

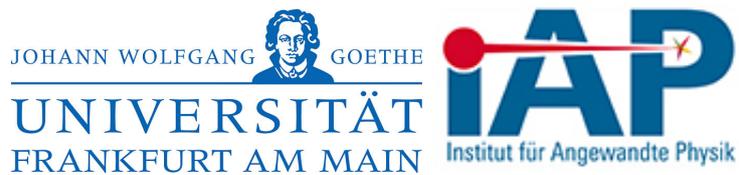
Bachelorarbeit

Thermische Untersuchungen an einer MYRRHA-CH

vorgelegt von

Alexander Ruffer

5. Mai 2021



1. Gutachter: Prof. Dr. Holger Podlech
2. Gutachter: Dr. Marco Busch

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	4
1.1. MYRRHA-Projekt	4
2. Theoretische Grundlagen	7
2.1. Linearbeschleuniger	7
2.1.1. CH-Struktur	8
2.2. Konditionierung	9
2.3. Thermodynamische Grundlagen für die Temperaturerhöhung	11
2.3.1. Der Energiesatz und die Temperatur	11
2.3.2. Die Wärmekapazität	11
2.3.3. Die Wärmeleitfähigkeit	12
2.4. Thermosimulationen in CST	12
3. Messungen an CH1 vor der Konditionierung	13
3.1. Überblick	13
3.2. Verlauf der Kühlkanäle	14
3.3. Parallel-/Reihenschaltung des Tanks und der Deckel	15
3.4. Durchflussmessung	17
3.5. Druckmessung	19
4. Temperaturmessung an CH1 während der Konditionierung	21
5. Simulationen in CST Studio Suite 2021	25
5.1. CST Eigenmode Solver	25
5.2. CST Thermal Solver	26
5.2.1. Parallelschaltung der Kühlung	26
5.2.2. Reihenschaltung der Kühlung	27
6. Berechnung über dissipierte Leistung und Wärmekapazität	29
6.1. Vorüberlegungen	29
6.2. CST Eigenmode Solver und Temperaturänderung	30
6.3. Fehlerrechnung	32
7. Fazit	34
8. Danksagung	36
Literaturverzeichnis	37
Abbildungsverzeichnis	39
A. Simulationen Thermal Solver	40

1. Einleitung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Kühlung einer CH-Kavität. Moderne Linearbeschleuniger verfügen über eine Wasserkühlung, die die dissipierte Leistung abführt. Um die Kühlung bei der Entwicklung richtig zu dimensionieren, werden vorab thermische Simulationen benötigt. Eine überdimensionierte Kühlung sorgt für hohe Betriebskosten, während wenig Kühlleistung zu hohen Betriebstemperaturen und mechanischen Spannungen führt. Mithilfe der Simulationen wird die Wasserkühlung möglichst effizient gestaltet, ohne signifikante Veränderungen der Betriebsparameter oder der Zuverlässigkeit zu erhalten. Hierbei gilt, die Simulation so genau wie nötig zu gestalten. Je nach Einsatzzweck und Ziel sind somit die Kühlsysteme anzupassen. Grundsätzlich gilt, bei dem Fertigungsaufwand der Beschleuniger zur Sicherheit eine überdimensionierte Kühlung einzuplanen.

Bisherige Simulationen im IAP wurden mit dem Thermal Steady State Solver in CST Studio Suite 2021 durchgeführt. Bekanntes Problem hierbei ist, dass keine Fluidynamik simuliert werden kann. Die Software nimmt die Wassertemperatur als feste Temperaturquelle an und sorgt damit für zu geringe Temperaturen in den Bauteilen. Um die Größenordnung dieser Abweichung aufzuzeigen, werden die während der Konditionierung gemessenen Temperatur- und Durchflusswerte in Simulationen aufgegriffen und verifiziert. Ein weiterer Ansatz ist, über die simulierte dissipierte Leistung und bei bekanntem Wasserdurchfluss die Temperaturen des Kühlwassers im thermischen Fließgleichgewicht zu bestimmen.

Im Verlauf dieser Untersuchungen werden zwei Kühlkonzepte verfolgt: Zum einen werden die Mantelkanäle parallel an die Kühlverteilung angeschlossen, zum anderen dieselben hintereinander in Reihe mit Kühlwasser versorgt. Am Ende wird beurteilt, wie sich die CST Simulationen an den Messungen orientieren und damit das Design von zukünftigen Beschleunigern unterstützen können. Andere Arbeiten am Institut beschäftigen sich hier mit der Software Ansys, um genauer Kühlsysteme simulieren zu können.

1.1. MYRRHA-Projekt

MYRRHA ("Multi-purpose hYbrid Research Reactor for High-tec Applications") ist ein wissenschaftliches Projekt, das im belgischen Mol realisiert wird. Es umfasst einen unterkritischen Kernreaktor, der durch einen Neutronenstrahl angetrieben wird. Die Neutronen werden mithilfe eines 400 m langen Linearbeschleunigers aus einem Spallationstarget gelöst. Ziel ist, die Halbwertszeiten der minoren Actinoide auf historische Zeitskalen zu reduzieren (Transmutation) und somit auch die Lagerungsdauer des Abfalls. Neben der Realisierung eines beschleunigergetriebenen Systems (**A**ccelerator **D**riven **S**ystem) erweist sich vor allem die technische Umsetzung des Beschleunigers als schwierig, da hohe Zuverlässigkeit im Hinblick auf den Teilchenstrahl gefordert wird. Die Anlage gliedert sich in 4 Hauptbestandteile:

1. Linearbeschleuniger (Linac)
2. Reaktor
3. Proton Target Facility (PTF)
4. Fusion Target Station (FTS).

Somit verfolgt das Projekt neben der technischen Umsetzung des Beschleunigers und der Reaktorkühlung mit Blei und Bismut auch Forschung in der PTF und FTS. Hier werden beispielsweise Materialforschung mithilfe des Protonenstrahls betrieben und seltene radioaktive Ionen erzeugt.

Der LINAC beschleunigt Protonen auf 600 MeV, welche anschließend in den Reaktor injiziert werden. Der Strahl mit 4 mA erzeugt beim Zusammenstoß mit dem Spallationsziel Neutronen, durch die die Kernspaltung aufrecht erhalten wird. Bei dem Injektordesign und der Entwicklung ist das Institut für angewandte Physik der Goethe Universität in Frankfurt maßgeblich beteiligt. Die gewünschte Zuverlässigkeit im Hinterkopf behaltend, werden zwei identische Injektoren verbaut, um Wartungsarbeiten ohne längere Ausfälle zuzulassen. Das Ensemble aus Beschleunigerkavitäten beinhaltet auch die CH1-Kavität, an der das Kühlsystem untersucht wird. Diese befindet sich zum Zeitpunkt dieser Arbeit für High-Power Tests im Experimentierbunker des IAPs. [1]



Abbildung 1: MYRRHA Betriebsgelände aus der Vogelperspektive, geplante Fertigstellung in 2036.

Der MYRRHA-**Injektor** bis 5,9 MeV ist in seinem aktuellen Design in Abbildung 2 dargestellt. Nach der ECR-Quelle und dem 4-Rod-RFQ (nicht abgebildet) besitzt der Strahl eine Energie von 1,5 MeV und wird in die zwei baugleichen **Quarter Wave Resonatoren** geleitet, in denen der Strahl gebuncht, aber nicht weiter beschleunigt wird. Darauffolgend befindet sich die erste CH-Sektion, bestehend aus sieben normalleitenden CH-Beschleunigern.[2]

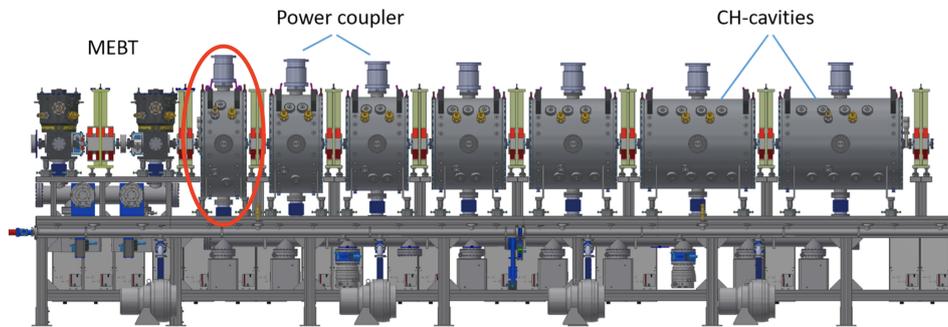


Abbildung 2: Die Position von CH1 ist rot hervorgehoben.

2. Theoretische Grundlagen

2.1. Linearbeschleuniger

Heutige Linearbeschleuniger werden mit hochfrequenten, elektromagnetischen Wechselfeldern betrieben. Die beschleunigten Teilchen sind über Forschungszwecke hinaus auch für praktische Anwendungen unabdingbar. Neben der Verwendung in der Kernphysik zur Elementarforschung, werden beschleunigte Teilchen auch für Materialuntersuchung oder zur Tumorthherapie in der Medizin benötigt.

Die durch Koronaentladungen begrenzte Teilchenenergie nach statischen Beschleunigern ließ Rolf Wideroe in 1928 den ersten HF-Linearbeschleuniger realisieren. Das Prinzip: Durch passende Umpolung der Beschleunigungsfelder durchläuft ein geladenes Teilchen die Beschleunigungsspannung mehrmals, während es auf Driftstrecken gegen abbremmende Felder abgeschirmt wird. Abbildung 3 skizziert den Wideroe-Beschleuniger und dessen Funktionsprinzip:

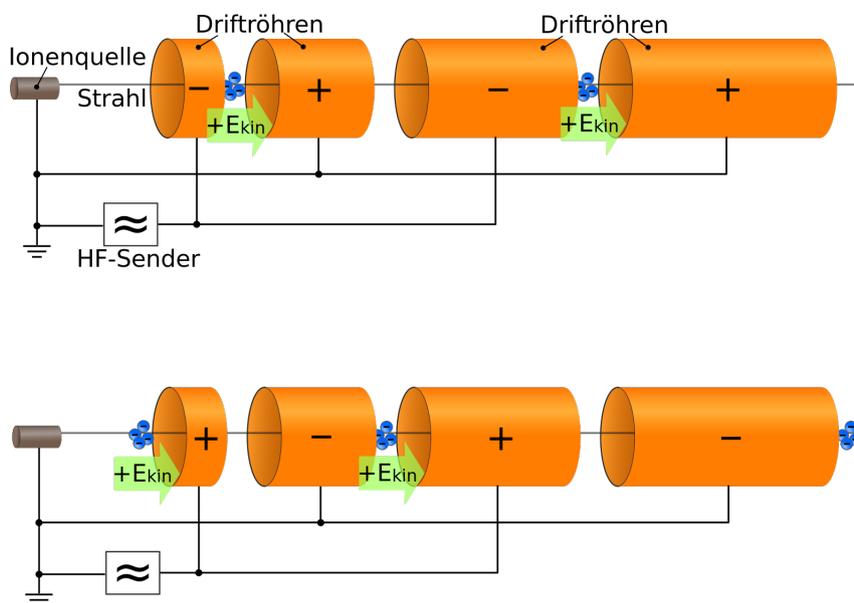


Abbildung 3: Konzept der Wideroe-Beschleunigerstruktur. Zwischen oberer und unterer Abbildung findet die Umpolung statt.

Seitdem entstanden immer mehr Resonatortypen, unter anderem der Alvarez-DTL. Dieser zeichnet sich dadurch aus, dass er ein Zylinderresonator ist, der in der Grundmode $TM_{010} = E_{010}$ schwingt. Die entstehende E-Feld Komponente in z-Richtung beschleunigt dabei die Teilchen, falls für den Spaltmittenabstand L_i gilt

$$L_i = \beta_i \lambda. \quad (1)$$

Neben der Grundmode ergeben sich auch höherfrequente Resonanzen. Die Moden, verschiedene elektrische und magnetische Feldverteilungen, lassen sich aus den Lösungen

der Wellengleichungen im Vakuum

$$\begin{aligned}\Delta \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} &= 0 \\ \Delta \vec{B} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} &= 0 \\ c &= \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}\end{aligned}\quad (2)$$

herleiten. [3]

Dazu benötigt werden außerdem Randbedingungen für elektromagnetische Felder an metallischen Oberflächen und weitere Symmetriebetrachtungen. Die analytische Lösung soll hier nicht weiter betrachtet werden. Die Moden sind in H(TE)- oder E(TM)-Moden zu unterscheiden, wobei hier jeweils magnetische oder elektrische Feldkomponente in Ausbreitungsrichtung zeigt. Des Weiteren werden diese mit drei Indizes m,n,p folgendermaßen charakterisiert:

m ist die Zahl der Knoten in ϕ -Richtung,

n ist die Zahl der Knoten in radialer Richtung,

p ist die Zahl der halben Perioden entlang der z-Achse. [4]

2.1.1. CH-Struktur

Ein wichtiger Resonatortyp ist die **Crossbar-H-Moden-Kavität**. Diese Driftröhrenkavität wird in der H_{211} -Mode betrieben. Besonders hierbei ist die versetzte Anordnung der Stützen, die im Leiterquerschnitt kreuzförmig erscheinenden Driftröhrenhalter. Die Stützen sorgen für hohe mechanische Stabilität und teilen den Tank in vier Bereiche. Die Feldverteilung der angeregten Mode ist in Abbildung 4 zu sehen.

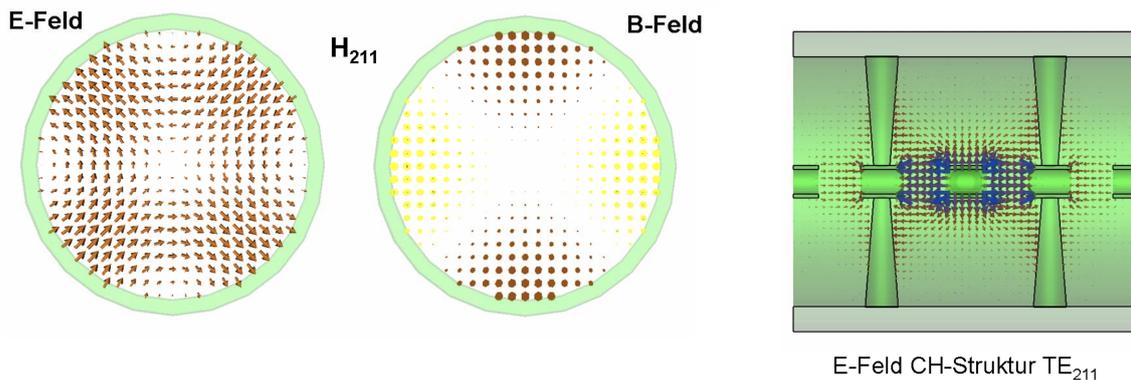


Abbildung 4: E- und B-Feld der H_{211} -Mode in CH-Strukturen.

Durch das Einbringen der kapazitiven Beschleunigerstruktur sinkt die Resonanzfrequenz

des Systems. Während die E_r -Komponente schwindet, wird die z -Komponente des Magnetfeldes homogen. CH-Strukturen eignen sich für Geschwindigkeiten bis $\beta = 0.5$ und damit für niedrige und mittlere kinetische Energien. In diesem Bereich arbeiten sie effizient sowie sicher und erreichen bei gleicher Frequenz einen etwa doppelten Tankdurchmesser wie verwandte IH-Strukturen. Wie auch die zu untersuchende CH1 sind CH-Beschleuniger in Injektoren zu finden. Nach der Ionenquelle gelangt der DC-Teilchenstrahl zunächst in einen bunchenden und fokussierenden Radiofrequenzquadrupol (RFQ), um darauf im CH-DTL auf genannte Energien beschleunigt zu werden. [4]

2.2. Konditionierung

Bevor in eine Kavität die vollständige Betriebsleistung eingespeist werden kann, wird die Struktur konditioniert. Hierzu wird über einen längeren Zeitraum die Vorwärtsleistung unter Beobachtung der Betriebsparameter wie Druck oder reflektierter Leistung erhöht. Da die metallischen Oberflächen im Resonatorinneren trotz aufwendiger Politur noch Verunreinigungen und andere Unregelmäßigkeiten aufweisen, können bei normal- und supraleitenden Strukturen Entladungen und Multipacting auftreten. Des Weiteren sind Ausgasungen möglich.

Die **Entladung** wird durch Stoßionisation aufrecht erhalten und klingt erst ab, sobald die Vorwärtsleistung gedrosselt wird. Bei hohen Feldstärken zwischen den metallischen Oberflächen kommt es zu Überschlägen. An der genauen Ursache forschend, führt man die Entladung bisher auf durch Feldemissionen ausgelöste Elektronen als auch restliche Ionen im vakuumierten Tank zurück. Die Verunreinigungen im Resonator begünstigen Feldspitzen und markieren damit gefährdete Bereiche für Entladungen. Bei der Konditionierung sind solche Entladungen zu vermeiden. Hierbei steigt der Druck in der Kavität stark an. Des Weiteren steigt die reflektierte Leistung schlagartig, ein sofortiges Senken der Vorwärtsleistung wirkt dem entgegen. Das empirisch gefundene Kilpatrick-Kriterium hilft, die Durchschlagfestigkeit in hochfrequenten Wechselspannungsaufbauten zu beurteilen:

$$f = 1,64E^2 \cdot e^{\frac{-8,5}{E}}, \quad (3)$$

dabei ist f die Frequenz in MHz und E das Oberflächenfeld in MV/m.

Das **Multipacting** ist eine resonante Bewegung von Elektronenlawinen, die die Resonatorschwingung stört. Durch Feldemission entstandene Elektronen im Restgas werden im E-Feld beschleunigt und lösen beim Aufprall weitere Sekundärelektronen aus der Oberfläche. Man findet Ein-Punkt-Multipacting und Zwei-Punkt-Multipacting. Ersteres beschreibt die Beschleunigung eines Elektrons, das aus der Oberfläche gelöst wird und darauf durch ein Magnetfeld auf eine Kreisbahn gelenkt wird, sodass es am Austrittspunkt wieder einschlägt. Entspricht das ganzzahlige Vielfache der HF-Periode der Kreisperiode, entsteht Multipacting. Der Sekundärelektronenemissionskoeffizient δ gibt dabei das Verhältnis von auftreffenden zu ausgelösten Elektronen an und ist somit von

der Aufprallenergie abhängig. Die Stärke des Magnetfelds lässt sich abschätzen über

$$H_n \propto \frac{m\omega_g}{n\mu_0 e}, \quad (4)$$

wobei $\omega_g = n\omega_c$ dem Vielfachen der Zyklotronfrequenz entspricht. Beim Zwei-Punkt-Multipacting pendeln die Elektronen zwischen zwei Beschleunigeroberflächen im HF-Feld. Die Bedingung hierfür ist erfüllt, sollten die Elektronen nach ungeraden Vielfachen der halben HF-Periode den Weg zwischen den Oberflächen überwinden und hier weitere Sekundärelektronen auslösen. Betrachtet man als Vereinfachung die gegenüberliegenden Oberflächen als Plattenkondensator und nimmt ein Wechselfeld der Form

$$E(t) = E_0 \sin(\omega t) \quad (5)$$

an, so findet man zur Abschätzung der Spannung U , ab der Multipacting auftreten kann, folgenden Ausdruck:

$$U = E_0 L = \frac{4\pi m_e f^2 L^2}{e(2n - 1)}. \quad (6)$$

Hierbei ist L der Abstand der Platten, m_e die Elektronenmasse, f die Frequenz und n charakterisiert die Vielfachen der HF-Periode. Beim Multipacting, welches meist bereits bei niedrigen Spannungen auftritt, wird Leistung in der Kavität für die Beschleunigung der Elektronenlawine benötigt. Es macht sich daher durch eine gleichbleibende transmittierte Leistung bei ansteigender Vorwärtsleistung bemerkbar. Wird das Konditionieren ausgelassen, ist eine Einkopplung hoher Leistungen meist nicht möglich. Die teilweise monotone und zeitaufwändige Konditionierung wird daher angesichts der hohen Entwicklungs- und Baukosten der Beschleuniger nötig. [5]

2.3. Thermodynamische Grundlagen für die Temperaturerhöhung

2.3.1. Der Energiesatz und die Temperatur

Der Erste Hauptsatz der Thermodynamik erklärt Wärme als Energieform mit der Einheit Joule und beinhaltet auch den Energiesatz. Die innere Energie eines Körpers kann mithilfe von Wärme verändert werden, ohne mechanische Arbeit zu leisten. Wärme verhält sich somit wie jede Energieform extensiv. Für das totale Differential der inneren Energie U gilt somit

$$dU = \delta Q + \delta W, \quad (7)$$

wobei im Allgemeinen die Differentiale von $\delta Q, \delta W$ nicht exakt sind.

Die Wärmeenergie setzt sich aus der ungeordneten Bewegung von Teilchen um ihren Schwerpunkt herum zusammen. Sie ist daher nur in makroskopischen Systemen sinnvoll, da sie sonst mit der Bewegungsenergie verschwimmt. Ein Wesensmerkmal der Wärme ist also die Unordnung, die als Entropie bekannt ist. Postuliert man nun die Temperatur oder leitet diese aus der statistischen Physik ab, so führt dies mit dem aus der Mechanik bekannten Ausdruck für die Volumenarbeit zu

$$dU = TdS - pdV \quad (8)$$

mit der Temperatur T , der Entropie S , dem Druck p und dem Volumen V . Daraus folgt für die Änderung der Wärmeenergie direkt

$$\delta Q = TdS. \quad (9)$$

[6]

2.3.2. Die Wärmekapazität

Die Wärmekapazität gibt an, wie sehr sich die Temperatur eines Systems bei einer zugeführten Wärmemenge ändert. Allgemein ist die spezifische Wärmekapazität c_x definiert über

$$c_x = \left(\frac{\delta Q}{m \cdot dT} \right)_x \quad (10)$$

mit den konstant gehaltenen Zustandsgrößen x und der Masse m des Systems [6]. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgen Berechnungen an Wasser, dessen Wärmekapazität nur schwach temperaturabhängig im gegebenen Bereich ist. In diesem Fall vereinfacht sich c_x zur mittleren spezifischen Wärmekapazität

$$c = \frac{\Delta Q}{m \cdot \Delta T}. \quad (11)$$

Die Einheit von c im Internationalen Einheitensystem beträgt $[c] = \frac{J}{kg \cdot K}$.

2.3.3. Die Wärmeleitfähigkeit

Die (spezifische) Wärmeleitfähigkeit λ eines Systems ist eine temperaturabhängige Materialkonstante. Sie gibt an, inwieweit thermische Energie mit Hilfe von Wärmeleitung übertragen werden kann. Die Einheit der Wärmeleitfähigkeit beträgt $[\lambda] = \frac{W}{K \cdot m}$. Für den Edelstahl der MYRRHA-CHs liegt er bei $20 \frac{W}{K \cdot m}$ [7].

2.4. Thermosimulationen in CST

Mithilfe von CST MPhysics Studio werden thermische und mechanische Studien an elektromagnetischen Systemen wie CH-Kavitäten möglich. In dieser Arbeit wird mit dem Thermal Steady State Solver gearbeitet. Dieser arbeitet mit einem stationären Vorgang, auch Fließgleichgewicht genannt, bei dem Energie in das System einströmt und gleichermaßen ausströmt. Dieses Gleichgewicht entsteht somit nur in offenen Systemen.

Im Falle des simulierten Hochfrequenzbeschleunigers stellt sich nach hinreichend langer Betriebsdauer ein solches Fließgleichgewicht ein. Die eingespeiste transmittierte Leistung wird über die Wasserkühlung und den Kontakt mit der Umgebung abgeführt, bis diese denselben Betrag erreichen. Zu diesem Zeitpunkt sind die Temperaturen im System nahezu konstant. Diese Temperaturen in den Wasserkanälen, der Umgebung und der transmittierten Leistung, die in dem Beschleuniger in Wärme umgewandelt wird, gilt es zu messen. Initialisiert man die Wasserkanäle in der Simulation mit diesen Temperaturen, simuliert der Thermal Solver die Situation im Betrieb nach.

Als Resultat liefert der Solver ein dreidimensionales Skalar-/Vektorfeld für Temperatur und Wärmestromdichte in den Bauteilen (siehe Abbildung 5). Da während des Betriebs Temperaturüberwachungen innerhalb des Beschleunigertanks schwierig sind, ermöglicht diese Methode eventuelle thermische Problemzonen auch nach der Produktion aufzudecken. In den Bauteilen können die Maximaltemperaturen angezeigt werden und die Felder über definierte Bereiche integriert werden.

In weiteren Simulationen in CST MPhysics Studio können mechanische Verformungen untersucht werden, die durch die Temperaturunterschiede verursacht werden. [8]

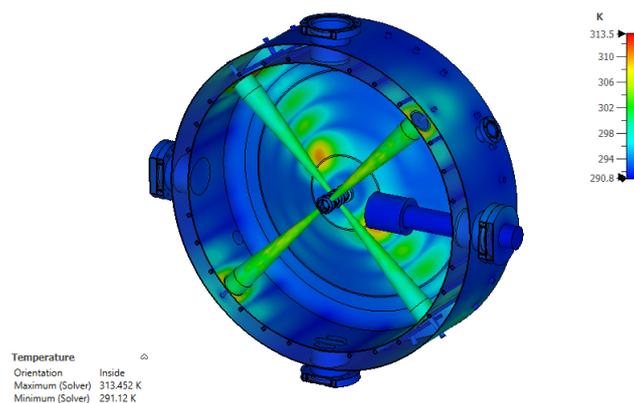


Abbildung 5: Thermal Steady State Solver 3D Resultat für Temperatur im Querschnitt.

3. Messungen an CH1 vor der Konditionierung

3.1. Überblick

CH1 besitzt drei Beschleunigungsgaps und zwei Stützen. Die Kavität wird bei der vorgegebenen Resonanzfrequenz von 176,1 MHz betrieben. Diese ist durch einen statischen und einen dynamischen Tuner, der mittels Steppermotor gesteuert werden kann, variabel. Gefertigt wurde die Kavität 2018 bei der Firma NTG in Gelnhausen aus Edelstahl. Die 50 μm Verkupferung und anschließende Polierung der Tankinnenfläche erfolgte bei der Firma Galvano-T in Windeck. [9]



Abbildung 6: CH1 ohne Deckel, verkupferte und polierte Tankoberfläche.

Nach der ersten Konditionierung kam der Vorschlag auf, durch ein anderes Design des Tankdeckels die Kosten des Fertigungsverfahrens zu verringern. Der neue Deckel wird mit einer Kupferdickschicht versehen.

Die CH1-Kavität wird mit einem der neuen Deckel ausgestattet und befindet sich für Konditionierung und Low-Level Messungen im IAP in Frankfurt, bevor weitere Untersuchungen in Belgien durchgeführt werden.

Über die induktive Einkoppelschleife, bestehend aus Kupfer, werden 7 kW Leistung für die benötigten elektrischen Felder eingespeist. Zur Sicherheit wird die Kavität mit bis zu 9 kW konditioniert. Für HF-Messungen besitzt der Tank zwei Pickups. Diese sind an zweien der vier CF-40 Flansche der Tankwand angebracht. Um die transversale Bunch-Position zu messen, befindet sich im Injektor hinter jeder CH-Kavität ein Beam Position Monitor (**BPM**). [10]

3.2. Verlauf der Kühlkanäle

Der Kühlung der normalleitenden CH-Strukturen ist hinsichtlich der hohen Zuverlässigkeitsanforderungen des MYRRHA-Linacs besondere Aufmerksamkeit gewidmet worden. Durch die im Vergleich zu Kupfer schlechte thermische Leitfähigkeit der Edelstahlbauteile ist es wichtig, die Kühlkanäle nahe und flächendeckend an den thermisch belasteten Bereichen im Beschleuniger anzulegen. Dementsprechend wurde das Design der Kühlung überarbeitet und sieht im Tank die doppelte Anzahl an Kühlkanälen vor (24 Stück) im Vergleich zum ersten FRANZ CH-Prototypen (12 Stück) [11]. Dies ergibt sich zum Erreichen der geforderten thermischen Stabilität, die genaue Position wird in CST Simulationen bestimmt.

Da der Abfall thermischer Leistung an den Deckeln im Dauerbetrieb kleiner als 1 kW ist, wird ein Kühlkanal pro Deckel verwendet. Dieser setzt sich aus fünf konzentrischen Kanälen zusammen, welche miteinander radial verbunden sind.

Relevant ist die Kühlung der Stützen inklusive Driftröhren. Hier entstehen die größten thermischen Verluste. Die Wandstärke der hohlen Stützen und Driftröhren wird minimiert, um dennoch den mechanischen Anforderungen bei Herstellung und Betrieb standzuhalten. Das Kühlwasser fließt durch die gesamte Stütze und Driftröhre, sodass je Stütze ein großer Kanal entsteht. Um die Kühlung der Tunerkolben zu gewährleisten, werden diese koaxial ausgefräst und sind innen größtenteils mit Kühlwasser durchflutet. Das hierdurch verringerte Gewicht erleichtert zusätzlich den Ein- und Ausbau bei Wartungsarbeiten oder Kontrolle. [12]

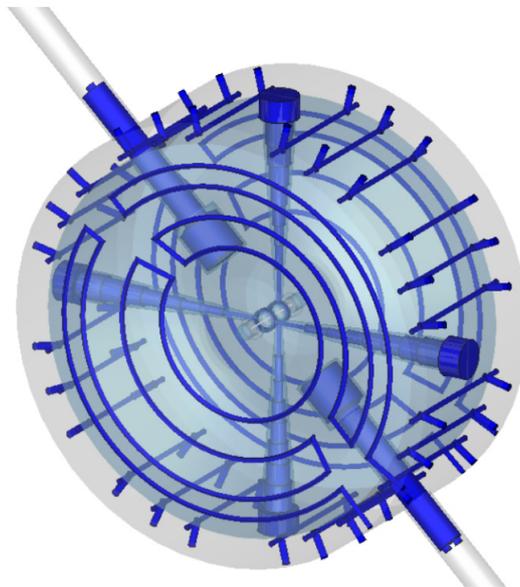


Abbildung 7: Kühlkanäle der MYRRHA CH-Kavitäten. Mittlerweile besitzen die Deckel fünf konzentrische Kühlkanäle.

3.3. Parallel-/Reihenschaltung des Tanks und der Deckel

Die einzelnen Kühlkanäle werden über Festo[13] Einsteckanschlüsse und Kühlschläuche an die Vorlauf- und Rücklaufverteiler angeschlossen. Diese sind zentral mit der Kühlwasseranlage des Physik-Gebäudes verbunden. Zunächst werden alle Kühlkanäle samt Mantel und Deckel einzeln an die Verteiler angeschlossen, in diesem Fall wird nachfolgend von **parallelgeschalteter Kühlung** gesprochen. Um die Kühlleistung an Stützen und Tunern zu erhöhen, ist eine höhere Durchflussmenge an Kühlwasser nötig. Durch die **Reihenschaltung** der Mantelkanäle und der zwei Tankdeckel verringerte sich der Durchfluss in diesen und führte bei der internen Wasserversorgung zur besseren Kühlleistung an den kritischeren Bauteilen. Im Folgenden ist der angeschlossene Kühlkreislauf im Bunker für beide Möglichkeiten abgebildet.

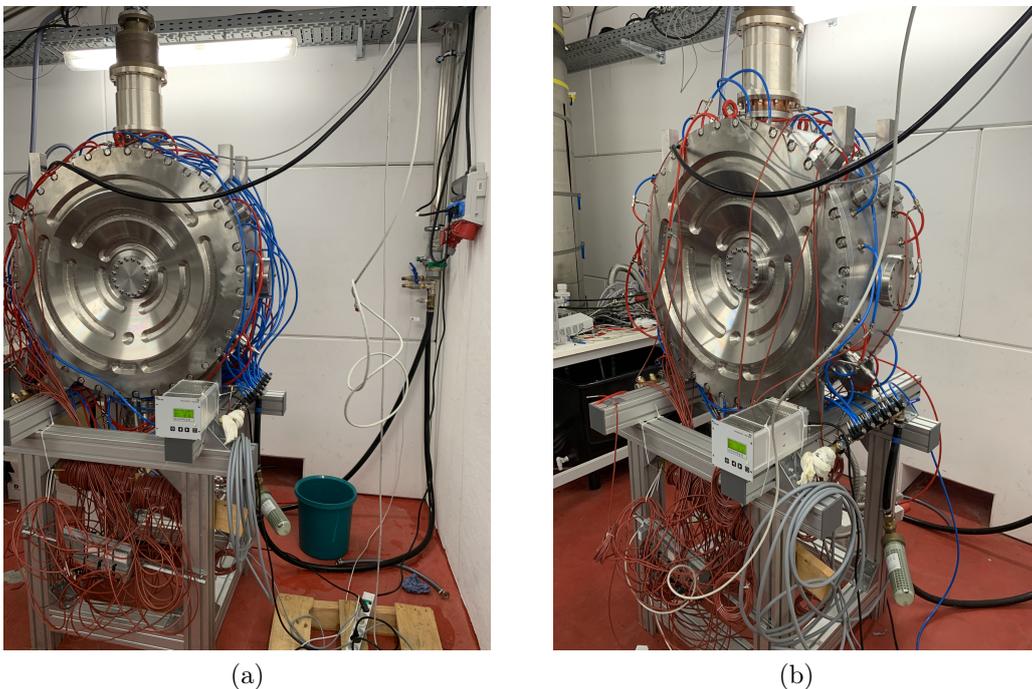


Abbildung 8: CH1 im Bunker mit parallelgeschalteter Mantelkühlung links (09.10.20), rechts in Reihe geschaltet (29.10.20).

Die Mantelkanäle werden in Strahlrichtung dem Uhrzeigersinn nach von 1-24 benannt. Deckel und Stützen werden in Strahlrichtung bis 2 nummeriert.

Um die Anschlusssituation der Reihenschaltung besser zu veranschaulichen, ist diese am Querschnitt des Tanks in Abbildung 9 dargestellt. Um eine asymmetrische Erhitzung zu vermeiden, werden nicht alle 24 Kanäle in Reihe geschaltet, sondern jeweils 12. Insgesamt entstehen dadurch zwei Kreisläufe. Diese decken jeweils jeden zweiten Kanal ab und kühlen gegenläufig den Tank. Die zwei Kühlkreisläufe (für **gerade** Kanäle 2,...,24 und **ungerade** 1,...,23) laufen gegen und mit dem Uhrzeigersinn bei Blick in Strahlrichtung.

tung (a).

Um auch parallel zur Strahlachse eine möglichst symmetrische und gleichmäßige Kühlung zu erhalten, sitzen Vor- und Rücklauf jedes zweiten Kanals versetzt zueinander (b).

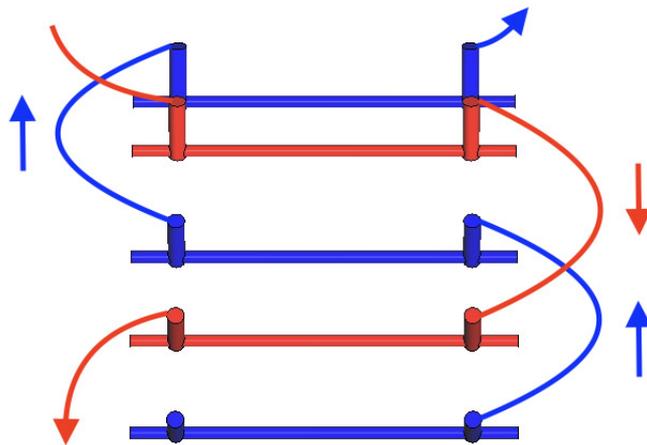
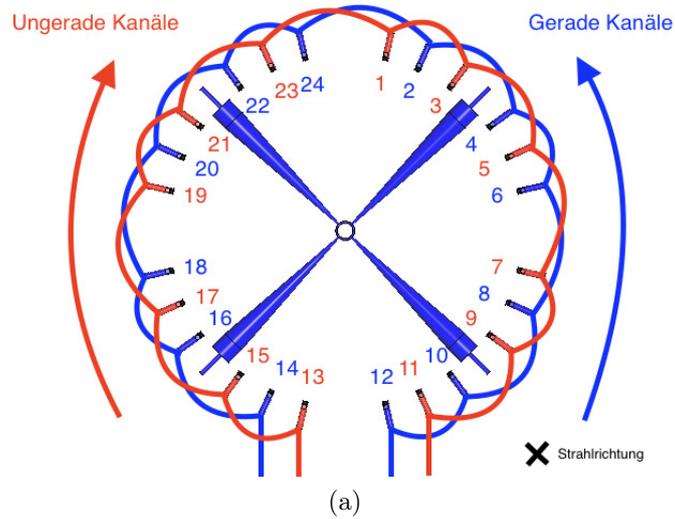


Abbildung 9: Nummerierung und Anschluss der seriell geschalteten Mantelkühlung, Pfeile markieren Flussrichtung des Kühlwassers.

Des Weiteren ist Deckel 2 vor Deckel 1 geschaltet. Die restlichen Kanäle verfügen über eigene Zu- und Abläufe.

3.4. Durchflussmessung

An CH1 wird eine Durchflussmessung durchgeführt, um den zugehörigen Volumenstrom \dot{V} zu kennen. Die Messung erfolgt zunächst für die parallelgeschalteten Mantelkanäle. Nach Umrüsten des Kühlsystems auf seriell geschaltete Mantelkanäle wird die Durchflussmessung wiederholt. Während der Messungen befindet sich lediglich ein Tauchkolben in der Kavität.

Zu- und Ablauf verfügen über 6 Verteiler, die ab dem Absperrhahn beginnend von 1 bis 6 durchnummeriert werden. Dies wird beispielhaft für den Zulauf in Abbildung 10 gezeigt.

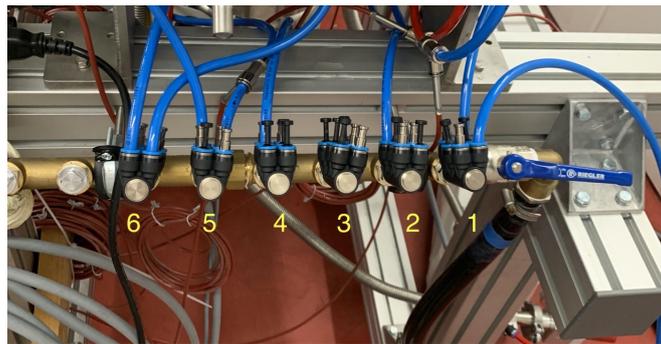


Abbildung 10: Nummerierung der Kühlwasserverteiler beginnend ab dem Absperrventil.

Die Messung wird mit einem magnetisch-induktiven Strömungsmesser des Typs Kobold MIM durchgeführt. Dieser besitzt einen Arbeitsbereich von 0-16 bar und 0,2-50 l/min. [14]. Der Durchflussmesser wird statt der Festo T-Kupplung, die für die Temperatursensoren vorgesehen ist, eingebaut. Der Messfehler beträgt $\pm(0,5\% \text{ ME} + 0,8\% \text{ MW})$, also $\pm(0,25 + 0,8\% \text{ des Messwertes}) \text{ l/min}$.

Vor jeder Messung wird das Kühlsystem abgeschaltet und entleert, um beim Umbau keine elektrischen Bauteile durch Wasserkontakt zu beschädigen. Nach Öffnen der Hähne zirkuliert das Kühlwasser vor Ablesen des Wertes für zwei Minuten zur Entlüftung.

Parallelschaltung 21.10.20: Für Schleife, Tauchkolben, Deckel und Stützen wird der Durchfluss gemessen. Die Kanäle im Tank werden nicht alle vermessen, da diese geometrisch identisch sind. Hier hängt der Wert besonders von der Anschlussposition am Verteiler und dem Höhenunterschied zwischen Kühlkanal und Verteiler ab. Daher wird für jede Verteilerposition am Zulauf das Mittel aus dem Kanal mit größtem und geringstem Höhenunterschied auch auf die anderen Mantelkanäle übertragen, deren Durchfluss nicht explizit erfasst wird.

Reihenschaltung 29.10.20: Im Gegensatz zur Parallelschaltung verfügt die gewählte Reihenschaltung der Tankkanäle und damit die gesamte Tankkühlung über zwei Anschlüsse an die Zulauf- und Ablaufverteiler. Innerhalb dieser beiden ist der Durchfluss konstant und wird über fünf zufällig gewählte Kanäle gemittelt. Die andere Bauteile wie Schleife, Tauchkolben etc. werden erneut individuell vermessen.

Tabelle 1: Durchflusswerte für die Kühlsystemmessungen mit Fehlern, Okt. 2020.

Kühlkanal	Verteilerpos.	Verteilerpos.	\dot{V}	$\pm\sigma_{\dot{V}}$
	Zulauf	Rücklauf	in l/min	in l/min
Parallelschaltung				
Schleife	5	4	1,85	0,27
Tauchkolben	5	2	4,90	0,29
Deckel 1	1	2	4,65	0,29
Deckel 2	1	1	4,70	0,29
Stütze 1	6	2	4,55	0,29
Stütze 2	6	5	6,4	0,3
Mantelkanäle				
1	2	5	3,50	0,28
2	2	4	4,30	0,29
3	5	5	4,10	0,29
4	2	2	4,30	0,29
5	2	4	4,30	0,29
6	2	4	4,30	0,29
7	2	4	5,10	0,29
8	5	4	4,85	0,29
9	5	5	4,85	0,29
10	1	3	6,10	0,30
11	5	3	5,60	0,30
12	4	2	4,25	0,29
13	4	3	4,25	0,29
14	4	5	4,70	0,29
15	3	3	4,00	0,29
16	3	6	4,00	0,29
17	3	6	4,05	0,29
18	4	6	4,25	0,29
19	3	6	4,00	0,29
20	3	6	4,00	0,29
21	4	1	4,25	0,29
22	4	6	3,80	0,28
23	3	5	3,95	0,29
24	1	2	5,40	0,30
Reihenschaltung				
Schleife	5	4	5,20	0,30
Tauchkolben	5	2	11,3	0,4
Deckel 1	Deckel 2	2	9,0	0,4
Deckel 2	1	Deckel 1	8,9	0,4
Stütze 1	6	2	10,1	0,4
Stütze 2	6	5	11,9	0,4
Mantelkanäle				
Kanäle 2-24	2	6	6,8	0,3
Kanäle 1-23	4	3	6,9	0,3

Bei der Durchflussmessung wird deutlich, dass durch die Reihenschaltung von Deckel- und Mantelkanälen der Durchfluss an Kühlwasser in den Stützen und Deckeln deutlich steigt, sich ungefähr verdoppelt. So erhöht er sich in Stütze 1 um 122 % und in Stütze 2 um 86 %. Des Weiteren ist der Durchfluss bei Parallelschaltung in Stütze 2 um 41 % höher als in Stütze 1. Die Reihenschaltung verringert diesen Unterschied, dennoch ist der Durchfluss in Stütze 2 noch 18 % größer.

3.5. Druckmessung

Hierbei wird der Druckabfall innerhalb eines Kühlkanals gemessen. Dazu dient ein Manometer von Kobold des Typs MAN-LD3S5B8S[15]. Den optimalen Arbeitsbereich besitzt es zwischen 0-16 bar. Das Gerät wird direkt am Zulauf eines Kanals und anschließend am Rücklauf angeschlossen. Aus der Differenz der beiden Werte folgt der Druckabfall. Die Messung wird direkt nach dem Volumenstrom durchgeführt. Nach zwei Minuten Entlüftung nach jeder Entleerung des Kreislaufs wird der Druck in bar abgelesen. Der Fehler beträgt $\pm 0,5$ %. Die Messwerte sind in Tabelle 2 dargestellt.

Die Druckmessung zeigt, wie sich durch den umgebauten Kühlkreislauf die Druckunterschiede zwischen Kanalein- und Kanalausgang erhöhen. Auffällig ist der wesentlich höhere Vorlaufdruck an Deckel 2 und der Einkoppelschleife. Insgesamt ist die Kühlwasserversorgung an beiden Messtagen unterschiedlich. In den Stützen ist die Erhöhung des Druckabfalls nahezu proportional zum Durchfluss.



Abbildung 11: (a) zeigt das Kobold Druckmessgerät MAN, (b) zeigt den Kobold Strömungsmesser MIM. Die Abbildungen dienen als Beispiel.

Tabelle 2: Druckabfall in Kühlkanälen Okt. 2020.

Kühlkanal	Druck Zulauf in bar	Druck Rücklauf in bar	Druckunterschied in bar
Parallelschaltung der Kühlung			
Schleife	4	3,42	0,58
Tauchkolben	3,58	3,49	0,09
Deckel 1	3,49	3,18	0,31
Deckel 2	3,56	2,94	0,62
Stütze 1	4,25	3,7	0,55
Stütze 2	4,23	3,73	0,5
Mantelkanäle			
3	3,99	3,78	0,21
10	3,82	3,29	0,53
23	3,66	3,46	0,2
Reihenschaltung der Kühlung			
Schleife	6,02	1,31	4,71
Tauchkolben	4,01	3,48	0,53
Deckel 1	3,84	2,68	1,16
Deckel 2	5,28	3,84	1,44
Stütze 1	4,58	3,42	1,16
Stütze 2	4,88	3,73	1,15
Mantelkanäle			
Kanäle 2-24	6,28	1,63	4,65
Kanäle 1-23	6,08	1,95	4,13

4. Temperaturmessung an CH1 während der Konditionierung

Zuerst startet die Konditionierung mit paralleler Kühlung. Nach einer Dichtigkeitsprüfung werden die Temperatursensoren angebracht und durchnummeriert. Wichtig für die Temperaturdaten ist, dass die transmittierte Leistung über einen längeren Zeitraum konstant ist. In diesem Fall kann ein thermisches Fließgleichgewicht angenommen werden. Die Leistung wird in OriginPro gefittet.

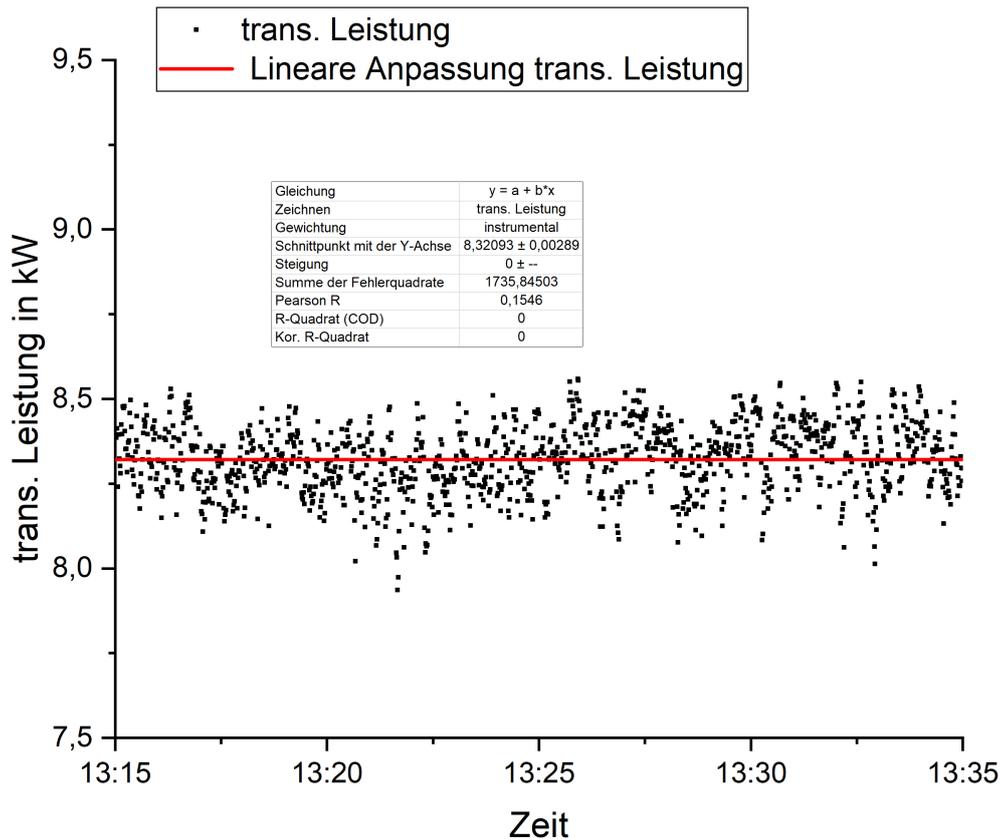


Abbildung 12: Transmittierte Leistung am 20.10.20 bei **paralleler** Kühlung. Linearer Fit in OriginPro2019 bei fester Steigung 0 über 20 Minuten.

Für den Powerscaling-Faktor zur Simulation wird eine mittlere transmittierte Leistung von $\bar{P}_{trans} = 8,3209 \text{ kW} \pm 0,0030 \text{ kW}$ verwendet. Der Faktor wird benötigt, um die dissipierten Verluste aus dem CST Eigenmode Solver in den Thermal Solver zu importieren. Der EM-Solver geht während der Simulation von einem Joule elektrischer Energie in der Kavität aus und errechnet hohe Verluste. Da diese für normalleitende Kavitäten wesentlich geringer ist, werden die Verluste mit der gemessenen transmittierten Leistung

durch den Powerscaling-Faktor normiert.

Nach dem Umbau auf serielle Kühlung am 21.10.20 werden weitere Temperaturdaten aufgezeichnet, die transmittierte Leistung wird wie in der vorigen Grafik dargestellt. Mithilfe der Fit-Tabelle aus Abbildung 13 ergibt sich ihr Mittelwert zu $\bar{P}_{trans} = 8,4300 \text{ kW} \pm 0,0014 \text{ kW}$.

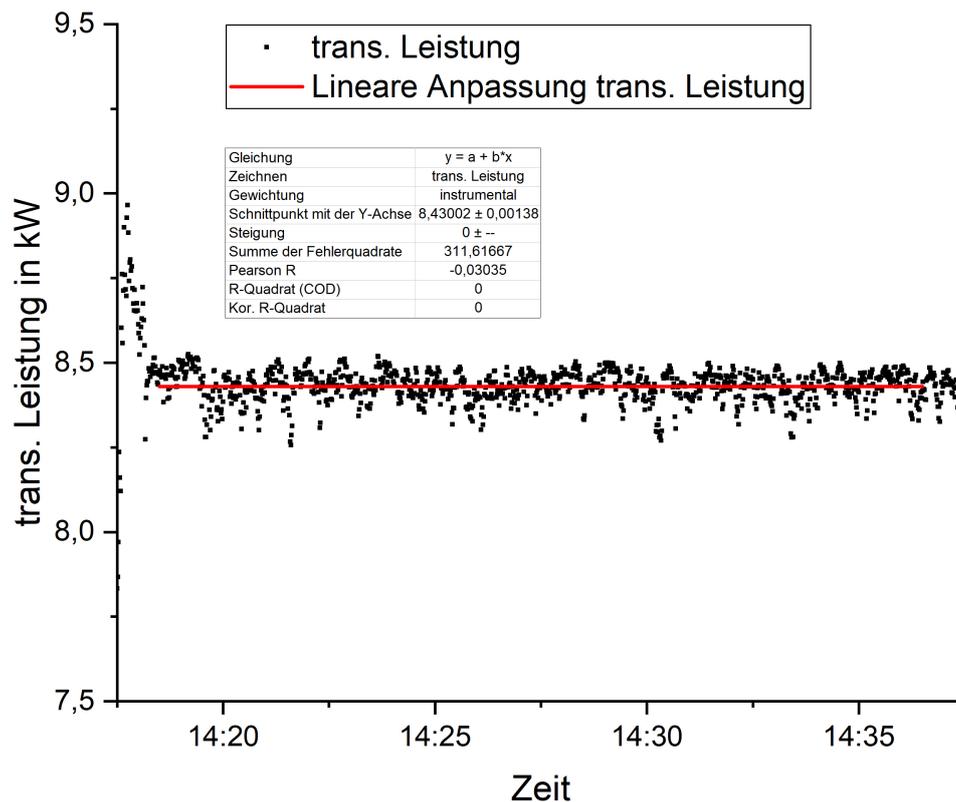


Abbildung 13: Transmittierte Leistung bei **serieller** Kühlung. Linearer Fit in Origin-Pro2019 bei fester Steigung 0 über 20 Minuten.

Während der Dauertests zeichnet eine Computersoftware die Temperaturdaten in einer .txt-Datei auf. Zur Vermeidung von Schwankungen werden über die letzten 10 Sekunden die Temperaturen der Tests gemittelt. Der Fehler beträgt $\pm 0,01 \text{ K}$.

Innerhalb des Kühlkanals heizt sich das Wasser auf, sodass zwischen Ein- und Ausgang eine Temperaturdifferenz entsteht. Für die Simulationen werden die Kanäle allerdings mit einem festen Wert als Temperaturquellen definiert. Die Wassertemperatur in einem Kühlkanal wird daher zur Vereinfachung als homogen angenommen. Sie setzt sich aus dem Mittel aus Ein- und Ausgangstemperatur zusammen. Somit beträgt der Fehler für jeden Wert in Tabelle 3 $\pm 0,02 \text{ K}$.

Tabelle 3: Temperaturdaten während Konditionierung.

Kühlkanal	Temperatur in Kelvin	
	parallel	seriell
Schleife	291,31	291,29
Tauchkolben	291,43	291,39
Deckel 1	292,06	292,95
Deckel 2	291,93	291,62
Stütze 1	296,06	293,31
Stütze 2	294,16	292,77
Mantelkanäle		
1	290,94	291,57
2	290,89	291,4
3	291,09	291,81
4	290,94	291,29
5	290,95	291,92
6	290,89	291,32
7	290,82	291,84
8	290,96	291,37
9	291,29	292,22
10	291,03	291,39
11	291,04	292,54
12	291,06	291,12
13	291,09	291,17
14	291,27	292,6
15	291,32	291,73
16	291,17	292,16
17	290,88	291,6
18	290,94	291,98
19	290,92	291,32
20	291,07	291,94
21	291,11	291,59
22	291,08	291,69
23	290,81	291,59
24	290,88	291,53
Umgebung	296,83	298,09
Vorlauf	290,77	290,84

Die aufgezeichneten Temperaturen aus Tabelle 3 bestätigen die Messergebnisse von Volumenstrom und Druck. So sinkt bei Reihenschaltung der Mantelkanäle die absolute Temperatur in Stütze 1 und 2 um jeweils 12 % und 6,6% (für Temperaturen in Grad Celsius). Die Temperaturen in den Mantelkanälen sind geringfügig höher als die Vorlauf-temperatur. Im Falle der Reihenschaltung wird in Kanal 14 der Maximalwert von 292,6 K erreicht. Dieser liegt 1,76 K über der Vorlauf-temperatur.

5. Simulationen in CST Studio Suite 2021

5.1. CST Eigenmode Solver

Startpunkt ist die STEP Datei von CH1, im Querschnitt in Abbildung 14 zu sehen. Ziel ist, den Dauertest während der Konditionierung für beide Kühlungen zu simulieren. Hierzu wird ein Tauchkolben entfernt und durch einen Blinddeckel ersetzt. Die Schleife wird nicht in den Simulationen berücksichtigt. Das gewählte Material besitzt folgende physikalische Eigenschaften, mit denen es dem verkupferten V2A Edelstahl (1.4301) nahekommt:

Tabelle 4: Physikalische Eigenschaften des verkupferten V2A.

Materialgrößen	
Wärmeleitfähigkeit in WK/m	20
elektrische Leitfähigkeit in S/m	5.80E+07
Spez. Wärmekapazität in J/kg/K	500

Die Kühlkanäle bestehen aus destilliertem Wasser. Die Einschubtiefe des Tauchkolbens wird über einen Parametersweep so bestimmt, dass die Resonanzfrequenz 176,233 MHz beträgt. Mithilfe des EM-Solvers wird die Thermal Loss Calculation durchgeführt. In dieser befinden sich die elektrischen Verluste an den Oberflächen und Volumina bei dem von CST angenommenem Gesamtverlust. Dieser entspricht im Experiment der transmittierten Leistung. In CST liegt er bei 84,5136 kW.

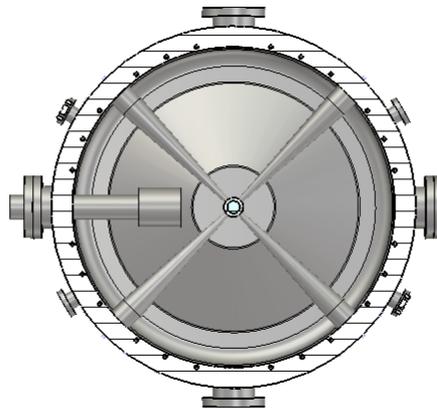


Abbildung 14: CH1 mit einem Tauchkolben, Frequenz 176,233 MHz.

5.2. CST Thermal Solver

Die CH1-Kavität wird in allen Richtungen mit 10 cm Raumlufte für die Konvektion umgeben. Im Inneren des Tanks wird ein Vakuumszylinder platziert, da im Gegensatz zur Eigenmode Simulation das Background Material aus Atmosphärenluft besteht. Die Thermal Losses aus dem Eigenmode Solver werden mit dem entsprechenden Powerscaling-Faktor importiert. Die Kühlkanäle werden als Temperaturquellen angegeben. Sie werden mit den Werten aus Tabelle 3 abgeglichen. Anschließend wird die Simulation im Thermal Steady State Solver gestartet.

5.2.1. Parallelschaltung der Kühlung

Zuerst wird wie bei der Konditionierung die parallel geschaltete Kühlung untersucht. Für den Powerscaling-Faktor findet sich mit der transmittierten Leistung aus Abbildung 12

$$\frac{8,3209 \text{ kW}}{84,5136 \text{ kW}} = 0,0985. \quad (12)$$

Der Messwert während der Konditionierung von 296,83 K wird als Umgebungstemperatur angenommen. Die Temperaturquellen und somit die Daten aus der Temperaturmessung sind vorab veranschaulicht.

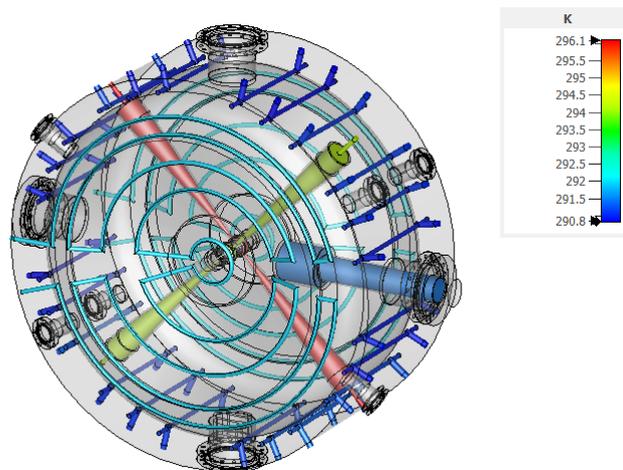


Abbildung 15: Die gemessenen Temperaturdaten der Parallelschaltung werden als Quellen in CST eingetragen.

5.2.2. Reihenschaltung der Kühlung

Analog wird jetzt die Reihenschaltung untersucht. Es ändern sich die Temperaturen und die transmittierte Leistung. Mit dieser findet sich (siehe Abbildung 13) für den Powerscaling-Faktor

$$\frac{8,43 \text{ kW}}{84,5136 \text{ kW}} = 0,0998. \quad (13)$$

Der Messwert während der Konditionierung von 298,09 K wird als Umgebungstemperatur angenommen. Die Temperaturquellen und somit die Daten aus der Temperaturmessung sind erneut veranschaulicht.

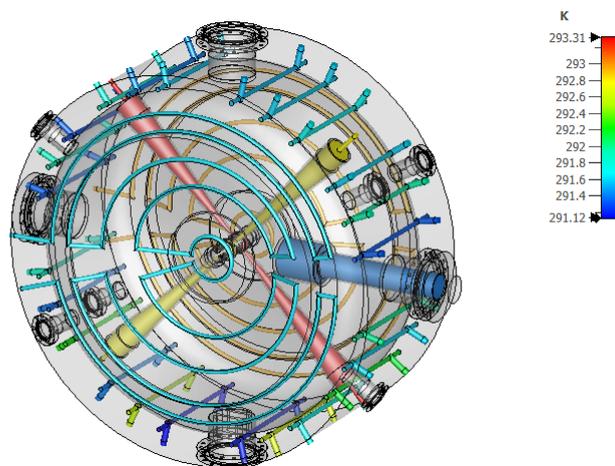


Abbildung 16: Die gemessenen Temperaturdaten der Reihenschaltung werden als Quellen in CST eingetragen.

Anschließend simuliert CST die Temperaturen in den weiteren Bauteilen für die Parallelschaltung in Abbildung 17 und für die Reihenschaltung in Abbildung 18. Für weitere Grafiken siehe Anhang A.Simulationen Thermal Solver.

Die Maximaltemperatur im Falle der Parallelschaltung beträgt 313,92 K und 313,45 K bei Reihenschaltung. Diese ist am Übergang von Tankzylinder zu den Stützen zu finden. In beiden Fällen sind der Tauchkolben und der Tank im Vergleich zu den Stützen um teilweise 20 K kälter. Bei einer logarithmischen Skala wird dies erneut deutlich. Bei der Reihenschaltung sinkt die Temperatur in den Stützen, der Tank wird nicht signifikant wärmer, trotz der um 2 K höheren Umgebungstemperatur.

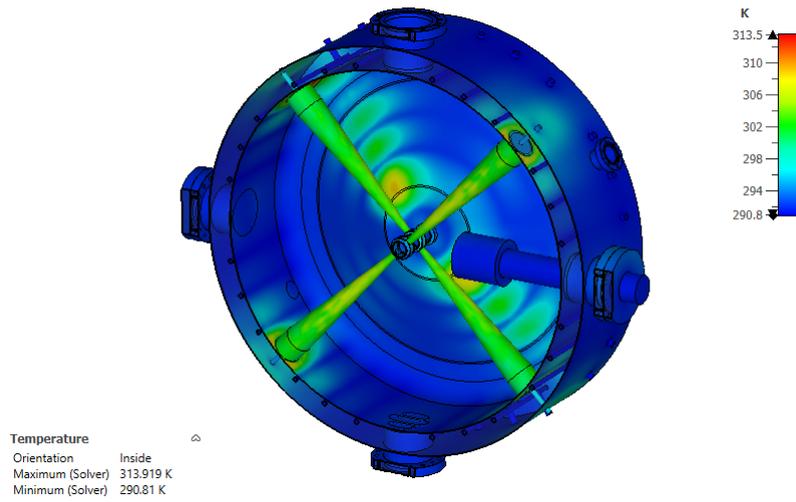


Abbildung 17: Thermal Solver 3D Resultat für Temperatur, lineare Temperaturskala, im Tankinneren, Parallelschaltung.

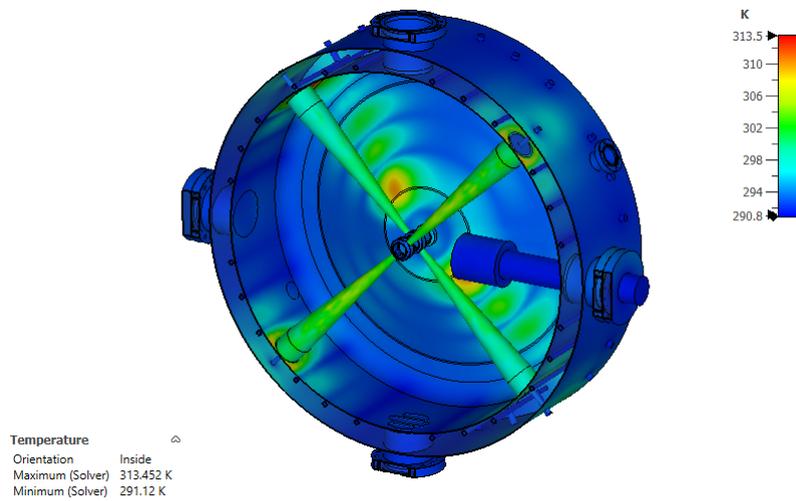


Abbildung 18: Thermal Solver 3D Resultat für Temperatur, lineare Temperaturskala, im Tankinneren, Reihenschaltung.

6. Berechnung über dissipierte Leistung und Wärmekapazität

6.1. Vorüberlegungen

In diesem Kapitel werden die gemessenen Temperaturerhöhungen näherungsweise aus der Eigenmode Simulation und den Durchflusswerten gewonnen. Hiermit kann bei zukünftigen Beschleunigerentwicklungen die Wassertemperatur in Bauteilen wie Stützen bestimmt werden, bevor die Kavität in Betrieb genommen wird.

CST berechnet die relativen elektrischen Verluste für jedes Bauteil. In bisherigen Simulationen waren der Tankzylinder inklusive beider Deckel zusammengefasst. Da es von Interesse ist, wie viel der Verluste die einzelnen Tankkanäle abführen müssen, wird der Tank in Deckel und Zylinder aufgeteilt. Der Zylinder wird zwischen den Kanälen mittig getrennt, sodass 24 Einzelkomponenten den Gesamtzylinder bilden:

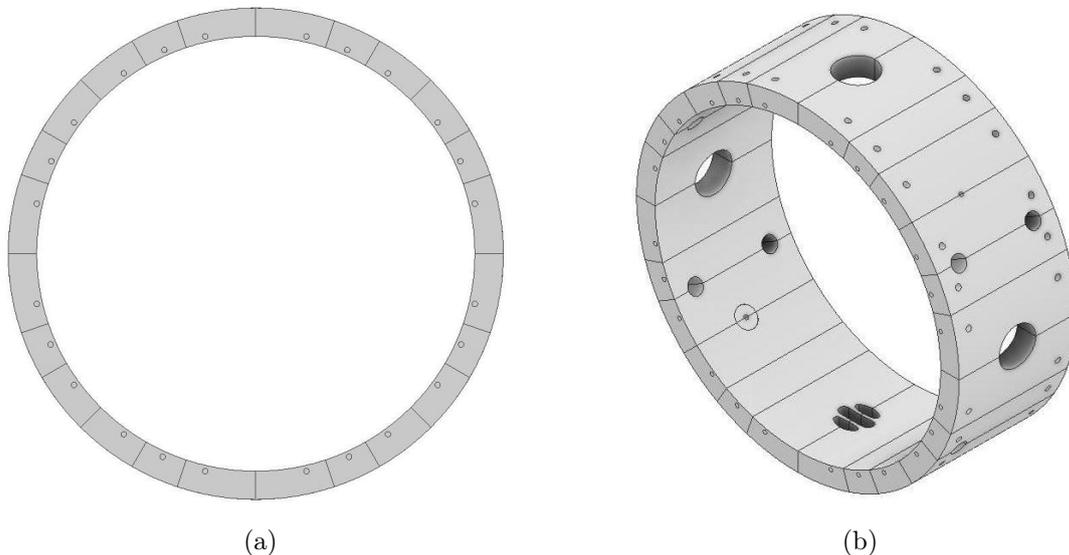


Abbildung 19: CH1 Tankzylinder, in 24 Komponenten getrennt.

Im Allgemeinen gilt für die Temperaturerhöhungen T_i der einzelnen Kühlwasserströme nach Formel (11)

$$\Delta T_i = \frac{\Delta Q_i}{c \cdot m_i}. \quad (14)$$

Die Energieänderung, also die zugeführte Wärme, ergibt sich aus der Leistung P_{loss} und der Zeit t_{heat} des Aufheizens, die ein Wassermolekül benötigt, um durch den Kanal zu strömen:

$$\Delta Q_i = P_{loss} \cdot t_{heat}. \quad (15)$$

Da der Durchfluss an Kühlwasser aus Tabelle 1 bekannt ist, erhält man über die Strömungsgeschwindigkeit und die Kanallänge die Zeit t_{heat} . Insgesamt ergibt sich für die

Temperaturerhöhung

$$\Delta T_i = \frac{P_{loss}}{c \cdot \rho \cdot \dot{V}_i} \quad (16)$$

mit der Dichte ρ und dem Volumenstrom \dot{V} . P_{loss} entspricht dem Produkt aus dem simulierten relativen Verlust (Loss) in % und der mittleren transmittierten Leistung \bar{P}_{trans} , sodass final gilt

$$\Delta T_i = \frac{\bar{P}_{trans} \cdot Loss_i}{c \cdot \rho \cdot \dot{V}_i}. \quad (17)$$

Zusätzlich benötigt man die mittlere spezifische Wärmekapazität von Wasser mit 4182 kJ/kg/K und die Dichte bei 20°C und 5 bar von 998,43 kg/m³. [16]

Hierbei wird als Vereinfachung angenommen, dass jeder Kanal aus einem geraden Zylinder besteht. Als letzte Vereinfachung wird die Wechselwirkung zwischen Tank und Raumluft in dieser Berechnung vernachlässigt.

6.2. CST Eigenmode Solver und Temperaturänderung

Der geteilte Tank von CH1 wird in CST importiert und im Eigenmode Solver simuliert. Über das Post-Processing werden die relativen Verluste für die einzelnen Bauteile in Tabelle 5 zusammengefasst.

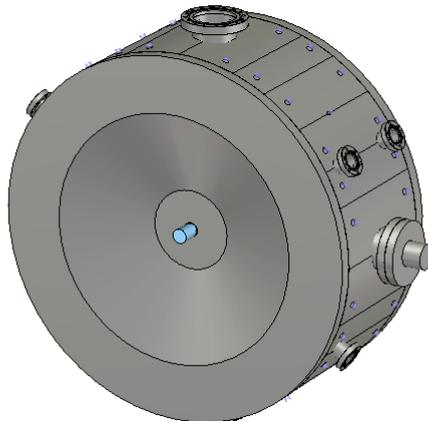


Abbildung 20: In CST wird der Tank von CH1 modifiziert, aufgeteilt in Deckel und 24 Zylinder-Komponenten.

Die mit Formel (17) berechneten Temperaturerhöhungen werden auf höchstens zwei signifikante Stellen gerundet, abhängig von ihrer Unsicherheit. Die Fehler und deren Herleitung finden sich in Tabelle 6 bzw. im folgenden Kapitel.

Tabelle 5: Relative Verluste aus Eigenmode Solver, Temperaturerhöhungen pro Kanal aus den simulierten Verlusten und gemessen bei Konditionierung.

Kühlkanal	Loss in %	ΔT_i in K Simulation		ΔT_i in K Messung	
		parallel	seriell	parallel	seriell
Tauchkolben	0,772	0,188	0,0828	1,33	1,10
Deckel 1	7,560	1,94	1,02	2,58	1,56
Deckel 2	7,190	1,83	0,98	2,32	1,55
Stütze 1	34,500	9,1	4,14	10,57	4,94
Stütze 2	34,000	6,35	3,46	6,78	3,85
Mantelkanäle					
1	0,119	0,041	0,0209	0,34	0,30
2	0,263	0,073	0,0469	0,24	0,19
3	1,540	0,45	0,270	0,64	0,18
4	1,530	0,425	0,273	0,33	0,02
5	0,270	0,075	0,0474	0,36	0,03
6	0,121	0,0336	0,0216	0,24	-0,08
7	0,120	0,0281	0,0211	0,10	-0,19
8	0,263	0,065	0,0469	0,37	-0,02
9	1,500	0,370	0,263	1,03	0,96
10	1,510	0,296	0,269	0,51	-0,02
11	0,258	0,0551	0,0453	0,53	-0,33
12	0,116	0,0326	0,0207	0,58	0,56
13	0,117	0,0329	0,0205	0,64	0,65
14	0,265	0,067	0,0472	1,00	0,36
15	1,560	0,47	0,2739	1,10	0,48
16	1,580	0,47	0,2815	0,79	0,44
17	0,286	0,084	0,0502	0,21	-0,75
18	0,142	0,0400	0,0253	0,34	-0,11
19	0,148	0,044	0,0260	0,30	0,20
20	0,279	0,083	0,0497	0,61	0,21
21	1,550	0,436	0,2721	0,67	0,34
22	1,530	0,48	0,2726	0,61	0,27
23	0,261	0,079	0,0458	0,09	-0,34
24	0,118	0,0261	0,0210	0,22	0,07
Summe	99,468	23,637	12,409	35,450	16,414

Für Bauteile innerhalb der Kavität wie den Stützen wird auf diese Weise die Temperatur sehr gut abgeschätzt. Insgesamt sind die berechneten Temperaturerhöhungen für die Tankkanäle (Deckel und Mantel), teilweise um einen Faktor 10 kleiner. Gut erkennbar ist die Temperaturerhöhung in den Kanälen 3, 4, 9, 10, 15, 16, 21, 22, die direkt an den Hotspots, den Übergängen von Stützen-Mantel, liegen. Dies wurde bereits in den Simulationen beobachtet. Auffällig bei der Messung sind auch negative Erhöhungen, also Temperaturabnahmen. Diese kann man nicht mit der Formel (17) reproduzieren.

6.3. Fehlerrechnung

Die Ergebnisse aus Tabelle 5 sind fehlerbehaftet. Für die Fehler der Werte aus Spalte 5 und 6 gilt ein absoluter Fehler von $\pm 0,02$ K.

Nach der Gaußschen Fehlerfortpflanzung gilt für die Fehler zu den Werten aus Spalte 3 und 4

$$\sigma_T = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial \bar{P}_{trans}}\right)^2 \sigma_{\bar{P}_{trans}}^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{V}}\right)^2 \sigma_{\dot{V}}^2} \quad (18)$$

$$\sigma_T = \sqrt{\left(\frac{\text{Loss}_i}{c \cdot \rho \cdot \dot{V}_i}\right)^2 \sigma_{\bar{P}_{trans}}^2 + \left(-\frac{\bar{P}_{trans} \cdot \text{Loss}_i}{c \cdot \rho \cdot \dot{V}_i^2}\right)^2 \sigma_{\dot{V}}^2} \quad (19)$$

mit den Fehlern des Volumenstroms $\sigma_{\dot{V}}$ und der transmittierten Leistung $\sigma_{\bar{P}_{trans}}$.

Tabelle 6: Ergebnisse der Fehlerrechnung nach Formel (19).

Kühlkanal	ΔT_i in K Simulation			
	parallel	parallel $\pm\sigma_T$	seriell	seriell $\pm\sigma_T$
Tauchkolben	0,188	0,012	0,0828	0,0025
Deckel 1	1,94	0,12	1,02	0,04
Deckel 2	1,83	0,12	0,98	0,04
Stütze 1	9,1	0,6	4,14	0,14
Stütze 2	6,35	0,30	3,46	0,10
Mantelkanäle				
1	0,041	0,004	0,0209	0,0010
2	0,073	0,005	0,0469	0,0021
3	0,45	0,03	0,270	0,012
4	0,425	0,030	0,273	0,013
5	0,075	0,005	0,0474	0,0021
6	0,0336	0,0023	0,0216	0,0010
7	0,0281	0,0016	0,0211	0,0010
8	0,065	0,004	0,0469	0,0021
9	0,370	0,022	0,263	0,012
10	0,296	0,015	0,269	0,012
11	0,0551	0,0030	0,0453	0,0020
12	0,0326	0,0022	0,0207	0,0010
13	0,0329	0,0022	0,0205	0,0010
14	0,067	0,005	0,0472	0,0022
15	0,47	0,04	0,2739	0,0130
16	0,47	0,04	0,2815	0,0130
17	0,084	0,006	0,0502	0,0023
18	0,0400	0,0027	0,0253	0,0012
19	0,044	0,004	0,0260	0,0012
20	0,083	0,006	0,0497	0,0023
21	0,436	0,030	0,2721	0,0120
22	0,48	0,04	0,2726	0,0130
23	0,079	0,006	0,0458	0,0021
24	0,0261	0,0015	0,0210	0,0010

7. Fazit

Bereits bei der Durchflussmessung wird deutlich, dass durch die Reihenschaltung von Deckel- und Mantelkanälen der Durchfluss an Kühlwasser in den Stützen deutlich steigt. Durch die gesparte Länge an Zuleitungen ist der Volumenstrom bei der Reihenschaltung insgesamt höher. So profitieren auch Deckel, Schleife und der Tauchkolben.

Die Druckmessung zeigt außerdem, wie sich durch den umgebauten Kühlkreislauf die Druckunterschiede zwischen Kanalein- und Kanalausgang erhöhen. Insgesamt ist die Kühlwasserversorgung an beiden Messtagen unterschiedlich gewesen und wirkt bei dem seriell geschalteten Kühlkreislauf unabhängig von diesem höher. Vermutlich haben hier andere Verbraucher in der Experimentierhalle Einfluss und erlauben über längere Zeit keine konstante Kühlwasserversorgung. Ein weiterer Ansatz ist, dass die Wasserpumpe nicht einen Vorlaufdruck konstant hält, sondern eine bestimmte Durchflussmenge.

Die aufgezeichneten Temperaturen aus Tabelle 3 bestätigen die Messergebnisse von Volumenstrom und Druck. So sinkt bei Reihenschaltung der Mantelkanäle die Temperatur in Stütze 1 und 2. Die asymmetrische Erhitzung ist wahrscheinlich durch die unterschiedliche Anschlussposition an der Kühlwasserverteilung bedingt, die für einen höheren Durchfluss in Stütze 2 sorgt und bei höheren Durchflusswerten weniger relevant ist. Die aus dem Eigenmode Solver erhaltene dissipierte Leistung in Tankmantel (15,45 %) und Deckeln (14,75 %) ist für die vorhandene Menge an Kühlkanälen verhältnismäßig gering (siehe Tabelle 5). Die Reihenschaltung der Mantelkanäle führt demnach zu keiner relevanten Temperaturänderung, zumal am Messtag der Durchfluss insgesamt größer ist und den erwarteten Anstieg im Mantel dämpft. Dies geschieht trotz der Mehrleistung von 110 W im Falle der Reihenschaltung.

Der Thermal Steady State Solver kann mit den gemessenen Temperaturen das Fließgleichgewicht reproduzieren. Wie auch bei dem Kühlwasser, führt das Hintereinanderschalten der Mantelkanäle zu geringeren Temperaturen im Metall der Stützen. Die Temperatur des Tanks nimmt leicht zu, dennoch nicht relevant ($\approx 0,5$ K). Dies liegt mit Sicherheit ebenfalls an der 2 K höheren Umgebungstemperatur als bei der Parallelschaltung. In beiden Simulationen stellt sich eine fast identische Maximaltemperatur am Übergang zwischen den Stützen und dem Mantel ein. Da hier nicht direkt ein Kühlkanal fließt und der Edelstahl eine vergleichsweise schlechte Wärmeleitfähigkeit besitzt, ändert die Anschlussituation der Kühlung die Maximaltemperatur nur gering. Aus der Simulation geht ebenfalls der bereits beobachtete Temperaturunterschied zwischen den Stützen hervor.

Die Thermosimulationen geben interessante Einblicke in die Temperaturverteilung des Beschleunigers, die auch vor Inbetriebnahme benötigt werden. In Kapitel 6 sind die gemessenen Temperaturen wie beschrieben nachgerechnet. Die Ergebnisse bringen für die Stützen gute Annäherungen hervor. Für die Tankkanäle spielen Effekte durch turbulente Strömung und Wechselwirkung mit der 7 K wärmeren Raumluft eine größere Rolle. Die berechneten Temperaturen sind zu gering.

Dass auch innerhalb des Tankmantels Wärmeleitung zwischen den 24 Komponenten stattfindet, zeigen die negativen Temperaturänderungen aus der Messung. Diese bele-

gen, dass das Kühlwasser auch abkühlt, falls es bei der Reihenschaltung von einem wärmeren anschließend in einen kälteren Kanal fließt. Ein Szenario, welches mit Formel (17) nicht möglich ist, da in jedem Kanal Energie dem Kühlwasser zugeführt wird.

Abschließend ist die Reihenschaltung der Kühlkanäle für die CH1 die bessere Anordnung. Besonders bei Wasserquellen mit konstanter Durchflussmenge sorgt sie für kältere Stützen bei kaum wärmerem Tank. Insgesamt erhält man weniger mechanische Spannungen und gelangt damit näher an die hohen Zuverlässigkeitsanforderungen des MYRRHA-Injektors. Um die Kühlung vor Inbetriebnahme zu simulieren, eignet sich die Methode in Kapitel 6 in Hinblick auf die Stützentemperatur sehr gut. Für zukünftige Anwendungen mit CH-Kavitäten kann der CST Thermal Steady State Solver weiter empfohlen werden.

8. Danksagung

Gerne möchte ich Prof. Dr. Holger Podlech danken, der mir diese Arbeit im Rahmen meines Studiums ermöglichte.

Besonderen Dank an Klaus Kümpel, der mir bei jeder Frage zur Seite stand und mich bestens betreute.

Bedanken möchte ich mich bei Luca Braun, mit der ich die Messungen an der CH1 durchführte.

Danke an Nils Petry für die Unterstützung bei den CST Simulationen.

Danke an Dr. Marco Busch und Malte Schwarz, die mich in der LINAC-AG willkommen hießen und einarbeiteten.

Danke an alle, die mich bei dieser Arbeit unterstützten, besonders an Familie und Freunde.

Literaturverzeichnis

- [1] Verschiedene. Informationen MYRRHA Projekt, Zuletzt aufgerufen 10.12.20. <https://myrrha.be/myrrha-project/>.
- [2] D. Mäder, H. Hähnel, H. Höltermann, D. Koser, K. Kümpel, U. Ratzinger, W. Schweizer, M. Busch, H. Podlech, C. Angulo, et al. Construction of the MYRRHA Injector. *Proc. IPAC'17*, pages 2221–2223, 2017.
- [3] K. Wille. *Physik der Teilchenbeschleuniger und Synchrotronstrahlungsquellen*. Teubner B. G. GmbH, 1996.
- [4] H. Podlech. Driftröhren Kavitäten Sommersemester 2013, Zuletzt aufgerufen 14.12.2020. http://linac.physik.uni-frankfurt.de/linearbeschleuniger_ss13/Linacs6.pdf.
- [5] S. Lamprecht. Masterarbeit Untersuchung des MYRRHA-RFQ. Master's thesis, Goethe Universität Frankfurt am Main, August 2018.
- [6] Wolfgang Nolting. *Grundkurs Theoretische Physik 4/2: Thermodynamik*. Springer-Verlag, 2016.
- [7] Lumitos AG. Wärmeleitfähigkeit, Zuletzt aufgerufen 13.03.21. <https://www.chemie.de/lexikon/Waermeleitfaehigkeit.html>.
- [8] Dassault Systèmes. CST Studio Suite 2021, Zuletzt aufgerufen 13.03.21. <https://www.3ds.com/de/produkte-und-services/simulia/produkte/cst-studio-suite/>.
- [9] K. Kümpel, S. Lamprecht, P. Müller, NF. Petry, H. Podlech, and S. Zimmermann. Status of the MYRRHA CH cavities. 2018.
- [10] K. Kümpel, D. Bade, M. Busch, D. Koser, S. Lamprecht, NF. Petry, H. Podlech, S. Zimmermann, et al. Current Status of the MYRRHA Cavities. In *10th Int. Particle Accelerator Conf.(IPAC'19), Melbourne, Australia, 19-24 May 2019*, pages 892–894. JACOW Publishing, Geneva, Switzerland, 2019.
- [11] Anja Seibel. Entwicklung und Test des 175 MHz CH-Rebunchers für das FRANZ-Projekt. Master's thesis, Goethe Universität Frankfurt am Main, 2013.
- [12] K. Kümpel, D. Mäder, P. Müller, NF. Petry, and H. Podlech. The new injector design for MYRRHA. In *8th Int. Particle Accelerator Conf.(IPAC'17), Copenhagen, Denmark*, 2017.
- [13] Festo Vertrieb GmbH & Co. KG, Zuletzt aufgerufen 21.01.21. https://www.festo.com/cms/de_de/index.htm.

- [14] Kobold Messring GmbH. Kobold MIM Durchflussmesser, Zuletzt aufgerufen 20.01.21. <https://kobold.com/Magnetisch-Induktiver-Stroemungsmesser-MIM>.
- [15] Kobold Messring GmbH. Kobold Manometer Man LD, Zuletzt aufgerufen 20.01.21. <https://kobold.com/Manometer-Digital-mit-Keramikzelle-MAN-LD>.
- [16] H. Grimm, Zuletzt aufgerufen 14.03.21. http://www.wissenschaft-technik-ethik.de/wasser_dichte.html#kap02.
- [17] D. Mäder, H. Höltermann, D. Koser, B. Koubek, K. Kümpel, P. Müller, U. Ratzinger, M. Schwarz, C. Angulo, J. Belmans, et al. Status and Development of the MYRRHA Injector. In *9th Int. Particle Accelerator Conf.(IPAC'18), Vancouver, BC, Canada, April 29-May 4, 2018*, pages 432–434. JACOW Publishing, Geneva, Switzerland, 2018.

Abbildungsverzeichnis

1.	MYRRHA Gelände aus der Vogelperspektive, [1]	5
2.	MYRRHA-Injektor, [2]	6
3.	Wideroe-Beschleuniger, Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Lineaer_accelerator_de.svg	7
4.	Elektromagnetische Felder in CH-Kavitäten, [4]	8
5.	Veranschaulichung einer Thermosimulation in CST.	12
6.	CH1 ohne Deckel, [17]	13
7.	Kühlkanäle MYRRHA Kavitäten, [12]	14
8.	CH1 Kühlung, parallel und in Reihe	15
9.	Anschluss Reihenschaltung Kühlung	16
10.	Kühlwasserverteilung CH1	17
11.	Kobold Messgeräte, [15] und [14]	19
12.	Transmittierte Leistung parallel	21
13.	Transmittierte Leistung seriell	22
14.	CH1 mit einem Tauchkolben	25
15.	Temperaturquellen parallel in CST	26
16.	Temperaturquellen seriell in CST	27
17.	Thermosimulation Parallelschaltung, Innenansicht linear	28
18.	Thermosimulation Reihenschaltung, Innenansicht linear	28
19.	CH1 Tankzylinder, aufgeteilt in 24 Komponenten	29
20.	CH1 Tank in CST, aufgeteilt in 24 Komponenten und Deckel	30
21.	Thermosimulation Parallelschaltung, Innenansicht logarithmisch	40
22.	Thermosimulation Reihenschaltung, Innenansicht logarithmisch	40
23.	Thermosimulation Parallelschaltung, Querschnitt	41
24.	Thermosimulation Reihenschaltung, Querschnitt	41
25.	Thermosimulation Parallelschaltung, Tankzylinder	42
26.	Thermosimulation Reihenschaltung, Tankzylinder	42
27.	Thermosimulation Parallelschaltung, Stützen	43
28.	Thermosimulation Reihenschaltung, Stützen	43

A. Simulationen Thermal Solver

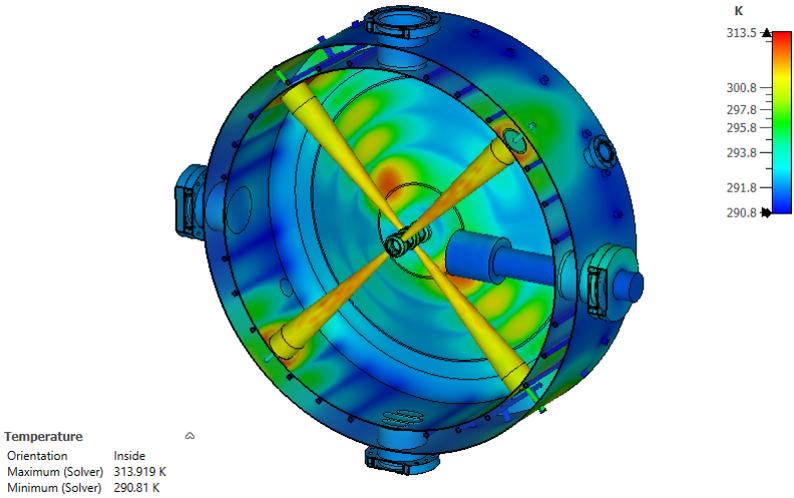


Abbildung 21: Thermal Solver 3D Resultat für Temperatur, logarithmische Temperaturskala, im Tankinneren, Parallelschaltung.

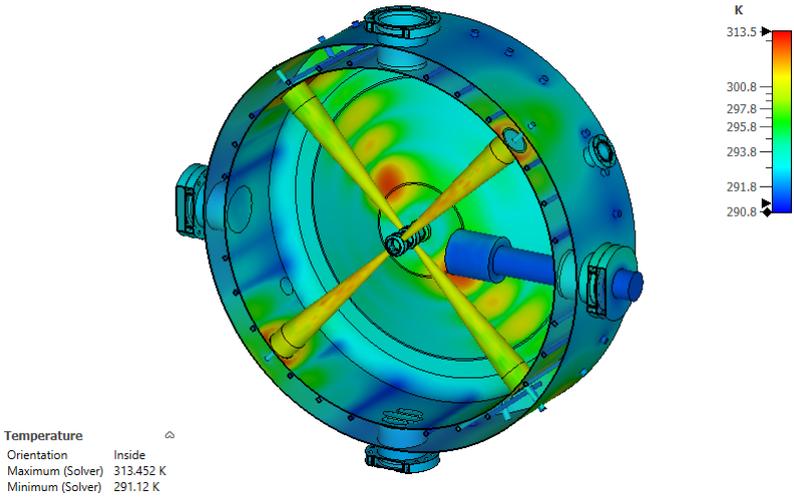


Abbildung 22: Thermal Solver 3D Resultat für Temperatur, logarithmische Temperaturskala, im Tankinneren, Reihenschaltung.

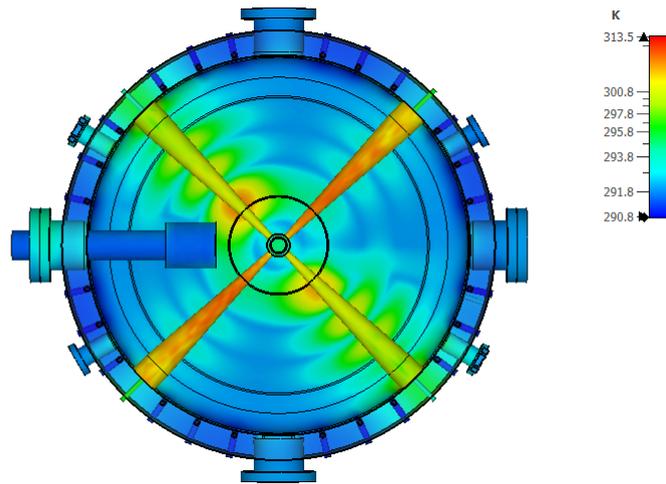


Abbildung 23: Thermal Solver 3D Resultat für Temperatur, logarithmische Temperaturskala, Tankquerschnitt, Parallelschaltung.

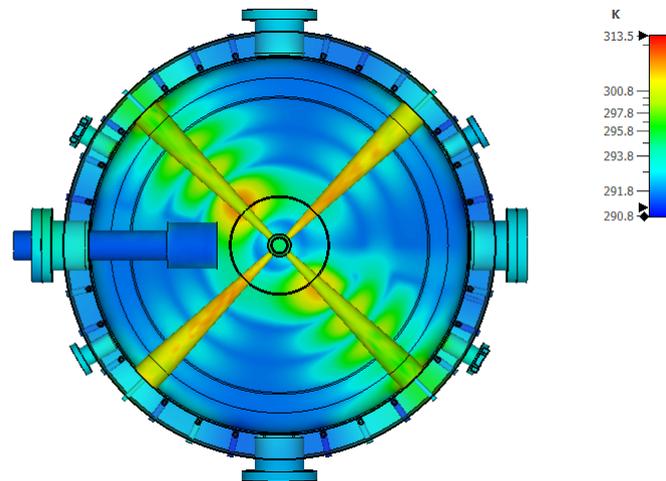


Abbildung 24: Thermal Solver 3D Resultat für Temperatur, logarithmische Temperaturskala, Tankquerschnitt, Reihenschaltung.

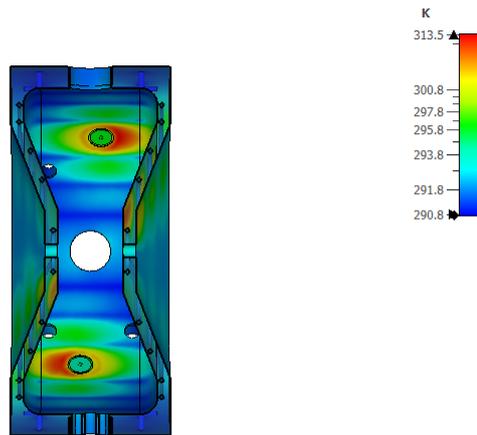


Abbildung 25: Thermal Solver 3D Resultat für Temperatur, logarithmische Temperaturskala, Tankzylinder, Parallelschaltung.

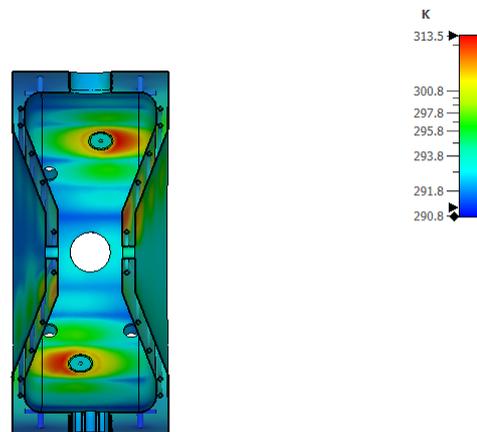


Abbildung 26: Thermal Solver 3D Resultat für Temperatur, logarithmische Temperaturskala, Tankzylinder, Reihenschaltung.

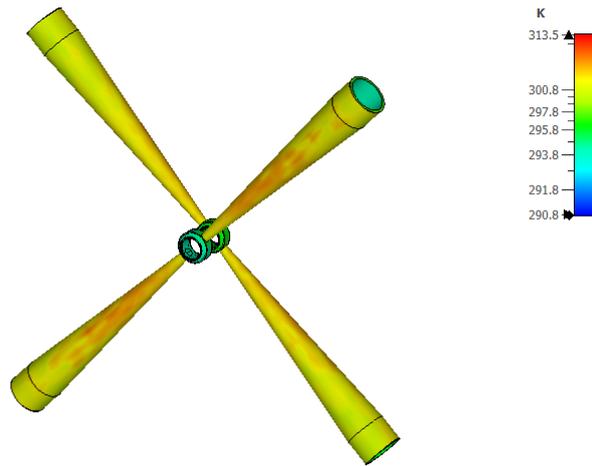


Abbildung 27: Thermal Solver 3D Resultat für Temperatur, logarithmische Temperaturskala, Stütze 1 und 2, Parallelschaltung.

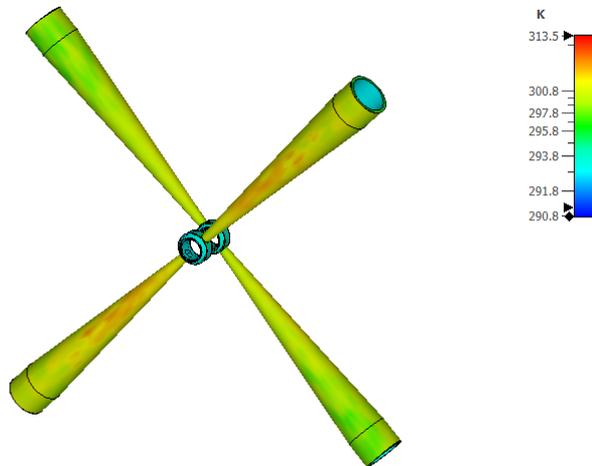


Abbildung 28: Thermal Solver 3D Resultat für Temperatur, logarithmische Temperaturskala, Stütze 1 und 2, Reihenschaltung.