden Tauchkolben erst während der Low-Level-Messungen festgelegt wird, werden diese erst später gefertigt. Statt dessen wurden für jede Kavität zwei bewegliche Dummytuner aus Aluminium gefertigt (vgl. Abbildung 5.43), die für die Low-Level-Messungen verwendet werden können und zusätzlich je ein „Preliminary Static Tuner“. Diese dienen dazu, die Resonanzfrequenz für die Konditionierung herabzusetzen.

5.5 Low-Level-Messungen an den CHs

In den nachfolgenden Unterkapiteln wurden die Ergebnisse der Low-Level-Messungen an CH1, CH2 und CH1newlid zusammengefasst. Diese Messungen dienen dazu, die Kavitäten für die nachfolgenden High-Power-Tests und den späteren Strahlbetrieb durch die Bestimmung der grundlegenden HF-Parameter zu charakterisieren.

Obwohl bei den meisten Messungen von drei verschiedenen Kavitäten gesprochen wird, handelt es sich, wie in Kapitel 5.4 bereits erklärt wurde, nur um die Kavitäten CH1 und CH2.

Bei der mit „CH1newlid“ bezeichneten Kavität handelt es sich um CH1, die nach ihrer Konditionierung mit dem neuen dickschichtverkupferten Deckel versehen wurde, um dessen Einfluss auf die Eigenschaften der Kavität zu untersuchen.

Da zum Zeitpunkt dieser Arbeit davon ausgegangen wird, dass der neue Deckel auch im geplanten Strahlbetrieb auf CH1 verbleibt, werden für die finalen Vergleiche der Ergebnisse der Low-Level-Messungen mit den Simulationsergebnissen die Werte von CH1newlid verwendet.

5.5.1 Resonanzfrequenz und Kopplungsfaktor ohne Tuner

Der Leistungsbedarf einer Kavität lässt sich aus der Verlustleistung P_c und dem Beam Loading P_b zusammensetzen, wobei Ersteres die Leistung beschreibt, die für das Aufrechterhalten der gespeicherten Energie W in der Kavität benötigt wird und Letzteres die Leistung beschreibt, die auf die zu beschleunigenden Teilchen übergeht.

Da im späteren Strahlbetrieb das Zusammenspiel zwischen Einkoppelschleife und Kavität derart eingestellt sein soll, dass ein möglichst geringer Teil der vom Verstärker ausgehenden Leistung reflektiert wird, soll die Schleife möglichst kritisch ($\beta \approx 1$) eingestellt werden. Da während der Low-Level-Messungen kein Strahl vorhanden ist, wird der Kopplungsfaktor nur von der Verlustleistung der Kavität P_c bestimmt, während $P_b = 0$ ist. Um dennoch eine kritische Ankopplung während des Strahlbetriebes zu gewährleisten, wird der während der Low-Level-Messungen einzustellende Kopplungsfaktor über Formel 5.71 bestimmt. Tabelle 5.16 enthält den Energiegewinn der MYRRHA-CHs 1-7

5.5 Low-Level-Messungen an den CHs

und die daraus für einen Strahlstrom von 4 mA berechneten Beam Loadings P_b sowie die erwarteten und 120 %-Verlustleistungen $P_{c,erw}$ ³ und $P_{c,120}$, aus denen sich die Kopplungsfaktoren β_{LL} bestimmen lassen, die bei den Messungen ohne Strahl eingestellt werden müssen, um im Strahlbetrieb kritisch anzukoppeln.

$$\beta = 1 + \frac{P_b}{P_c} \quad (5.71)$$

	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7
Energiegewinn in MeV	0,201	0,302	0,446	0,593	0,752	1,051	1,027
P_b in kW	0,804	1,208	1,784	2,372	3,008	4,204	4,108
$P_{c,erw}$ in kW	6,78	9,72	14,26	17,03	20,07	26,79	24,01
$P_{c,120}$ in kW	8,14	11,66	17,11	20,44	24,05	32,15	28,81
$\beta_{LL,erw}$ mit $P_{c,erw}$	1,12	1,12	1,13	1,13	1,15	1,16	1,17
$\beta_{LL,120}$ mit $P_{c,120}$	1,10	1,10	1,11	1,11	1,12	1,13	1,14

Tabelle 5.16: Simulierter Energiegewinn der Teilchen pro Kavität und die damit für einen Strahlstrom von 4 mA errechneten Beam Loadings P_b für CH1-7. Die für eine kritische Ankopplung im Strahlbetrieb notwendigen Kopplungsfaktoren während der Low-Level-Messungen $\beta_{LL,erw}$ und $\beta_{LL,210}$ wurden mit den Verlustleistungen $P_{c,erw}$ und $P_{c,120}$ nach Formel 5.71 bestimmt.

Nachdem die jeweilige Kavität in der Experimentierhalle des IAP aufgestellt worden war, wurde sie mit einer Einkoppelschleife versehen und es wurde überprüft, ob eine Ankopplung von $\beta = 1,10$ eingestellt werden kann, wie sie für den Fall einer Verlustleistung vorliegt, die 120 % der erwarteten Verlustleistung entspricht. Hierfür wurde die Schleife überkoppelt eingestellt, was mit einer Pulsmessung, wie sie in Kapitel 3.5.3 beschrieben und in Abbildung 5.38 dargestellt ist, überprüft wurde. Die Messung des Kopplungsfaktors wurde dann mit einer kalibrierten S_{11} -Messung durchgeführt, wobei Formel 5.72 verwendet wurde.

$$\beta = \frac{1 + |S_{11}|}{1 - |S_{11}|} \quad (5.72)$$

Abbildung 5.39 zeigt exemplarisch die S_{11} -Messung von CH1newlid, bei der mit einer Ankopplung von -26 dB ein Kopplungsfaktor von $\beta = 1,10$ bestimmt wurde. Die Ergebnisse dieser Messung für alle drei Kavitäten sind in Tabelle 5.17 zusammengefasst,

³ Entnommen aus Tabelle 5.6.

5.5 Low-Level-Messungen an den CHs

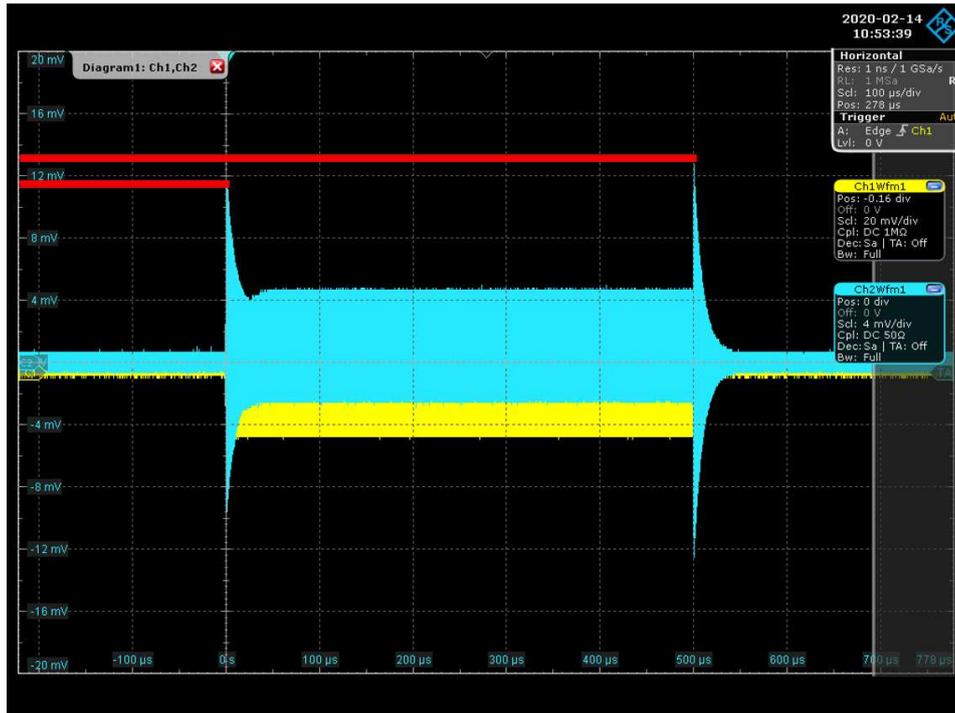


Abbildung 5.38: Pulsmessung an CH1newlid, um zu bestimmen, ob die Schleife über- oder unterkopelt ist. Zur besseren Übersicht wurden rote Querbalken ergänzt. Anhand der höheren Reflektion am Pulsende lässt sich ein $\beta > 1$ erkennen.

wobei bemerkt werden muss, dass auch eine stärkere Überkopplung, wie etwa die Kopplungsfaktoren $\beta_{LL,erw}$ aus Tabelle 5.16, problemlos einzustellen waren. Da sich die beiden Versionen von CH1 nicht in ihrer Geometrie, sondern nur in der Art unterscheiden, in der einer der Deckel produziert wurde, ist es nicht verwunderlich, dass die gleichen Werte gemessen werden konnten.

	CH1	CH1newlid	CH2
f_r in MHz	176,86	176,86	176,81
β	1,10	1,10	1,10

Tabelle 5.17: Resonanzfrequenzen und Kopplungsfaktoren von CH1, CH1newlid und CH2. Gemessen ohne Tauchkolben.

5.5 Low-Level-Messungen an den CHs

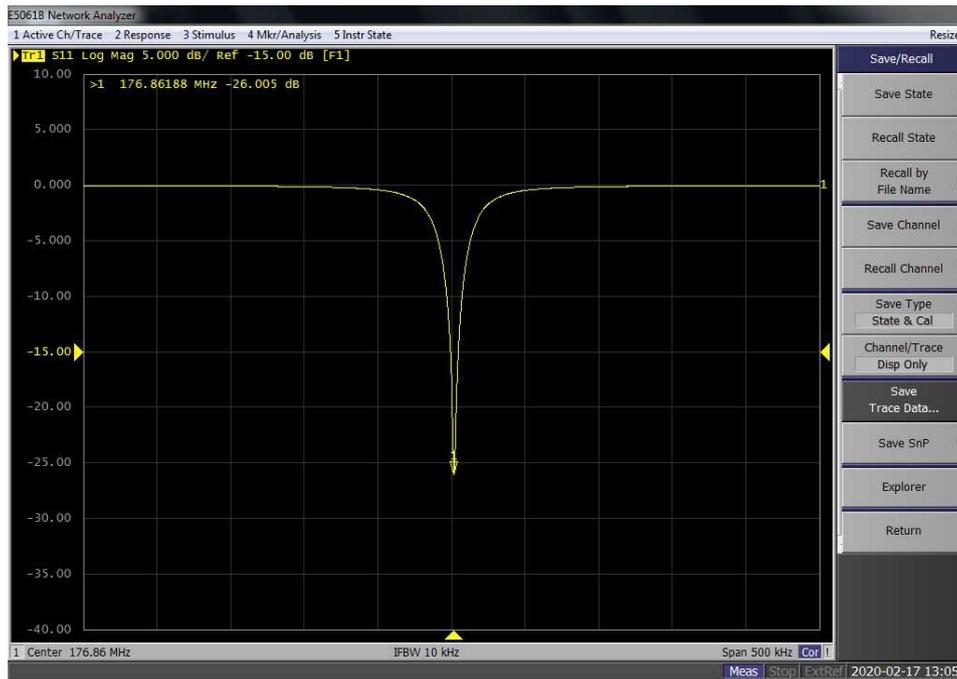


Abbildung 5.39: Kalibrierte S_{11} -Messung an CH1newlid ohne Tauchkolben zur Bestimmung der Ankopplung und der Resonanzfrequenz.

5.5.2 Güte und Dämpfung der Pickups

Um die Ersatzteilversorgung innerhalb des MYRRHA-Projektes gering zu halten, werden die MYRRHA-CHs mit je zwei Pickups der gleichen Bauart ausgestattet, wie sie für den MYRRHA-RFQ in Kapitel 4.3.2 beschrieben sind.

Für den Strahlbetrieb ist vorgesehen, dass an den Pickups der MYRRHA-CH-Kavitäten ca. 0,1 W Leistung ausgekoppelt wird, wodurch sich unter Verwendung der Leistungen $P_{c,erw}$ und $P_{c,120}$ die in Tabelle 5.18 dargestellten Dämpfungen für die Pickups bestimmen lassen. Zur Bestimmung der Güte wurden die CHs mit je zwei Pickups versehen, die

	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7
Pickup Dämpfung in dB für $P_{c,erw}$	-48,3	-49,9	-51,5	-52,3	-53,0	-54,3	-53,8
Pickup Dämpfung in dB für $P_{c,120}$	-49,1	-50,7	-52,3	-53,1	-53,8	-55,1	-54,6

Tabelle 5.18: Aus den erwarteten und 120 %-Verlusten errechnete Dämpfungen der Pickups von CH1-7.

über eine kalibrierte S_{21} -Messung, wie sie in Abbildung 5.40 dargestellt ist, eingemessen wurden. Anschließend konnte über Formel 3.47 die Güte der Kavitäten ohne Tuner bestimmt werden (siehe Tabelle 5.19).

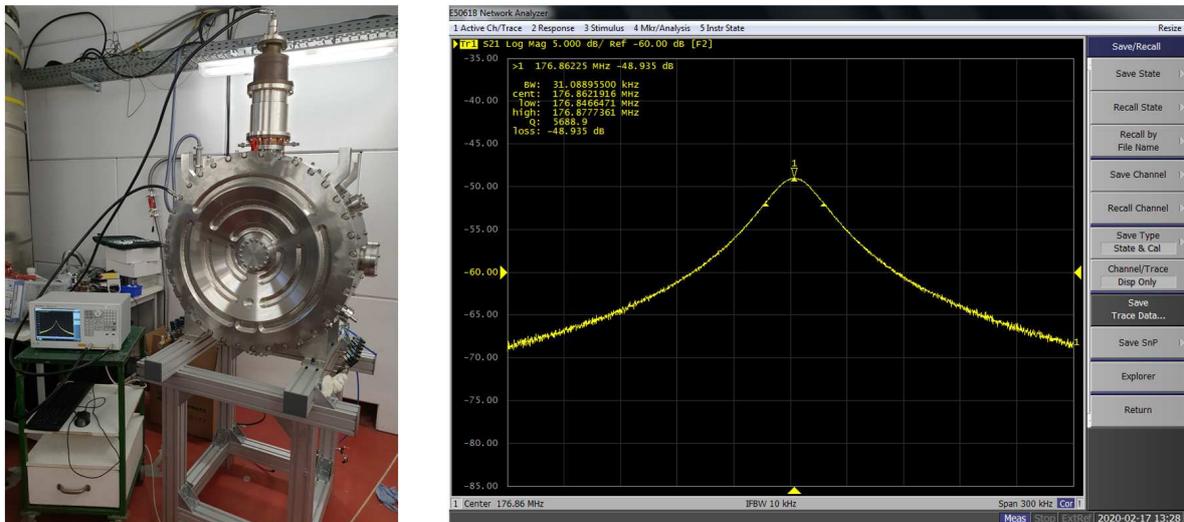


Abbildung 5.40: Links: Messaufbau zur Bestimmung der Güte von CH1newlid im Bunker der Experimentierhalle des IAP. Rechts: Kalibrierte S_{21} -Messung an Ch1newlid ohne Tauchkolben zur Bestimmung der Dämpfung des Pickups und der Güte.

Da diese Gütemessungen unter Normaldruck und ohne Tuner durchgeführt worden waren, wurde während der Vorbereitungen zu den Konditionierungen die Güte erneut gemessen, während die Kavitäten unter Vakuum standen und die Frequenz aufgrund der

5.5 Low-Level-Messungen an den CHs

	Dämpfung des Pickups in dB	Q_L	Q_0
CH1	-49	5570	11700
CH1newlid	-49	5690	11950
CH2	-50,7	6070	12750

Tabelle 5.19: Dämpfung des benutzten Pickups und damit ermittelte Güten von CH1, CH1newlid und CH2. Gemessen ohne Tuner.

eingesetzten Preliminary Static Tuner näher an der Zielfrequenz von 176.1 MHz war.



Abbildung 5.41: Gemessene Ankopplungen im Vakuum für CH1newlid während der Vorbereitungen für die Konditionierung.

Hierbei ist zu bemerken, dass während der Messungen im Vakuum ein anderer Kopplungsfaktor eingestellt wurde, wie anhand der Abbildungen 5.41 und 5.42 zu sehen ist. Da der veränderte Kopplungsfaktor aber in der Berechnung der Güte berücksichtigt wird und die Messungen im Vakuum den Gegebenheiten im späteren Strahlbetrieb wesentlich mehr entsprechen, als die obigen Messungen unter Normaldruck und ohne Tauchkolben, wird für spätere Vergleiche von CH1 und CH2 mit den Simulationsergebnissen die hier ermittelte Güte Q_0 , die in Tabelle 5.20 abgebildet ist, verwendet.

Die in Tabelle 5.20 dargestellten Werte von Q_0 entsprechen für CH1 $\approx 91\%$ und für CH2 $\approx 93\%$ der simulierten Werte aus Tabelle 5.5, woraus sich Vorhersagen über die

5.5 Low-Level-Messungen an den CHs

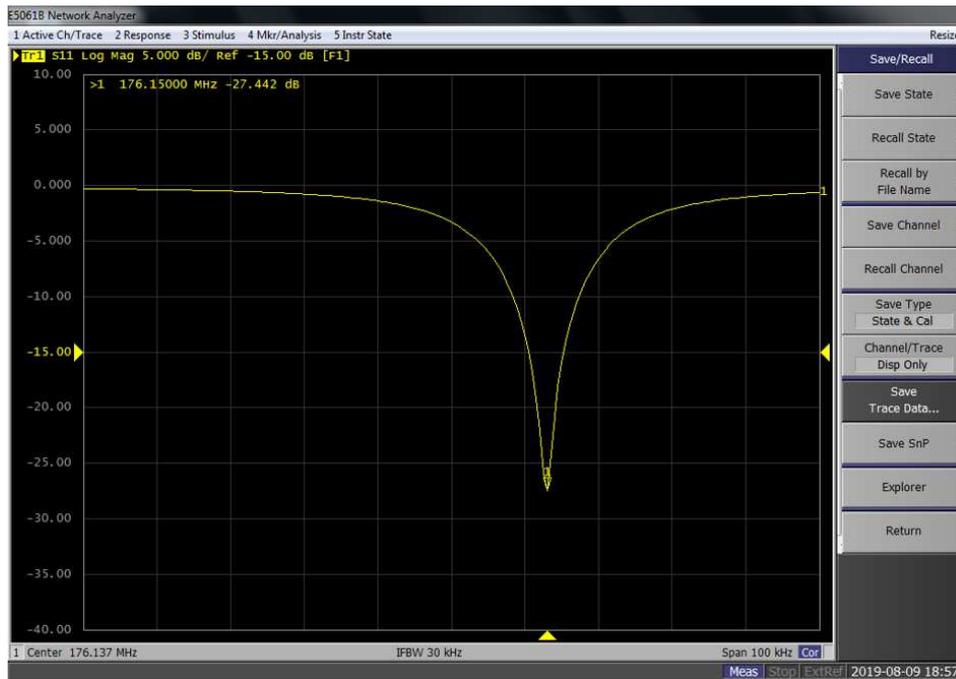


Abbildung 5.42: Gemessene Ankopplungen im Vakuum für CH2 während der Vorbereitungen für die Konditionierung.

	f_r in MHz	Dämpfung des Pickups in dB	β	Q_L	Q_0
CH1 new lid	176,21	-49,4	1,02	5870	11860
CH2	176,15	-50,3	0,9	6620	12580

Tabelle 5.20: Dämpfung des benutzten Pickups und damit ermittelte Güten von CH1newlid und CH2. Gemessen mit den Preliminary Static Tunern und unter Vakuum.

zu erwartenden Shuntimpedanzen Z_a von $\approx 50,3 M\Omega/m$ für CH1 und $\approx 64,6 M\Omega/m$ für CH2 treffen lassen.

5.5.3 Bestimmung des Arbeitspunktes

Anders als beim RFQ, bei dem die Resonanzfrequenz bereits während des Zusammenbaus eingestellt wird, hat die gebaute CH-Kavität an sich (also ohne montierte Tauchkolben) zwangsläufig eine andere Frequenz, als sie im späteren Betrieb benötigt wird. Daher ist es sinnvoll zu zeigen, dass unter Zuhilfenahme der Tauchkolben die gewünschte Resonanzfrequenz eingestellt werden kann und dass ein genügender Tuningbereich existiert (siehe Abschnitt 5.5.4).

Da sich die gebauten Kavitäten von den Simulationsmodellen hinsichtlich ihrer geometrischen Ausmaße unterscheiden, müssen die in Tabelle 5.3 bestimmten Arbeitspunkte und Tuningbereiche für die Tauchkolben nicht automatisch für die gebauten Kavitäten gelten. Daher werden die endgültigen Positionen der Tauchkolben und dadurch auch deren bauliche Längen, erst durch die Low-Level-Messungen bestimmt.

	f_r in MHz	Abstand des dyn. Tuners zur Strahlachse in mm	Abstand des stat. Tuners zur Strahlachse in mm
CH1	176,05	106,75	141,75
CH1 new lid	176,05	106,75	135,45
CH2	176,06	118,875	118,875

Tabelle 5.21: Arbeitspunkte der beiden Tuner für CH1, CH1newlid und CH2.

Da die Zielfrequenz im späteren Betrieb 176,1 MHz beträgt, wurde versucht, den Arbeitspunkt aufgrund der Vakuumverschiebung auf $176,05 \pm 0,02$ MHz zu legen. Als Vakuumverschiebung beschreibt man den Umstand, dass sich die Resonanzfrequenz eines Resonators durch das Vakuum verändert.

Wie bereits an anderer Stelle vermerkt, lässt sich die Frequenz eines Schwingkreises über die Thompsonschen Schwingungsgleichung $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$ bestimmen. Da die Kapazität C von der Permittivität ϵ_r des Dielektrikums abhängt, hat eine unter Normaldruck mit Luft gefüllte Kavität eine minimal andere Resonanzfrequenz, als unter Vakuum. Diese Vakuumverschiebung lässt sich mit Formel 5.73 abschätzen, die sich aus der Thompsonschen Schwingungsgleichung herleiten lässt. Hierbei sind f_L und f_0 die Resonanzfrequenzen unter Normaldruck und im Vakuum und ϵ_0 und $\epsilon_{r,L}$ die Permittivitäten des Vakuums und von Luft.

$$f_L = f_0 \frac{\sqrt{\epsilon_0}}{\sqrt{\epsilon_{r,L}}} \quad (5.73)$$

Die Arbeitspunkte der Tauchkolben wurden mit Hilfe der Dummytuner unter Normaldruck ermittelt, wie es in Abbildung 5.43 exemplarisch für CH2 dargestellt ist. Hierbei werden die Dummytuner vorsichtig in die Kavität geschoben, während die Resonanzfrequenz per S_{11} -Messung bestimmt wird.

Tabelle 5.21 gibt die Abstände der Tauchkolben zur Strahlachse und die gemessenen Resonanzfrequenzen der Kavitäten an.

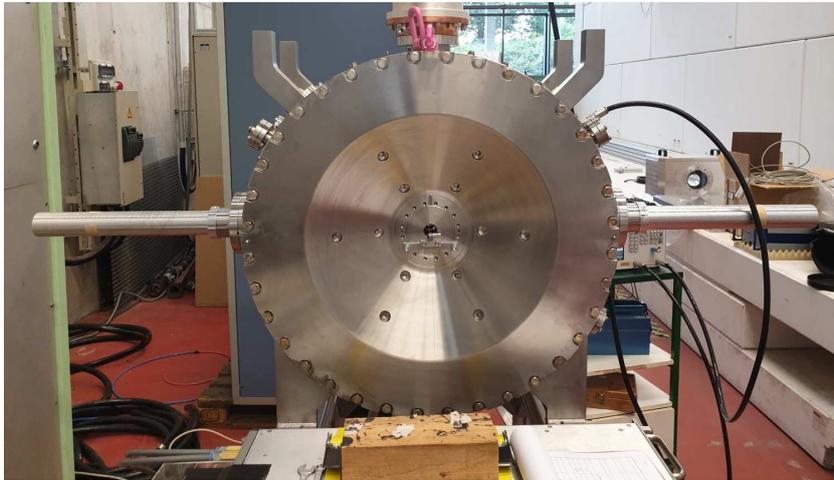


Abbildung 5.43: CH2 mit Dummytunern während der Low-Level-Messungen.

Wie bereits aus den Simulationsergebnissen aus Kapitel 5.1.2 bekannt ist, werden die beiden Tauchkolben von CH1 asymmetrisch positioniert, um eine Kollision mit der Tunermode zu vermeiden. Wie der Vergleich der Werte von CH1 und CH1newlid zeigt, ist die Position des dynamischen Tuners in beiden Konfigurationen identisch, während der statische Tuner um mehr als 6 mm versetzt ist.

Bei der Bewertung dieses Unterschiedes muss bedacht werden, dass der Einfluss des statischen Tauchkolbens an diesen Positionen nur noch sehr gering auf das Feld und damit auf die Resonanzfrequenz ist, weswegen bereits kleinere Messfehler oder Unterschiede am Versuchsaufbau z.B. in der Raumtemperatur für diesen Unterschied verantwortlich sein können.

5.5.4 Bestimmung des Tuningbereiches

Um den Tuningbereich zu bestimmen wurde die Resonanzfrequenz per S_{11} -Messung verfolgt während die Eindringtiefe des dynamischen Tauchkolben variiert wurde und der statische Tauchkolben auf dem Arbeitspunkt festgehalten wurde.

In Abbildung 5.44 sind links die unter Normaldruck gemessenen Tuningbereiche von CH1 und CH1newlid aufgetragen, wobei keine signifikanten Unterschiede auszumachen sind und die beiden Verläufe quasi aufeinanderliegen, während sich auf der rechten Seite der Tuningbereich von CH2 befindet.

Die in Tabelle 5.22 dargestellten Tuningbereiche wurden unter Normaldruck ermittelt, wodurch der Bereich, um den die Frequenz durch den Tuner nach oben verschoben werden kann bei CH1 und CH1newlid bei 0,28 und bei CH2 bei 0,45 MHz liegt, was, wie in Kapitel 6 gezeigt wird, ausreichend ist.

5.5 Low-Level-Messungen an den CHs

	Tuningbereich in MHz	Tuningbereich in mm
CH1	175,33 - 176,33	85,95 - 121,75
CH1 new lid	175,33 - 176,33	85,95 - 121,75
CH2	175,60 - 176,50	105,58 - 149,68

Tabelle 5.22: Gemessene Tuningbereiche für CH1, CH1newlid und CH2. Die Angaben in mm beschreiben den Abstand des dynamischen Tauchkolbens zur Strahlachse.

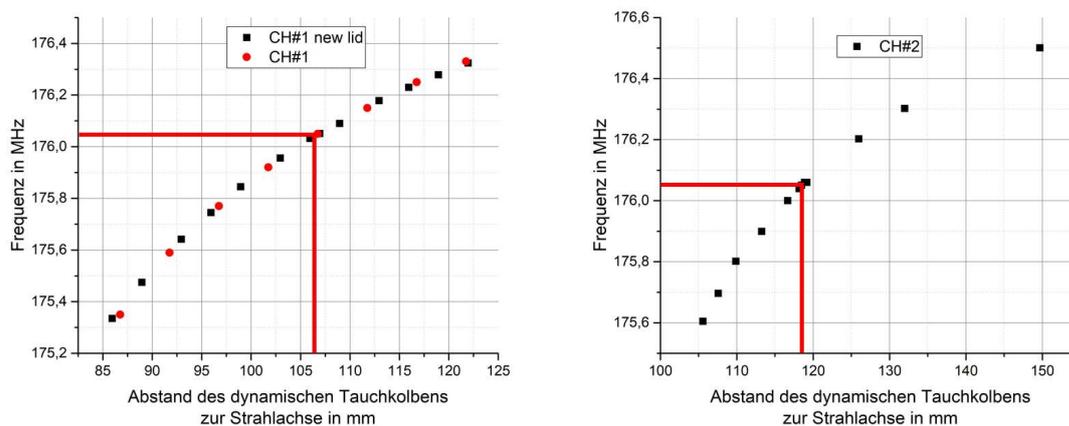


Abbildung 5.44: Links: Verlauf der Resonanzfrequenzen in Abhängigkeit des Tunerabstandes von der Strahlachse, wobei jeweils der Arbeitspunkt durch rote Balken gekennzeichnet ist. Links: CH1 in rot und CH1newlid in schwarz. Rechts: CH2.

5.5.5 Störkörpermessungen

Um die Spannungsverteilung entlang der Strahlachse zu messen macht man sich, wie auch schon bei den Flatness- und Dipolmessungen beim RFQ, das Slater-Theorem aus Kapitel 3.5.1 zu Nutze. Dieses besagt, dass man durch das Einbringen eines Fremdkörpers in den Resonatorraum die Felder und damit die gespeicherte Energie verändert, was sich durch eine Veränderung der Resonanzfrequenz äußert.

Bei der sogenannten Störkörper- oder Bead-Pull-Messung wird eine Nylonschnur auf der Strahlachse durch die Kavität gespannt, auf der sich eine Teflonkugel mit einem Durchmesser von 4 mm befindet. Da die Frequenzveränderung, die durch die Teflonkugel hervorgerufen wird sehr klein und damit schwer zu messen ist, wird statt dessen die Phasenverschiebung zwischen dem Ein- und Ausgangssignal gemessen. Wenn also die Teflonkugel gleichmäßig durch den Resonator gezogen wird, kann mit dem Netzwerkanalysator die Veränderung der Phase aufgezeichnet werden, aus der sich die Verteilung des elektrischen Feldes mit dem LINAC-Multitool [69] bestimmen lässt, wobei die Proportionalität aus Formel 5.74 verwendet wird, deren genaue Herleitung in [37] und [51]

zu finden ist. Abbildung 5.45 zeigt die mit dem LINAC-Multitool ausgewerteten Spannungsverteilungen für CH1newlid.

$$E \propto \sqrt{\tan(\Delta\phi)} \quad (5.74)$$

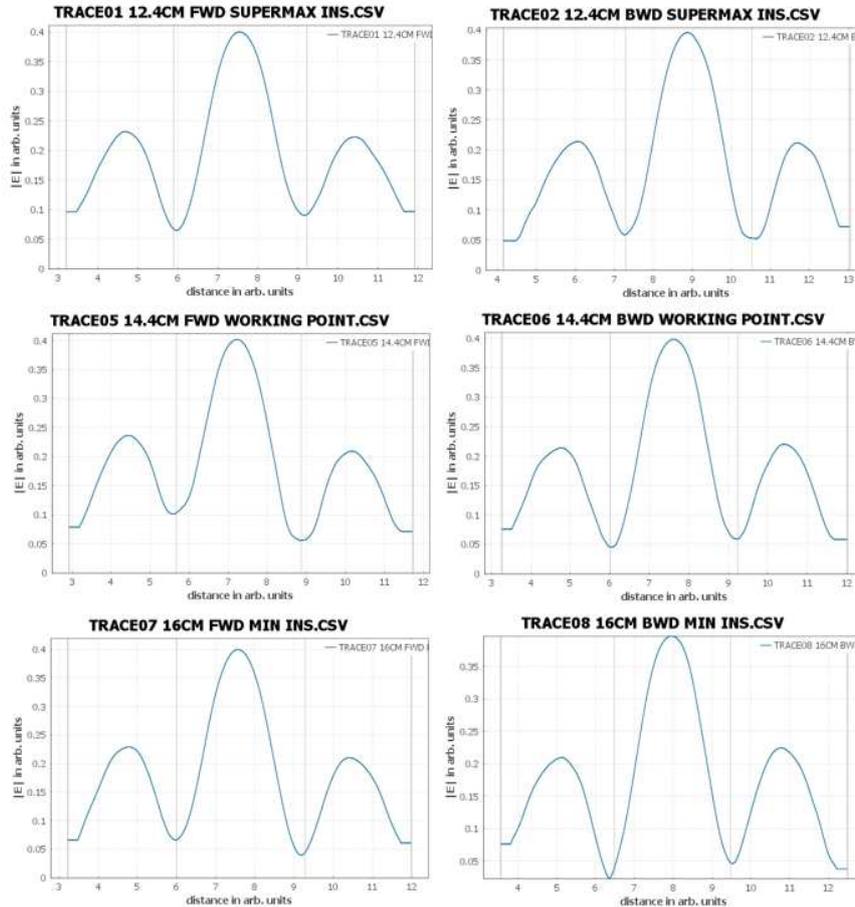


Abbildung 5.45: Mit dem LINAC-Multitool ausgewertete Störkörpermessungen an CH1newlid.

Die Schwierigkeit bei dieser Messmethode liegt darin, dass die Teflonkugel möglichst gleichmäßig bewegt werden muss, während Schwingungen der Nylonschnur vermieden werden sollen. Daher muss beim Aufbau und während der Messung darauf geachtet werden, dass die Schnur straff genug gespannt ist, um nicht durchzuhängen und um das Durchrutschen an den Umlenkrollen zu vermeiden, aber nicht zu straff, damit möglichst wenig Schwingungen auftreten.

In den vorliegenden Störkörpermessungen wurde die Geschwindigkeit des Schrittmotors derart eingestellt, dass die Teflonkugel ca. 14 s durch die Kavität benötigt, während der Netzwerkanalysator eine Zeitdauer von 20 s aufzeichnet.

Um zu gewährleisten, dass der Tauchkolben die Feldverteilung nicht beeinflusst, wurden die Spannungsverteilung der CHs sowohl am Arbeitspunkt, als auch an der minimalen und der maximalen Eindringtiefe des dynamischen Tauchkolbens gemessen, wobei

5.5 Low-Level-Messungen an den CHs

	Gap 1	Gap 2	Gap 3	Gap 4
CH1				
aus DD	24,9 %	49,2 %	26,1 %	
aus CST	26,1 %	48,0 %	25,9 %	
gemessen CH1	25,23 %	49,12 %	25,64 %	
gemessen CH1newlid	25,25 %	49,74 %	25,01 %	
CH2				
aus DD	17,3 %	32,7 %	33,4 %	16,5 %
aus CST	16,5 %	33,2 %	33,4 %	17,0 %
gemessen CH2	17,07 %	32,80 %	32,96 %	17,17 %

Tabelle 5.23: Vergleich der Spannungsverteilungen aus der Strahldynamiksimulation (DD), den simulierten Modellen der MYRRHA-CH-Kavitäten (CST) und den Messungen.

sich die einzelnen Spannungsverteilungen nicht signifikant voneinander unterscheiden dürfen, da dies ein Hinweis auf eine Beeinflussung der Feldverteilung durch den Tauchkolben wäre. Zusätzlich wurden die Messungen in, als auch entgegen der Strahlrichtung durchgeführt, um etwaige Fehler des Versuchsaufbaus zu kompensieren.

Die Tabellen 5.24 bis 5.26 zeigen die einzelnen Messungen, die für CH1, CH1newlid und CH2 durchgeführt wurden. Wie dort zu sehen ist, unterscheiden sich teilweise die ermittelten Spannungsverteilung bei einer Tauchkolbenstellung zwischen den beiden Messrichtungen, was sich auf minimalen Schlupf der Nylonschnur auf den Umlenkrollen zurückführen lässt.

	Spalt 1 in %	Spalt 2 in %	Spalt 3 in %
min. Eindringtiefe FWD	24,74	48,61	26,65
min. Eindringtiefe BWD	24,98	48,36	26,67
Arbeitspunkt FWD	27,86	47,52	24,62
Arbeitspunkt BWD	23,04	52,34	24,61
max. Eindringtiefe FWD	24,66	49,53	25,81
max. Eindringtiefe BWD	26,10	48,36	25,47
Mittelwert	25,23	49,12	25,64

Tabelle 5.24: Gemessene Spannungsverteilungen von CH1.

5.5 Low-Level-Messungen an den CHs

	Spalt 1 in %	Spalt 2 in %	Spalt 3 in %
max. Eindringtiefe FWD	25,94	49,96	24,10
max. Eindringtiefe BWD	23,81	49,74	26,45
Arbeitspunkt FWD	24,83	50,86	24,31
Arbeitspunkt BWD	26,04	49,94	24,02
min. Eindringtiefe FWD	25,25	49,18	25,57
min. Eindringtiefe BWD	25,62	48,78	25,60
Mittelwert	25,25	49,74	25,01

Tabelle 5.25: Gemessene Spannungsverteilungen von CH1newlid.

Die so ermittelten Spannungsverteilungen können anschließend mit denen aus der Strahldynamik- und der HF-Simulation, wie in Tabelle 5.23 und Abbildung 5.46 dargestellt, verglichen werden. Da sich die Abweichungen zwischen den Werten aus der Strahldynamiksimulation von den gemessenen Werten nur um maximal 1,1 % unterscheiden, ist nicht davon auszugehen, dass diese Abweichung zu Problemen während des Strahlbetriebes führt.

	Spalt 1 in %	Spalt 2 in %	Spalt 3 in %	Spalt 4 in %
max. Eindringtiefe FWD	17,54	32,61	32,66	17,18
max. Eindringtiefe BWD	16,92	32,55	32,82	17,71
Arbeitspunkt FWD	17,61	32,39	32,42	17,58
Arbeitspunkt BWD	17,42	32,48	32,61	17,49
min. Eindringtiefe FWD	16,47	33,49	33,6	16,44
min. Eindringtiefe BWD	16,44	33,30	33,65	16,61
Mittelwert	17,07	32,80	32,96	17,17

Tabelle 5.26: Gemessene Spannungsverteilungen von CH2.

Da zum Zeitpunkt des Entstehens dieser Arbeit, davon ausgegangen wird, dass der dickschichtverkupferte Deckel auch während des Strahlbetriebes auf CH1 verbleibt, wer-

5.5 Low-Level-Messungen an den CHs

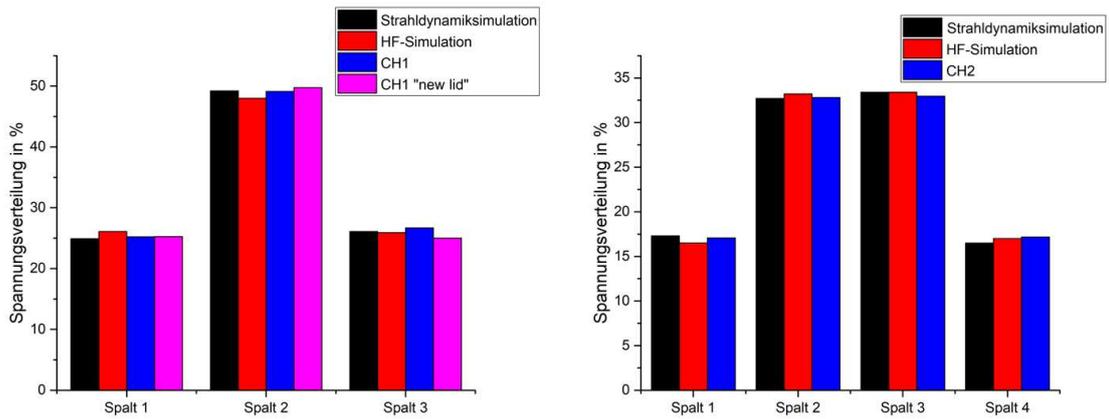


Abbildung 5.46: Vergleich der gemessenen Spannungsverteilungen von CH1 bzw. CH1newlid (links) und CH2 (rechts) mit den Strahldynamik- und HF-Simulationen.

den in der nachfolgenden Tabelle 5.27 in der die Ergebnisse der Low-Level-Messungen zusammengefasst sind, nur die Werte von CH1newlid und CH2 betrachtet.

	CH1newlid	CH2	Bemerkung
f_r in MHz	176,1	176,1	durch Tauchkolben einstellbar
β	1,10	1,10	durch Position der Schleife einstellbar
Q_0	11860	12580	entspricht ≈ 91 bzw. 93% des Simulationswertes
Tunerhub in MHz	175,33 - 176,33	175,60 - 176,50	ausreichend
Spannungs- verteilung			
DD in %	24,9 49,2 26,1	17,3 32,7 33,4 16,5	Abweichung
Messung in %	25,25 49,74 25,01	17,07 32,80 32,96 17,17	tolerierbar

Tabelle 5.27: Ergebnisse der LL-Messungen an CH1newlid und CH2 mit Vergleichswerten aus der Simulation und Bemerkungen.

6 Konditionierung

Um eine Kavität mit Strahl betreiben zu können, muss zunächst sichergestellt werden, dass so hohe Leistungen eingekoppelt werden können, wie es zur Ausbildung der geforderten Beschleunigungsspannungen notwendig ist.

Der Prozess, in dem die in eine Kavität eingekoppelte Leistung langsam schrittweise bis zu diesem Leistungspegel erhöht wird, bezeichnet man als Konditionierung. Eine Kavität gilt als konditioniert, wenn die notwendige Leistung über einen hinreichend großen Zeitraum hinweg konstant eingekoppelt werden kann, ohne dass Probleme auftreten, die das Verringern oder das Ausschalten der Leistung notwendig machen.

In den folgenden Abschnitten soll zunächst ein grundlegender Versuchsaufbau und anschließend der schematische Ablauf einer Konditionierung erläutert werden, wie sie für die MYRRHA-Kavitäten durchgeführt wurde. Hierbei soll das Augenmerk auf die während der Konditionierungen der MYRRHA-Kavitäten gesammelten praktischen Erfahrungen gelegt werden, um als Hilfestellung für zukünftige Konditionierungen zu dienen.

6.1 Grundlegender Versuchsaufbau einer Konditionierung

Wie in Abschnitt 6.2 noch näher besprochen wird, erfolgt die Konditionierung über die Steuerung der Vorwärtsleistung P_f , während die reflektierte Leistung P_r , die transmittierte Leistung P_t und der Druck p innerhalb der Kavität überwacht werden. Gleichzeitig wird, entweder durch das Bewegen des dynamischen Tuners oder durch Variation der Frequenz der Vorwärtsleistung am Signalgenerator die reflektierte Leistung P_r minimiert.

Der grundlegende Aufbau der Konditionierung einer normalleitenden Kavität, wie er für die in dieser Arbeit besprochenen Konditionierungen benutzt wurde, ist in Abbildung 6.1 dargestellt, wobei die benötigten Geräte und deren Zweck im folgenden kurz beschrieben werden sollen:

Signalgenerator

Über den Signalgenerator werden Frequenz und Höhe der Vorwärtsleistung gesteuert. Je nach Modell ergeben sich bauartbedingte Unterschiede im Umfang der Funktionen und im möglichen Frequenz- und Leistungsbereich, der vom Signalgenerator ausgegeben werden kann. Einzelne Modelle verfügen über installierte Pulsgeneratoren oder können extern gesteuert werden.

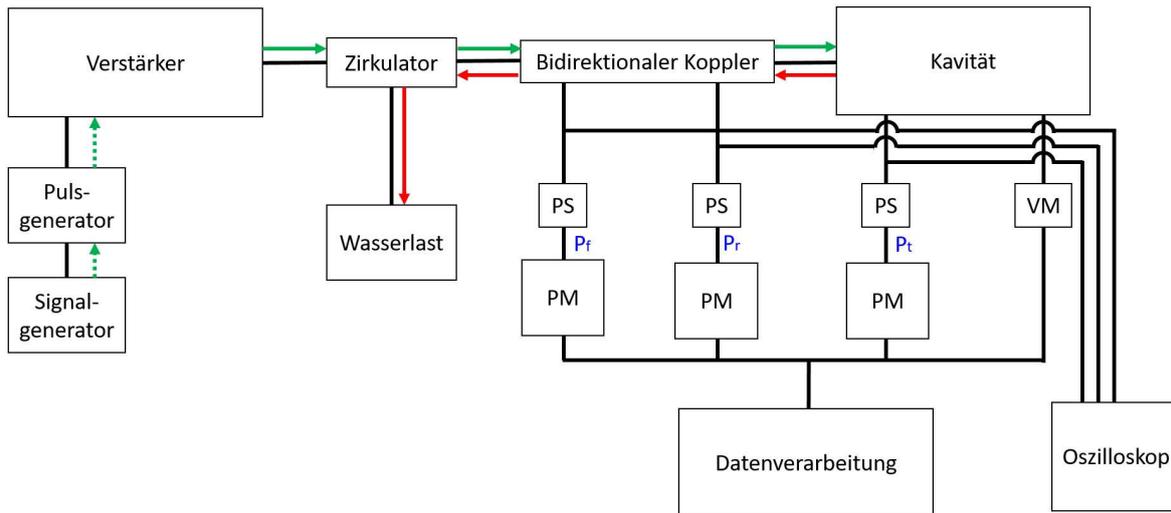


Abbildung 6.1: Schematischer Versuchsaufbau für die Konditionierung einer normalleitenden Kavität. Die grünen Pfeile beschreiben den Weg der Vorwärtsleistung vom Signalgenerator über den Pulsgenerator bis zum Verstärker (gestrichelte Pfeile) und von dort bis zur Kavität, während die roten Pfeile den Weg der reflektierten Leistung von der Kavität durch den bidirektionalen Koppler und den Zirkulator bis zur Wasserlast beschreibt.

Pulsgenerator

Beim Pulsgenerator handelt es sich um einen optionalen Teil des Konditionierungsaufbaus, das aus dem cw-Signal des Signalgenerators ein gepulstes Signal generiert, dessen Pulslänge und Repetitionsrate innerhalb bauartbedingter Grenzen einstellbar ist. Die Entscheidung, ob und wenn ja, mit welchen Tastverhältnissen eine gepulste oder eine cw-Konditionierung erfolgen soll, entscheidet sich anhand der zu konditionierenden Kavität und der übrigen für die Konditionierung verwendeten Baueile.

Verstärker

Der Verstärker erzeugt die Vorwärtsleistung P_f , indem er das vom Signalgenerator, bzw. Pulsgenerator ankommende Signal um einen festen Faktor verstärkt. Bei der Planung einer Konditionierung müssen vor der Wahl des Verstärkers folgende Punkte beachtet werden:

- **Frequenzbereich:** Wenn der Verstärker nur in einem sehr engen Frequenzbereich betrieben werden kann, oder während des Betriebes die Frequenz nur unzureichend verändert werden darf, kann während der Konditionierung die Frequenz der Vorwärtsleistung P_f nicht nachreguliert werden, was die Verwendung eines dynamischen Tuners erfordert.
- **Tastverhältnis:** Nicht jeder Verstärker kann in jedem Tastverhältnis betrieben werden. So mussten z.B. die MYRRHA-CHs im cw-Betrieb konditioniert werden, da der verwendete Verstärker nicht für den gepulsten Betrieb ausgelegt ist.

- **Reflexion:** Während der Konditionierung und seltener auch während des späteren Strahlbetriebes kann es dazu kommen, dass ein Teil der Vorwärtsleistung P_f nicht vollständig in die Kavität eingekoppelt wird und als reflektierte Leistung P_r in Richtung des Verstärkers zurückfließt, wodurch dieser, sofern er nicht dafür ausgelegt ist, beschädigt werden kann. Die Eigenschaft eines Verstärkers, reflektierte Leistung zu bewältigen, entscheidet, ob die Verwendung eines Zirkulators samt Wasserlast notwendig ist.

Zirkulator und Wasserlast

Um den Verstärker vor der reflektierten Leistung P_r zu schützen, kann ein Zirkulator verwendet werden. Diese lassen sich in aktive und passive Zirkulatoren einteilen, die zusätzlich nach Anzahl ihrer Anschlüsse (3- oder 4-Ports) unterschieden werden. Für die Verwendung in den Konditionierungsaufbauten, die am IAP für die vorliegende Arbeit verwendet wurden, haben sich passive 3-Port Zirkulatoren bewährt. Diese besitzen 3 Anschlüsse, und sind mit einem magnetischen Material z.B. einem Ferrit, gefüllt. Durch die Ferrite wird die Laufzeit der elektromagnetischen Wellen beeinflusst, wobei sich diese bei unterschiedlichen Propagationsrichtungen unterscheiden [66].

Die an den Ports einlaufenden Wellen werden gleichmäßig aufgeteilt und es fließt je eine Hälfte im und eine Hälfte entgegen dem Uhrzeigersinn durch den Zirkulator. Die unterschiedlichen Laufzeiten sind so gewählt, dass sich für ein Signal, das in Port 1 eingespeist wird, ein Phasenversatz von 180° für die beiden Wellenanteile an Port 3 ergibt, während an Port 2 kein Phasenversatz vorliegt, weswegen an Port 2 das Signal abgegriffen werden kann [66].

Die an der Kavität reflektierte Leistung P_r wird demnach am Zirkulator komplett in die angeschlossene Wasserlast geleitet. Bei dieser handelt es sich um einen ohmschen Widerstand, in dem die ankommende Leistung in Wärmeenergie umgewandelt und von der integrierten Kühlung abtransportiert wird.

Sofern der verwendete Verstärker darauf ausgelegt ist, die erwartete reflektierte Leistung selbst abzuführen, kann auf die Verwendung eines Zirkulators samt Wasserlast verzichtet werden.

Bidirektionaler Koppler

Der bidirektionale Koppler ermöglicht es, kleine Anteile (im Bereich von -40 bis -45 dB) von P_f und P_r zu Mess- und Regelzwecken auszukoppeln. Da es sich bei bidirektionalen Kopplern um sehr empfindliche Bauteile handelt, empfiehlt es sich, regelmäßig deren Funktion und die Dämpfung der einzelnen Signalausgänge durch Testmessungen zu überprüfen.

Kavität

Die zu konditionierende Kavität spielt selbstverständlich eine Hauptrolle im Konditionierungsaufbau. Zu beachten ist, dass vor Beginn der Konditionierung die Dämpfung der

verwendeten Pickups unter Vakuum nachgemessen wird um den systematischen Messfehler bei der Bestimmung der transmittierten Leistung P_t , möglichst gering zu halten.

Power-Sensor (PS) und Power-Meter (PM)

Die Power-Sensoren werden mit den Anschlüssen des bidirektionalen Kopplers und einem Pickup der Kavität verbunden, um P_f , P_r und P_t messen zu können. Es muss vor Beginn der Konditionierung darauf geachtet werden, dass die verwendeten Power-Sensoren und Power-Meter für die geplante Konditionierungsmethode (cw oder gepulst) verwendet werden können. Auch muss sichergestellt sein, dass die zu erwartenden Leistungen, die an den Power-Sensoren anfallen innerhalb des tolerierbaren Leistungsbereichs liegen, da die Geräte sonst beschädigt werden.

Vakuummessröhre (VM)

Die Vakuummessröhre misst den Druck innerhalb der Kavität und sollte derart gewählt werden, dass sie den erwarteten Druckbereich abdeckt und mit der verwendeten Software für die Datenerfassung kompatibel ist.

Datenverarbeitung

Bislang besteht die Datenverarbeitung, die am IAP für die Konditionierung der MYRRHA-Kavitäten verwendet wurde aus der Erfassung der Messwerte für die drei Leistungen P_f , P_r , P_t , den Druck p und den Kühlwassertemperaturen T_n , wobei n für die Position des Temperatursensors steht. Allerdings kann die Datenverarbeitung auch eine zentrale Steuerung der Konditionierung unter Zuhilfenahme einer automatischen Konditionierungssoftware beinhalten, für die derzeit die ersten Versuche am IAP unternommen werden.

Oszilloskop

Das Oszilloskop dient dem Experimentator zur besseren Visualisierung der Messwerte P_f , P_r , P_t und p und kann als optional betrachtet werden.

6.2 Schematischer Ablauf einer Konditionierung

Während des Konditionierens der MYRRHA-Kavitäten wurden neben dem Druck p und den Temperaturen des Kühlwassers T_n die drei Leistungen P_f , P_r und P_t überwacht. Hierbei beschreibt die Vorwärtsleistung P_f die Leistung, die vom Verstärker in Richtung Kavität geleitet wird und P_r die Leistung, die von der Kavität in Richtung Verstärker reflektiert wird. P_t wird als transmittierte Leistung bezeichnet und beschreibt den Anteil an der Vorwärtsleistung, der in der Kavität zum Ausbilden der Felder genutzt wird und in Form von ohmschen Verlusten von der Kühlung abgeführt werden muss. Für den Fall einer abgeschlossenen Konditionierung ohne Strahl gilt Formel 6.75.

$$P_f = P_r + P_t \quad (6.75)$$

Während der Konditionierung ist Formel 6.75 üblicherweise nicht erfüllt, da ein Teil der Leistung, die in die Kavität eingekoppelt wird, nicht in den Aufbau des Feldes, sondern für den Konditionierungsprozess aufgewendet wird. Diese Leistung P_{kond} setzt sich aus den Einzelleistungen der verschiedenen möglichen Prozesse zusammen, die Abschnitt 6.3 kurz beschrieben werden. Damit ergibt sich während der Konditionierung folgende Gleichung:

$$P_f = P_r + P_t + P_{\text{kond}} \quad (6.76)$$

Aus Gleichung 6.76 kann gefolgert werden, dass die Konditionierung abgeschlossen ist, sofern $P_{\text{kond}} = 0$ gilt, also Gleichung 6.75 erfüllt ist.

Da P_{kond} experimentell nicht sauber bestimmt werden kann, muss über die Differenz, die sich aus der Betrachtung der drei Leistungen P_f , P_r und P_t ergibt, der Stand der Konditionierung abgeschätzt werden.

Der schematische Ablauf einer Konditionierung ist in Abbildung 6.2 abgebildet. Es ist aber zu bemerken, dass eine Konditionierung bei verschiedenen Kavitäten, selbst wenn diese bauartbedingt gleich sind, hinsichtlich ihrer Dauer und womöglich auftretender Probleme, stark unterschiedlich ablaufen kann. Auch können sich die in Abbildung 6.2 angegebenen Grenzwerte, etwa für den Druck p und das Verhältnis P_r/P_f , für verschiedene Kavitäten unterscheiden.

Zu Beginn der Konditionierung werden P_f und die Frequenz (entweder durch den dynamischen Tauchkolben, oder am Signalgenerator) so eingestellt, dass ein Minimum an Leistung (für normalleitende Kavitäten in der Größenordnung 0,5 - 1 mW) derart in die Kavität eingekoppelt werden kann, dass Gleichung 6.75 annähernd erfüllt und der Druck p innerhalb der Kavität unterhalb des vorher bestimmten Grenzwertes ist. Ab hier kann, wie in Abbildung 6.2 dargestellt die Leistung in kleinen Schritten erhöht werden, während sowohl die reflektierte Leistung P_r , als auch der Druck p stetig überwacht werden. Bei den in dieser Arbeit vorgestellten Konditionierungen betrug die Schrittweite bei der Erhöhung üblicherweise 0,01 dB.

6.2 Schematischer Ablauf einer Konditionierung

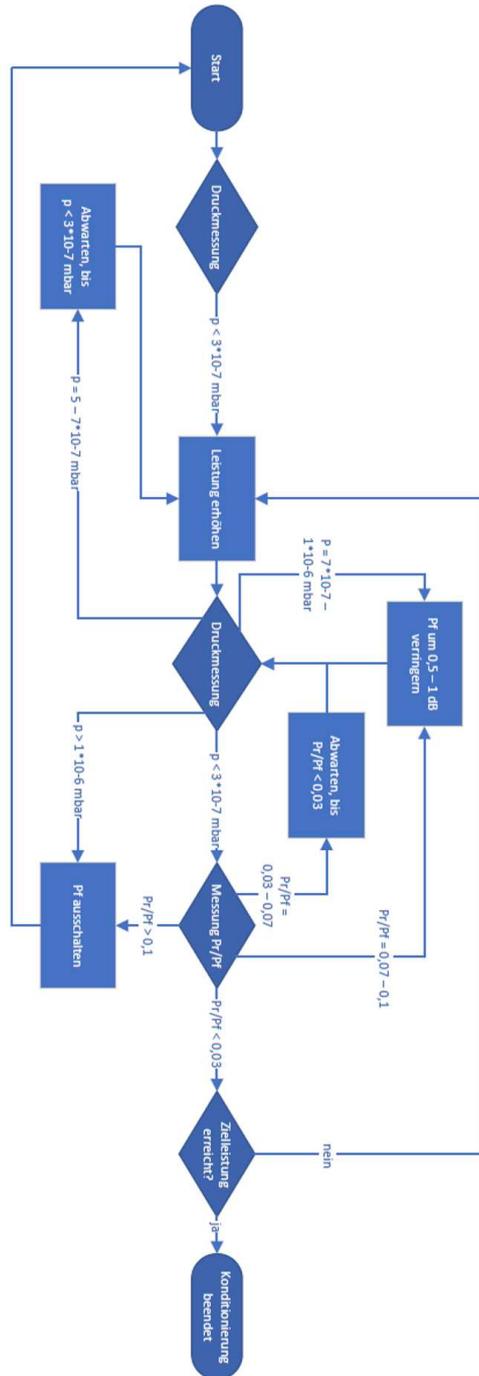


Abbildung 6.2: Vereinfachter Ablauf einer Konditionierung. Die Grenzwerte p und P_r/P_f können für unterschiedliche Kavitäten anders gewählt werden.

6.3 Prozesse während der Konditionierung

Nach dem Bau einer normalleitenden Kavität wird deren Oberfläche vor dem Versand, oder spätestens vor den Low-Level-Messungen gründlich mit fusselfreien Tüchern und geeigneten Reinigungsmitteln gesäubert. Trotz dessen können sich noch kleinste Verschmutzungen und Ablagerungen auf der Oberfläche befinden, die erst durch die eingekoppelte Leistung gelöst und anschließend vom Vakuumsystem entfernt werden. Diese „Reinigung“ kann für gewöhnlich als der zeitintensivste Prozess und damit als die eigentliche Konditionierung betrachtet werden. Währenddessen wird eine Erhöhung der Vorwärtsleistung meist nur vom Anstieg des Druckes begrenzt, wobei vereinzelt auch eine leichte Zunahme der reflektierten Leistung zu beobachten ist.

Neben diesem Reinigungsprozess können noch andere Prozesse ablaufen, die je nach Ausprägung ein Eingreifen des Experimentators bzw. der Konditionierungssoftware erfordern. Wobei betont darauf hingewiesen wird, dass die nachfolgende Liste keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt.

6.3.1 Ausgasung

Unter einer Ausgasung versteht man eine schnelle Zunahme des Druckes innerhalb des Resonators, wobei das zusätzliche Material, das den Druck erhöht, entweder von einem virtuellen Leck, oder einer Art „Verschmutzung“ herrühren kann, die sich schlagartig löst.

Unter einem virtuellen Leck werden in diesem Zusammenhang eingeschlossene Hohlräume, die z.B. während der Fertigung oder dem Verkupfern entstanden sein können, bezeichnet.

Ausgasungen äußern sich durch einen schnellen Anstieg des gemessenen Druckes und unterscheidet sich von einem Leck dadurch, dass ein Leck eine dauerhafte Verschlechterung des Vakuums zur Folge hat, die eine Unterbrechung der Konditionierung, mit anschließender Inspektion der Kavität und des Vakuumsystems zur Folge hat.

Sofern der Druckanstieg bei einer Ausgasung unterhalb eines kritischen Wertes bleibt und das angeschlossene Vakuumsystem in der Lage ist, den Druck stetig zu verringern, muss die Konditionierung nicht unterbrochen werden. Der kritische Wert für den Druck muss für jede Kavität und für jede Konditionierung individuell festgelegt werden, wobei sich für die MYRRHA-Kavitäten ein Wert von $1 \cdot 10^{-6}$ mbar bewährt hat.

6.3.2 Multipacting

Beim Multipacting handelt es sich um einen resonanten Prozess, bei dem freie Elektronen durch elektromagnetische Felder beschleunigt werden und auf der Oberfläche des Resonators auftreffen. Wenn die Energie der Elektronen hoch genug ist, werden dabei Sekundärelektronen herausgelöst, die wiederum im Feld der Kavität beschleunigt werden, wodurch eine sog. Elektronelawine entstehen kann [50] [34].

Bei sehr hohen Energien dringen die Elektronen zu tief in das Material ein und die herausgelösten Sekundärelektronen gelangen nicht an die Oberfläche, weswegen bei hohen Feldpegeln kein Multipacting mehr auftritt. [51].

Es kann in 1-Punkt- und 2-Punkt-Multipacting unterschieden werden. Beim 1-Punkt-Multipacting treffen die erzeugten Sekundärelektronen in der Nähe des Entstehungsortes wieder auf die Resonatoroberfläche. Hierbei werden die erzeugten Elektronen durch das elektrische Feld senkrecht zur Oberfläche beschleunigt und durch das parallel dazu verlaufende Magnetfeld auf eine Kreisbahn abgelenkt [37].

2-Punkt-Multipacting findet zwischen zwei Flächen statt, wobei die herausgelösten Elektronen auf der jeweils gegenüberliegenden Fläche auftreffen, um wieder Sekundärelektronen zu erzeugen [51].

Da das Multipacting von der eingekoppelten Leistung gespeist wird, äußert es sich dadurch, dass die transmittierte Leistung P_t nicht durch eine Steigerung von P_f erhöht werden kann. Zusätzlich kann ein leichter bis mittlerer Anstieg des Vakuums beobachtet werden.

Es lässt sich beobachten, dass viele bereits erfolgreich durch Konditionierung abgetragene Multipactingbarrieren meist auch nach einer kontrollierten Belüftung der Kavität nicht von neuem in Erscheinung treten. Das spricht dafür, dass es sich beim Multipacting gewissermaßen um einen Prozess der Oberflächenbearbeitung handelt, bei dem Unebenheiten bzw. Verunreinigungen abgetragen werden können. Daher empfiehlt es sich, sofern die Verschlechterung des Vakuums dies erlaubt, das Multipacting nicht nur weiterlaufen zu lassen, sondern es durch eine zaghafte Erhöhung der Vorwärtsleistung P_f zusätzlich zu verstärken. Ebenfalls kann das Multipacting durch eine Frequenzanpassung gefördert werden. Allerdings muss diese aktive Bearbeitung von Multipactingschwellen äußerst vorsichtig erfolgen, da sonst der kritische Wert für den Druck überschritten werden kann.

Beim Multipacting können „harte“ und „weiche“ Barrieren unterschieden werden: „Weiche“ Barrieren können durch die Konditionierung so lange bearbeitet werden, bis sie „weggebrannt“ [51], also verschwunden sind, während „harte“ Barrieren dauerhaft auftreten und nicht wegkonditioniert werden können. In vielen Fällen lassen sich diese jedoch zumindest „überspringen“.

6.3.3 Entladung

Aufgrund der hohen Feldstärken, die sich innerhalb von Resonatoren ausbilden, kann es zwischen leitenden Flächen zu Feldemissionen und schließlich zu Überschlägen kommen, wobei lokale Feldspitzen, wie sie etwa durch Unebenheiten oder Verschmutzungen auf der Resonatoroberfläche entstehen können und lokal erhöhte Drücke im Restgas, z.B. durch eine Ausgasung, dies weiter begünstigen.

Im Gegensatz zu den beiden vorherigen Prozessen, die u.U. nicht unterbunden werden müssen, und bei denen die Konditionierung unter strenger Beobachtung fortgesetzt werden kann, sollte eine Entladung sofort mit einer deutlichen Reduktion oder dem Ausschalten der Vorwärtsleistung unterbunden werden. Zwar werden Argon-Gasentladungen in supraleitenden Kavitäten zur Präparation der Oberfläche eingesetzt [37], doch ist das während der Konditionierung weder beabsichtigt, noch gewünscht. Entladungen erzeugen lokal große Wärmemengen, die sehr schnell Teile des Resonators dauerhaft beschädigen, oder gar zerstören können.

6.3 Prozesse während der Konditionierung

Sie äußern sich durch eine schlagartige Verschlechterung des Vakuums um mehrere Größenordnungen, gepaart mit einem starken Anstieg der reflektierten Leistung P_r bis hin zur Totalreflexion bei gleichzeitiger Reduktion der transmittierten Leistung P_t .

6.4 Genauigkeit der Messungen während der Konditionierung

Die Konditionierungen des MYRRHA-RFQs und der MYRRHA-CHs, die in den nachfolgenden Abschnitten behandelt werden, wurden anhand der gemessenen Daten der drei Leistungen P_t , P_r und P_t , sowie des Druckes innerhalb der Kavität p gesteuert.

Vor Beginn der Konditionierung wird der Messaufbau der Leistungsmessungen einer sorgfältigen Kalibrierung unterzogen. Hierzu werden die Dämpfungen entlang der einzelnen Signalpfade möglichst genau nachgemessen. Die so ermittelten Dämpfungen werden bei der Auswertung der Signale als Korrekturfaktor benutzt, um aus den am Bidirektionalen Koppler bzw. am Pickup gemessenen Leistungen die tatsächlichen Leistungen P_f , P_r und P_t zu errechnen.

Obwohl diese Messungen mit äußerster Sorgfalt durchgeführt werden, ist trotz dessen mit einem Fehler von 2-3% zu rechnen, wobei dieser Fehler bei einem längeren Signalpfad mit einer höheren Anzahl von verschiedenen Bauteile (Kabel, Splitter, Übergänge etc.) auf bis zu 5% ansteigen kann.

Üblicherweise werden diese Kalibrierungen mit einem Netzwerkanalysator oder direkt mit einem Messaufbau bestehend aus Signalgenerator, Power-Sensor und Power-Meter durchgeführt. Die hierbei verwendeten Leistungspegel sind kleiner als 1 W. Für die Bestimmung der Dämpfung der Bauteile, die nach dem Bidirektionalen Koppler bzw. nach dem Pickup verwendet werden, ist das kein Problem, da dies auch den während der Konditionierung auftretenden Leistungen entspricht.

Allerdings kann dies problematisch für die Bestimmung der Dämpfung des Pickups sein. Wie aus den Low-Level-Messungen des MYRRHA-RFQs und der MYRRHA-CHs in den Abschnitten 4.3.2 und 5.5.2 bereits bekannt ist, wurden die verwendeten Pickups mit einer Dämpfung von -58,1 bis -49,1 dB eingestellt. In diesem Bereich reagiert die Dämpfung äußerst sensibel auf kleinste Veränderungen der Position bzw. der Orientierung der Pickup-Schleife innerhalb des Resonators. So kann beispielsweise bereits das Festziehen der Schrauben, die den Pickup mit dem DN40cf-Flansch der Kavität verbinden, die Dämpfung um mehrere dB verändern.

Während der Konditionierung und dem späteren Strahlbetrieb werden mehrere kW in die Kavität eingekoppelt, was mit geometrischen Veränderungen aufgrund thermischer Expansion einher geht. Daher kann nicht ausgeschlossen werden, dass sich die Kopplung der Schleife des Pickups an das Feld des Resonators bei höheren Leistung verändert, wodurch sich auch die Dämpfung des Pickups verändert.

Eine analoge Überlegung kann auch für die Dämpfung von P_f und P_r am Bidirektionalen Koppler geführt werden. Da an diesem aber idealerweise keine Leistung abfällt, ist nicht mit thermischen Veränderungen der Geometrie und den daraus resultierenden Abweichungen der Dämpfungen zu rechnen.

6.5 Konditionierung des MYRRHA-RFQs

Der MYRRHA-RFQ wurde in zwei Phasen konditioniert. Die Erste Konditionierung erfolgte in der Experimentierhalle des IAP

6.5.1 Vorkonditionierung des MYRRHA-RFQs am IAP

Der MYRRHA-RFQ wurde zunächst im Rahmen der Masterarbeit von Sarah Lamprecht [70] in der Experimentierhalle des IAP bis zu einer Leistung von ≈ 11 kW cw konditioniert. Der hierfür verwendete Verstärker der Firma Bruker, gehört zum Neutronengenerator FRANZ und ist für 12 kW im cw-Betrieb bei einer Frequenz von 175 MHz ausgelegt. Dieser Verstärker wurde ebenfalls für die Konditionierungen der CH-Strukturen verwendet, die in Abschnitt 6.6 beschrieben werden.

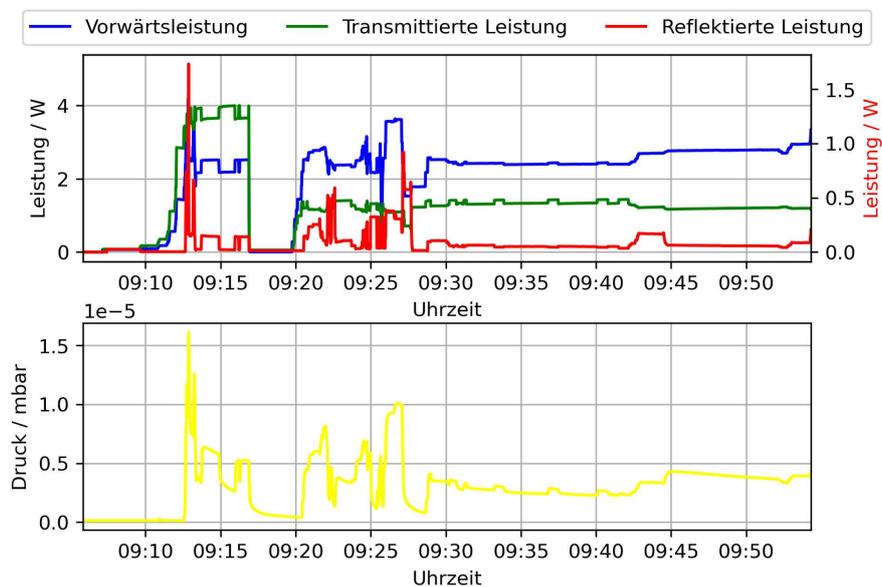


Abbildung 6.3: Konditionierung des MYRRHA-RFQs in der Experimentierhalle des IAP, bei dem kurzzeitig eine Leistung von 4 W eingekoppelt werden konnte.

Abbildung 6.3 zeigt einen Ausschnitt zu einem frühen Zeitpunkt der Konditionierung, bei dem zunächst bei verhältnismäßig hohem Druck im Bereich von 10^{-5} mbar gearbeitet wurde und bei dem nur wenige Watt in den RFQ eingekoppelt werden konnten.

Am Ende der Vorkonditionierung des MYRRHA-RFQs am IAP konnten, wie in Abbildung 6.4 dargestellt, 11 kW eingekoppelt werden. Von einer weiteren Erhöhung der Leistung bis zur Maximalleistung des Verstärkers von 12 kW wurde abgesehen, da der Verstärker auf 175 MHz ausgelegt ist und bei der Konditionierung des RFQs bei 176,1 MHz betrieben wurde.

Eine genauere Betrachtung der Konditionierung des MYRRHA-RFQs am IAP befindet sich in [70].

6.5 Konditionierung des MYRRHA-RFQs

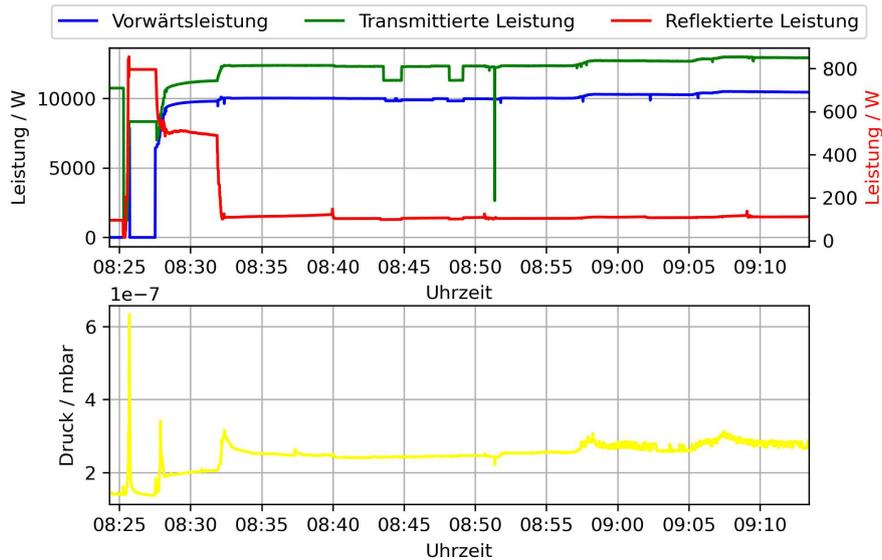


Abbildung 6.4: Konditionierung des MYRRHA-RFQs in der Experimentierhalle des IAP bei dem bis zu 11 kW eingekoppelt werden konnten.

6.5.2 Konditionierung des MYRRHA-RFQs in LLN

Nach der Vorkonditionierung am IAP mit 11 kW wurde der MYRRHA-RFQ ins belgische Louvain-la-Neuve transportiert, wo er für den 5,9 MeV-Injektor (vgl. Abschnitt 2.3) verwendet werden soll. Abbildung 6.5 zeigt den RFQ an seinem Bestimmungsort im Bunker in Louvain-la-Neuve nachdem er mit dem Verstärker und der Kühlwasserversorgung verbunden wurde.

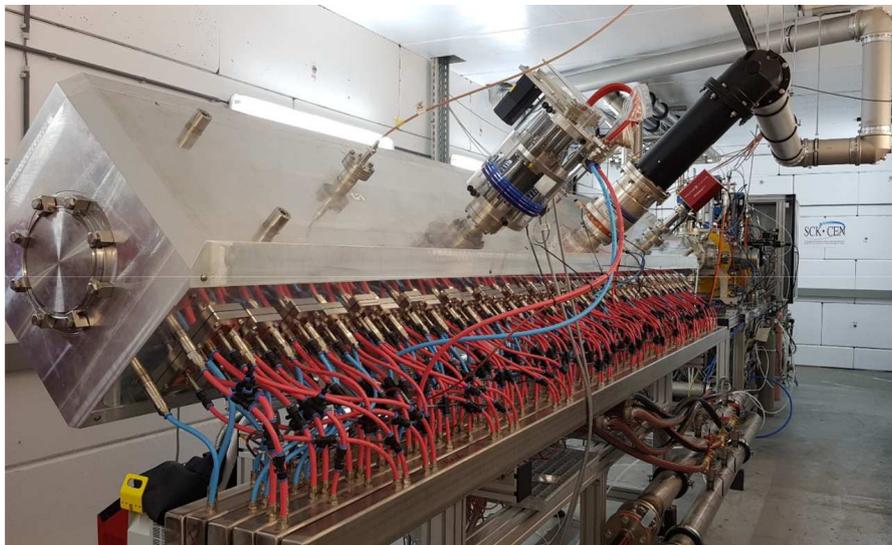


Abbildung 6.5: MYRRHA-RFQ an seinem Bestimmungsort in Louvain-la-Neuve mit verbundener Leistungs- und Kühlwasserversorgung.

6.5 Konditionierung des MYRRHA-RFQs

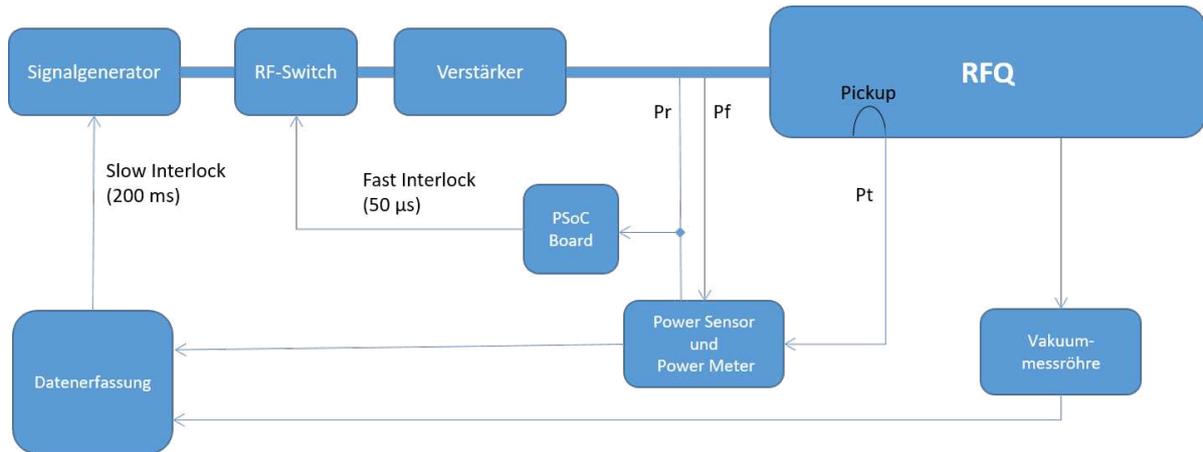


Abbildung 6.6: Vereinfachte Übersicht des Konditionierungsaufbaus in LLN mit den beiden Interlocksystemen.

Der Versuchsaufbau in LLN war, wie es in Abbildung 6.6 vereinfacht dargestellt ist, mit zwei redundanten Interlocksystemen versehen, die die reflektierte Leistung, bzw. die reflektierte Leistung und den Druck innerhalb des Resonators überwachen und die Vorwärtsleistung unterbrechen konnten, sobald frei einstellbare Grenzwerte überschritten wurden.

Das **Fast Interlock** System wurde von einem PSoC¹-Board gesteuert, das die reflektierten Leistung P_r am Bidirektionalen Koppler abgreift und das Signal zwischen dem Signalgenerator und dem Verstärker über einen RF-Switch kurzzeitig unterbricht, sobald der voreingestellte Grenzwert überschritten wurde. Die Reaktionszeit des Fast Interlock Systems wurde von Seiten des SCK mit etwa $50 \mu\text{s}$ angegeben.

Das **Slow Interlock** System ist ein Teil der Datenaufzeichnungssoftware und überwacht die reflektierte Leistung und den Druck innerhalb der Kavität und kann direkt die Vorwärtsleistung am Signalgenerator ausschalten, sofern Grenzwerte für die reflektierte Leistung P_r oder den Druck p überschritten wurden. Die Reaktionszeit des Slow Interlock Systems wurde von Seiten des SCK mit etwa 200 ms abgeschätzt, womit es immer noch deutlich unter der Reaktionszeit eines aufmerksamen Experimentators liegt.

In LLN wurde die Konditionierung mit einem 192 kW Verstärker der Firma IBA zunächst im cw-Betrieb fortgesetzt. Abbildung 6.7 zeigt beispielhaft eine dieser frühen cw-Konditionierungen bei der 14,8 kW eingekoppelt werden konnten, wobei sich die reflektierte Leistung im Bereich weniger Watt bewegte. Der Verlauf des Druckes und der reflektierten Leistung zeigt, dass während dieses Konditionierungsausschnittes im Bereich niedriger Leistungen (bis etwa 11.00 Uhr und deutlich unter 1 kW) die Konditionierung noch nicht vollständig abgeschlossen ist, bzw. dass sich in diesem Bereich harte Schwellen befinden, die beim Einschalten der Leistung übersprungen werden müssen. Im Laufe der folgenden Konditionierungen konnten diese Bereiche weiter bearbeitet werden, sodass sie bei späteren Messungen nicht mehr registrierbar waren. Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass diese Schwellen bei einer erneuten Belüftung des RFQs wie-

¹ Programmable System on Chip

6.5 Konditionierung des MYRRHA-RFQs

der auftreten.

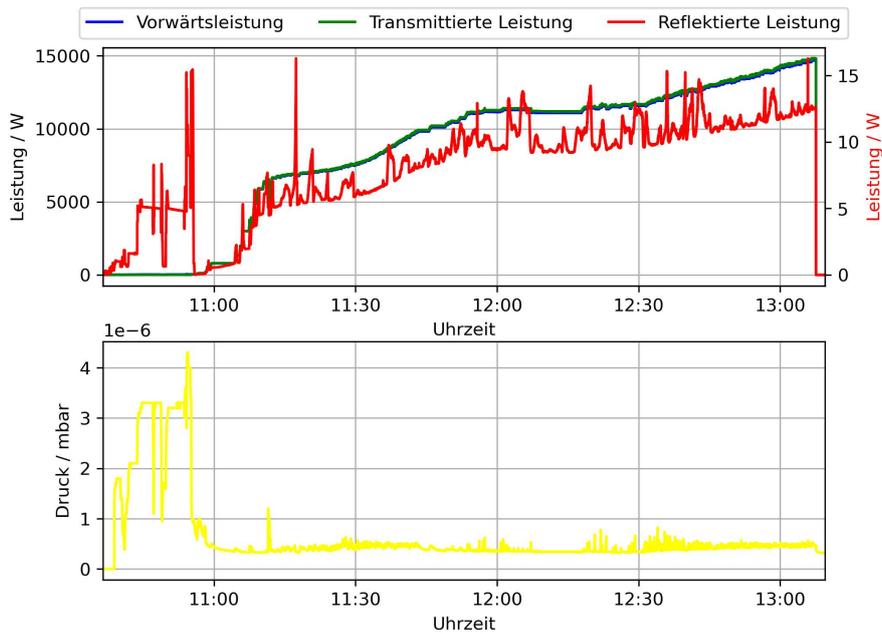


Abbildung 6.7: Konditionierung des MYRRHA-RFQs in LLN, bei der 114,8 kW im cw-Betrieb eingekoppelt werden konnten.

Da der 192 kW-Verstärker in LLN im Gegensatz zu dem 12 kW-Verstärker, der am IAP benutzt wurde, auch darauf ausgelegt ist, in verschiedenen Tastverhältnissen betrieben zu werden, wurde die Konditionierung zunächst mit einem Tastverhältnis von 5 % fortgesetzt.

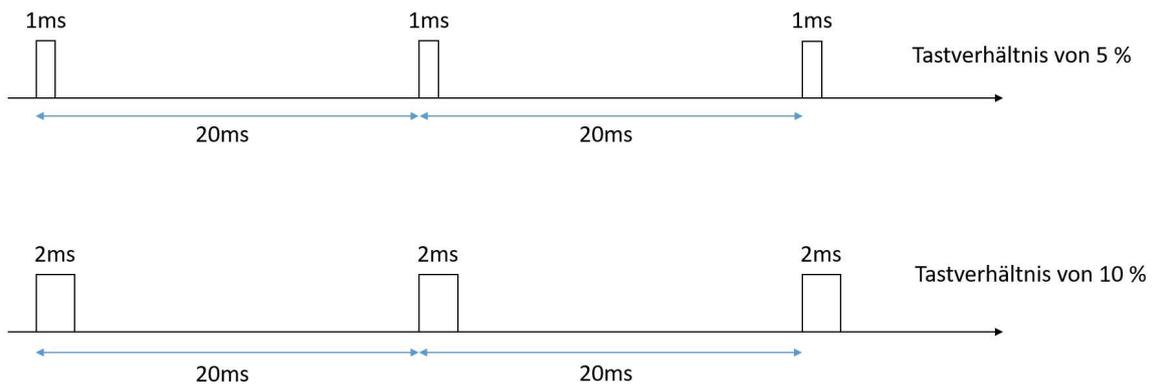


Abbildung 6.8: Skizze der Pulsverteilung bei verschiedenen Tastverhältnissen, wie sie bei der Konditionierung des MYRRHA-RFQs in LLN verwendet wurden.

Die gepulste Konditionierung in LLN erfolgte mit einer Repetitionsrate von 50 Hz, wobei die verschiedenen Tastverhältnisse über die Pulslänge definiert wurden, wie es in

6.5 Konditionierung des MYRRHA-RFQs

Abbildung 6.8 skizziert ist. So entspricht ein Tastverhältnis von 5 % einer Pulslänge von 1 ms.

Der Vorteil eines niedrigen Tastverhältnisses ist, dass Effekte, wie beispielsweise das Multipacting, oder Entladungen sich nicht innerhalb des kurzen Leistungspulses von wenigen *ms* vollends ausbilden können.

Weiterhin ist zu bedenken, dass während der Konditionierung der Druck innerhalb der Kavität unterhalb eines bestimmten Wertes gehalten werden soll, wodurch der Druck oftmals der begrenzende Faktor bei der Erhöhung der Leistung ist. Da der konditionierungsbedingte Vakuumanstieg jedoch nur während des Leistungspulses stattfindet, das Vakuumssystem jedoch kontinuierlich läuft, kann bei niedrigen Tastverhältnissen mit höheren Leistungen - und dadurch schneller - konditioniert werden, als im cw-Betrieb.

Daher wurde für die weitere Konditionierung des MYRRHA-RFQs geplant, zuerst mit einem niedrigen Tastverhältnis von 5 % bis zu dem gewünschten Leistungspegel zu konditionieren und dann anschließend die Pulslängen zu erhöhen, bis das gewünschte Tastverhältnis bzw. der cw-Betrieb erreicht ist.

Abbildung 6.9 zeigt das Ende der Konditionierung des RFQs mit einem Tastverhältnis von 5 %, bei dem eine transmittierte Leistung von 128 kW erzielt werden konnte. Die mehrfachen Einbrüche der transmittierten und der Vorwärtsleistung wurden jeweils von den beiden Interlocksystemen ausgelöst, wobei die Unterbrechung bei 17.15 Uhr aufgrund eines Vakuumanstiegs erfolgte, während sich die anderen auf Anstiege der reflektierten Leistung zurückführen lassen. Da die verwendete Datenerfassung nur einen Wert pro Sekunde aufzeichnete, sind nur wenige dieser Anstiege, wie z.B. kurz nach 15.30 Uhr und kurz nach 15.45 Uhr, in Abbildung 6.9 zu erkennen.

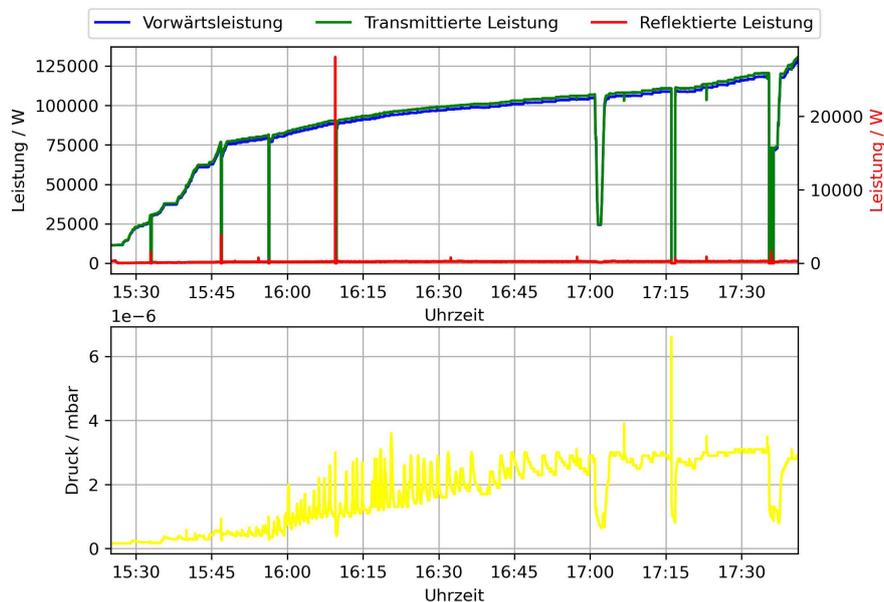


Abbildung 6.9: Konditionierung des MYRRHA-RFQs in LLN, bei der mit einem Tastverhältnis von 5 % eine maximale Leistung von 128 kW eingekoppelt werden konnten.

6.5 Konditionierung des MYRRHA-RFQs

Nachdem eine Leistung von über 120 kW in den RFQ eingekoppelt werden konnte, wurde damit begonnen, das Tastverhältnis zu erhöhen. Abbildung 6.10 zeigt einen Konditionierungsausschnitt, bei dem mit verschiedenen Leistungen und verschiedenen Tastverhältnissen gearbeitet wurde. Zur besseren Übersicht wurde in Abbildung 6.10 neben den drei Leistungen P_f , P_r , P_t und dem Druck p zusätzlich das Tastverhältnis als schwarze Linie aufgetragen. Die zahlreichen durch die beiden Interlocksysteme ausgelösten Leistungsunterbrechungen, lassen sich dadurch erklären, dass die Prozesse, die in Abschnitt 6.3 beschrieben werden, sich aufgrund der höheren Pulslängen teilweise besser ausbilden können und so den Druck bzw. den Anteil der reflektierten Leistung stärker erhöhen, als mit einem niedrigeren Tastverhältnis.

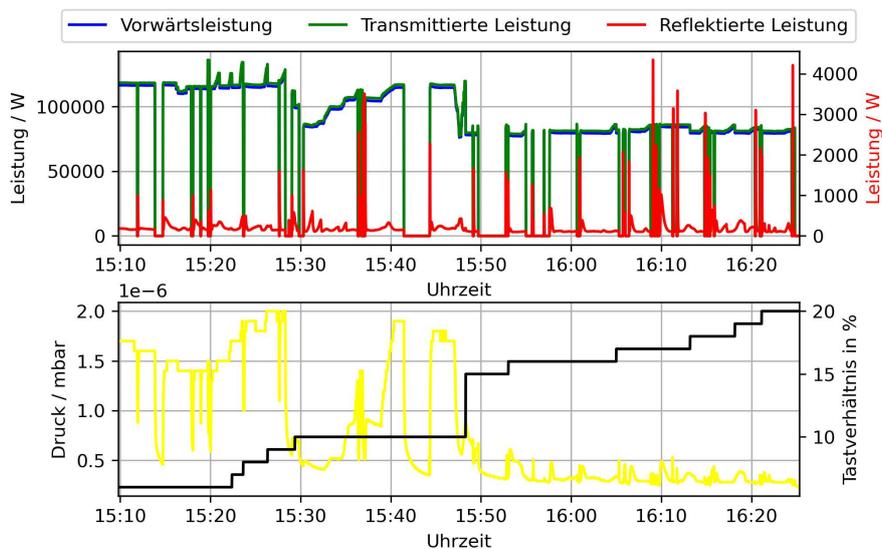


Abbildung 6.10: Konditionierung des MYRRHA-RFQs in LLN mit verschiedenen Tastverhältnissen, bei der eine maximale Leistung von 117 kW eingekoppelt werden konnte.

Bei der in Abbildung 6.11 dargestellten Konditionierung konnten schließlich 120 kW im cw-Betrieb eingekoppelt werden, obwohl auch hier noch zeitweise die Interlocksysteme kurzzeitig aufgrund des Anstieges des Druckes bzw. der reflektierten Leistung die Vorwärtsleistung unterbrechen mussten.

Im Anschluss an die bisher beschriebene Konditionierung, die größtenteils unter der Federführung des IAP in LLN durchgeführt wurde, wurde die Konditionierung des MYRRHA-RFQs vom SCK selbstständig fortgesetzt, wobei das IAP beratend tätig war.

Am Ende dieser Konditionierung konnte, wie in Abbildung 6.12 dargestellt, eine Leistung von 145 kW im cw-Betrieb in den RFQ eingekoppelt werden [71]. In darauf folgenden Strahltests konnte im Dezember 2020 bei einer eingekoppelten Leistung von 110 kW eine Transmission von 96 % gemessen werden, wobei sich die Transmission bei gesteigerter Leistung noch erhöhen ließ, bis ab 125 kW ein Plateau von 98 % erreicht wurde [71].

6.5 Konditionierung des MYRRHA-RFQs

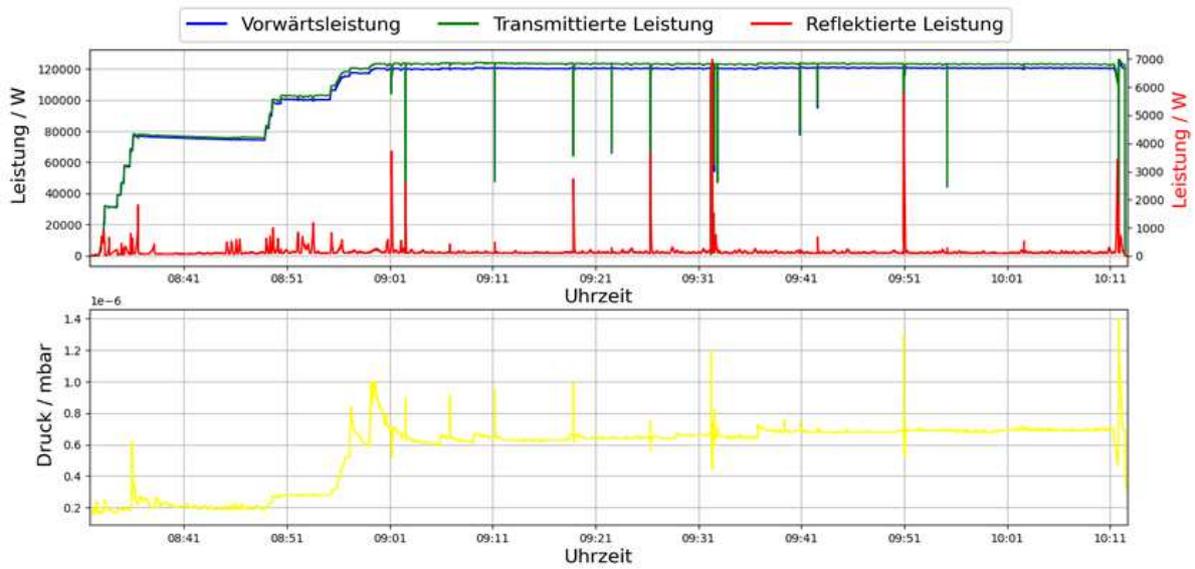


Abbildung 6.11: Konditionierung des MYRRHA-RFQs in LLN im cw-Betrieb, bei der eine maximale Leistung von 120 kW eingekoppelt werden konnte.

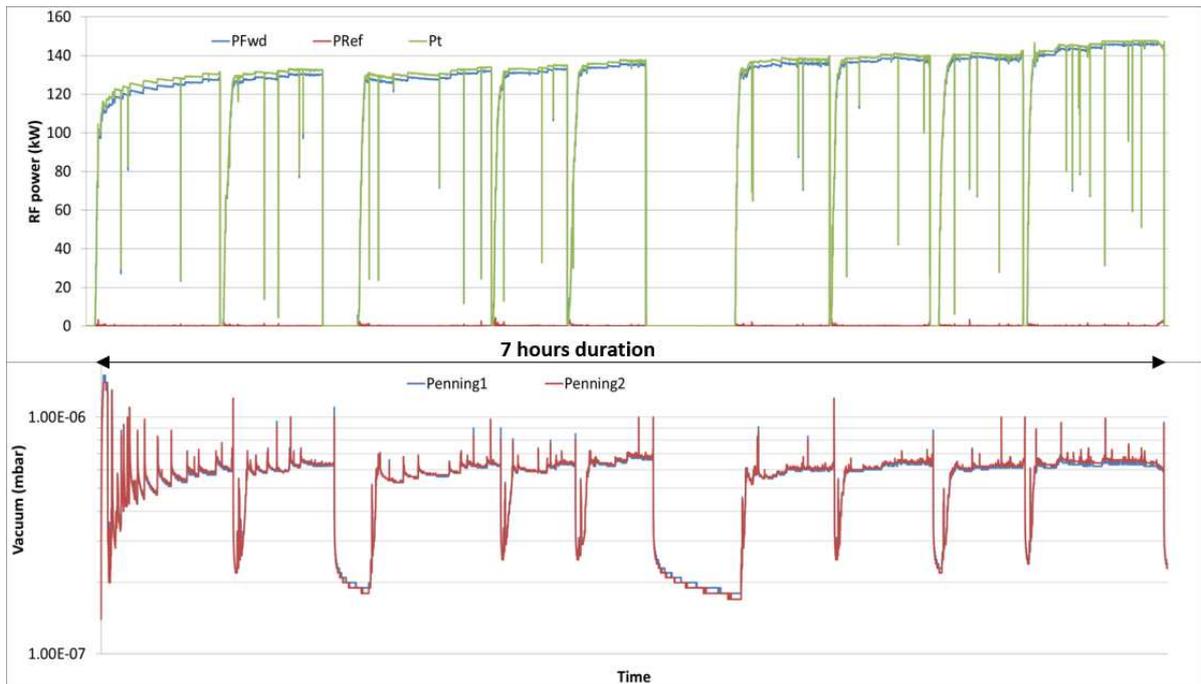


Abbildung 6.12: Konditionierung des MYRRHA-RFQs in LLN mit bis zu 145 kW im cw-Betrieb. Entnommen aus [71].

6.5.3 Bestimmung der Shuntimpedanz des MYRRHA-RFQs

Die Shuntimpedanz des MYRRHA-RFQs wurde mit zwei verschiedenen Methoden bestimmt. Zum Einen konnte bereits während den Low-Level-Messungen festgestellt werden, dass die experimentell gemessene intrinsische Güte Q_0 des RFQs etwa 77% des simulierten Wertes entspricht, woraus sich nach Formel 3.65 eine Shuntimpedanz von etwa $74,2\text{k}\Omega\text{m}$ ergibt (vgl. Tabellen 4.1 und 4.6).

Zum Anderen wurden nach der Konditionierung mehrere Röntgenspektren aufgenommen, durch die sich ebenfalls die Shuntimpedanz bestimmen lässt (vgl. Abschnitt 3.5.4).

Für diese Messungen wurde, wie in Abbildung 6.13 dargestellt, ein tragbares Röntgenspektrometer verwendet, während in den RFQ ein konstanter Leistungspegel eingekoppelt wurde. Wie in den Abbildungen 6.14 und 6.15 zu sehen ist, zeichnete das verwendete

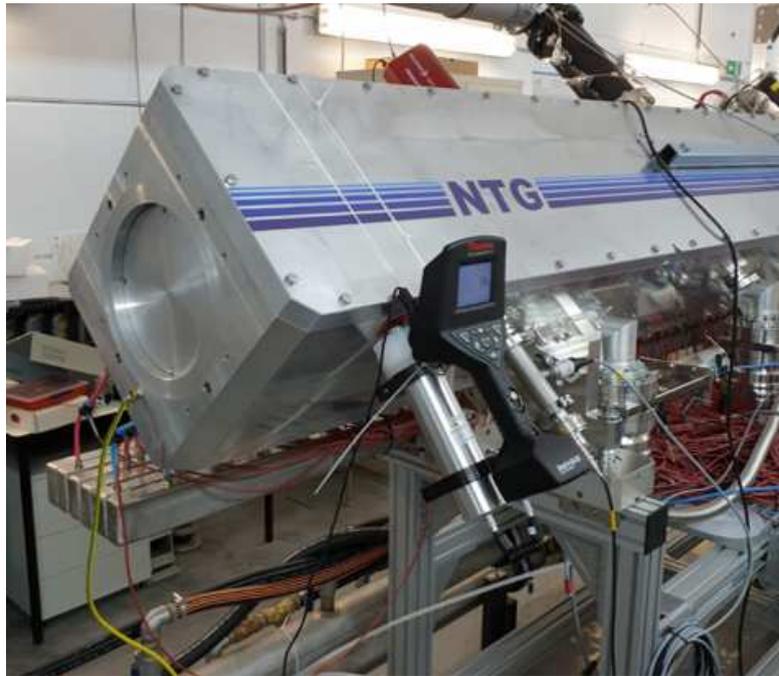


Abbildung 6.13: Aufbau zur Messung des Röntgenspektrums am MYRRHA-RFQ. Das mobile Röntgenspektrometer befindet sich transversal zur Strahlrichtung am Hochenergieende der Kavität.

te Spektrometer kein kontinuierliches Spektrum auf, sondern sortierte die eingehenden Photonen in Bereiche von ca. 2keV ein. Zusätzlich ergibt sich bei der Betrachtung des Röntgenspektrums das Problem, dass zwischen den Photonen der Bremsstrahlung, die im Resonator erzeugt wird, und denen des Hintergrunds unterschieden werden muss, was für die beiden Messungen einzeln beschrieben wird. Bei der in Abbildung 6.14 dargestellten Messung wurde eine Leistung von 90kW in den RFQ eingekoppelt. Der aufgezeichnete Verlauf zeigt auf der linken Seite das Spektrum der Bremsstrahlung und rechts davon den Verlauf des Hintergrunds, wobei bemerkt werden muss, dass sich im linken Bereich das Spektrum der Bremsstrahlung und der Hintergrund überlagern. Der Schnittpunkt, der in der Abbildung mit einer roten Linie markiert ist, zeigt die maximale Energie der

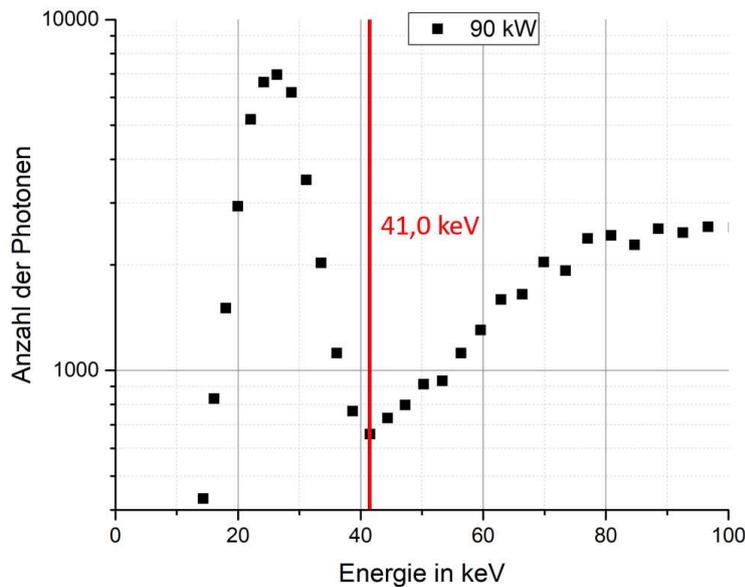


Abbildung 6.14: Am MYRRHA-RFQ gemessenes Röntgenspektrum bei einer transmittierten Leistung von 90 kW. Der Schnittpunkt mit dem Hintergrund, der das energiereichste Röntgenphoton anzeigt, ist in rot markiert.

Bremsstrahlung an, woraus sich die Elektrodenspannung ablesen lässt. Für eine transmittierte Leistung von 90 kW betrug die Elektrodenspannung demnach 41,0 kV.

Die zweite Messung, die in Abbildung 6.15 dargestellt ist, wurde mit 110 kW transmittierter Leistung durchgeführt. Beim Vergleich der Abbildungen 6.14 und 6.15 fällt auf, dass die Anzahl der Photonen der Bremsstrahlung signifikant größer ist, was der gestiegenen Leistung geschuldet ist. Auch in dieser Abbildung markiert die rote Linie die maximale Energie der Bremsstrahlung - allerdings nur der Elektronen, die die Spannung innerhalb des Resonators nur einmal durchlaufen haben, anhand derer sich die Elektrodenspannung von 45,5 kV bestimmen lässt.

Aus den so bestimmten Elektrodenspannungen lässt sich zusammen mit der transmittierten Leistung und der Elektrodenlänge von 4 m nach Formel 3.61 die Shuntimpedanz bestimmen.

Allerdings muss hierbei beachtet werden, dass sowohl die Messung der Leistung, als auch die Messungen mit dem verwendeten Röntgenspektrometer mit nicht vernachlässigbaren Fehlern behaftet sind. Bereits in Abschnitt 6.4 wurde dargelegt, dass bei der Leistungsmessung mit einem Fehler von bis zu 5 % gerechnet werden kann. Bei der Messung der Photonenenergien resultiert der Fehler aus der Schwierigkeit, den richtigen Schnittpunkt der Bremsstrahlung mit dem Hintergrund zu ermitteln, weswegen ein absoluter Fehler von ± 1 kV angenommen wird.

Für die beiden Messungen ergibt sich dadurch:

In zusätzlichen Messungen, die vom SCK ohne die Beteiligung des IAP durchgeführt

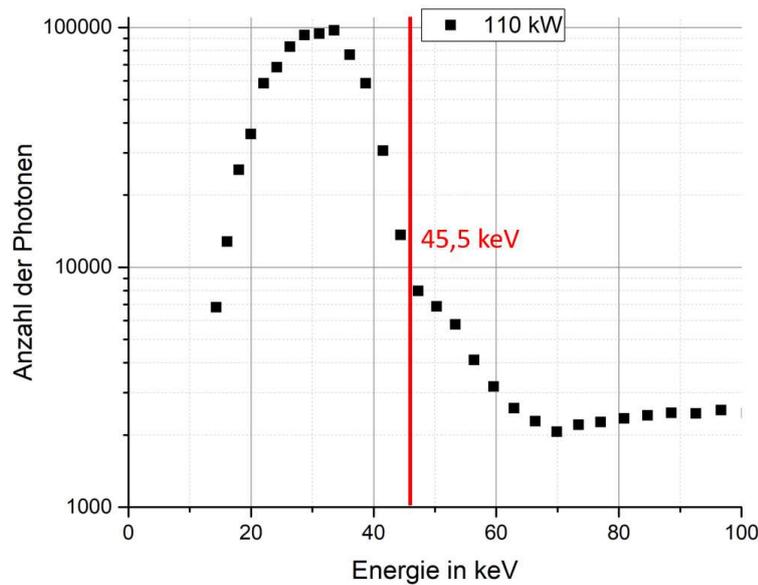


Abbildung 6.15: Am MYRRHA-RFQ gemessenes Röntgenspektrum bei einer transmittierten Leistung von 110 kW. Der Schnittpunkt mit dem Hintergrund, der das energiereichste Röntgenphoton anzeigt, ist in rot markiert.

$(90 \pm 4,5) \text{ kW}$	$(41,0 \pm 1) \text{ kV}$	$(74,7 \pm 7,4) \text{ k}\Omega\text{m}$
$(110 \pm 5,5) \text{ kW}$	$(45,5 \pm 1) \text{ kV}$	$(75,3 \pm 7,1) \text{ k}\Omega\text{m}$

Tabelle 6.1: Mit Hilfe der der Röntgenspektren ermittelte Werte für die Shuntimpedanz des MYRRHA-RFQ. Die Fehler in der transmittierten Leistung entsprechen 5 % des Messwertes.

und die in [71] veröffentlicht wurden, konnten weitere Werte für die transmittierte Leistung und die Elektroden Spannung ermittelt werden, die in Tabelle 6.2 zusammen mit den daraus nach Formel 3.61 berechneten Shuntimpedanzen zusammengefasst sind. Die Tatsache, dass die dort zusammengefassten Werte und Ergebnisse ohne Fehler abgebildet sind, resultiert daraus, dass auch in der benutzten Quelle keine Fehler angegeben sind. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass sich die Fehler in den gleichen Größenordnungen befinden, wie sie in Tabelle 6.1 dargestellt sind.

Insgesamt konnten 5 verschiedene Werte für die Shuntimpedanz des MYRRHA-RFQ ermittelt werden, die in Tabelle 6.3 zusammengefasst wurden. Wobei die Bestimmung über den R/Q-Wert als die Genaueste anzusehen ist, da sie auf einer gut reproduzierbaren Messung der intrinsischen Güte und auf Computersimulationen beruht, die beide mit einer hohen Genauigkeit durchgeführt werden können.

Die Bestimmung der Shuntimpedanz mit Hilfe des Röntgenspektrums ist sowohl den

6.5 Konditionierung des MYRRHA-RFQs

110 kW	44 kV	70,4 k Ω m
125 kW	48 kV	73,7 k Ω m

Tabelle 6.2: Aus [71] entnommene Werte für die transitierte Leistung und die Elektrodenspannung und die daraus nach Formel 3.61 ermittelten Shuntimpedanzen des MYRRHA-RFQs.

Fehlern der Leistungsmessung, als auch den etwaigen Ungenauigkeiten des Röntgenspektrometers unterworfen, was in diesem Fall zu relativ hohen Fehlern von bis zu 10 % des Endergebnisses führt.

Abschließend soll aber bemerkt werden, dass die Bestimmung der Shuntimpedanz mit Hilfe des Röntgenspektrums trotz des größeren Fehlers dennoch eine zu empfehlende Methode ist. Da mit ihr die Shuntimpedanz im Leistungsbetrieb ermittelt werden kann, während der R/Q-Wert nur mit niedrigen Leistungen während der Low-Level-Messungen durchgeführt wird, was der Bestimmung mit Hilfe des Röntgenspektrums einen besseren Bezug zum späteren Strahlbetrieb verleiht.

Methode	ermittelte Shuntimpedanz
R/Q	74,2 k Ω m
Röntgenspektrum (IAP)	
90 kW	(74,7 \pm 7,4) k Ω m
110 kW	(75,3 \pm 7,1) k Ω m
Röntgenspektrum (SCK aus [71])	
110 kW	70,4 k Ω m
125 kW	73,7 k Ω m

Tabelle 6.3: Zusammenstellung der mit Shuntimpedanzen des MYRRHA-RFQ, die per R/Q-Methode und mit Hilfe der Röntgenspektren ermittelt wurden, die durch das IAP bzw. das SCK aufgenommen wurden. Die Bezeichnungen „90 kW“ bzw. „110 kW“ dienen der Unterscheidung und sind daher nicht mit den Fehlern versehen, die in Tabelle 6.1 zu finden sind.

6.6 Konditionierung der MYRRHA-CH Kavitäten

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden CH1, CH1newlid und CH2 im Kryobunker der Experimentierhalle des IAP konditioniert. Da diese drei Konditionierungen prinzipiell dem gleichen Ablauf folgten, wurden die einzelnen Unterpunkte dieses Kapitels nicht nach den Kavitäten getrennt, sondern nach den thematischen Schritten, in die sich die Konditionierungen und Messungen unterteilen lassen.

6.6.1 Konditionierungsaufbau

Die Konditionierungen von CH1, CH1newlid und CH2 fanden im Kryobunker der Experimentierhalle des IAP statt. Hierfür wurden die CHs nach den jeweiligen Low-Level-Messungen, die in Kapitel 5.5 beschrieben wurden, mit einem Preliminary Static Tuner versehen und im Bunker aufgestellt. Anschließend wurden sie mit neuen Vakuumdichtungen verschlossen und an das Vakuumsystem angeschlossen. Erst nachdem sichergestellt war, dass ein ausreichendes Vakuum erzeugt werden konnte ($p < 5 \cdot 10^{-7}$ mbar), sodass keine weiteren Arbeiten am Vakuumsystem notwendig waren, wurden die Kavitäten mit der Kühlwasserversorgung der Experimentierhalle und der Temperaturüberwachung verbunden. Als letzter Schritt vor Beginn der Konditionierung wurden die Power-Meter und dem bereits in Abschnitt 6.5.1 beschriebenen 12 kW-FRANZ-Verstärker angeschlossen.



Abbildung 6.16: Arbeitsplatz des Experimentators während der Konditionierung auf dem Dach des Kryobunkers.

Zur Datenerfassung wurde für CH1 das bereits am IAP etablierte Programm MNDACS [72] benutzt, während für CH2 und CH1newlid ein im Rahmen der Masterarbeit von Sara Zimmermann [73] am IAP entwickeltes Datenerfassungsprogramm getestet werden konnte.

Abbildung 6.16 zeigt den Arbeitsplatz auf dem Dach des Kryobunkers, von dem aus die Konditionierungen gesteuert und überwacht wurden. Der Aufbau der Messgeräte

6.6 Konditionierung der MYRRHA-CH Kavitäten

in Abbildung 6.17 zeigt, dass zwei Sets an Power-Metern verwendet wurden, von denen eines zur Überwachung durch den Experimentator und das andere für die Datenerfassung benötigt wurde.

Die Überwachung der Kühlwassertemperaturen erfolgte über PT100-Temperatursensoren, die jeweils am Ausgang des Kühlkanals angebracht waren. Zusätzlich wurde die Temperatur des Kühlwasservorlaufs mit einem weiteren Sensor ermittelt.

Die Temperaturen des Kühlwassers hängen, u.A., von folgenden Parametern ab:

- Transmittierte Leistung P_t
- Umgebungstemperatur im Kryobunker bzw. in der Experimentierhalle
- Temperatur des Kühlwasservorlaufs
- Durchflussmenge des Kühlwassers

Während die Umgebungstemperatur, die transmittierte Leistung P_t und die Vorlauftemperatur gemessen werden können, war keine permanente Messung der Durchflussmengen während den Konditionierungen vorgesehen.

Die Messung des Durchflusses war nur für einzelne Kanäle ohne eingekoppelte Leistung möglich und mit einem Messfehler von $\pm 0,21/m$ behaftet. Zusätzlich dazu wird die zur Verfügung stehende Kühlwassermenge im Kryobunker u.A. davon beeinflusst, wie viele andere Versuchsaufbauten in der Experimentierhalle des Physikgebäudes gleichzeitig mit Kühlwasser versorgt werden. Des Weiteren ist die Temperatur des Vorlaufes und die Umgebungstemperatur im Kryobunker selbst nicht konstant.

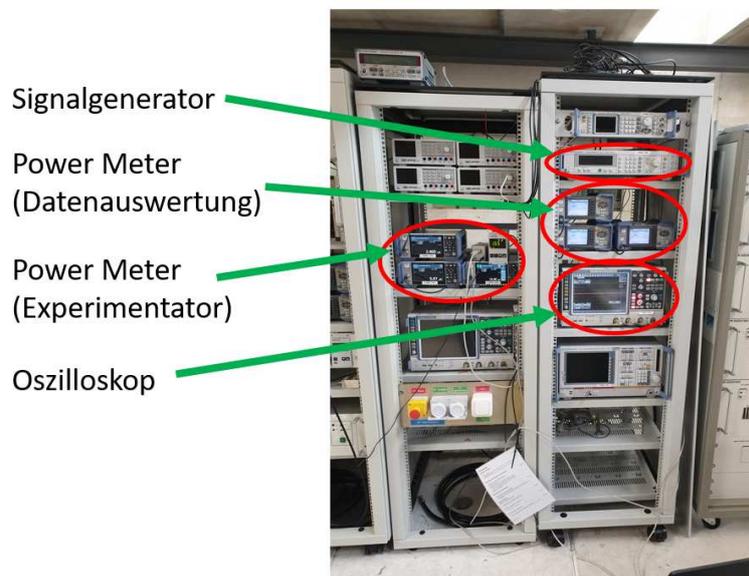


Abbildung 6.17: Aufbau der Messgeräte, wie sie für die Konditionierung der MYRRHA-CH Kavitäten am IAP verwendet wurden.

6.6.2 Konditionierung im niedrigen Leistungsbereich bis ca. 1 kW

Obwohl in der ersten Phase der Konditionierung nur mit verhältnismäßig niedrigen transmittierten Leistungen gearbeitet wird, ist dieser Bereich für gewöhnlich der zeitlich aufwändigere. Da die Kavität zu diesem Zeitpunkt noch nicht mit Leistung betrieben wurde, laufen bereits bei sehr kleinen eingekoppelten Leistungen Konditionierungsprozesse ab, die ein weiteres Erhöhen der Leistung aufgrund eines Druckanstieges verhindern. Beispielhaft dargestellt in Abbildung 6.18, wo ein Zeitraum von mehr als 2 h notwendig war, um die transmittierte Leistung in CH1newlid von 1 auf 2 W zu erhöhen, obwohl ein Druckbereich von $5 \cdot 10^{-7} < p < 1 \cdot 10^{-6}$ mbar in Kauf genommen wurde. Zusätzlich kommt hinzu, dass angesichts der niedrigen Leistungen, diese Prozesse verhältnismäßig lange andauern, bis sie abgeschlossen sind.

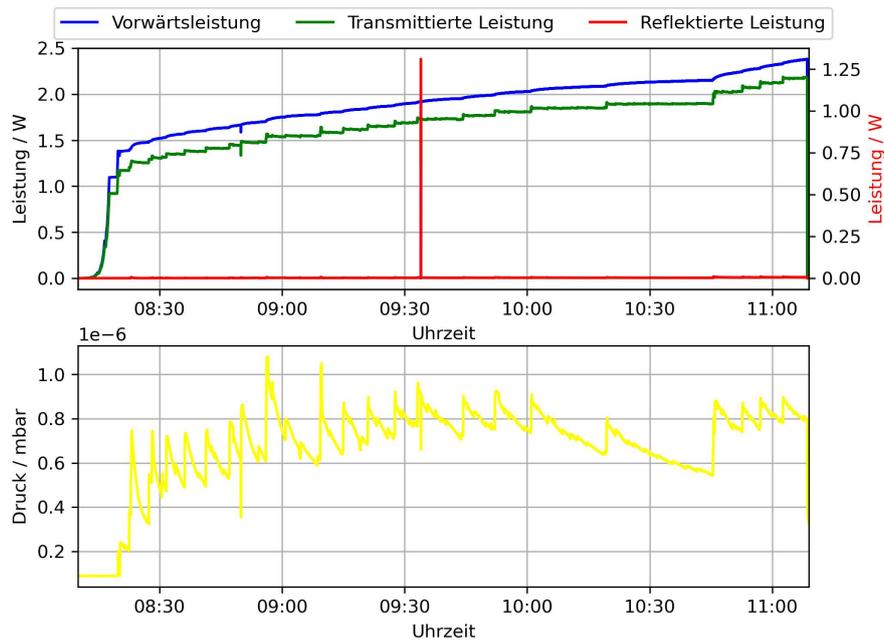


Abbildung 6.18: Konditionierung von CH1newlid in einem niedrigen Leistungsbereich.

Die vorherrschenden Prozesse bei niedrigen transmittierten Leistungen sind Multipacting und Ausgasungen, wobei letzteres vor allem am Beginn der Konditionierung eine größere Rolle spielt. Zwar kann es auch im späteren Verlauf und bei deutlich höheren Leistungen noch zum Lösen grober Verschmutzungen, oder zum Ausgasen an virtuellen Lecks kommen, doch waren solche Ereignisse bei den Konditionierungen der MYRRHA-CHs eher selten zu beobachten.

Des Weiteren ist aufgrund der niedrigen Leistungspegel und der damit verbundenen geringen Spannungen innerhalb der Kavität in diesem Leistungsbereich nicht mit Entladungen oder Überschlügen zu rechnen und auch Probleme, die sich auf eine unzureichende Kühlung zurückführen lassen, sind hier nicht zu erwarten.

Bis auf wenige Ausnahmen, z.B. der in Abbildung 6.18 dargestellte Termin, wurde für die MYRRHA-CHs ein sehr konservativer Konditionierungsstil gewählt, bei dem die

Leistung nur langsam und in kleinen Schritten erhöht wurde, während sich der Druck in einem Bereich von $p < 5 \cdot 10^{-7}$ mbar bewegen sollte.

Abbildung 6.19 zeigt einen exemplarischen Ausschnitt aus der Konditionierung von CH1 im Bereich bis $P_t \approx 4,5$ W. Es lassen sich sehr gut die Anstiege und die anschließenden Reduktionen des Druckes bei den Erhöhungen von P_f zu den Zeitpunkten 12.45, 12.52 und 13.02 Uhr erkennen, die sich auf Reinigungseffekte an der Oberfläche zurückführen lassen. Ab ca. 13.13 Uhr zeigt sich eine Multipactingschwelle durch den starken Anstieg der reflektierten Leistung, die durch eine Anpassung der Frequenz am Signalgenerator kompensiert werden musste und den darauf folgenden langsamen Anstieg der transmittierten Leistung bei konstanter Vorwärtsleistung, gepaart mit einer stetigen Verbesserung des Vakuums.

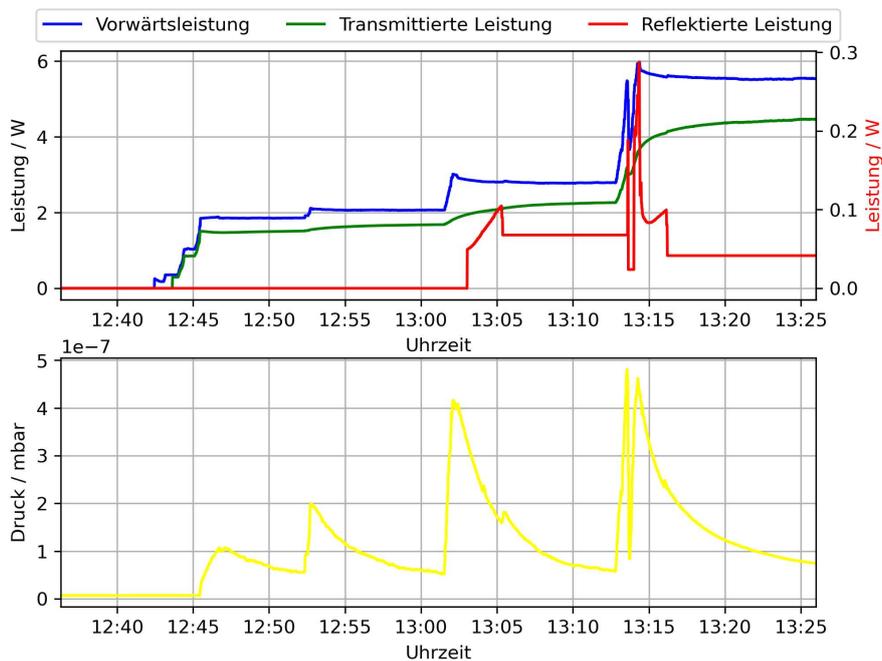


Abbildung 6.19: Konditionierung von CH1 in einem niedrigen Leistungsbereich.

6.6.3 Konditionierung bei höheren Leistungen

Wie bereits erwähnt, kann keine klare Trennlinie zwischen den Bereichen „Konditionierung bei niedrigen Leistungen“ und „Konditionierung bei höheren Leistungen“ getroffen werden. Es fällt nur während des Konditionierungsprozesses auf, dass ab einem bestimmten Punkt die transmittierte Leistung in größeren Schritten erhöht werden kann, während der Anstieg des Vakuums zwar noch deutlich messbar ist, aber innerhalb überschaubarer Zeiten vom Vakuumsystem wieder reduziert werden kann. Abbildung 6.20 zeigt beispielsweise, wie schrittweise innerhalb von 5 h die transmittierte Leistung in CH2 auf $\approx 1,2$ kW erhöht werden konnte, während der Druck bei jeder Erhöhung kurz ansteigt, um dann wieder abzusinken.

6.6 Konditionierung der MYRRHA-CH Kavitäten

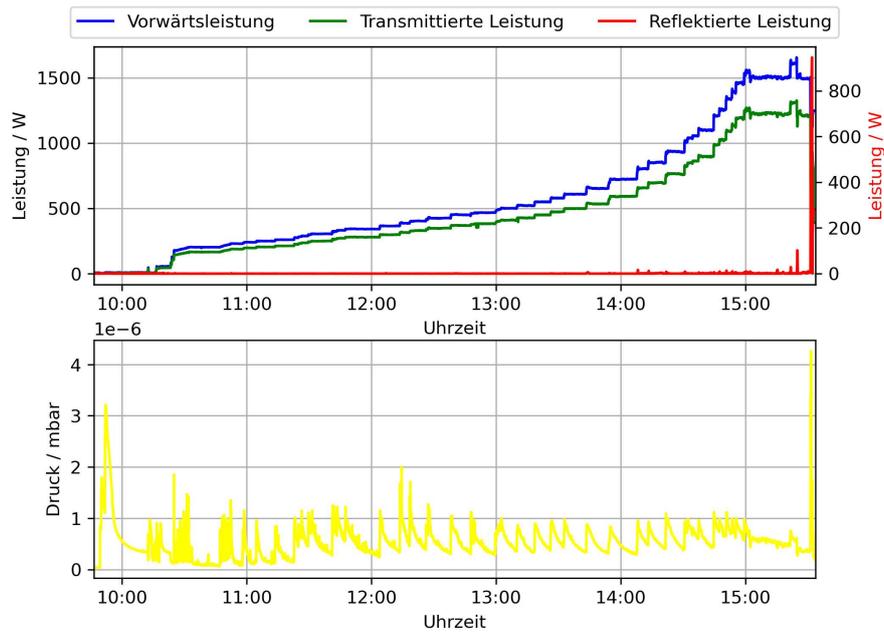


Abbildung 6.20: Schrittweises Erhöhen der Leistung auf $P_t \approx 1,2 \text{ kW}$ innerhalb von $\approx 5,5 \text{ h}$ in CH2.

Im Idealfall werden die maximalen Leistungen während der Konditionierung von der erwarteten Verlustleistung bestimmt, welche im Fall der MYRRHA-CHs den Werten aus Tabelle 5.6 entsprechen. Allerdings wurde bei den hier besprochenen Konditionierungen die Leistung zusätzlich vom verwendeten 12 kW-Verstärker beschränkt, da dieser bei Leistungen ab ca. 6 kW ein anomales Verhalten zeigte, dass sich in einer sprunghaften Erhöhung der Vorwärtsleistung äußerte.

Bei dem in Abbildung 6.21 dargestellten Konditionierungsausschnitt konnten $\approx 7,2 \text{ kW}$ in CH1 eingekoppelt werden, wobei es über einen Zeitraum von weniger als 2 h vier mal zu kurzzeitigen Totalreflexionen kam, denen jeweils ein spontaner Anstieg der Vorwärtsleistung um $\approx 0,2 \text{ kW}$ vorausging, die ihren Ausgang am Verstärker und nicht am Signalgenerator nahm.

Auftreten von Totalreflexionen durch Schwankungen von P_f

Bei einer Erhöhung der Vorwärtsleistung erhöht sich auch die transmittierte Leistung, wodurch es bei konstanter Kühlwasserzufuhr zu einem Anstieg der Temperatur in der Kavität kommt, was nach Formel 5.69 die Resonanzfrequenz beeinflusst. Für Hohlraumresonatoren der hier betrachteten Bauart kann vereinfacht gesagt werden, dass sich die Erhöhung der Vorwärtsleistung in einer Absenkung der Resonanzfrequenz äußert und umgekehrt, wie es in Abbildung 6.22 dargestellt ist.

Um einen möglichst großen Anteil der Vorwärtsleistung in die Kavität einzukoppeln, also das Verhältnis P_t/P_f zu maximieren, sollte die Frequenz der Vorwärtsleistung möglichst genau der der Kavität entsprechen. Wenn sich also die Frequenz der Kavität durch eine Schwankung der Leistung am Verstärker ändert, muss dies bei der Konditionie-

6.6 Konditionierung der MYRRHA-CH Kavitäten

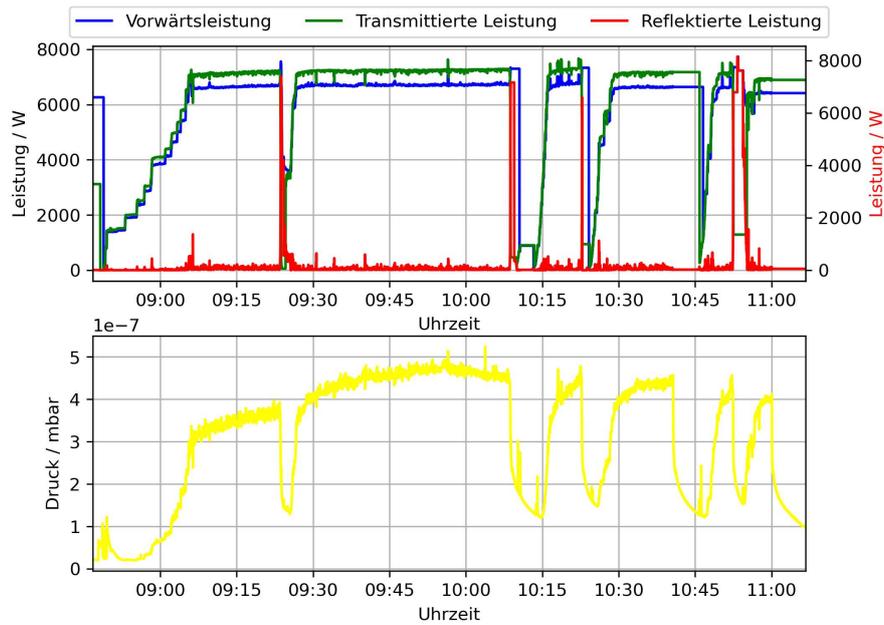


Abbildung 6.21: Konditionierung von CH1 mit $\approx 7,2$ kW unterbrochen von mehreren Totalreflexionen aufgrund von Schwingungen am Verstärker.

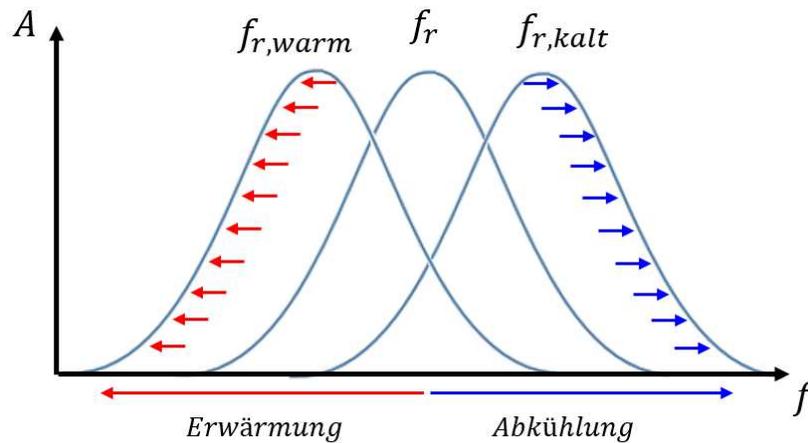


Abbildung 6.22: Bei einer Erwärmung der Kavität, wie sie etwa durch einen Anstieg der transmittierten Leistung P_t verursacht wird, verschiebt sich die Resonanzkurve nach links und umgekehrt.

Die Resonanzkurve der MYRRHA-CHs am Signalgenerator kompensiert werden, da kein dynamischer Tauchkolben verwendet wurde. Da diese Kompensation sehr schnell geschehen muss, besteht die Gefahr, den Effekt zu verstärken, indem man entweder die Frequenz in die „falsche“ Richtung korrigiert, oder die Frequenz zu weit verändert und eine Überkompensation hervorruft. In beiden Fällen sinkt die transmittierte Leistung und damit die Temperatur weiter, wodurch ein „Einfangen“ der Frequenz immer schwieriger wird, was schließlich zu einer Totalreflexion führt.

6.6 Konditionierung der MYRRHA-CH Kavitäten

Allerdings kann auf die Kompensation auch nicht verzichtet werden, da eine genügend große Schwankung der Vorwärtsleistung ebenfalls zu einem Absinken von P_t/P_f führt, was eine Totalreflexion zur Folge hat.

Um den Schwankungen des Verstärkers entgegenzuwirken wurde bei der Konditionierung von CH1 zum einen die maximale transmittierte Leistung auf 7,2 kW beschränkt, was den erwarteten Leistungsbedarf aus Tabelle 5.6 von 6,78 kW übersteigt, und zum anderen ein einfaches Regelsystem an den Signalgenerator angeschlossen. Dieses bestimmt den Phasenversatz zwischen dem Pickup-Signal der Vorwärtsleistung und dem der transmittierten Leistung und soll es durch Variation der Amplitude am Signalgenerator konstant halten. Bei der Konditionierung, die in Abbildung 6.23 dargestellt ist, wurde das Regelsystem kurz nach 15.00 Uhr eingeschaltet, was an den Schwankungen zu erkennen ist, während derer das System eingestellt wurde, gefolgt von einem vergleichsweise ruhigen Verlauf. Allerdings zeigte sich bei späteren Konditionierungen, dass das Regelsystem nicht in der Lage war, die Schwankungen des Verstärkers auf Dauer auszugleichen.

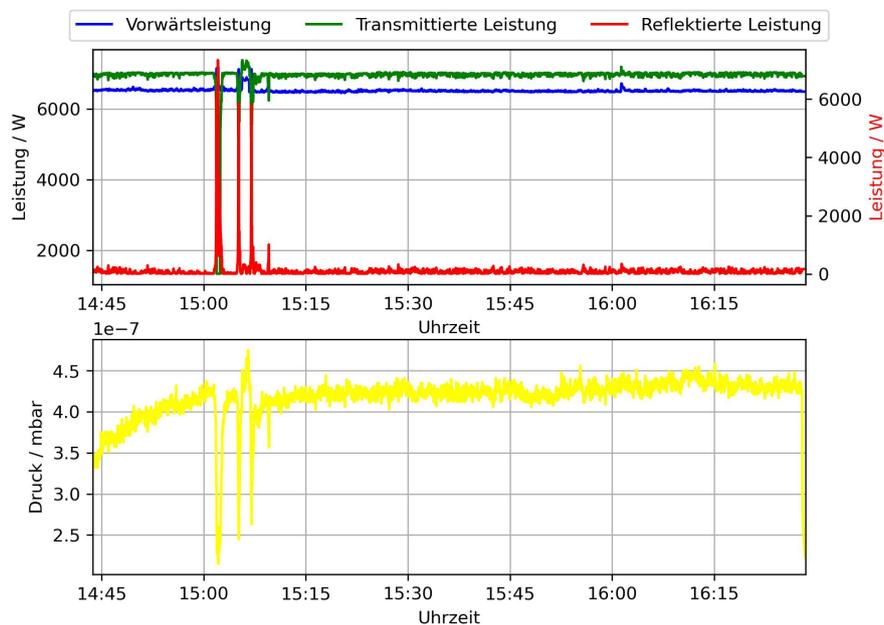


Abbildung 6.23: Konditionierung von CH1 mit $\approx 6,8$ kW und laufendem Regelsystem.

„Versetzte“ Konditionierung

Da das Regelsystem, das bei der Konditionierung von CH1 verwendet wurde nicht den erwünschten Erfolg zeigte, wurde versucht, die unerwünschten Totalreflexionen anderweitig zu vermeiden. Um das „Fortlaufen“ der Resonatorfrequenz zu verhindern, oder zumindest deutlich zu verlangsamen, erfolgte die Konditionierung bei höheren Leistungen ab $P_t \approx 5 \text{ kW}$ von CH2 (und später auch bei der Konditionierung von CH1newlid) „versetzt“. Das bedeutet, dass für die Vorwärtsleistung eine Frequenz f_k gewählt wird, die leicht über der Resonanzfrequenz des Resonators f_r liegt, wie es in Abbildung 6.24 skizziert ist. Die hierdurch entstehende nicht minimierte reflektierte Leistung kann aufgrund des im Konditionierungsaufbaus verwendeten Zirkulators toleriert werden. Bei den Konditionierungen von CH2 und CH1newlid wurde diese beabsichtigte reflektierte Leistung auf $\approx 3\text{-}7\%$ von P_f eingestellt.

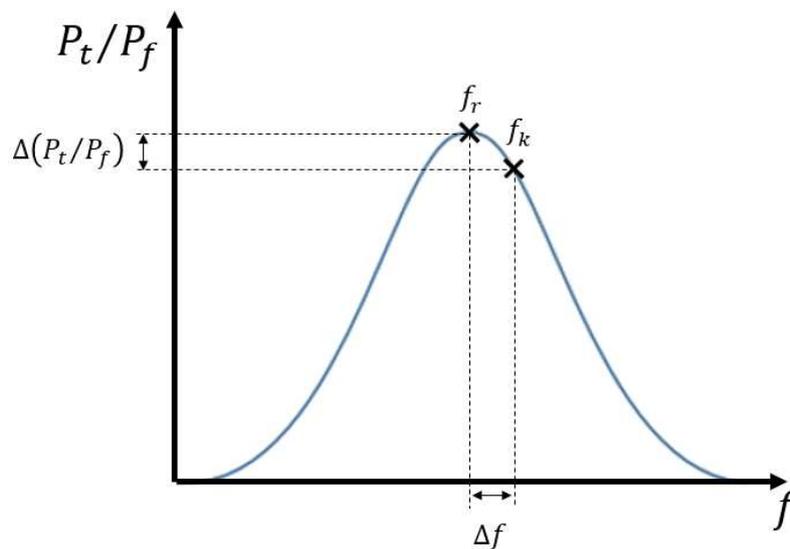


Abbildung 6.24: Die Frequenz der Vorwärtsleistung während der Konditionierung von CH2 und CH1newlid f_k wurde so gewählt, dass sie leicht über der Resonanzfrequenz der Kavität f_r liegt, wodurch sich der Anteil der transmittierten Leistung P_t/P_f verringert.

Der Vorteil dieses Vorgehens wird in Abbildung 6.25 verdeutlicht, in der die transmittierte Leistungen P_t gegen die Frequenz f aufgetragen sind, wobei die Maxima der blauen Kurven den Vorwärtsleistungen P_f entsprechen. Wie dort zu sehen ist, ist die Schwankung der transmittierten Leistung in einer Kavität mit der Resonanzfrequenz f_r (grüner Pfeil) wesentlich kleiner als die Differenz der Vorwärtsleistung mit der Frequenz f_k (roter Pfeil). Dadurch wirken sich die Schwankungen des Verstärkers wesentlich schwächer auf die Temperatur und damit die Resonanzfrequenz der Kavität aus. Durch das „versetzte“ Konditionieren wird ein Eingreifen des Experimentators weniger häufig nötig und die Zeit, die zwischen einer Schwankung von P_f und der Totalreflexion

liegt, wird wesentlich verlängert.

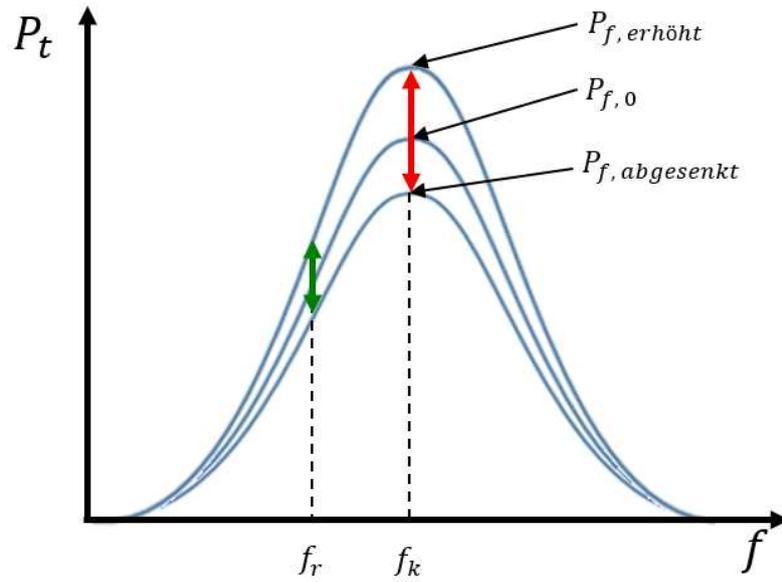


Abbildung 6.25: Veranschaulichung des Prinzips der „versetzten“ Konditionierung, bei der die transmittierte Leistung auch bei schwankenden Vorwärtsleistungen und daraus resultierenden Veränderungen relativ stabil bleibt.

Dauertests

Aufgrund des fehlerhaften Verhaltens des Verstärkers wurde nach der Konditionierung von CH1 beschlossen, die Vorwärtsleistung auf maximal 8,5 kW zu beschränken, weswegen in CH2 eine maximale Leistung von 8 kW und in CH1newlid von 8,2 kW eingekoppelt werden konnte. Die beiden unterschiedlichen transmittierten Leistungen ergeben sich daraus, dass das Verhalten des Verstärkers inklusive dem Auftreten der Leistungsschwankungen nicht reproduzierbar war und somit bei CH2 ein stabiler Betrieb mit einer höheren Leistung nicht möglich war.

Obwohl die eigentlichen Dauertests mit den Kavitäten erst nach ihrer Installation in LLN erfolgen werden, war dennoch für jede Kavität ein mehrstündiger Dauertest im IAP vorgesehen, bei der die maximale Leistung über einen Zeitraum von mindestens 6 h stabil eingekoppelt werden sollte.

Bei der in Abbildung 6.26 dargestellten Messung wurden über einen Zeitraum von mehr als 6 h $\approx 6,8$ kW in CH1 eingekoppelt, wobei es trotz des installierten Regelsystems zu zahlreichen Anstiegen der reflektierten Leistung kam.

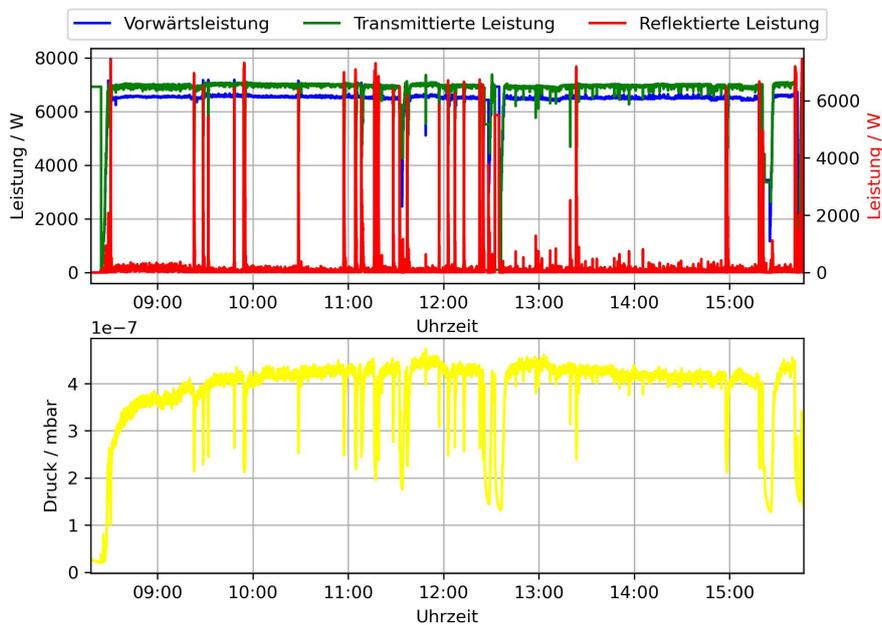


Abbildung 6.26: Dauertest an CH1, bei dem über einen Zeitraum von mehr als 6 h eine Leistung von $\approx 6,8$ kW eingekoppelt wurde. Die zahlreichen Anstiege der reflektierten Leistung lassen sich auf Fehler des Verstärkers zurückführen.

Abbildung 6.27 zeigt eine Konditionierung von CH2 mit dem neuen Verfahren, bei dem über einen Zeitraum von $\approx 6,5$ h eine transmittierte Leistung von ≈ 8 kW eingekoppelt wurden, wobei es nur zwei Mal zu Totalreflexionen kam.

In CH1newlid konnten für mehr als 8 h ≈ 8 kW eingekoppelt werden, wobei es zu keinen nennenswerten Schwankungen kam, was sich sowohl auf ein verhältnismäßig „ruhiges“ Verhalten des Verstärkers, als auch auf die „versetzte“ Konditionierung zurückführen lässt.

6.6 Konditionierung der MYRRHA-CH Kavitäten

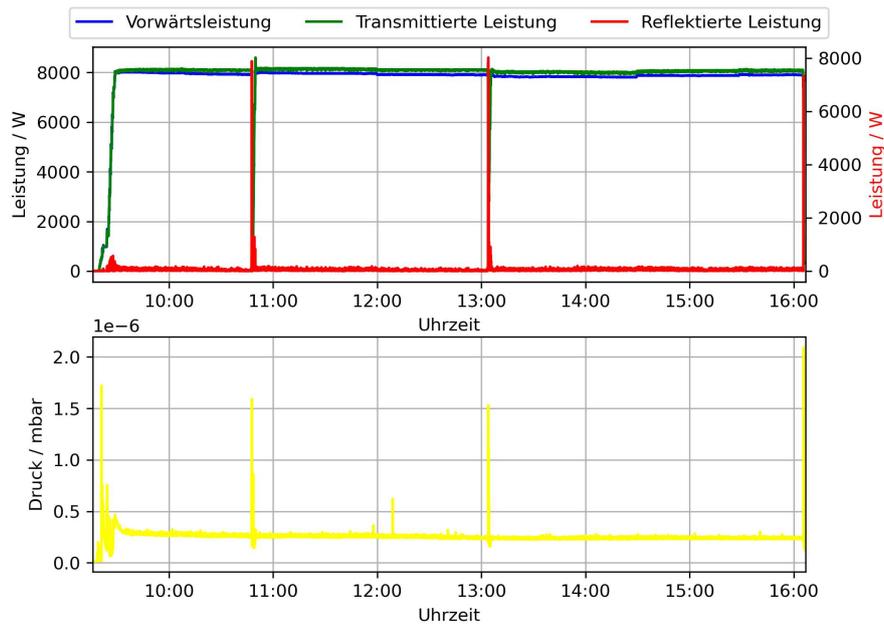


Abbildung 6.27: Dauertest an CH2, bei dem über einen Zeitraum von mehr als 6 h eine Leistung von ≈ 8 kW eingekoppelt wurde. Die beiden Anstiege der reflektierten Leistung lassen sich auf Fehler des Verstärkers zurückführen.

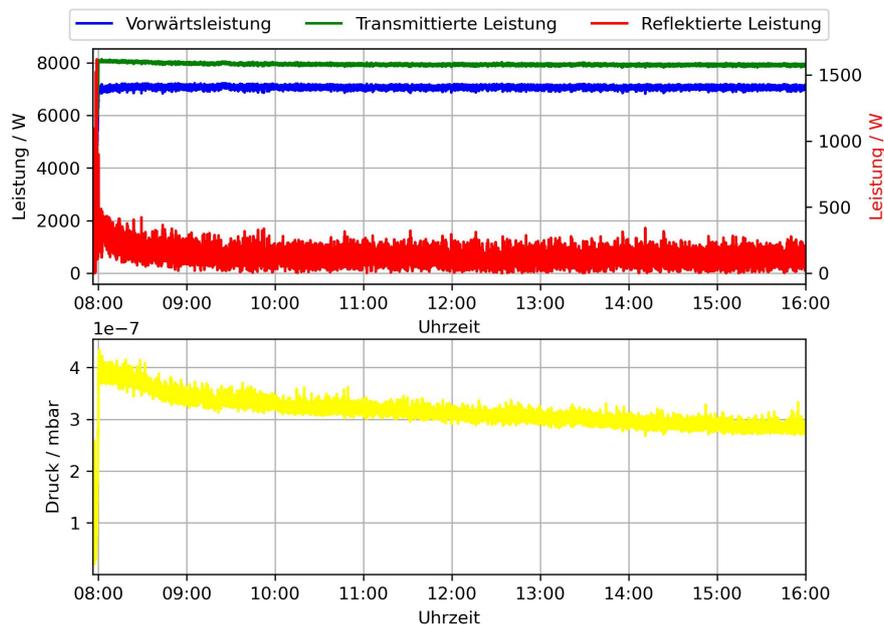


Abbildung 6.28: Dauertest an CH1newlid, bei dem über einen Zeitraum von mehr als 8 h eine Leistung von $\approx 8,2$ kW eingekoppelt wurde.

6.6.4 Abschließende Untersuchungen am Ende der Konditionierung von CH1

Die Frequenzveränderung pro transmittierter Leistung, wie er für CH1 in Abbildung 6.29 dargestellt ist, gibt an, wie groß der Frequenzbereich mindestens sein muss, der mit dem Tauchkolben eingestellt werden kann. Insgesamt sank die Resonanzfrequenz von CH1 bei einer transmittierten Leistung von 7,2 kW um $\approx 0,15$ MHz. Der Vergleich mit dem während der Low-Level-Messungen (vgl. Abschnitt 5.5.4) gemessenen möglichen Tuningbereich, in dem die Frequenz um bis zu 0,28 MHz nach oben verschoben werden kann, zeigt, dass dieser mögliche Tuningbereich ausreichend ist. Darüber hinaus kann aufgrund des Verlaufs der Frequenz eine Einschätzung über das thermische Verhalten der Kavität getroffen werden. So würde sich ein unterdimensioniertes Kühlsystem durch eine sehr starke nichtlineare Absenkung der Frequenz bemerkbar machen. Da für Abbildung 6.29 ein annähernd linearer Verlauf gemessen wurde, kann davon ausgegangen werden, dass die Kühlung ausreichend ist.

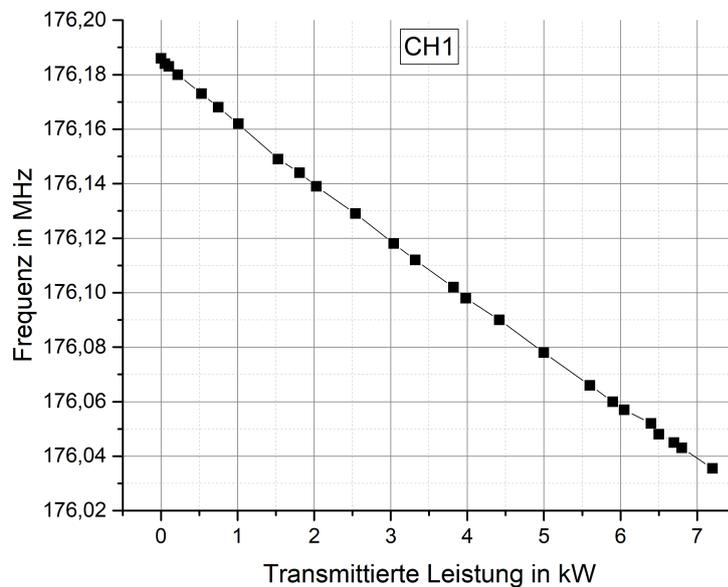


Abbildung 6.29: Veränderung der Frequenz bei transmittierter Leistung bei CH1.

Während der Konditionierung von CH1 war eine ausführliche Untersuchung der verschiedenen Kühlwasserlayouts, wie sie später für CH2 und CH1newlid gemacht wurde, noch nicht vorgesehen. Daher waren während des gesamten Konditionierungsprozesses die Kühlkanäle parallel geschaltet und es konnten die in Tabelle 6.4 zusammengefassten Durchflusswerte gemessen werden, die mit den in Abschnitt 6.6 beschriebenen Fehlern behaftet sind.

Abbildung 6.31 zeigt links die Kühlwassertemperaturen, die während der in Abbildung 6.30 dargestellten Messung aufgezeichnet wurden. Für das rechte Bild wurde die

6.6 Konditionierung der MYRRHA-CH Kavitäten

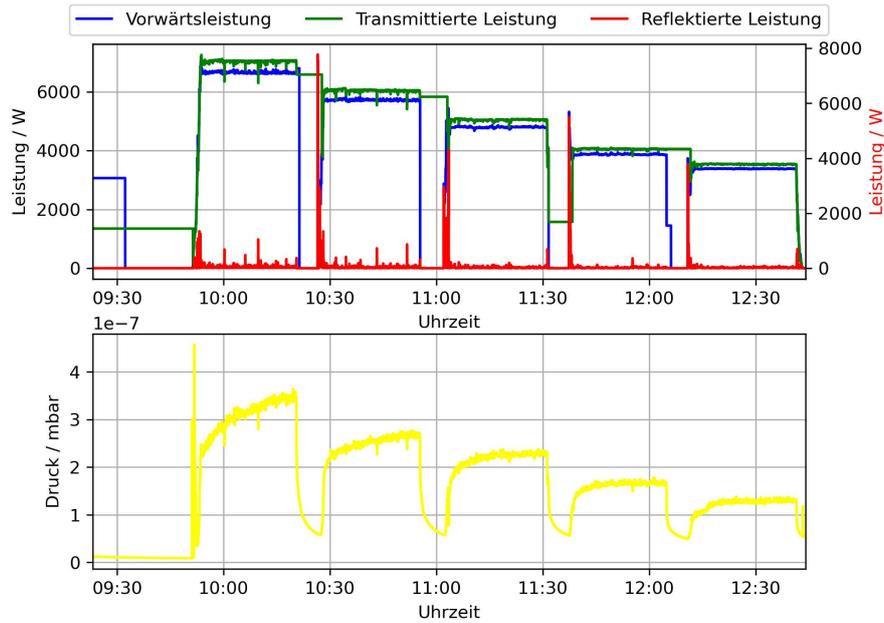


Abbildung 6.30: Über einen Zeitraum von mehr als 2 h wurden verschiedene Leistungspegel in CH1 eingekoppelt, um zu zeigen, dass sie gut angenommen werden.

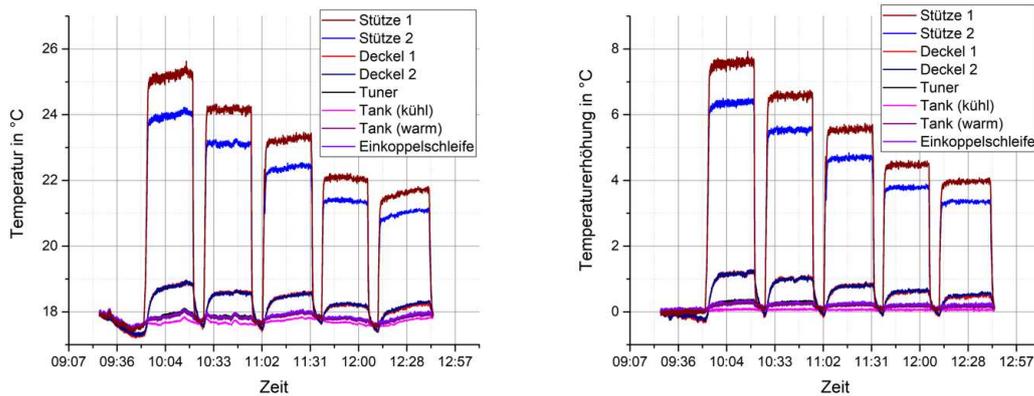


Abbildung 6.31: Ausgewählte Kühlwassertemperaturen während der Messung am 06.08.2019 (links) und die daraus berechneten Temperaturerhöhungen relativ zur Temperatur des Kühlwasservorlaufs (rechts).

Temperatur des Kühlwassereingangs von den gemessenen Temperaturen abgezogen, um die Temperaturerhöhungen zu erhalten. Um eine bessere Übersichtlichkeit zu gewährleisten wurden in beiden Bildern nur der wärmste und kälteste der 24 Kühlkanäle im Tank aufgetragen.

Die deutlichen Schwankungen im linken Bild im Bereich bis ca. 9.50 Uhr, in dem noch keine Leistung in die Kavität eingekoppelt wurde zeigen die Temperaturschwankungen am Kühlwassereingang, während diese im rechten Bild durch die Rechnung kompensiert

6.6 Konditionierung der MYRRHA-CH Kavitäten

Kühlkanal	Durchflussmenge in l/min
Deckel 1	4,8
Deckel 2	4,8
Tuner	4,7
Einkoppelschleife	2,6
Stütze 1	5,1
Stütze 2	6,1
Kanäle im Tank	3,8 bis 4,8

Tabelle 6.4: Gemessene Durchflussmengen durch die Kühlkanäle von CH1. Die abgebildeten Messwerte unterliegen einem Messfehler von $\pm 0,21$ l/m, der die Fluktuationen der Kühlwasserversorgung nicht berücksichtigt.

wurde. Interessant ist, dass die Kühlwassertemperatur von Deckel 2 kurzzeitig vermeintlich kälter ist, als die des Vorlaufs. Dies kommt daher, dass die Korrekturrechnung mit Werten berechnet wurden, die zur gleichen Zeit gemessen wurden. Da die Kühlkanäle in den Deckeln aber eine vergleichsweise große Länge aufweisen, ist das im Rücklauf der Deckel gemessene Kühlwasser spürbar „älter“ als das des Vorlaufs, wodurch sich diese minimale Abweichung von $\approx 0,1$ °C ergeben kann.

Wie aus den Simulationsergebnissen in Tabelle 5.7 zu erwarten ist, fällt bei CH1 verhältnismäßig viel Verlustleistung an den beiden Stützen an, was sich mit den gemessenen Temperaturerhöhungen aus Abbildung 6.31 deckt. Der Temperaturunterschied von ≈ 1 °C zwischen den beiden Deckeln lässt sich durch die unterschiedlichen Durchflussmengen erklären.

Wie bereits aus den Thermosimulationen zu erwarten ist zeigt sich das neu entworfene Kühlsystem als ausreichend für CH1, was sich auch der geringen Frequenzverschiebung von $\approx 0,15$ MHz bei einer transmittierten Leistung von 7,2 kW zeigt.

6.6.5 Abschließende Untersuchungen am Ende der Konditionierung von CH2

Die Konditionierung von CH2 erfolgte zunächst mit parallel geschalteten Kühlkanälen. Nachdem die maximale transmittierte Leistung erreicht war, wurde die Verschaltung der Kanäle schrittweise dahingehend umgebaut, dass eine immer größer werdende Anzahl der Kanäle in Reihe geschaltet wurde, wobei nach jedem Umbau die Frequenzverschiebung pro transmittierter Leistung bestimmt wurde. Insgesamt wurden vier verschiedene Kühlwasserverschaltungen, die im folgenden mit KVV 1 bis KVV 4 abgekürzt werden, untersucht:

- KVV 1: alle Kanäle sind parallel geschaltet
- KVV 2: je 6 Kanäle im Tank werden in Reihe geschaltet, die restlichen sind weiterhin parallel
- KVV 3: je 12 Kanäle im Tank werden in Reihe geschaltet, die restlichen sind weiterhin parallel
- KVV 4: je 12 Kanäle im Tank und die beiden Deckel werden in Reihe geschaltet, die restlichen sind weiterhin parallel

Das Schema der Verschaltungen der Tankkanäle bei den KVV 3 und 4 ist in Abbildung 6.32 links dargestellt. Es wurde jeweils jeder zweite Kanal in Reihe geschaltet und die beiden so entstandenen Kühlkreisläufe verliefen gegenläufig. Durch diese Art der abwechselnden Verschaltung und durch die Tatsache, dass auch Kühlwasserein- und Kühlwasserausgang benachbarter Kanäle versetzt zueinander liegen (vgl. Abbildung 6.32 rechts), sollte eine gleichmäßige Temperaturverteilung im Tank gewährleistet werden.

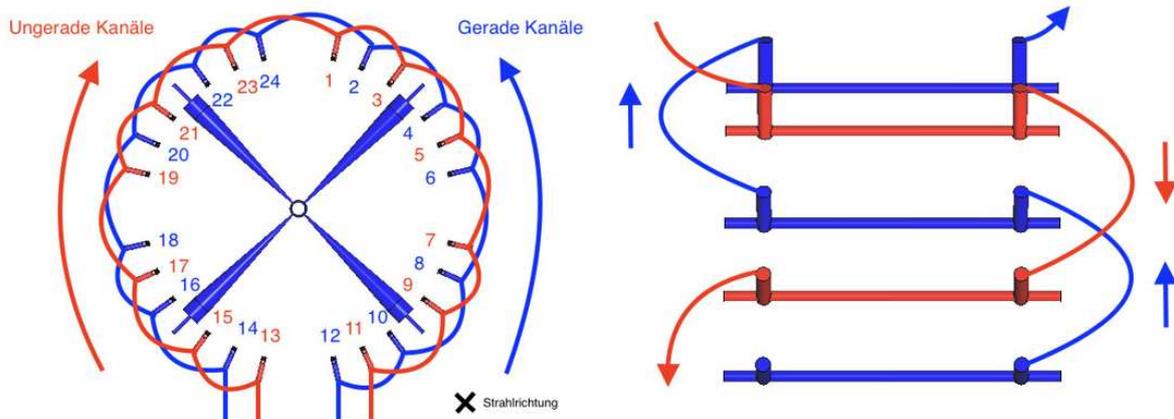


Abbildung 6.32: Links: Die 24 Kühlkanäle des Tanks werden abwechselnd miteinander verbunden, so dass zwei getrennte Kühlkreisläufe entstehen, von denen einer die geraden Kanäle und der andere die ungeraden Kanäle verbindet. Rechts: Bei benachbarten Kanälen wurden Kühlwasserein- und -ausgang versetzt zueinander gelegt. Die Vorlagen beider Bilder wurden aus [74] entnommen.

Nach jeder Veränderung der Kühlwasserverschaltung wurde die transmittierte Leistung in kleinen Schritten auf ≈ 8 kW erhöht und die Frequenzverschiebung bestimmt, die in Abbildung 6.33 und Tabelle 6.5 dargestellt ist. Hierbei zeigt sich, dass die Verschiebung mit $\approx 0,17$ MHz für die parallele Verschaltung KW 1 am größten ist, während die drei Reihenschaltungen sich nur marginal voneinander unterscheiden.

Obwohl die Messung der Frequenzverschiebung nur bis zu einer transmittierten Leistung von 8 kW durchgeführt wurde und laut Tabelle 5.6 eine Leistung von 9,72 kW benötigt wird, sofern die Shuntimpedanz von CH2 90 % des Simulationsmodells erreicht, kann aufgrund der gemessenen Frequenzverschiebungen davon ausgegangen werden, dass der in Kapitel 5.5.4 bestimmte Tuningbereich von 0,45 MHz nach oben ausreichend ist.

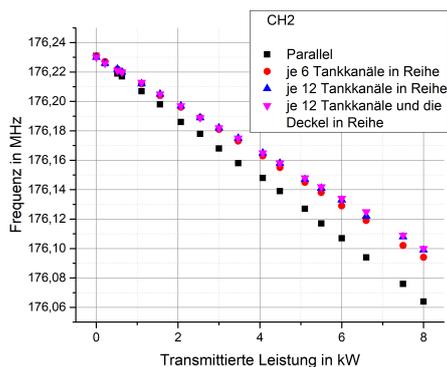


Abbildung 6.33: Veränderung der Frequenz bei transmittierter Leistung für parallel geschaltete (in rot) und teilweise in Reihe geschaltete Kühlkanäle bei CH1newlid.

Frequenzverschiebung in MHz	
KWV 1	0,17
KWV 2	0,14
KWV 3	0,13
KWV 4	0,13

Tabelle 6.5: Gemessene Frequenzverschiebungen bei 8 kW transmittierter Leistung in CH2 mit den Kühllayouts KW 1-4.

Um die Auswirkungen der verschiedenen Kühlwasserverschaltungen auf die Kühlwassertemperaturen zu untersuchen, sollen Kühlwassertemperaturen bei 8 kW mit KWV 1 und mit KWV 4 verglichen werden.

Abbildung 6.35 zeigt links die gemessenen Kühlwassertemperaturen und rechts die daraus berechneten Temperaturdifferenzen relativ zur Temperatur des Kühlwasservorlaufs von der in Abbildung 6.34 dargestellt Konditionierung mit verschiedenen Leistungen. Wie auch bei den entsprechenden Abbildungen in Kapitel 6.6.4 wurden zur besseren Übersichtlichkeit nur der wärmste und der kälteste Kanal des Tanks abgebildet. Die in Abbildung 6.36 dargestellten Kühlwassertemperaturen und Temperaturerwärmungen entstammen der in Abbildung 6.27 dargestellten Konditionierung, bei der die Kühlkanäle von CH2 nach KWV 4 verschaltet waren.

Für den Vergleich der beiden Temperaturverläufe empfiehlt es sich die Temperaturerhöhungen gegenüber der Temperatur des Kühlwasservorlaufs heranzuziehen. Des Weiteren soll aus der Messung mit den parallel geschalteten Kühlkanälen in Abbildung 6.35 nur der erste Bereich betrachtet werden, da nur in diesem die transmittierte Leistung $P_t \approx 8,2$ kW betrug.

In beiden Fällen entsteht die maximale Temperaturerhöhung an den Stützen, was

6.6 Konditionierung der MYRRHA-CH Kavitäten

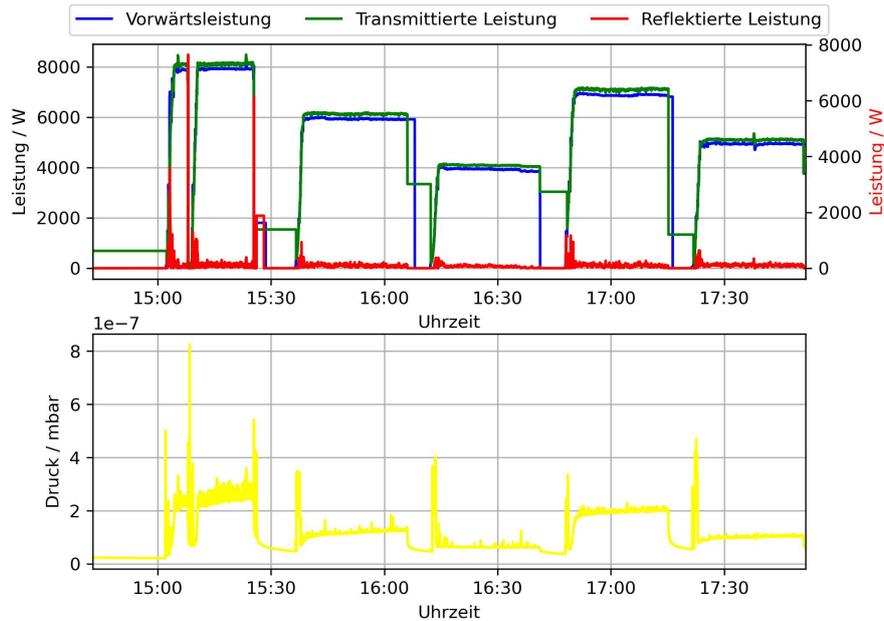


Abbildung 6.34: Einkoppeln verschiedener Leistungen in CH2 über einen Zeitraum von ≈ 3 h.

bereits aus den in Tabelle 5.7 dargestellten Simulationsergebnissen zu erwarten war. Allerdings hat sich die maximale Erwärmung von $\approx 5,5$ auf knapp über 3°C signifikant verringert. Weiter fällt auf, dass sich bei der seriellen Kühlwasserverschaltung KWV 4 die Kanäle im Tank mehr erwärmen, als die beiden Deckel, was bei der parallelen Verschaltung KWV 1 umgedreht war. Diese Beobachtungen lassen sich dadurch erklären, dass bei der seriellen Schaltung der Tank nur noch über 2 statt über 24 Anschlüsse mit Kühlwasser versorgt wird, wodurch sich die Wassermenge, die auf einen einzelnen Kühlwasseranschluss entfällt, erhöht. Da an den Stützen am meisten Leistung abgeführt werden muss, hat bei diesen die zusätzliche Kühlwassermenge den größten Effekt, was sich in geringeren Temperaturerhöhungen äußert. Der Tank erhält nun anteilig weniger Kühlwasser und erwärmt sich dadurch stärker. Da die Erwärmung des Kühlwassers im Tank aber weiterhin $< 2^\circ\text{C}$ beträgt, ist dies zu vernachlässigen.

Obwohl nur eine maximale Leistung von $\approx 8\text{ kW}$ in CH2 eingekoppelt wurde, kann aufgrund der geringen Frequenzverschiebung von $0,13\text{ MHz}$ und den verhältnismäßig kleinen Erwärmung im Kühlwasser abschließend davon ausgegangen werden, dass das verwendete Kühlsystem für CH2 ausreichend ist.

6.6 Konditionierung der MYRRHA-CH Kavitäten

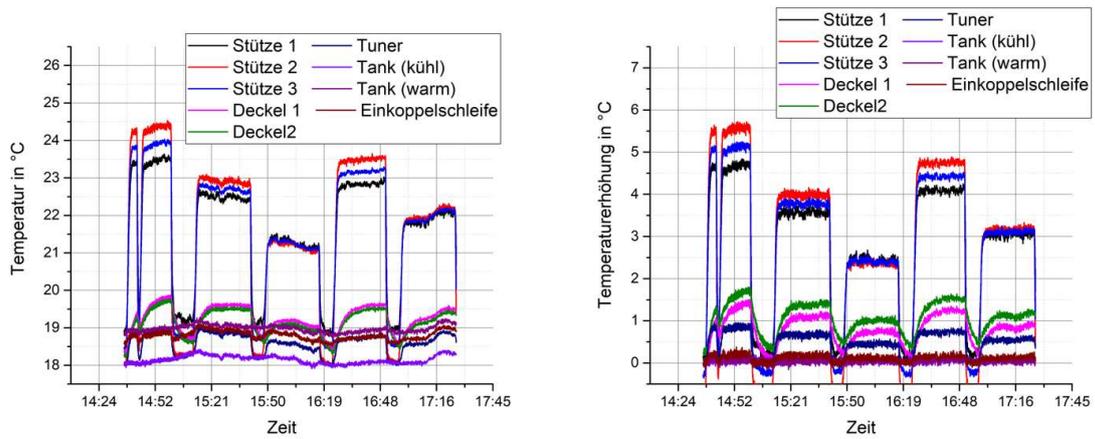


Abbildung 6.35: Ausgewählte Kühlwassertemperaturen in CH2 während die transmittierte Leistung am 28.1.2020 über mehr als 8 h relativ konstant auf 8 kW gehalten wurde (links) und die daraus berechneten Temperaturdifferenzen relativ zur Temperatur des Kühlwasservorlaufs (rechts) mit teilweise in Reihe geschalteten Kühlkanälen.

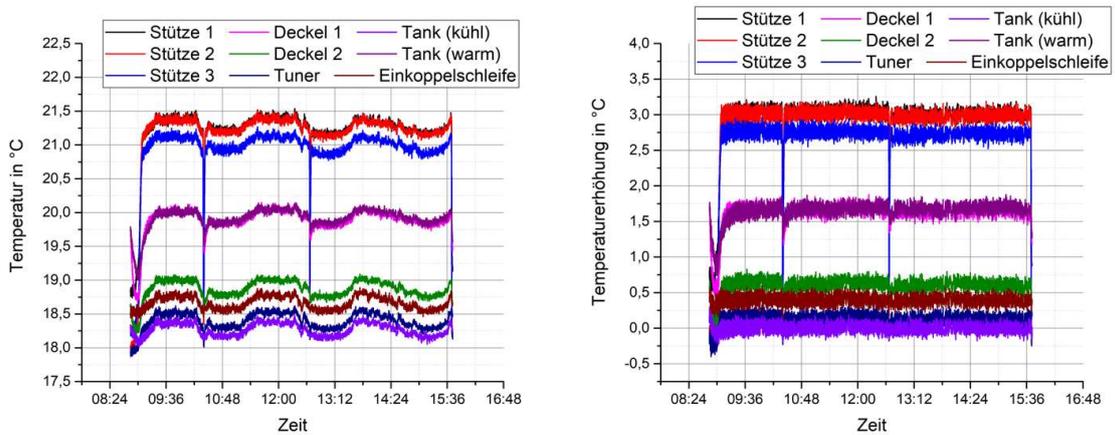


Abbildung 6.36: Ausgewählte Kühlwassertemperaturen in CH2 während die transmittierte Leistung am 28.1.2020 über mehr als 8 h relativ konstant auf 8 kW gehalten wurde (links) und die daraus berechneten Temperaturdifferenzen relativ zur Temperatur des Kühlwasservorlaufs (rechts) mit teilweise in Reihe geschalteten Kühlkanälen.

6.6.6 Abschließende Untersuchungen am Ende der Konditionierung von CH1newlid

Wie auch schon bei CH2 erfolgte die Konditionierung von CH1newlid zunächst mit parallelen Kühlkanälen. Nachdem 8 kW in CH1newlid eingekoppelt werden konnten, wurde die Frequenzverschiebung pro transmittierter Leistung gemessen. Anschließend wurden wie zuvor bei KMV 4 bei CH2 je 12 Kanäle im Tank und die beiden Kanäle des Deckels in Reihe geschaltet und die Messung wiederholt, was zusammen mit der ersten Messung in Abbildung 6.37 dargestellt ist. Bei einer transmittierten Leistung von 8,2 kW verringert sich die Frequenz für die teilweise in Reihe geschalteten Kühlkanäle um $\approx 0,125$ MHz.

Im Vergleich zu der Messung die für CH1 in Kapitel 6.6.4 dargestellt ist, ergibt sich, dass sowohl bei CH1, als auch bei CH1newlid für parallelgeschaltete Kühlkanäle und eine transmittierte Leistung von 7,2 kW die gleiche Frequenzverschiebung von 0,15 MHz messbar ist, was in Anbetracht der Tatsache, dass es sich um die gleiche Kavität handelt, bei der lediglich die Bauform einer der beiden Deckel unterschiedlich ist, zu erwarten war.

Zusätzlich wurden die Kühlwasserdurchflüsse sowohl in der parallelen, als auch in der seriellen Variante gemessen und in Tabelle 6.6 zusammengefasst.

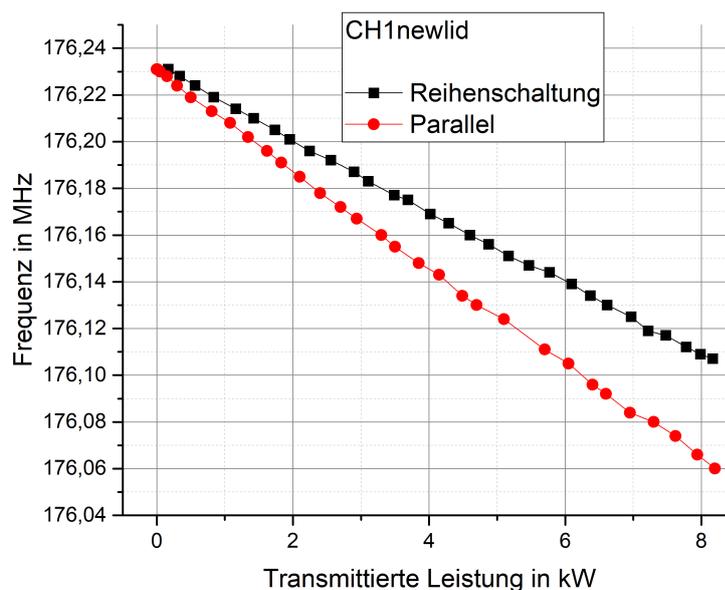


Abbildung 6.37: Veränderung der Frequenz bei transmittierter Leistung für parallel geschaltete (in rot) und teilweise in Reihe geschaltete Kühlkanäle bei CH1newlid.

Wie auch schon bei CH2 wurden die Auswirkungen der unterschiedlichen Kühlwasserschaltungen auf die Kühlwassertemperatur von CH1newlid gemessen. Hierfür wurde für den parallelen Fall die Konditionierung herangezogen, die in Abbildung 6.38 dargestellt ist. In dieser wurde die transmittierte Leistung in CH1newlid zuerst Schrittweise

6.6 Konditionierung der MYRRHA-CH Kavitäten

auf 8 kW erhöht und nach einer anschließenden Pause für mehr als 2 h konstant auf 8 kW gehalten.

Kühlkanal	Durchflussmenge in l/min	Durchflussmenge in l/min
	Parallel	Reihe
Deckel 1	4,7	9
Deckel 2	4,7	9
Tuner	4,9	11,3
Einkoppelschleife	1,9	5,2
Stütze 1	4,6	10,1
Stütze 2	6,4	11,9
Kanäle im Tank	3,5 bis 6,1	6,8

Tabelle 6.6: Gemessene Durchflussmengen durch die Kühlkanäle von CH1newlid für die parallele und die serielle Konfiguration der Kühlkanäle. Die abgebildeten Messwerte unterliegen einem Messfehler von $\pm 0,21/m$, der die Fluktuationen der Kühlwasserversorgung nicht berücksichtigt.

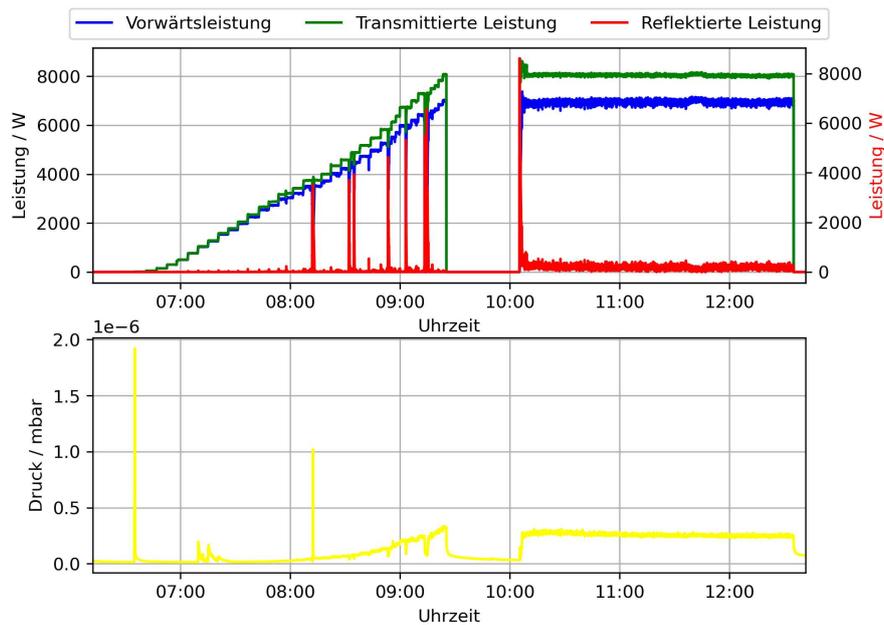


Abbildung 6.38: Konditionierung von CH1newlid mit parallelen Kühlkanälen. Zuerst wurde die transmittierte Leistung schrittweise auf 8,2 kW erhöht und dann nach einer Pause für mehr als 2 h konstant auf 8,2 kW gehalten.

Im Verlauf der Temperaturerhöhungen relativ zum Kühlwasservorlauf in Abbildung 6.39 rechts ist zu Beginn der Messung und während der Pause zu erkennen, dass einzelne

6.6 Konditionierung der MYRRHA-CH Kavitäten

Temperaturen unterhalb der des Kühlwasservorlaufs sind, was auf Ungenauigkeiten der Temperaturmessung zurückzuführen ist.

Die Maximaltemperaturen finden sich, wie bereits aus den Simulationsergebnissen in Tabelle 5.6 und auch aus den gemessenen Temperaturen aus Kapitel 6.6.4 anzunehmen ist, in den beiden Stützen, wobei diese sich aufgrund der höheren transmittierten Leistung im Vergleich zu der Messung aus Kapitel 6.6.4 deutlich mehr erwärmen.

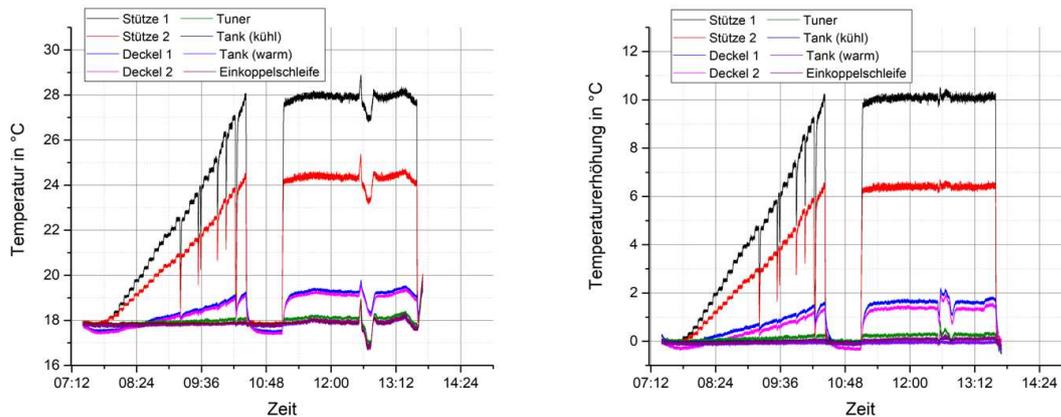


Abbildung 6.39: Ausgewählte Kühlwassertemperaturen während der Messung am 20.10.2020 (links) und die daraus berechneten Temperaturdifferenzen relativ zur Temperatur des Kühlwasservorlaufs (rechts) mit parallel geschalteten Kühlkanälen.

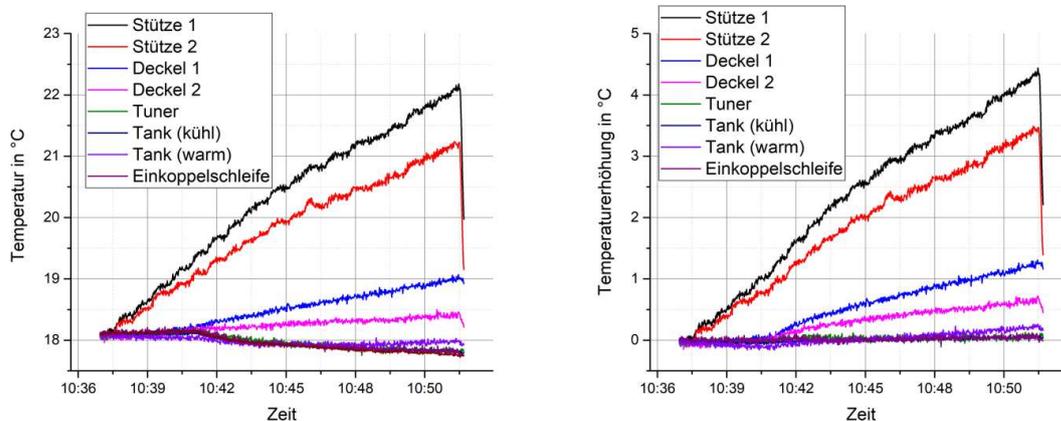


Abbildung 6.40: Ausgewählte Kühlwassertemperaturen während der schrittweisen Erhöhung der transmittierten Leistung auf 8 kW am 03.11.2020 (links) und die daraus berechneten Temperaturdifferenzen relativ zur Temperatur des Kühlwasservorlaufs (rechts) mit teilweise in Reihe geschalteten Kühlkanälen.

Um für die teilweise serielle Kühlkanalverschaltung ebenfalls eine schrittweise Erhöhung auf 8 kW und eine konstante Messung mit 8 kW heranzuziehen, werden zwei unterschiedliche Messungen betrachtet. Für die Erhöhung auf 8 kW wird die Konditionierung aus Abbildung 6.41 benutzt, deren dazu passende Kühlwassertemperaturen und

-erwärmungen relativ zum Kühlwasservorlauf in Abbildung 6.40 sind. Ab ca. 10.40 Uhr ist bei den gemessenen Temperaturen (in Abbildung 6.40 links) deutlich zu erkennen, dass die Temperaturen der Kanäle, die keinem hohen Temperaturanstieg unterliegen (Tuner, Einkoppelschleife und Tank) minimal abnimmt, was auf eine Abkühlung im Kühlwasservorlauf schließen lässt. Wie bereits bei den weiter oben dargestellten Temperaturverläufen, lassen sich die Temperaturunterschiede der Stützen auf die unterschiedlichen Durchflussmengen zurückführen, während sich die unterschiedliche Erwärmung des Kühlwassers der beiden Deckel daraus ergibt, dass diese in Reihe geschaltet sind, wodurch das Kühlwasser erst durch den hinteren Deckel 1 fließt und danach durch Deckel 2. Der Temperaturanstieg im Kühlwasserrücklauf der beiden Stützen ist geringer, als mit der parallelen Kühlwasserverschaltung, was aufgrund der höheren Durchflussraten aus Tabelle 6.6 zu erwarten war. Das Wasser in den Stützen erwärmt sich um $\approx 3,5$ bzw. $4,5$ °C.

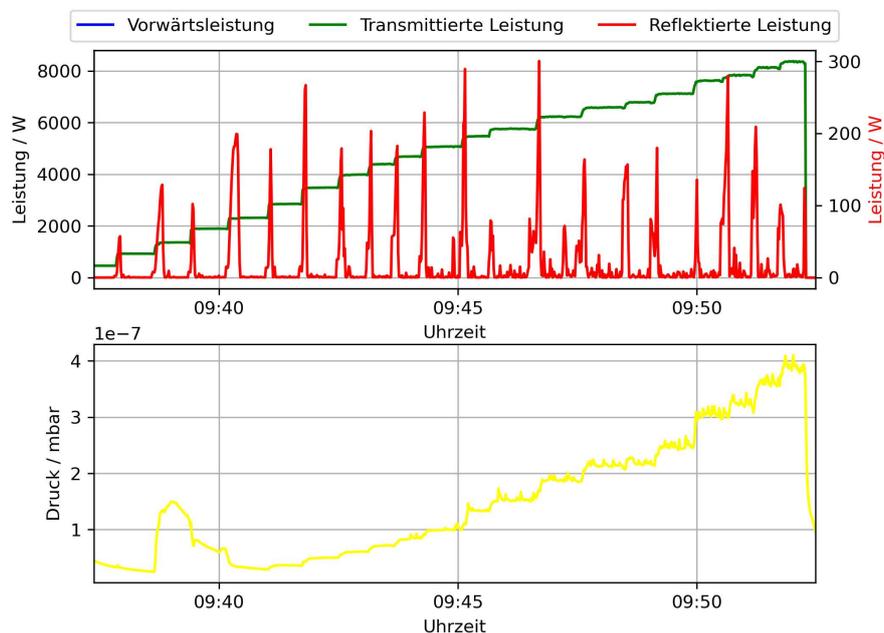


Abbildung 6.41: Erhöhung der transmittierten Leistung in CH1newlid mit teilweise in Reihe geschalteten Kühlkanälen.

Für die Messung bei konstanter transmittierter Leistung wird der Dauertest aus Abbildung 6.28 herangezogen, dessen gemessene Kühlwassertemperaturen und -erwärmungen relativ zum Kühlwasservorlauf sich in Abbildung 6.42 befinden. Im linken Bild zeigen sich in allen Kühlwassertemperaturen mehrere kurze Schwankungen über die Messdauer verteilt, die sich auf Schwankungen des Kühlwasservorlaufs zurückführen lassen. Bei der Betrachtung der Temperaturerhöhung im rechten Bild sind diese Schwankungen nur noch in den Temperaturen der beiden Deckel zu erkennen, was sich dadurch erklären lässt, dass die Temperaturdifferenzen durch die Berechnung der Temperaturen zu exakt demselben Zeitpunkt miteinander gebildet werden. Da die Kühlkanäle der Deckel deutlich länger sind, als beispielsweise die Kanäle in den Stützen oder im Tank, ver-

6.6 Konditionierung der MYRRHA-CH Kavitäten

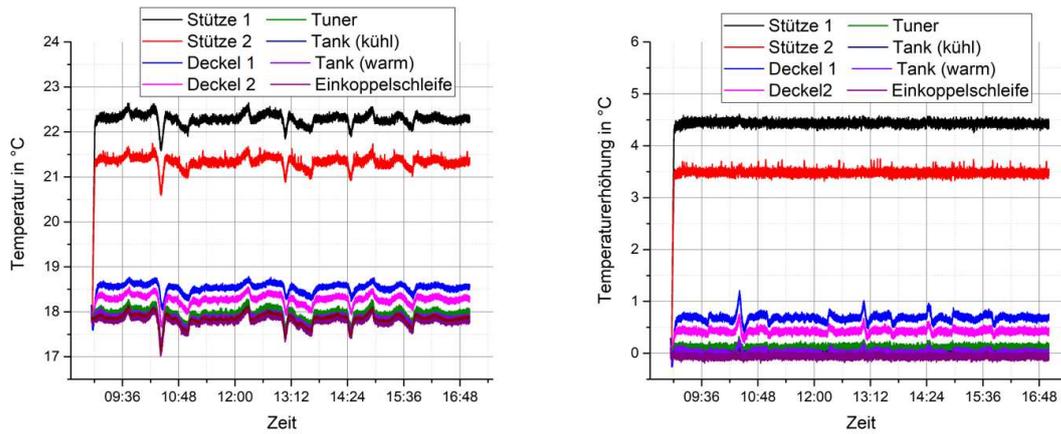


Abbildung 6.42: Ausgewählte Kühlwassertemperaturen während die transmittierte Leistung am 28.1.2020 über mehr als 8 h relativ konstant auf 8 kW gehalten wurde (links) und die daraus berechneten Temperaturdifferenzen relativ zur Temperatur des Kühlwasservorlaufs (rechts) mit teilweise in Reihe geschalteten Kühlkanälen.

weilt das Wasser länger in den Kanälen, sodass schnelle Änderungen der Temperatur des Kühlwasservorlaufs an den Deckeln weiterhin sichtbar bleibt.

Weiter ist aufgrund des konstanten Temperaturverlaufs zu erkennen, dass sich die Kavität bereits kurz nach Erreichen der transmittierten Leistung von 8,2 kW im thermischen Gleichgewicht befindet. Die konstante Temperaturerhöhung des Kühlwassers an den Stützen beträgt $\approx 3,5$ bzw. $4,5$ °C, während sich die übrigen Erwärmungen unter 1 °C bewegen.

7 Zusammenfassung

Die minoren Aktinoiden dominieren auf lange Sicht die Radioaktivität des gesamten abgebrannten Brennstoffes und können somit, obwohl sie nur etwa 0,2 % davon ausmachen, als die Hauptverursacher der Endlagerproblematik betrachtet werden.

Neben einer möglichen Endlagerung und den damit verbundenen Problemen, bietet die Transmutation eine Alternative im Umgang mit dieser Art der radioaktiven Abfälle. Hierbei werden die minoren Aktinoide durch Neutroneneinfang zur Spaltung angeregt, wodurch sowohl deren Halbwertszeit, als auch deren Radiotoxizität deutlich reduziert werden soll.

Innerhalb des in der vorliegenden Arbeit vorgestellten MYRRHA-Projektes, das im belgischen Mol realisiert werden soll, soll gezeigt werden, dass die Transmutation in einem industriellen Maßstab möglich ist. Bei MYRRHA handelt es sich um ein sog. ADS (Accelerator Driven System), bei dem ein 4 mA Protonenstrahl mit 600 MeV in einem Target aus LBE (Lead-Bismuth Eutectic) per Spallation Neutronen erzeugen soll, die für die Transmutation in einem ansonsten unterkritischen Reaktor notwendig sind. Da eine solche Anlage enorme Ansprüche an die Zuverlässigkeit des Teilchenstrahls stellt, um den thermischen Stress innerhalb des Reaktors so gering wie möglich zu halten, werden auch hohe Ansprüche an die verwendeten Kavitäten innerhalb des Beschleunigers gestellt.

Besonderes Augenmerk muss hierbei auf den Injektor gelegt werden. In diesem wird der Protonenstrahl auf 16,6 MeV beschleunigt, wobei in seinem aktuellen Design nur noch normaleitende Kavitäten verwendet werden.

Als erstes beschleunigendes Bauteil nach der Ionenquelle fungiert hier ein im Rahmen der vorliegenden Arbeit gebauter 4-Rod-RFQ, dessen HF-Design auf dem bereits am IAP getesteten MAX-Prototypen basiert.

Für den MYRRHA-RFQ konnte eine neue Art der Dipolkompensation für 4-Rod-RFQs entwickelt werden, die bereits in anderen Beschleunigern, wie etwa dem neuen HLI-RFQ-Prototypen eingesetzt werden konnte [41]. Hierbei werden die Stützen, auf denen die Elektroden befestigt werden alternierend verbreitert, um so den Strompfad zum niedrigeren Elektrodenpaar zu verlängern, wodurch sich die dortige Spannung erhöht. Im Zuge dieser Entwicklung wurden Simulations- und Messmethoden erarbeitet, um den Dipolanteil sowohl an bereits gebauten, wie auch an zukünftigen 4-Rod-RFQs untersuchen zu können. Der Erfolg dieser neuartigen Dipolkompensation konnte in den Low-Level-Messungen, die sich an den Zusammenbau des MYRRHA-RFQs anschlossen, validiert werden.

Die CH-Sektion, die im MYRRHA-Injektor auf den RFQ und die MEFT folgt, besteht aus insgesamt 16 normaleitenden Kavitäten. Sie gliedert sich in sieben beschleunigende

CHs, auf die ein CH-Rebuncher und weitere acht beschleunigende CHs folgen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde - aufbauend auf bereits vorhandenen Entwürfen - das Design der ersten sieben CH-Strukturen des MYRRHA-Injektors erstellt und hinsichtlich seiner HF-Eigenschaften optimiert.

Die dabei während den Simulationen an CH1 auftretende Problematik einer parasitären Tunermode konnte durch zahlreiche Simulationen umgangen werden.

Weiter wurde das aus der FRANZ-CH bekannte Kühlkonzept überarbeitet, um eine hohe thermische Stabilität gewährleisten zu können, wobei mehrere verschiedene Konzepte entwickelt, simuliert und bewertet wurden.

Das so entwickelte HF- und Kühl-Design der ersten sieben MYRRHA-CHs dient als Vorlage für die weiteren MYRRHA-CHs [25] sowie für zukünftige Beschleunigerprojekte, wie etwa HBS am Forschungszentrum Jülich. [75].

Im Anschluss an die Designphase wurden die ersten beiden CH-Strukturen des Injektors und ein zusätzlicher dickschichtverkupferter Deckel für CH1 von den Firmen NTG und PINK gefertigt und anschließend Low-Level-Messungen unterzogen, in denen die Simulationsergebnisse bestätigt werden konnten, während diese Messungen zusätzlich als Vorbereitung für die Konditionierung dienten.

Sowohl der MYRRHA-RFQ, als auch die CH-Strukturen wurden nach ihren jeweiligen Low-Level-Messungen durch eine Konditionierung auf den späteren Strahlbetrieb vorbereitet.

Die Konditionierung des MYRRHA-RFQ erfolgte in zwei Phasen. Zunächst wurde er in der Experimentierhalle des IAP im cw-Betrieb vorkonditioniert, bevor er nach Louvain-la-Neuve transportiert wurde. In der dort fortgesetzten Konditionierung, die sowohl gepulst, als auch im cw-Betrieb erfolgte, konnten im Rahmen dieser Arbeit 120 kW cw stabil eingekoppelt werden, wobei diese transmittierte Leistung später noch vom SCK auf bis zu 145 kW cw gesteigert wurde [71]. Nach Abschluss der Konditionierung konnten sowohl vom IAP, als auch vom SCK Röntgenspektren aufgenommen werden, um so die Shuntimpedanz bestimmen zu können. Die Ergebnisse dieser Messungen zusammen mit der alternativen Bestimmung der Shuntimpedanz über den R/Q-Wert wurden ebenfalls in dieser Arbeit besprochen.

Die CH-Kavitäten wurden im Bunker der Experimentierhalle des IAP konditioniert, wobei zusätzlich neue Konditionierungsmethoden erarbeitet und erprobt werden konnten. In den abschließenden Untersuchungen, die sich an jede der drei Konditionierungen anschlossen, konnten Erkenntnisse über das thermische Verhalten der CHs, sowie über den Einfluss verschiedener Verschaltungen des Kühlsystems darauf gewonnen werden, die bei der Installation auch zukünftiger CHs von Nutzen sein werden.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich meine tiefe Dankbarkeit all jenen ausdrücken, die mich während der Zeit als Doktorand unterstützt haben.

Bei Prof. Dr. Holger Podlech und Prof. Dr. Ulrich Ratzinger möchte ich mich für die Zeit bedanken, die für die Begutachtung meiner Arbeit nötig war.

Ein besonderer Dank gilt Prof. Dr. Holger Podlech, der mich in seine Arbeitsgruppe aufgenommen hat und mir so die Gelegenheit zu dieser Dissertation gab. Ich danke besonders für die Freiheiten, das große Vertrauen und die Unterstützung, ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Prof. Dr. Ulrich Ratzinger und Prof. Dr. Alwin Schempp danke ich für viele anregende Gespräche, die mir die Funktion von RFQs und Hohlraumresonatoren näher brachten.

Vielen Dank auch an Sven Reploeg und sein Team für die vielen großen und kleinen Hilfen und Anregungen, ohne die die Aufbauten, die bei den Experimenten verwendet wurden, einfach nicht möglich gewesen wären.

Bei Daniel Bänsch und Thomas Metz, deren Fachwissen und tatkräftige Hilfe einen Großteil der Arbeiten in der Experimentierhalle erst möglich machten, möchte ich mich ebenfalls bedanken.

Meinen Bürokollegen Thorsten Conrad, Patrick Müller, Nils Petry, Sarah Lamprecht und Stephan Wagner möchte ich für viele anregende Gespräche und für unendlich viel Hilfe in schwierigen Zeiten danken. Eure Unterstützung machte nicht nur diese Arbeit erst möglich.

Andi, Domo und Domi - ich bin kein Freund großer Worte. Aber wir haben schon einen weiten Weg hinter uns gebracht und ich wollte euch einfach nur Danke sagen.

Zu guter Letzt möchte ich mich bei meiner Familie bedanken - meinen Eltern, meinem Bruder, meinem Cousin und natürlich meinen Kindern. Es war nicht einfach in den letzten Jahren, aber ich war mir eurer Unterstützung immer sicher und dafür kann ich euch nicht genug danken.

Literaturverzeichnis

- [1] O. RENN (HRSG.): *Partitionierung und Transmutation. Forschung - Entwicklung - Gesellschaftliche Implikationen (acatech STUDIE)*. Herbert Utz Verlag, München, 2014.
- [2] A. SCHWENK-FERRERO: *German Spent Nuclear Fuel Legacy: Characteristics and High-Level Waste Management Issues*. Science and Technology of Nuclear Installations, Vol. 2013, 2013, <http://dx.doi.org/10.1155/2013/293792>.
- [3] <https://world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/world-nuclear-power-reactors-and-uranium-requireme.aspx>, abgerufen am 24.11.2021
- [4] J. GUIDEZ ET AL.: *Phenix: the irradiation program for transmutation experiments*. Nuclear Energy Agency of the OECD (NEA): Organisation for Economic Cooperation and Development - Nuclear Energy Agency, 2005, https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:37035853.
- [5] B. MERK, V. GLIVICI-COTRUȚĂ: *Studie zur Partitionierung und Transmutation (P&T) Hochradioaktiver Abfälle. Stand der Grundlagen- und Technologischen Forschung*. Herausgegeben vom Helmholtz-Zentrum Dresden - Rossendorf, 2014, ISSN 2191-8716, <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:d120-qucosa-154560>
- [6] F. MAEKAWA AND TRANSMUTATION EXPERIMENTAL FACILITY DESIGN TEAM: *J-PARC Transmutation Experimental Facility Program*. Plasma and Fusion Research, Vol. 13, 2018, <https://doi.org/10.1585/pfr.13.2505045>
- [7] H. AIT ABDERRAHIM ET AL.: *MYRRHA accelerator driven system programme: recent progress and perspectives*. Izvestiya v-zov. Yadernaya Energetika, vol. 2019, no. 2, pp. 29–42, Jun.2019, <https://doi.org/10.26583/npe.2019.2.03>.
- [8] H. PODLECH ET AL.: *The MYRRHA Project*. Proceedings of NAPAC2019 (pp. 945-950, THZBA2), Lansing, USA, 2019, <https://doi.org/10.18429/JACoW-NAPAC2019-THZBA2>.
- [9] F. BOULY ET AL.: *Superconducting LINAC Design Upgrade in View of the 100 MeV MYRRHA Phase I*. Proceedings of IPAC2019 (pp. 837-840, MOPTS003), Melbourne, Australia, 2019, <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2019-MOPTS003>.

- [10] D. VANDEPLASSCHE ET AL.: *The MYRRHA Linear Accelerator*. Proceedings of IPAC2011 (pp. 2718-2720, WEPS090), San Sebastián, Spain, 2011, <https://accelconf.web.cern.ch/IPAC2011/papers/weps090.pdf>.
- [11] J.-L. BIARROTTE, D. URIOT: *Dynamic compensation of an rf cavity failure in a superconducting linac*. Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams, 11, 072803, 2008, <http://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.11.072803>.
- [12] F. BOULY ET AL.: *Fault Tolerance and Consequences in the MYRRHA Superconducting LINAC*. Proceedings of LINAC2014 (pp. 297-299, MOPP103), Geneva, Switzerland, 2014, <https://accelconf.web.cern.ch/LINAC2014/papers/mopp103.pdf>.
- [13] G. VAN DEN EYNDE ET AL.: *An updated core design for the multi-purpose irradiation facility MYRRHA*. Journal of Nuclear Science and Technology, vol. 52, Nos. 7-8, pp. 1053-1057, 2015, <https://doi.org/10.1080/00223131.2015.1026860>.
- [14] <https://myrrha.be/about-myrrha/myrrha-proton-target-facility>, abgerufen am 04.03.2022.
- [15] W. LEYSEN, D. TERYTYEV, A. STANKOVSKIY: *Fusion target station on MYRRHA facility: Baseline concept*. Journal of Nuclear Materials (2020), <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2020.152242>.
- [16] <https://myrrha.be/about-myrrha/myrrha-full-power-facility>, abgerufen am 04.03.2022.
- [17] D. MÄDER: *Die CH-Sektion des 17MeV Injektors für MYRRHA*. Dissertation, Goethe-Universität Frankfurt am Main, 2014, <http://linac.physik.uni-frankfurt.de/publikationen/doktor-maeder.pdf>.
- [18] F. DZIUBA ET AL.: *CH-Cavity Development for the 17MeV EUROTRANS Injector*. Proceedings of LINAC2010 (pp. 446-448, MOPTS003), Tsukuba, Japan, 2010, <https://accelconf.web.cern.ch/LINAC2010/papers/tup023.pdf>.
- [19] C. ZHANG ET AL.: *From EUROTRANS to MAX: New Strategies and Approaches for the Injector Development*. Proceedings of IPAC2011 (pp. 2583-2585, WEPS043), San Sebastián, Spain, 2011, <https://accelconf.web.cern.ch/IPAC2011/papers/weps043.pdf>.
- [20] C. ZHANG ET AL.: *General Layout of the 17MeV Injector for MYRRHA*. Proceedings of IPAC2011 (pp. 2574-2576, WEPS039), San Sebastián, Spain, 2011, <https://accelconf.web.cern.ch/IPAC2011/papers/weps039.pdf>.
- [21] D. MÄDER ET AL.: *Consolidated Design of the 17MeV Injector for MYRRHA*. Proceedings of SRF2013 (pp. 274-276, MOP065), Paris, France, 2013, <https://accelconf.web.cern.ch/SRF2013/papers/mop065.pdf>.

- [22] D. MÄDER ET AL.: *R&D of the 17MeV MYRRHA Injector*. Proceedings of LINAC2014 (pp. 202-204, MOPP064), Geneva, Switzerland, 2014, <https://accelconf.web.cern.ch/LINAC2014/papers/mopp064.pdf>.
- [23] K. KÜMPEL ET AL.: *The New Injector Design for MYRRHA*. Proceedings of IPAC2017 (pp. 2234-2236, TUPVA068), Copenhagen, Denmark, 2017, <https://accelconf.web.cern.ch/ipac2017/papers/tupva068.pdf>.
- [24] BEVATECH GmbH, <https://bevatech.com/>
- [25] P. BÜLLER ET AL.: *RF Simulations of the Injector Section from CH8 to CH15 for MYRRHA*. Proceedings of IPAC2017 (pp. 2790-2790, WEPML043), Vancouver, BC, Canada, 2017, <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2018-WEPML043>.
- [26] J. D. COCKCROFT, E. T. S. WALTON: *Experiments with High Velocity Positive Ions - (II) The Disintegration of Elements by High Velocity Protons*. Proceedings of the Royal Society A, Volume 137, Issue 831 (pp. 229-242), 1932, <http://doi.org/10.1098/rspa.1932.0133>.
- [27] F. HINTERBERGER: *Electrostatic Accelerators*. Proceedings of Cern Accelerator School - Small Accelerators, Zeegse, Netherlands, 24. Mai - 2. Juni 2005, (CERN-2006-012, pp. 95-112, 2006), <https://cds.cern.ch/record/1005042?ln=de>.
- [28] F. HINTERBERGER: *Physik der Teilchenbeschleuniger und Ionenoptik*. Zweite Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-540-75281-3, 2008.
- [29] R. J. VAN DE GRAAFF, K. T. COMPTON, L. C. VAN ATTA: *The Electrostatic Production of High Voltage for Nuclear Investigations*. Physical Review, Volume 43, Issue 3 (pp. 149-157), 1933, <http://doi.org/10.1103/PhysRev.43.149>.
- [30] A. NASSIRI ET AL.: *History and Technology Developments of Radio Frequency (RF) Systems for Particle Accelerators*. IEEE Transactions on Nuclear Science, Volume 63, Number 2 (pp. 707-750), 2016, <http://doi.org/10.1109/TNS.2015.2485164>.
- [31] R. WIDERÖE: *Über ein neues Prinzip zur Herstellung hoher Spannungen*. Archiv f. Elektrotechnik, Ausgabe 21 (pp. 387-406), 1928, <http://doi.org/10.1007/BF01656341>.
- [32] J. JACKSON: *Classical Electrodynamics*. Third Edition, John Wiley & Sons, Inc., ISBN 978-0-47130-932-1, 1998.
- [33] T. P. WANGLER: *RF Linear Accelerators*. 2nd Completely Revised and Enlarged Edition, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, ISBN 978-3-527-40680-7, 2008.
- [34] H. PODLECH: *Entwicklung von normal- und supraleitenden CH-Strukturen zur effizienten Beschleunigung von Protonen und Ionen*. Habilitationsschrift, Goethe-Universität Frankfurt am Main, 2008, <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:hebis:30:3-364687>.

- [35] U. RATZINGER: *Interdigital RF Structures*. Proceedings of LINAC1996 (pp. 525-529), Albuquerque, New Mexico, USA, 1990, <https://accelconf.web.cern.ch/190/papers/we201.pdf>.
- [36] U. RATZINGER ET AL.: *The New High Current Ion Accelerator at GSI and Perspectives for LINAC Design based on H-Mode Cavities*. Proceedings of EPAC2000 (pp. 98-102), Vienna, Austria, 2000, <https://accelconf.web.cern.ch/e00/PAPERS/TUZF204.pdf>.
- [37] M. BASTEN: *Entwicklung und Inbetriebnahme zweier supraleitender 217 MHz CH-Strukturen für das HELIAC-Projekt*. Dissertation, Goethe-Universität Frankfurt am Main, 2019, http://publikationen.ub.uni-frankfurt.de/opus4/frontdoor/deliver/index/docId/51767/file/Doktorarbeit5_ohne_persoenliche_Daten.pdf.
- [38] M. FERRARIO, M. MIGLIORATI, L. PALUMBO: *Space Charge Effects*. Proceedings of Cern Accelerator School: Advanced Accelerator Physics, Trondheim, Norway, 19. - 29. August 2013, (CERN-2014-009, pp. 331-356, 2014), <http://doi.org/10.5170/cern-2014-009.331>.
- [39] I. M. KAPCHINSKY, V. A. TEPLYAKOV: *A Linear Ion Accelerator with Spatially Uniform Hard Focusing*. SLAC-TRANS-0099 (August 1969), übersetzt von T. Watt vom Preprint ITEP-673 (März 1969), erschienen in: Pribory i. Tekhnika Eksperimenta, 119, No. 2, 1970, <http://www.slac.stanford.edu/pubs/slactrans/trans01/slac-trans-0099.pdf>.
- [40] A. L. LOMBARDI: *The Radio Frequency Quadrupole (RFQ)*. Proceedings of Cern Accelerator School - Small Accelerators, Zeegse, Netherlands, 24. Mai - 2. Juni 2005, (CERN-2006-012, pp. 201-207, 2006), <http://doi.org/10.5170/cern-2006-012.201>.
- [41] D. KOSER: *Development of a 108 MHz 4-Rod CW RFQ-Design for High Duty Cycle Acceleration of Heavy Ion Beams at the GSI-HLI*. Dissertation, Goethe-Universität Frankfurt am Main, 2020, http://publikationen.ub.uni-frankfurt.de/opus4/frontdoor/deliver/index/docId/59228/file/PhD_Thesis_Koser.pdf.
- [42] J.E. STOVALL, K.R. CRANDALL, R.W. HAMM: *Performance Characteristics of a 425 MHz RFQ Linac*. 6th Conference on the Application of Accelerators in Research & Industry, Denton, Texas, USA, 1980, Report LA-UR-80-3140, <http://permalink.lanl.gov/object/tr?what=info:lanl-repo/lareport/LA-UR-80-3140>.
- [43] R. STOKES, T. P. WANGLER: *Radiofrequency Quadrupole Accelerators and Their Applications*. Annual Review of Nuclear and Particle Science, Vol. 38, 2003, <http://doi.org/10.1146/annurev.ns.38.120188.000525>.

- [44] S. MATHOT ET AL.: *Mechanical Design, Brazing and Assembly Procedures of the LINAC₄ RFQ*. Proceedings of IPAC2010 (pp. 807-809, MOPD054), Kyoto, Japan, 2010, <http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/ipac10/papers/mopd054.pdf>.
- [45] T. SIEBER: *Entwicklung von 4-Rod- und IH- Radio-Frequenz-Quadrupol (RFQ)-Beschleunigern für radioaktive Ionenstrahlen bei REX-ISOLDE und MAFF*. Dissertation, Ludwig Maximilian Universität München, 2001, https://edoc.ub.uni-muenchen.de/455/1/Sieber_Thomas.pdf.
- [46] U. RATZINGER: *The New GSI Prestripper Linac for High Current Heavy Ion Beams*. Proceedings of LINAC1996 (pp. 288-292, TU202), Geneva, Switzerland, 1996, <http://accelconf.web.cern.ch/196/papers/tu202.pdf>.
- [47] N. MEHROTRA: *Quadrupolar asymmetry in shifted-stem vane-shaped-rod radio frequency quadrupole accelerator*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 886 (pp. 119-124), 2018, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.12.075>.
- [48] K. KÜMPEL ET AL.: *Dipole Compensation of the 176 MHz MYRRHA RFQ*. Proceedings of IPAC2017 (pp. 2240-2242, TUPVA070), Copenhagen, Denmark, 2017, <http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/ipac2017/papers/tupva070.pdf>.
- [49] L. C. MAIER, J. C. SLATER: *Field Strength Measurements in Resonant Cavities*. Journal of Applied Physics, Volume 23, Number 1 (pp. 68-77), 1952, <http://doi.org/10.1063/1.1701980>.
- [50] H. PADAMSEE, J. KNOBLOCH, T. HAYS: *RF Superconductivity for Accelerators*. John Wiley & Sons, Inc., ISBN 0-471-15432-6, 1998.
- [51] M. BUSCH: *Auslegung und Messung einer supraleitenden 325 MHz CH-Struktur für Strahlbetrieb*. Dissertation, Goethe-Universität Frankfurt am Main, 2015, http://publikationen.ub.uni-frankfurt.de/opus4/frontdoor/deliver/index/docId/38625/file/Dissertation_Busch_online.pdf.
- [52] CST Studio Suite, Dassault Systèmes (DS), <http://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite>
- [53] COMSOL Multiphysics, COMSOL Inc., <http://www.comsol.com>
- [54] ANSYS Workbench, ANSYS Inc., <http://ansys.com>
- [55] NTG Neue Technologien GmbH & Co. KG, <http://www.ntg.de>
- [56] H. PODLECH ET AL.: *Design of the MYRRHA RFQ and Assortiated Short Test Section*. MAX Deliverable Number 2.4, Contract Number 269565, 2014.

- [57] P. FISCHER: *Ein Hochleistungs-RFQ-Beschleuniger für Deuteronen*. Dissertation, Goethe-Universität Frankfurt am Main, 2007, <http://publikationen.uni-frankfurt.de/opus4/frontdoor/deliver/index/docId/1548/file/Dissertation.pdf>.
- [58] I. MARDOR ET AL.: *The SARAF cw 40 MeV Proton/Deuteron Accelerator*. Proceedings of SRF2009 (pp. 74-80, MOODAU04), Berlin, Germany, 2009, <https://accelconf.web.cern.ch/SRF2009/papers/moodau04.pdf>.
- [59] U. RATZINGER ET AL.: *The Frankfurt Neutron Source FRANZ*. Proceedings of IPAC2010 (pp. 597-599, MOPEC059), Kyoto, Japan, 2010, <https://accelconf.web.cern.ch/IPAC10/papers/mopec059.pdf>.
- [60] L. WEISSMAN ET AL.: *Installation and Commissioning of the Upgraded SARAF 4-Rods RFQ*. Proceedings of 61st ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop HB18 (pp. 75-79, TUA1WC01), Daejeon, Korea, 2018, <http://doi.org/10.18429/JACoW-HB2018-TUA1WC01>
- [61] <https://prozesstechnik.industrie.de/pharma/lexikon-pharmatechnologie/dielektrizitaetskonstante/>, abgerufen am 09.08.2021
- [62] A. SEIBEL: *Entwicklung und Test des 175 MHz CH-Rebunchers für das FRANZ-Projekt*. Masterarbeit, Goethe-Universität Frankfurt am Main, 2013, <http://linac.physik.uni-frankfurt.de/publikationen/master-seibel.pdf>.
- [63] K. KÜMPEL: *Untersuchungen zur Temperaturabhängigkeit der Resonanzfrequenz von Hohlraumresonatoren*. Masterarbeit, Goethe-Universität Frankfurt am Main, 2015.
- [64] U. FISCHER ET AL.: *Acidur 4301 - Werkstoffdatenblatt X5CrNi18-10 1.4301*. Werkstoffdatenblatt, Deutsche Edelstahlwerke GmbH, https://www.dew-stahl.com/fileadmin/files/dew-stahl.com/documents/Publikationen/Werkstoffdatenblaetter/RSH/1.4301_de.pdf, abgerufen am 23.09.2021.
- [65] U. FISCHER ET AL.: *Tabellenbuch Metall*. 43., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Verlag Eurpa-Lehrmittel - Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, ISBN 978-3-8085-1723-9, 2005.
- [66] N. PETRY: *Untersuchung der FRANZ CH-Struktur*. Masterarbeit, Goethe-Universität Frankfurt am Main, 2017, <http://linac.physik.uni-frankfurt.de/publikationen/master-petry.pdf>.
- [67] PINK GmbH Vakuumtechnik, <http://www.pink-vak.de>
- [68] Galvano-T electroforming-plating GmbH, <https://galvano-t.com>

- [69] M. SCHWARZ ET AL.: *LINAC-Multitool - An Open Source JAVA-Toolkit*. Proceedings of LINAC2018 (pp. 217-219, MOPO101), Beijing, China, 2018, <https://doi.org/10.18429/JACoW-LINAC2018-MOP0101>.
- [70] S. LAMPRECHT: *Untersuchung des MYRRHA-RFQ*. Masterarbeit, Goethe-Universität Frankfurt am Main, 2018.
- [71] A. GATERA ET AL.: *MINERVA (MYRRHA Phase I) RFQ Beam Commissioning*. Proceedings of IPAC2021 (pp. 675-678, MOPAB205), Campinas, SP, Brazil, 2021, <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2021-MOPAB205>.
- [72] S. ALZUBAIDI ET AL.: *Control System for the FRANZ Facility*. Proceedings of IPAC2015 (pp. 830-832, MOPHA025), Richmond, VA, USA, 2015, <http://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2015-MOPHA025>
- [73] S. ZIMMERMANN: *Automatisierung von HF-Leistungstests der MYRRHA CH-Driftröhrenkavitäten*. Masterarbeit, Goethe-Universität Frankfurt am Main, 2020.
- [74] A. RÜFFER: *Thermische Untersuchungen einer MYRRHA-CH*. Bachelorarbeit, Goethe-Universität Frankfurt am Main, 2021.
- [75] H. PODLECH ET AL.: *Conceptual Design of the Proton LINAC for the High Brilliance Neutron Source HBS*. Proceedings of IPAC2019 (pp. 910-913, MOPTS027), Melbourne, Australia, 2019, <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2019-MOPTS027>.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Prozentuale Massenanteile von abgebranntem Brennstoff. Frei nach [1].	6
1.2	Radioaktivität von abgebranntem Brennstoff aufgetragen gegen die Zeit. Entnommen aus [2].	7
2.1	Übersicht über das MYRRHA-Projekt. Entnommen aus [9].	10
2.2	Schematische Darstellung der verschiedenen Injektordesigns A bis C3. Entnommen aus [17].	13
2.3	Übersicht des aktuelle geplanten MYRRHA-Injektors. Überarbeitet nach einer Vorlage von [24].	15
2.4	Übersicht des geplanten 5,9 MeV Injektors, der in Louvain-la-Neuve aufgebaut werden soll. Überarbeitet nach einer Vorlage von [24].	16
3.1	Skizzierter Aufbau eines Wideröe Beschleunigers. Die Driftröhren sind abwechselnd mit den Polen einer HF-Quelle verbunden und ihre Länge ist an die steigende Geschwindigkeit der Teilchenpakete angepasst.	18
3.2	Skizze der Spaltmittenabstände und der elektrischen Felder innerhalb eines RFQs (unten) einer Driftröhrenstruktur nach der Wideröe-Bedingung, z.B. eine Wideröe-, CH- oder IH-Struktur (mitte) und innerhalb einer Alvarez-Struktur (oben).	19
3.3	Feldverteilungen und Oberflächenstromdichten der TM_{010} -, TE_{111} und der TE_{211} -Mode in einer Pillbox-Kavität.	22
3.4	Schematische darstellung einer IH-Driftröhrenstruktur.	23
3.5	Zwei Versionen von MYRRHA-CH5, bei denen die rechte an den Rändern longitudinal verlängert wurde, wodurch sich der Potentialverlauf (grüne bzw. rote Kurve) verlängert wird, wodurch sich die äußeren Stützen auf einem höheren Potential befinden.	24
3.6	Transversal elektrisches Quadrupolfeld simuliert an einem Modell des MYRRHA-RFQs. Die roten Pfeile markieren die fokussierende und die grünen Pfeile die defokussierende Ebene für einen positiv geladenen Teilchenstrahl.	26
3.7	Elektrodenmodulation mit der minimalen und maximalen Apertur a und $m \cdot a$. Frei nach [40].	26
3.8	AG-Fokussierung in einer FODO-Anordnung. Entnommen aus [41].	26
3.9	Links: Zerlegung des senkrecht auf der Elektrodenoberfläche stehenden E-Feldvektors \vec{E} in seine transversalen und longitudinalen Anteile \vec{E}_r und \vec{E}_z . Rechts: Simulierte elektrische Feldverteilung zwischen schräg gegenüberliegenden Elektroden des MYRRHA-RFQ-Modells.	27
3.10	Elektrisches und magnetisches Feld der TE_{211} - und der TE_{111} -Mode.	28
3.11	Der 425 MHz 4-Vane-RFQ vom Los Alamos National Laboratory hat einen Durchmesser von 150 mm und war ca. 1,1 m lang. Entnommen aus [43].	29

Abbildungsverzeichnis

3.12	Ein Modul des 325 MHz 4-Vane-RFQs am CERN LINAC4. Entnommen aus [44].	29
3.13	Elektrisches und magnetisches Feld der TE_{211} - und der TE_{111} -Mode.	29
3.14	Skizzierter Aufbau eines IH-RFQ (links) mit vergrößerter Darstellung der Elektrodenhalteringe (rechts)[45].	30
3.15	Skizze der ersten beiden Module des 36 MHz IH-RFQs [46].	30
3.16	Links: 4-Rod-RFQ-Modell mit skizzierten Strompfaden (schwarze gestrichelte Linie). Rechts: Ersatzschaltbild der HF-Zellen.	31
3.17	Strompfade (grün) und Magnetfelder (blau) innerhalb der drei HF-Zellen eines 4-Rod-RFQs mit vier Stützen. Die positiven und negativen Ladungen (rot) beziehen sich nur auf die Elektroden, die im Vordergrund zu sehen sind.	32
3.18	Nach unten verschobene ideale Position der Strahlachse bei starkem Dipolanteil.	32
3.19	Vergleich der Spannungs- und Stromverteilung an einer RFQ-Stütze und einem theoretischen $\lambda/4$ -Resonator ohne kapazitivem Abschluss.	33
3.20	Verhalten von HF-Pulsen bei unterschiedlichen Kopplungsfaktoren. Entnommen aus [51].	39
3.21	Bestimmung der Güte über die Resonanzkurve.	41
3.22	Zeitabhängiger Verlauf des elektrischen Feldes innerhalb einer Spalts.	42
3.23	Verhalten der Frequenz des MYRRHA-RFQ-Simulationsmodells bei einer unterschiedlichen Anzahl von Meshzellen.	47
3.24	Detailaufnahmen aus dem CAD-Modell von CH1. Die roten Pfeile markieren beispielhafte Einzelheiten, wie Schrauben und Vertiefungen, die in dem Simulationsmodell nicht vorhanden sind. Das CAD-Modell wurde von der NTG [55] zur Verfügung gestellt.	48
3.25	Oben: FRANZ-RFQ-Simulationsmodell mit gleichmäßiger Tuningplattenhöhe und einer Frequenz von 174,88 MHz. Unten: FRANZ-RFQ-Simulationsmodell mit den Tuningplattenhöhen des echten RFQs und einer Frequenz von 167,51 MHz.	48
4.1	Simulationsmodell (links) und fertig zusammengebauter MAX-Prototyp vor den Tests mit hoher Leistung. Bilder entnommen aus [56].	50
4.2	Kühlkanäle in den Stützen des SARAF-RFQs. Entnommen aus [57].	51
4.3	Kühlkanäle in den Stützen des MAX-Prototypen. Dieses Layout wird auch im MYRRHA-RFQ verwendet. Entnommen aus [56].	51
4.4	Schnitte durch eine RFQ-Stütze mit dem neuen Kühlsystem. Links sind zwei der vier Kühlkanäle zur Kühlung der Stütze und rechts die Durchgangsbohrungen für die Kühlung der Elektroden zu erkennen. Die Bilder wurden von der NTG [55] zur Verfügung gestellt.	51
4.5	Verlauf der Kühlkanäle in den Elektroden des MAX-Prototypen. Dieses Kühllayout wurde auch im MYRRHA-RFQ verwendet. Die Bilder wurden von der NTG [55] zur Verfügung gestellt.	52
4.6	Verlauf des Kühlkanals in den Tuningplatten des MAX-Prototyps. Dieses Kühllayout wurde auch im MYRRHA-RFQ verwendet. Entnommen aus [56].	52
4.7	Tuningplatte des MYRRHA-RFQs mit Silberplatte zur besseren elektrischen Kontaktierung zur Stütze.	52
4.8	Verlauf der beiden Linien parallel zur Strahlachse, die beim ersten Verfahren zur Bestimmung des Dipols im Simulationsmodell benutzt wurden (V_{Achse}).	54

Abbildungsverzeichnis

4.9	Verlauf und Position der Linien zwischen den Elektroden, die beim zweiten Verfahren zur Bestimmung des Dipols im Simulationsmodell benutzt wurden (V_{Curve}).	54
4.10	Stützen des MYRRHY-RFQ-Simulationsmodells mit verschiedenen Stützenwinkeln. Die roten Pfeile markieren die im Bereich von $0-21,8^\circ$ konstant gehaltene Höhe des unteren Elektrodenarms und die blauen Pfeile die im Bereich von $21,8-50^\circ$ konstante Höhe des oberen Elektrodenarms.	56
4.11	Definition des Stützenwinkels zur Dipolkompensation. Der Abstand zwischen der Stütze und der vorbeilaufenden Elektrode und der Platz für die Tuningplatte sind mit dem roten und grünen Pfeil markiert.	56
4.12	Simulierter Dipolanteil bei verschiedenen Stützenwinkeln.	56
4.13	Links: Originalstütze ohne Versatz. Die Breite der Stütze (grüner Pfeil) entspricht der Breite der Tuningplatte (blauer Pfeil). Mitte: Stützen, die alternierend nach außen versetzt wurden. Die Stützenbreite entspricht dem Original, während die Breite der Tuningplatte (gestrichelter blauer Pfeil) um die Größe des Versatzes (roter Pfeil) schmaler geworden ist. Rechts: Stützen, die alternierend nach außen verbreitert wurden, wobei die Breite der Tuningplatte konstant bleibt, während die Stützenbreite um den Versatz zunimmt.	57
4.14	Simulierter Dipolanteil bei verschiedenen Stützenverbreiterungen.	58
4.15	Oben: Finales Simulationsmodell des MYRRHA-RFQs. Unten: Darauf basierendes CAD-Modell mit nachträglich eingesetzten Tuningplatten. Das CAD-Modell wurde von der NTG [55] zur Verfügung gestellt.	59
4.16	Verschiedene Montageschritte des MYRRHA-RFQs. Die Photos wurden im Labor der NTG [55] aufgenommen.	60
4.17	Produktionsschritte der Elektrodenteilstücke des MYRRHA-RFQs. Oben links: Kupferrohlinge mit eingefrästen Kühlkanälen, bevor sie dickschichtverkupfert werden. Oben rechts: Die Rohlinge nach der Dickschichtverkupferung und das Rohmaterial für die Aluminiumdummys. Mitte links: Die grobe Form der Elektrodenteilstücke wird aus den Rohlingen geschnitten. Mitte rechts: Die Elektrodengeometrie wird aufgefärs. Unten: Die 12 fertigen Elektrodenteilstücke vor der Montage. Die Photos wurden bei der NTG [55] aufgenommen.	61
4.18	Dummytuningplatte, die zum Einstellen der Frequenz und der Flatness verwendet wird.	62
4.19	Teflonklötzchen zwischen den oberen Elektroden während einer Flatnessmessung.	63
4.20	Flatness des MYRRHA-RFQs. Gemessen nach dem Befestigen der Tuningplatten.	64
4.21	Messung der Reflexionspeaks von vorlaufender und rücklaufender Welle.	65
4.22	Montierte Einkoppelschleife im MYRRHA-RFQ.	65
4.23	Per S_{11} -Messung ermittelte Anpassung der Einkoppelschleife des MYRRHA-RFQs.	66
4.24	Schematischer Messaufbau zur Bestimmung des Kopplungsfaktors β	66
4.25	Messaufbau für die in der Experimentierhalle des IAP.	67
4.26	S_{21} -Messung an Pickup 2 des MYRRHA-RFQs zur Bestimmung der Dämpfung des Pickups und der Güte.	68
4.27	Montierter Tauchkolben im MYRRHA-RFQ.	69
4.28	Beispiele gemessener Tuningbereiche, die mit einem Tauchkolben auf Höhe der 10. Tuningplatte möglich sind. Die Versatz zwischen den beiden Verläufen resultiert aus verschiedenen Einbauhöhen der 10. Tuningplatte.	70

Abbildungsverzeichnis

4.29	Messung der Frequenzverstimmung durch einen Störkondensator an den oberen Elektroden des HLI-Prototypen. Entnommen aus [41].	71
4.30	Messung der Frequenzverstimmung des RFQs mit einem Störkörper (jeweils in der roten Markierung).	71
4.31	Lokal bestimmte Dipolwerte entlang der Elektroden des FRANZ-RFQ.	73
4.32	MYRRHA-RFQ in der Experimentierhalle des IAP mit provisorischem Deckel während der Dipolmessungen.	74
4.33	Lokal mit dem Störkörper bestimmte Dipolwerte entlang der Elektroden des MYRRHA-RFQs.	75
4.34	Lokal mit dem Störkondensator bestimmte Dipolwerte entlang der Elektroden des MYRRHA-RFQs.	76
5.1	Schnitt durch die Simulationsmodelle der FRANZ-CH und der Rohform von MYRRHA-CH3.	78
5.2	Schnitt durch die Driftröhren der Simulationsmodelle der FRANZ-CH und der Rohform von MYRRHA-CH3.	79
5.3	Verschiedene Versionen der Driftröhren der MYRRHA-CH5. Links: Driftröhre aus der Rohform; Mitte: Neue Driftröhre mit vergrößertem Außenradius; Rechts: Neue Driftröhre mit inneliegender (direkter) Kühlung.	79
5.4	Veränderung der Frequenz bei einer Vergrößerung des Außenradius der Driftröhren am Beispiel von MYRRHA-CH5.	80
5.5	Links: Rohform der MYRRHA-CH5 mit Verrundung am Übergang zwischen Tank und Deckel; Rechts: Überarbeitetes Modell ohne Verrundung.	80
5.6	Auswirkung des Verrundungsradius auf die Güte und die Resonanzfrequenz von MYRRHA-CH5.	81
5.7	Der Abstand zwischen dem Tauchkolben und der Strahlachse (grüner Pfeil) entspricht 35 % des Tankinnenradius (roter Pfeil).	82
5.8	Verlauf der CH-Mode (schwarz), der nächsthöheren Mode (blau) und der Tunermode (rot) für MYRRHA-CH2.	83
5.9	Aus Abbildung 5.8 vergrößerter simulierter Tuningbereich der MYRRHA-CH2 mit rot markiertem Working Point.	84
5.10	Verlauf der CH-Mode (schwarz), der nächsthöheren Mode (blau) und der Tunermode (rot) für MYRRHA-CH1, wenn sich der Arbeitspunkt der beiden Tuner bei 35 % des Tankradius befindet.	85
5.11	Feldverteilung der Tunermode in einem CH1-Simulationsmodell.	86
5.12	Skizzierter Strompfad der Tunermode entlang des Tauchkolbens.	86
5.13	Verlauf der Tunermode (schwarz), der nächsthöheren Mode (blau) und der Tunermode (rot) für MYRRHA-CH1, wenn sich der Arbeitspunkt der beiden Tuner bei 35 % des Tankradius befindet.	87

Abbildungsverzeichnis

5.14	Verlauf der CH-Mode (schwarz) und der Tunermode (rot) für MYRRHA-CH1, wenn sich der Arbeitspunkt der beiden Tuner symmetrisch bei 30 % (links) bzw. 40 % (rechts) des Tankradius befindet. Im beabsichtigten Tuningbereich (in grün) wird in beiden Fällen die CH-Mode von der Tunermode geschnitten. Zusätzlich ist der mögliche Tuningbereich im rechten Bild nicht ausreichend, was durch den nicht geschlossenen grünen Bereich dargestellt ist.	88
5.15	Verlauf der CH-Mode (schwarz) und der Tunermode (rot) für MYRRHA-CH1, wenn sich der Arbeitspunkt der beiden Tuner symmetrisch bei 20 % (links) bzw. 25 % (rechts) des Tankradius befindet. In beiden Fällen schneidet die Tunermode nicht innerhalb des Tuningbereichs (in grün) die CH-Mode.	88
5.16	Verlauf der CH-Mode (schwarz) und der Tunermode (rot) für MYRRHA-CH1-Kavitäten mit einem Innenradius von 382,55 mm und verschiedenen Abständen des statischen Tuners zur Strahlachse. Die Tuningbereiche (soweit vorhanden) sind in grün eingezeichnet. Oben links: Abstand gleich 80 mm; Oben rechts: Abstand gleich 110 mm; Unten links: 140 mm; Unten rechts befindet sich kein statischer Tuner innerhalb der Kavität.	89
5.17	Simulierte Temperaturverteilung in zwei geometrisch identischen Kavitäten, aber aus unterschiedlichem Material (links = Kupfer, rechts = Edelstahl 1.4301).	98
5.18	Abbildung des FRANZ-CH .stp-Modells (links) und dessen Kühlkanälen (mitte: Kühlung des Tanks, der Stützen und der Tuner; rechts: Kühlung der beiden Deckel). . . .	100
5.19	Abbildung des MYRRHA-CH5-Simulationsmodells (links) und den neuen Kühlkanälen in den Deckeln (rechts).	101
5.20	Vergleich der konischen Kühlung (oben) mit der schrittweise kleiner werdenden Kühlung einer CH-Stütze.	101
5.21	Vergleich der Temperaturverteilung auf den Stützen simuliert MYRRHA-CH6 mit $P_{c,120}$. Links: konische Stützenkühlung. Rechts: abgestufte Stützenkühlung.	102
5.22	Thermosimulation der MYRRHA-CH5 mit der Tankkühlung der FRANZ-CH und $P_{c,120}$	103
5.23	Vergleich der Winkelverteilungen der Kühlkanäle im Tank bei der FRANZ-CH (links) und bei den MYRRHA-CHs (rechts). Die Positionen der Kühlkanäle wurden zur besseren Übersicht mit blauen Punkten markiert.	104
5.24	Thermosimulation der MYRRHA-CH5 mit der neu entwickelten Tankkühlung und $P_{c,120}$	104
5.25	.stp-Modell eines Tauchkolbens (links) und Schnittansicht mit Blick auf dessen innenliegende Kühlwasserzuleitung (rechts).	105
5.26	Simulationsmodell von CH5 (links) und die darin eingebauten Kühlkanäle nach Kühlkonzept A (rechts). In beiden Bildern wurden sind die Tauchkolben und deren Kühlungen zur besseren Übersicht unsichtbar.	106
5.27	Thermosimulation der MYRRHA-CH6 mit neuem Kühlkonzept. Simuliert mit 120 % Verlustleistung.	107
5.28	Darstellung des bislang verwendeten dreikammrigen Vakuulgitters, bei dem der restliche Tank für die bessere Sichtbarkeit entfernt wurde. Die beiden Balken sind an ihrer dünnsten Stelle 7 mm stark, was die übermäßig starke Erwärmung der Balken bei den CHs 5-7 begünstigt.	108
5.29	Simulationsmodell von CH5 (links) und die Oberflächenströme einer leeren Pillboxkavität, die in der TE_{111} -Mode schwingt (rechts).	109

Abbildungsverzeichnis

5.30	CH6 mit normalem (links) und longitudinal versetztem Vakuumgitter (rechts). Der Versatz (roter Pfeil) entspricht 1/6 der Tankinnenlänge (grüner Pfeil).	110
5.31	Temperaturverteilung von MYRRHA-CH6 mit versetztem Vakuumgitter, simuliert mit $P_{c,erw}$	110
5.32	Darstellung des neu entwickeltesn zweikammrigen Vakuumgitters B. Der Balken ist an seiner dünnsten Stelle mit 16 mm mehr als doppelt so dick, wie die Balken beim alten Vakuumgitter.	111
5.33	Position des zusätzlichen Kühlkanals in Vakuumgitter B.	113
5.34	Thermosimulation der MYRRHA-CH6 mit neuem Kühlkonzept und gekühltem neuem Vakuumgitter. Simuliert mit der Verlustleistung aus Tabelle 5.6.	113
5.35	Simulationsmodell von CH6 (links) mit zusätzlichen verkürzten Kühlkanälen beidseitig der DN100cf-Flansche, welche auf dem rechten Bild samt Zu- und Abläufen hervorgehoben sind.	115
5.36	CAD-Modelle von CH1 (links) und CH2 (rechts).	117
5.37	Schematische Konstruktion des geschweißten Deckels von CH1. Der äußere Deckel wird auf den inneren Deckel, der die Kühlkanäle enthält, aufgesetzt und sowohl am Rand, als auch entlang der Aussparungen verschweißt.	118
5.38	Pulsmessung an CH1newlid, um zu bestimmen, ob die Schleife über- oder unterkoppelt ist. Zur besseren Übersicht wurden rote Querbalken ergänzt. Anhand der höheren Reflektion am Pulsende lässt sich ein $\beta > 1$ erkennen.	121
5.39	Kalibrierte S_{11} -Messung an CH1newlid ohne Tauchkolben zur Bestimmung der Ankopplung und der Resonanzfrequenz.	122
5.40	Links: Messaufbau zur Bestimmung der Güte von CH1newlid im Bunker der Experimentierhalle des IAP. Rechts: Kalibrierte S_{21} -Messung an Ch1newlid ohne Tauchkolben zur Bestimmung der Dämpfung des Pickups und der Güte.	123
5.41	Gemessene Ankopplungen im Vakuum für CH1newlid während der Vorbereitungen für die Konditionierung.	124
5.42	Gemessene Ankopplungen im Vakuum für CH2 während der Vorbereitungen für die Konditionierung.	125
5.43	CH2 mit Dummytunern während der Low-Level-Messungen.	127
5.44	Links: Verlauf der Resonanzfrequenzen in Abhängigkeit des Tunerabstandes von der Strahlachse, wobei jeweils der Arbeitspunkt durch rote Balken gekennzeichnet ist. Links: CH1 in rot und CH1newlid in schwarz. Rechts: CH2.	128
5.45	Mit dem LINAC-Multitool ausgewertete Störkörpermessungen an CH1newlid.	129
5.46	Vergleich der gemessenen Spannungsverteilungen von CH1 bzw. CH1newlid (links) und CH2 (rechts) mit den Strahldynamik und HF-Simulationen.	132
6.1	Schematischer Versuchsaufbau für die Konditionierung einer normalleitenden Kavität. Die grünen Pfeile beschreiben den Weg der Vorwärtsleistung vom Signalgenerator über den Pulsgenerator bis zum Verstärker (gestrichelte Pfeile) und von dort bis zur Kavität, während die roten Pfeile den Weg der reflektierten Leistung von der Kavität durch den bidirektionalen Koppler und den Zirkulator bis zur Wasserlast beschreibt.	134
6.2	Vereinfachter Ablauf einer Konditionierung. Die Grenzwerte p und P_r/P_f können für unterschiedliche Kavitäten anders gewählt werden.	138

Abbildungsverzeichnis

6.3	Konditionierung des MYRRHA-RFQs in der Experimentierhalle des IAP, bei dem kurzzeitig eine Leistung von 4 W eingekoppelt werden konnte.	143
6.4	Konditionierung des MYRRHA-RFQs in der Experimentierhalle des IAP bei dem bis zu 11 kW eingekoppelt werden konnten.	144
6.5	MYRRHA-RFQ an seinem Bestimmungsort in Louvain-la-Neuve mit verbundener Leistungs- und Kühlwasserversorgung.	144
6.6	Vereinfachte Übersicht des Konditionierungsaufbaus in LLN mit den beiden Interlocksystemen.	145
6.7	Konditionierung des MYRRHA-RFQs in LLN, bei der 114,8 kW im cw-Betrieb eingekoppelt werden konnten.	146
6.8	Skizze der Pulsverteilung bei verschiedenen Tastverhältnissen, wie sie bei der Konditionierung des MYRRHA-RFQs in LLN verwendet wurden.	146
6.9	Konditionierung des MYRRHA-RFQs in LLN, bei der mit einem Tastverhältnis von 5% eine maximale Leistung von 128 kW eingekoppelt werden konnten.	147
6.10	Konditionierung des MYRRHA-RFQs in LLN mit verschiedenen Tastverhältnissen, bei der eine maximale Leistung von 117 kW eingekoppelt werden konnte.	148
6.11	Konditionierung des MYRRHA-RFQs in LLN im cw-Betrieb, bei der eine maximale Leistung von 120 kW eingekoppelt werden konnte.	149
6.12	Konditionierung des MYRRHA-RFQs in LLN mit bis zu 145 kW im cw-Betrieb. Entnommen aus [71].	149
6.13	Aufbau zur Messung des Röntgenspektrums am MYRRHA-RFQ. Das mobile Röntgenspektrometer befindet sich transversal zur Strahlrichtung am Hochenergieende der Kavität.	150
6.14	Am MYRRHA-RFQ gemessenes Röntgenspektrum bei einer transmittierten Leistung von 90 kW. Der Schnittpunkt mit dem Hintergrund, der das energiereichste Röntgenphoton anzeigt, ist in rot markiert.	151
6.15	Am MYRRHA-RFQ gemessenes Röntgenspektrum bei einer transmittierten Leistung von 110 kW. Der Schnittpunkt mit dem Hintergrund, der das energiereichste Röntgenphoton anzeigt, ist in rot markiert.	152
6.16	Arbeitsplatz des Experimentators während der Konditionierung auf dem Dach des Kryobunkers.	154
6.17	Aufbau der Messgeräte, wie sie für die Konditionierung der MYRRHA-CH Kavitäten am IAP verwendet wurden.	155
6.18	Konditionierung von CH1newlid in einem niedrigen Leistungsbereich.	156
6.19	Konditionierung von CH1 in einem niedrigen Leistungsbereich.	157
6.20	Schrittweises Erhöhen der Leistung auf $P_t \approx 1,2$ kW innerhalb von $\approx 5,5$ h in CH2.	158
6.21	Konditionierung von CH1 mit $\approx 7,2$ kW unterbrochen von mehreren Totalreflexionen aufgrund von Schwankungen am Verstärker.	159
6.22	Bei einer Erwärmung der Kavität, wie sie etwa durch einen Anstieg der transmittierten Leistung P_t verursacht wird, verschiebt sich die Resonanzkurve nach links und umgekehrt.	159
6.23	Konditionierung von CH1 mit $\approx 6,8$ kW und laufendem Regelsystem.	160
6.24	Die Frequenz der Vorwärtsleistung während der Konditionierung von CH2 und CH1newlid f_k wurde so gewählt, dass sie leicht über der Resonanzfrequenz der Kavität f_r liegt, wodurch sich der Anteil der transmittierten Leistung P_t/P_f verringert.	161

Abbildungsverzeichnis

6.25	Veranschaulichung des Prinzips der „versetzten“ Konditionierung, bei der die transmittierte Leistung auch bei schwankenden Vorwärtsleistungen und daraus resultierenden Veränderungen relativ stabil bleibt.	162
6.26	Dauertest an CH1, bei dem über einen Zeitraum von mehr als 6 h eine Leistung von $\approx 6,8$ kW eingekoppelt wurde. Die zahlreichen Anstiege der reflektierten Leistung lassen sich auf Fehler des Verstärkers zurückführen.	163
6.27	Dauertest an CH2, bei dem über einen Zeitraum von mehr als 6 h eine Leistung von ≈ 8 kW eingekoppelt wurde. Die beiden Anstiege der reflektierten Leistung lassen sich auf Fehler des Verstärkers zurückführen.	164
6.28	Dauertest an CH1newlid, bei dem über einen Zeitraum von mehr als 8 h eine Leistung von $\approx 8,2$ kW eingekoppelt wurde.	164
6.29	Veränderung der Frequenz bei transmittierter Leistung bei CH1.	165
6.30	Über einen Zeitraum von mehr als 2 h wurden verschiedene Leistungspegel in CH1 eingekoppelt, um zu zeigen, dass sie gut angenommen werden.	166
6.31	Ausgewählte Kühlwassertemperaturen während der Messung am 06.08.2019 (links) und die daraus berechneten Temperaturdifferenzen relativ zur Temperatur des Kühlwasservorlaufs (rechts).	166
6.32	Links: Die 24 Kühlkanäle des Tanks werden abwechselnd miteinander verbunden, sodass zwei getrennte Kühlkreisläufe entstehen, von denen einer die geraden Kanäle und der andere die ungeraden Kanäle verbindet. Rechts: Bei benachbarten Kanälen wurden Kühlwasserein- und -ausgang versetzt zueinander gelegt. Die Vorlagen beider Bilder wurden aus [74] entnommen.	168
6.33	Veränderung der Frequenz bei transmittierter Leistung für parallel geschaltete (in rot) und teilweise in Reihe geschaltete Kühlkanäle bei CH1newlid.	169
6.34	Einkoppeln verschiedener Leistungen in CH2 über einen Zeitraum von ≈ 3 h.	170
6.35	Ausgewählte Kühlwassertemperaturen in CH2 während die transmittierte Leistung am 28.1.2020 über mehr als 8 h relativ konstant auf 8 kW gehalten wurde (links) und die daraus berechneten Temperaturdifferenzen relativ zur Temperatur des Kühlwasservorlaufs (rechts) mit teilweise in Reihe geschalteten Kühlkanälen.	171
6.36	Ausgewählte Kühlwassertemperaturen in CH2 während die transmittierte Leistung am 28.1.2020 über mehr als 8 h relativ konstant auf 8 kW gehalten wurde (links) und die daraus berechneten Temperaturdifferenzen relativ zur Temperatur des Kühlwasservorlaufs (rechts) mit teilweise in Reihe geschalteten Kühlkanälen.	171
6.37	Veränderung der Frequenz bei transmittierter Leistung für parallel geschaltete (in rot) und teilweise in Reihe geschaltete Kühlkanäle bei CH1newlid.	172
6.38	Konditionierung von CH1newlid mit parallelen Kühlkanälen. Zuerst wurde die transmittierte Leistung schrittweise auf 8,2 kW erhöht und dann nach einer Pause für mehr als 2 h konstant auf 8,2 kW gehalten.	173
6.39	Ausgewählte Kühlwassertemperaturen während der Messung am 20.10.2020 (links) und die daraus berechneten Temperaturdifferenzen relativ zur Temperatur des Kühlwasservorlaufs (rechts) mit parallel geschalteten Kühlkanälen.	174

Abbildungsverzeichnis

6.40	Ausgewählte Kühlwassertemperaturen während der schrittweisen Erhöhen der transmittierten Leistung auf 8 kW am 03.11.2020 (links) und die daraus berechneten Temperaturdifferenzen relativ zur Temperatur des Kühlwasservorlaufs (rechts) mit teilweise in Reihe geschalteten Kühlkanälen.	174
6.41	Erhöhung der transmittierten Leistung in CH1newlid mit teilweise in Reihe geschalteten Kühlkanälen.	175
6.42	Ausgewählte Kühlwassertemperaturen während die transmittierten Leistung am 28.1.2020 über mehr als 8 h relativ konstant auf 8 kW gehalten wurde (links) und die daraus berechneten Temperaturdifferenzen relativ zur Temperatur des Kühlwasservorlaufs (rechts) mit teilweise in Reihe geschalteten Kühlkanälen.	176

Tabellenverzeichnis

2.1	Parameter des Supraleitenden Teils des MYRRHA-LINAC unterteilt in 3 Sektionen (entnommen aus [9]).	11
2.2	Überblick über die wichtigsten Entwicklungen des MYRRHA-Injektor-Designs. Freinach [17].	12
2.3	Anzahl der Beschleunigungsspalte (Gaps) und die Eingangs- und Ausgangsenergieen E_{in} und E_{out} der im aktuellen Injektor-Design vorgesehenen CH-Strukturen.	15
4.1	Simulationsergebnisse des MYRRHA-RFQ-Simulationsmodells	59
4.2	Eingestellte Dämpfungen und erwartete Signalstärken der 3 Pickups des MYRRHA-RFQs.	68
4.3	Vergleich der Ergebnisse der Dipolsimulationen am FRANZ-RFQ-Simulationsmodell mit der Dipolmessung am realen Resonator.	72
4.4	Gemittelte Frequenzverstimnungen Δf bei der Dipolmessung mit dem Störkörper und dem Störkondensator.	75
4.5	Ergebnisse der Dipolsimulationen am MYRRHA-RFQ-Simulationsmodell und der Dipolmessung am realen Resonator, gemessen mit dem Störkörper.	76
4.6	Ergebnisse der LL-Messungen am MYRRHA-RFQ mit Vergleichswerten aus der Simulation und Bemerkungen.	77
5.1	Vergleich der Simulationsergebnisse verschiedener CH1-Versionen.	90
5.2	Innenradien der MYRRHA-CH-Strukturen 1-7 vor und nach der Überarbeitung.	91
5.3	Simulierte Arbeitspunkte (WP), Tunerhübe und Tuningbereiche der MYRRHA-CHs 1-7, wobei Δz den Abstand zwischen dem dynamischen Tuner und der Strahlachse bezeichnet.	92
5.4	Vergleich der Spannungsverteilungen aus der Strahldynamiksimulation (DD) und den simulierten Modellen der MYRRHA-CH-Kavitäten (CST).	93
5.5	Zusammenstellung der Ergebnisse der HF-Parameter der Simulationen der MYRRHA-CHs 1-7.	94
5.6	Zusammenstellung der erwarteten HF-Parameter der Simulationen der MYRRHA-CHs 1-7 unter der Annahme, dass sie 90% der Effizienz der Simulationsmodell erreichen.	95
5.7	Vergleich der Spannungsverteilungen aus der Strahldynamiksimulation (DD) und den simulierten Modellen der MYRRHA-CH-Kavitäten (CST).	97
5.8	Simulierte Arbeitspunkte (WP), Tunerhübe und Tuningbereiche der MYRRHA-CHs 1-7, wobei Δz den Abstand zwischen dem dynamischen Tuner und der Strahlachse bezeichnet.	98
5.9	Simulierte Maximaltemperaturen mit Kühlkonzept A. Simuliert mit den Verlustleistungen $P_{c,erw}$ und $P_{c,120}$	106

Tabellenverzeichnis

5.10	Simulierte Maximaltemperaturen mit dem neuen Kühlkonzept und verschobenem Vakuumgitter. Simuliert mit den erwarteten Verlustleistungen $P_{c,erw}$ und den 120 % Verlustleistungen $P_{c,120}$, sowie die Temperaturdifferenzen zu den Simulationen mit unverändertem Vakuumgitter aus Tabelle 5.9.	109
5.11	Simulierte Maximaltemperaturen mit dem neuen Kühlkonzept und Vakuumgitter B. Simuliert mit den erwarteten Verlustleistungen $P_{c,erw}$ und den 120 % Verlustleistungen $P_{c,120}$, sowie die Temperaturdifferenzen zu den Simulationen mit Vakuumgitter A aus Tabelle 5.9.	111
5.12	Simulierte Maximaltemperaturen mit dem neuen Kühlkonzept und dem verschobenen Vakuumgitter B. Simuliert mit den erwarteten Verlustleistungen $P_{c,erw}$ und den 120 % Verlustleistungen $P_{c,120}$, sowie die Temperaturdifferenzen zu den Simulationen mit Vakuumgitter A aus Tabelle 5.9.	112
5.13	Simulierte Maximaltemperaturen mit dem neuen Kühlkonzept und dem gekühlten Vakuumgitter B. Simuliert mit den erwarteten Verlustleistungen $P_{c,erw}$ und den 120 % Verlustleistungen $P_{c,120}$, sowie die Temperaturdifferenzen zu den Simulationen mit Vakuumgitter A aus Tabelle 5.9.	114
5.14	Simulierte Maximaltemperaturen mit gekühlten Vakuumgitter B und den Flanschkühlungen. Simuliert mit den erwarteten Verlustleistungen $P_{c,erw}$ und den 120 % Verlustleistungen $P_{c,120}$, sowie die Temperaturdifferenzen zu den Simulationen mit Vakuumgitter A aus Tabelle 5.9.	115
5.15	Simulierte Maximaltemperaturen von CH1-7 mit den Kühlkonzepten A und B. Simuliert mit den erwarteten Verlustleistungen $P_{c,erw}$ und den 120 % Verlustleistungen $P_{c,120}$	116
5.16	Simulierter Energiegewinn der Teilchen pro Kavität und die damit für einen Strahlstrom von 4 mA errechneten Beam Loadings P_b für CH1-7. Die für eine kritische Ankopplung im Strahlbetrieb notwendigen Kopplungsfaktoren während der Low-Level-Messungen $\beta_{LL,erw}$ und $\beta_{LL,210}$ wurden mit den Verlustleistungen $P_{c,erw}$ und $P_{c,120}$ nach Formel 5.71 bestimmt.	120
5.17	Resonanzfrequenzen und Kopplungsfaktoren von CH1, CH1newlid und CH2. Gemessen ohne Tauchkolben.	121
5.18	Aus den erwarteten und 120 %-Verlusten errechnete Dämpfungen der Pickups von CH1-7.	123
5.19	Dämpfung des benutzten Pickups und damit ermittelte Güten von CH1, CH1newlid und CH2. Gemessen ohne Tuner.	124
5.20	Dämpfung des benutzten Pickups und damit ermittelte Güten von CH1newlid und CH2. Gemessen mit den Preliminary Static Tunern und unter Vakuum.	125
5.21	Arbeitspunkte der beiden Tuner für CH1, CH1newlid und CH2.	126
5.22	Gemessene Tuningbereiche für CH1, CH1newlid und CH2. Die Angaben in mm beschreiben den Abstand des dynamischen Tauchkolbens zur Strahlachse.	128
5.23	Vergleich der Spannungsverteilungen aus der Strahldynamiksimulation (DD), den simulierten Modellen der MYRRHA-CH-Kavitäten (CST) und den Messungen.	130
5.24	Gemessene Spannungsverteilungen von CH1.	130
5.25	Gemessene Spannungsverteilungen von CH1newlid.	131
5.26	Gemessene Spannungsverteilungen von CH2.	131

5.27	Ergebnisse der LL-Messungen an CH1newlid und CH2 mit Vergleichswerten aus der Simulation und Bemerkungen.	132
6.1	Mit Hilfe der der Röntgenspektren ermittelte Werte für die Shuntimpedanz des MYRRHA-RFQ. Die Fehler in der transmittierten Leistung entsprechen 5 % des Messwertes. . .	152
6.2	Aus [71] entnommene Werte für die transmittierte Leistung und die Elektrodenspannung und die daraus nach Formel 3.61 ermittelten Shuntimpedanzen des MYRRHA-RFQs. . .	153
6.3	Zusammenstellung der mit Shuntimpedanzen des MYRRHA-RFQ, die per R/Q-Methode und mit Hilfe der Röntgenspektren ermittelt wurden, die durch das IAP bzw. das SCK aufgenommen wurden. Die Bezeichnungen „90 kW“ bzw. „110 kW“ dienen der Unterscheidung und sind daher nicht mit den Fehlern versehen, die in Tabelle 6.1 zu finden sind.	153
6.4	Gemessene Durchflussmengen durch die Kühlkanäle von CH1. Die abgebildeten Messwerte unterliegen einem Messfehler von $\pm 0,21/m$, der die Fluktuationen der Kühlwasserversorgung nicht berücksichtigt.	167
6.5	Gemessene Frequenzverschiebungen bei 8 kW transmittierter Leistung in CH2 mit den Kühllayouts KW 1-4.	169
6.6	Gemessene Durchflussmengen durch die Kühlkanäle von CH1newlid für die parallele und die serielle Konfiguration der Kühlkanäle. Die abgebildeten Messwerte unterliegen einem Messfehler von $\pm 0,21/m$, der die Fluktuationen der Kühlwasserversorgung nicht berücksichtigt.	173

Lebenslauf

Persönliche Daten:

Name:	Klaus Peter Kümpel
Geburtsdatum:	23. Februar 1985
Geburtsort:	Aschaffenburg
Staatsangehörigkeit:	Deutsch

Ausbildung:

Seit 2015	Wissenschaftlicher Mitarbeiter und Beginn der Arbeiten zur vorliegenden Dissertation Goethe Universität Frankfurt
2012-2015	Masterstudium in Physik Goethe Universität Frankfurt Titel der Abschlussarbeit „Untersuchungen zur Temperaturabhängigkeit der Resonanzfrequenz von Hohlraumresonatoren“
2007-2012	Bachelorstudium in Physik Goethe Universität Frankfurt Titel der Abschlussarbeit: „Aufbau einer HF-Leistungsversorgung für einen IH-RFQ“
2006-2007	Staatliche Berufsoberschule Schönbrunn Abschluss mit der allgemeinen Hochschulreife
2005-2006	Studium Weinbau und Oenologie Fachhochschule Wiesbaden
2005-2006	Staatliche Berufsoberschule Triesdorf Abschluss mit der Fachhochschulreife
2001-2004	Abgeschlossene Ausbildung zum Weinküfer im Weingut Friedel Simon Wasserlos

Akademische Lehrer:

Prof. Dr. J. Baumeister
Prof. Dr. T. Boller
Dr. G. Bruls
Prof. Dr. B. Deiss
Prof. Dr. R. Dörner
Dr. P. Forck
Prof. Dr. W. Hofstetter
Dr. M. Iberler
Prof. Dr. J. Jacoby
Prof. Dr. O. Kester
Dr. O. Klein
Prof. Dr. P. Kopietz
Prof. Dr. M. Lang
Prof. Dr. W. Mäntele

Prof. Dr. J. Maruhn
Prof. Dr. U. Müller-Nehler
Prof. Dr. K. Peters
Prof. Dr. H. Podlech
Prof. Dr. U. Ratzinger
Prof. Dr. R. Reifarth
Prof. Dr. D. Rischke
Prof. Dr. H. Roskos
Prof. Dr. A. Schempp
Prof. Dr. A. Sedrakian
Prof. Dr. J. Stroth
Dr. C. Teske
Prof. Dr. R. Valenti
Prof. Dr. J. Weidmann