

Magnetdesign von BabyIAXO

Detektormagnet für die suche nach Axionen

Jörn Schaffran
Hamburg, 19.06.25

HELMHOLTZ



Magnetdesign von BabyIAXO

Agenda

01 Physik

- Kurze Einführung
- Motivation

02 Experiment

- Aufbau
- Experimentelle Anforderungen

03 Der BabyIAXO Magnet

- Technische Anforderungen
- Spezielle Herausforderung & Randbedingungen
- Die „Kalte Masse“
- Kryotechnik und Kühlkonzept
- Mechanische Betrachtungen & Engineering
- Montage & Fertigung

04 Zusammenfassung

- Zusammenfassung
- Ausblick

Physik

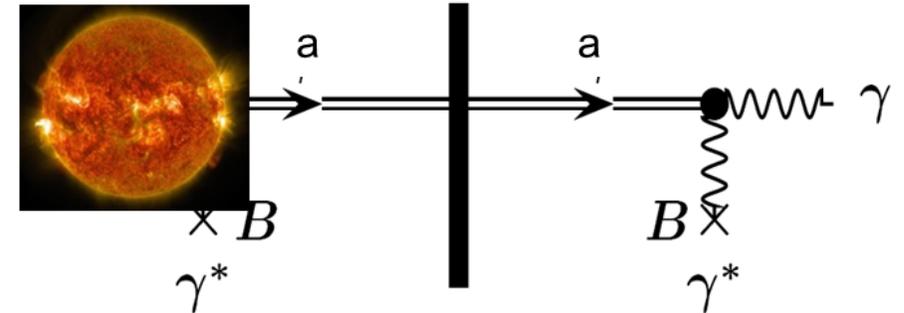
Warum suchen wir das Axion?

Motivation

- Quantenchromodynamik (QCD) fordert eine Verletzung der CP-Symmetrie (C-Ladung, P-Parität), die aber nicht beobachtet wird.
⇒ Axionen können diese Problem lösen.
- Axionen sind ein möglicher Kandidat für die Erklärung der „Dunklen Materie“.

Wie detektieren wir ein Axion?

- Axionen werden im Kern der Sonne durch die Wechselwirkung von Photonen mit den dort vorhandenen elektromagnetischen Feldern erzeugt. Messung mit Helioskop.
- Helioskop: ein Magnet wird Richtung Sonne ausgerichtet, um den Fluss der eintreffenden Axionen zu maximieren.



Das Axion kommt aus der Sonne, wird in ein Photon umgewandelt (Primakoff-Effekt) und so nachfolgend gemessen.

Experimenteller Aufbau

Was benötigen wir...

Realisierung

- Ein großer supraleitender Dipolmagnet folgt mit seiner Öffnung der Sonne, um möglichst viele Axionen „einzufangen“, umzuwandeln und letztendlich zu detektieren.



Experimenteller Aufbau (komplett)

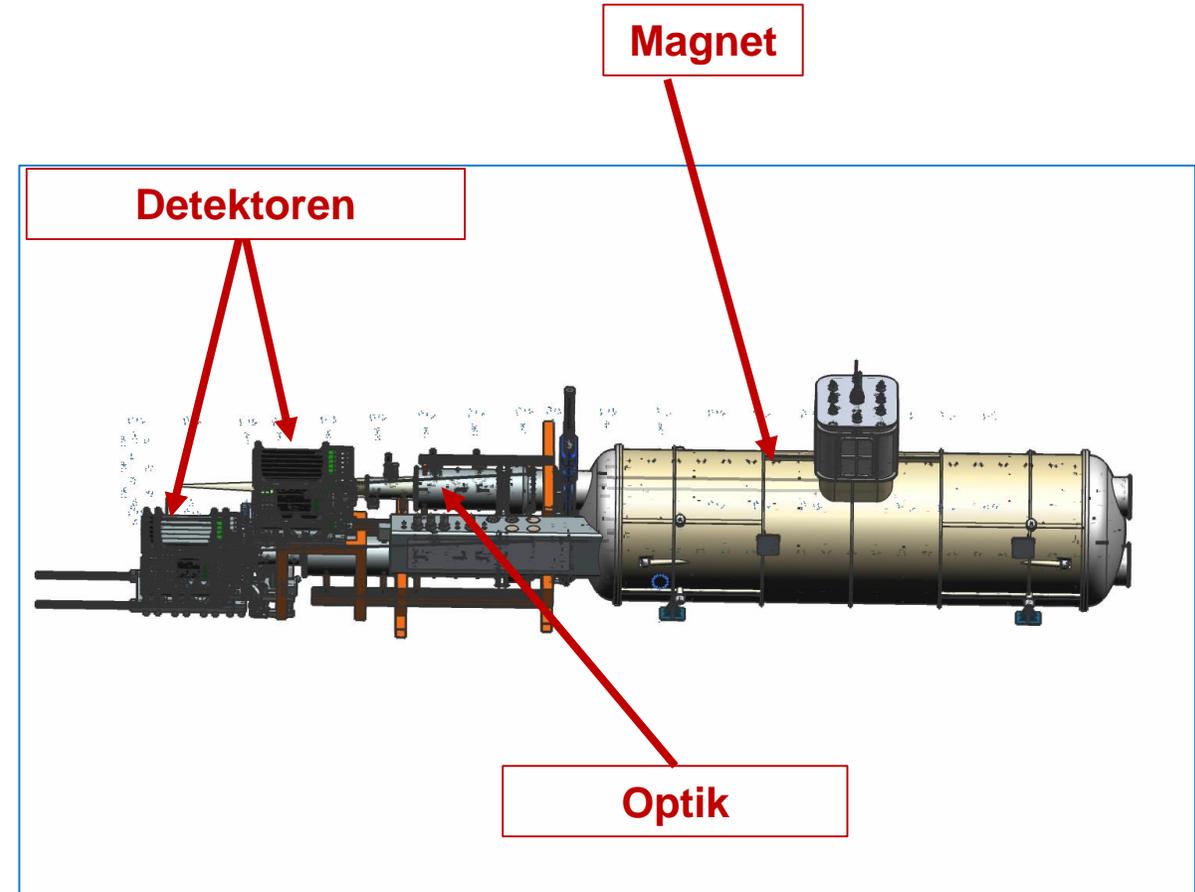
Support und
Drive System

Experimenteller Aufbau

Was benötigen wir...

Realisierung

- Ein großer supraleitender Dipolmagnet folgt mit seiner Öffnung der Sonne, um möglichst viele Axionen „einzufangen“, umzuwandeln und letztendlich zu detektieren.
 - Die Figure of Merit $MFOM(3-D) = \int_A \left(\int_L B_{\perp}(x, y, z) dx \right)^2 dy dz$ bestimmt die Sensitivität des Experiments.
- ⇒ Der Magnet sollte ein hohes Dipolfeld mit einem großen Volumen haben.



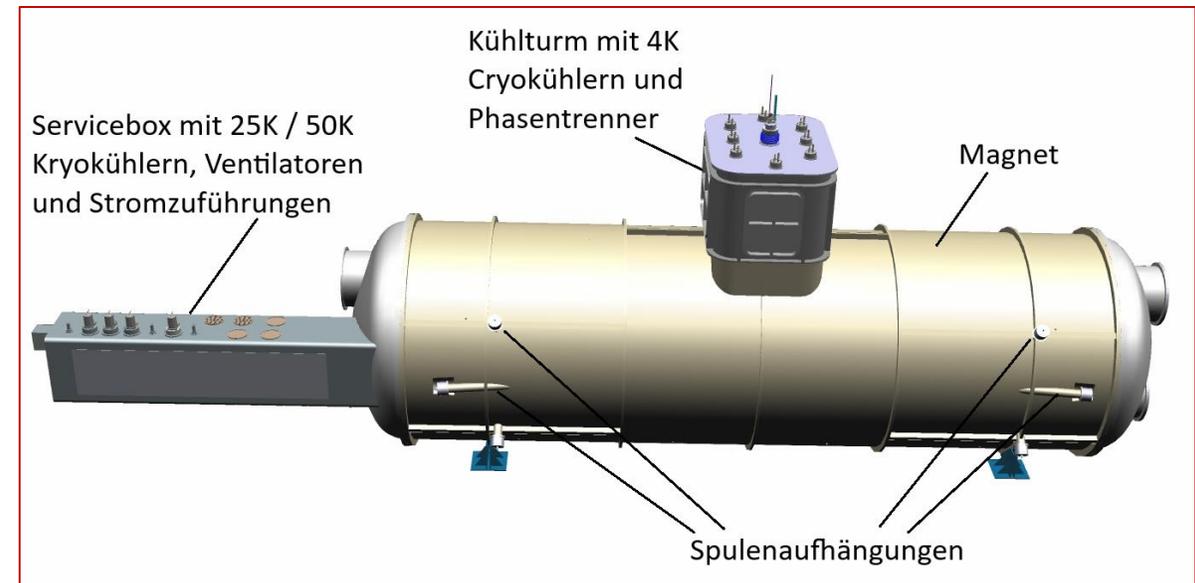
Experimenteller Aufbau

Experimenteller Aufbau

...und wie bauen wir es kostengünstig und nachhaltig?

Realisierung

- Ein großer supraleitender Dipolmagnet folgt mit seiner Öffnung der Sonne, um möglichst viele Axionen „einzufangen“, umzuwandeln und letztendlich zu detektieren.
- Die Figure of Merit $MFOM(3-D) = \int_A \left(\int_L B_{\perp}(x, y, z) dx \right)^2 dy dz$ bestimmt die Sensitivität des Experiments.
⇒ Der Magnet sollte ein hohes Dipolfeld mit einem großen Volumen haben.
- Zwei Magnetbohrungen (größeres Volumen mit weniger Aufwand für Spulengeometrie) erlauben die Umwandlung der Axionen in Photonen und deren Nachweis mittels nachfolgender Optik und Detektoren.



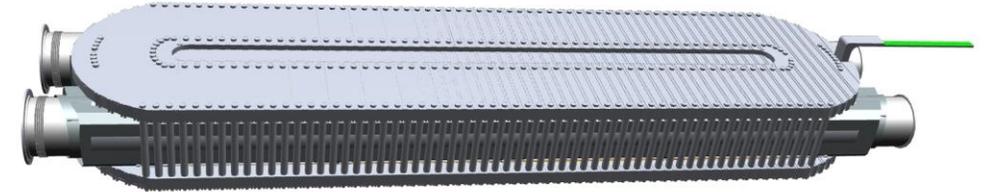
Supraleitender Dipolmagnet

Der Magnet...

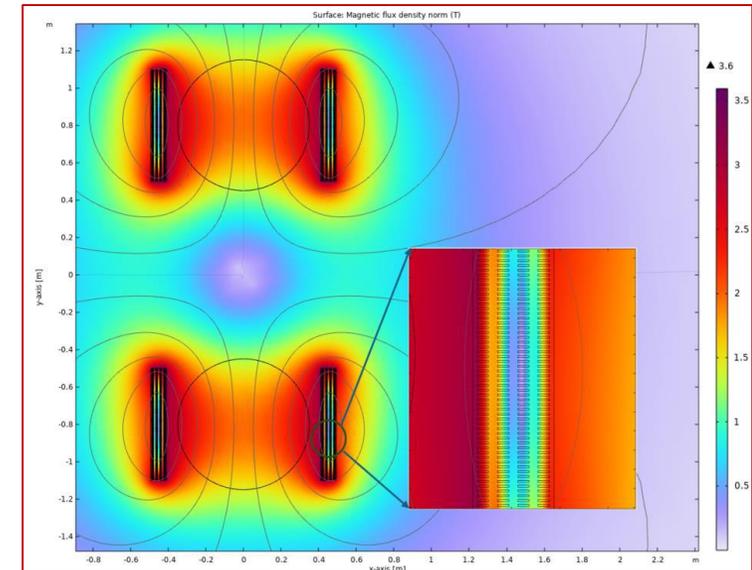
Warum ist das so kompliziert?

Herausforderung

- Der weltweit größte supraleitende Dipolmagnet, der nur mittels Kryokühlern gekühlt wird.
- Dipolmagnete sind schon vom Typ her kompliziert, da die Kräfteverteilung ungünstig ist (im Vergleich zu Solenoiden).
- Einfachheitshalber: „Flat race-track coil“ Design mit zwei Bohrungen (Dipolfeld).
⇒ Keine vertikale Formung des Supraleiters (Spule) nach dem eigentlichen Wickeln notwendig.
- Dimensionen (kalte Masse): Bohrungen mit Durchmesser = 0.7m; Länge = 11m; $B = 2.1\text{T}$; Gewicht >40 Tonnen.
- Optimiertes thermisches Design, da die Anzahl der Kryokühler platzbedingt begrenzt ist.



Kalte Masse inklusive Stützstruktur



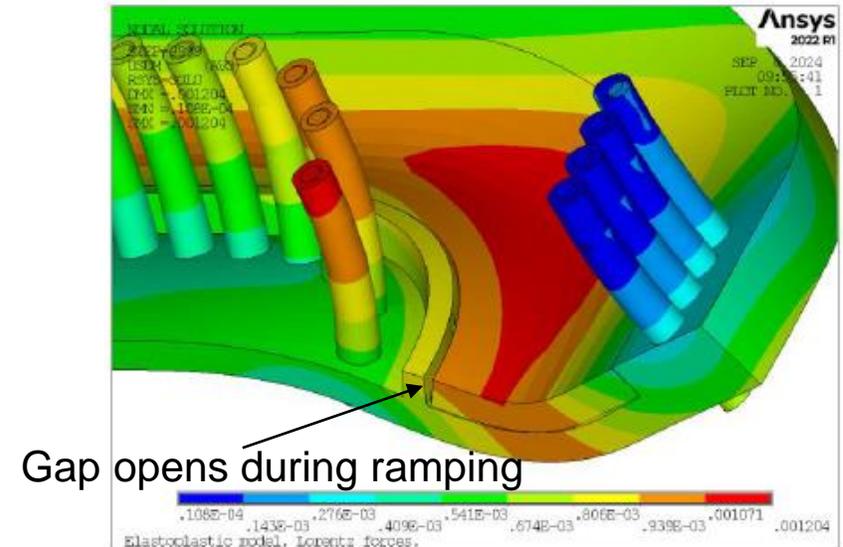
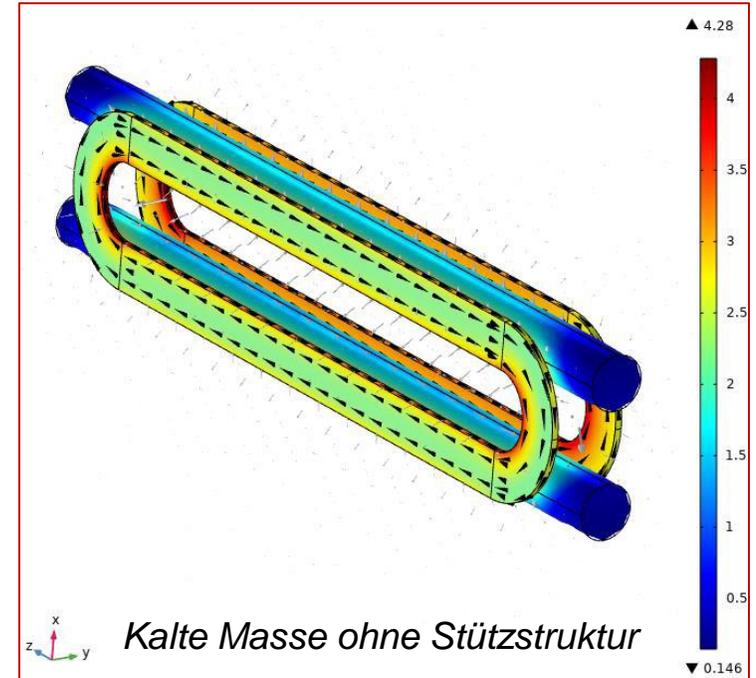
Magnetfeldkartierung

Die kalte Masse...

Was gilt für die Mechanik?

Mechanische Anforderung an die Bauteile

- Die Kräfte in der Spule müssen im Wesentlichen Druck-/Presskräfte sein, da so die internen Bewegungen minimiert werden und die Materialien hiergegen robust sind.
- Zugkräfte müssen vermieden werden, da sie den Leiter plastisch verformen und die Imprägnierung (Kleber) beschädigen können.
 - ⇒ Risse führen zu unerwünschten partieller Erwärmung (Trainingseffekt / Quench); ein Wiederabkühlen wäre sehr zeitaufwendig (Kryocooler).



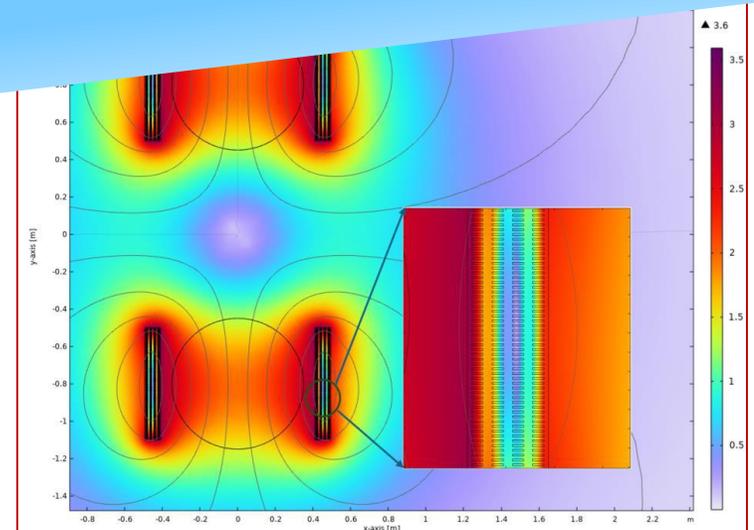
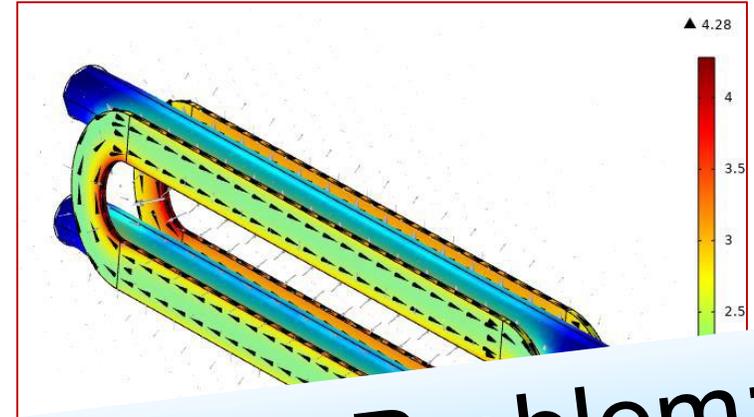
Die kalte Masse...

Was gilt für die Mechanik?

Mechanische Anforderung an die Bauteile

- Die Kräfte in der Spule müssen im Wesentlichen Druck-/Presskräfte sein, da so die internen Bewegungen minimiert werden und die Materialien hiergegen robust sind.

Ist das alles gelöst, kommt das nächste Problem:
Wie kühle ich das alles zuverlässig auf 4.2 K
ohne Kälteanlage?



Magnetfeldkartierung

Die kalte Masse...

Was gilt für die Materialien?

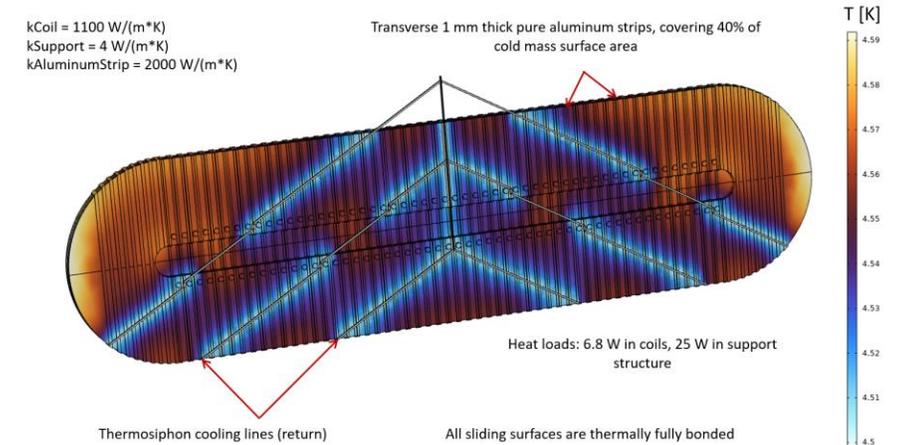
Thermische Anforderung an die Bauteile

Der Bau der Spulen (zwei „Double pancakes“ pro Seite) muss so erfolgen, dass folgende Eigenschaften berücksichtigt werden:

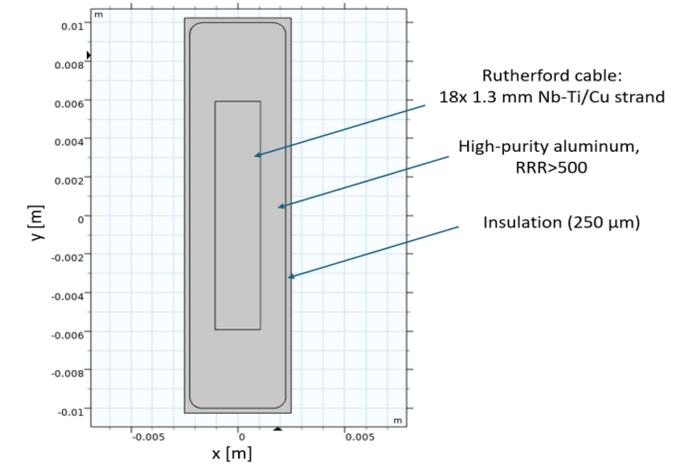
- Gute thermische Anbindung an Kühlung.
- Ähnliche thermische Ausdehnungskoeffizienten.

⇒ Der Supraleiter ist von einem Profil aus hochreinem Aluminium (hohe Wärmeleitfähigkeit bei tiefen Temperaturen) umgeben.

⇒ Selbstregulierende Siphonkühlung (s.u.).



Kalte Masse mit Kühlrohren (Siphonprinzip)



Al stabilisierter Leiter (Fließpresst)

Die kalte Masse...

Was gilt für die Materialien?

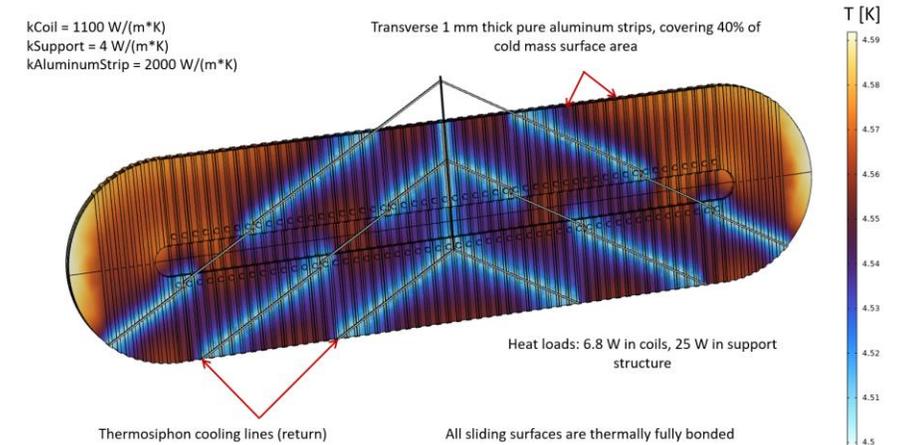
Thermische Anforderung an die Bauteile

Der Bau der Spulen (zwei „Double pancakes“ pro Seite) muss so erfolgen, dass folgende Eigenschaften berücksichtigt werden:

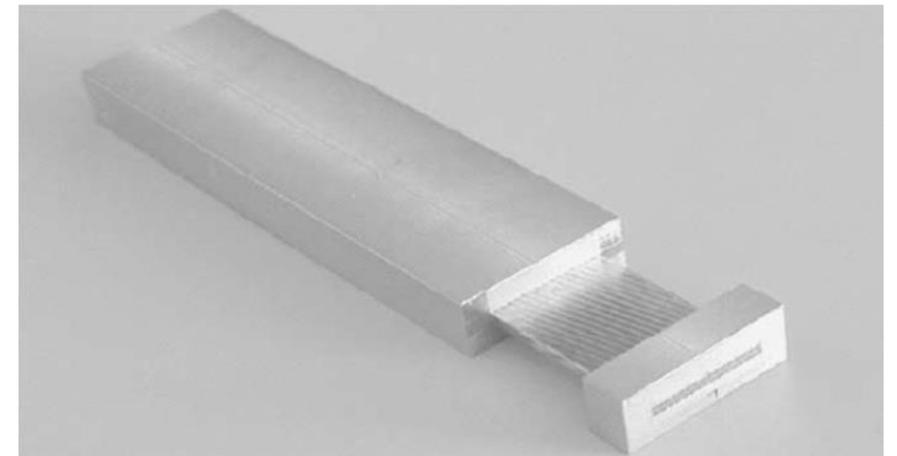
- Gute thermische Anbindung an Kühlung.
- Ähnliche thermische Ausdehnungskoeffizienten.

⇒ Der Supraleiter ist von einem Profil aus hochreinem Aluminium (hohe Wärmeleitfähigkeit bei tiefen Temperaturen) umgeben.

⇒ Selbstregulierende Siphonkühlung (s.u.).



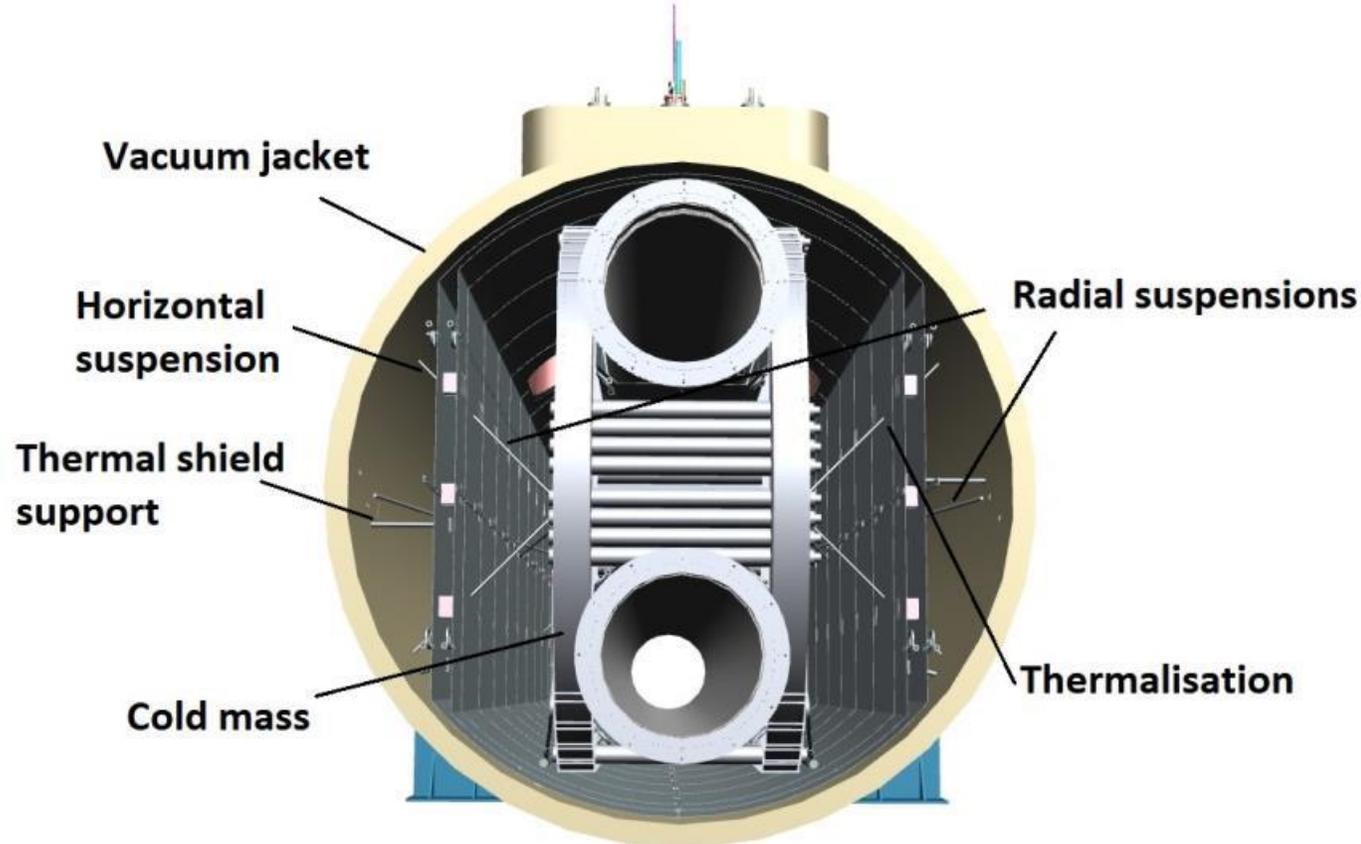
Kalte Masse mit Kühlrohren (Siphonprinzip)



Al stabilisierter Leiter (Fließgespresst)

Die kalte Masse...

Integration in den Kryostaten & Kryotechnik



Wärmeeinträge minimalisieren:

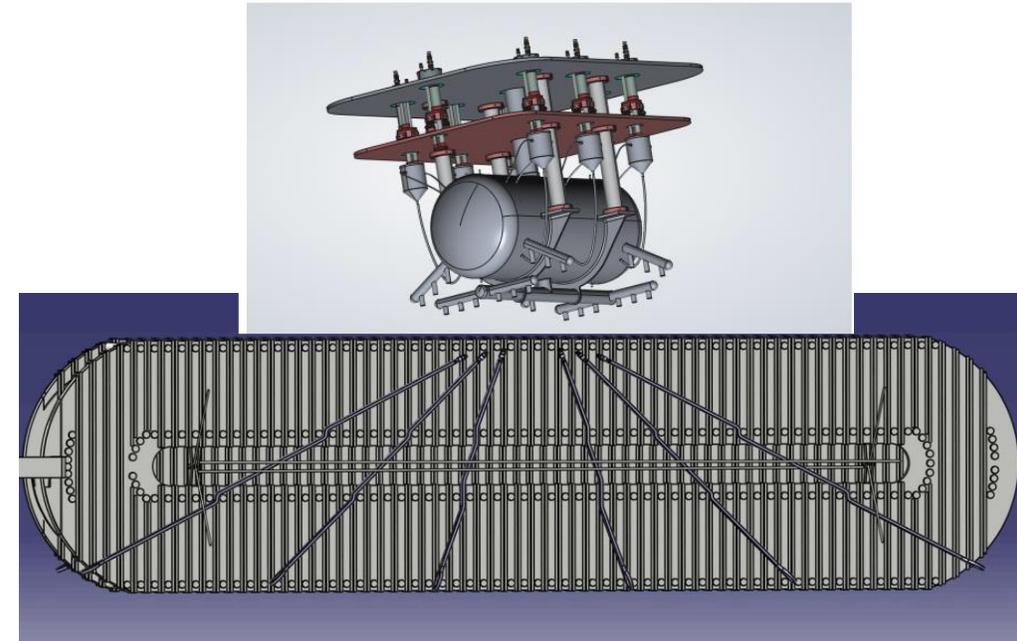
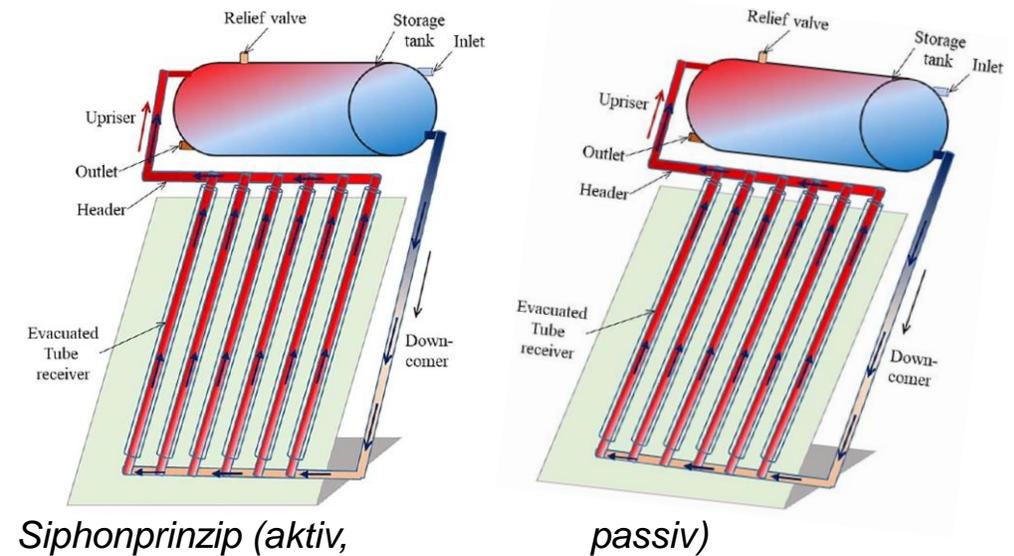
- Wärmestrahlung
 - ⇒ Thermische Schilde (25K, 50K)
 - ⇒ MLI
- Aufhängungen (Wärmeleitung λ)
 - ⇒ Minimierung der Anzahl
 - ⇒ Dimensionierung (λ , Kräfte)
 - ⇒ Thermalisierung (25K, 50K)
 - ⇒ Vakuum ($<1E-04\text{mbar}$)
- Verluste während des Ladevorgangs
 - ⇒ Anpassung der Rampgeschwindigkeit (AC Verluste)
 - ⇒ HTS basiert (Minimierung dissipierte Wärme in den Stromzuführungen)
 - ⇒ Gute Verbindung der Supraleiter (Ohmsche Verluste)

Die kalte Masse...

Thermische Anbindung und Kühlkonzept...

Siphon Kühlung

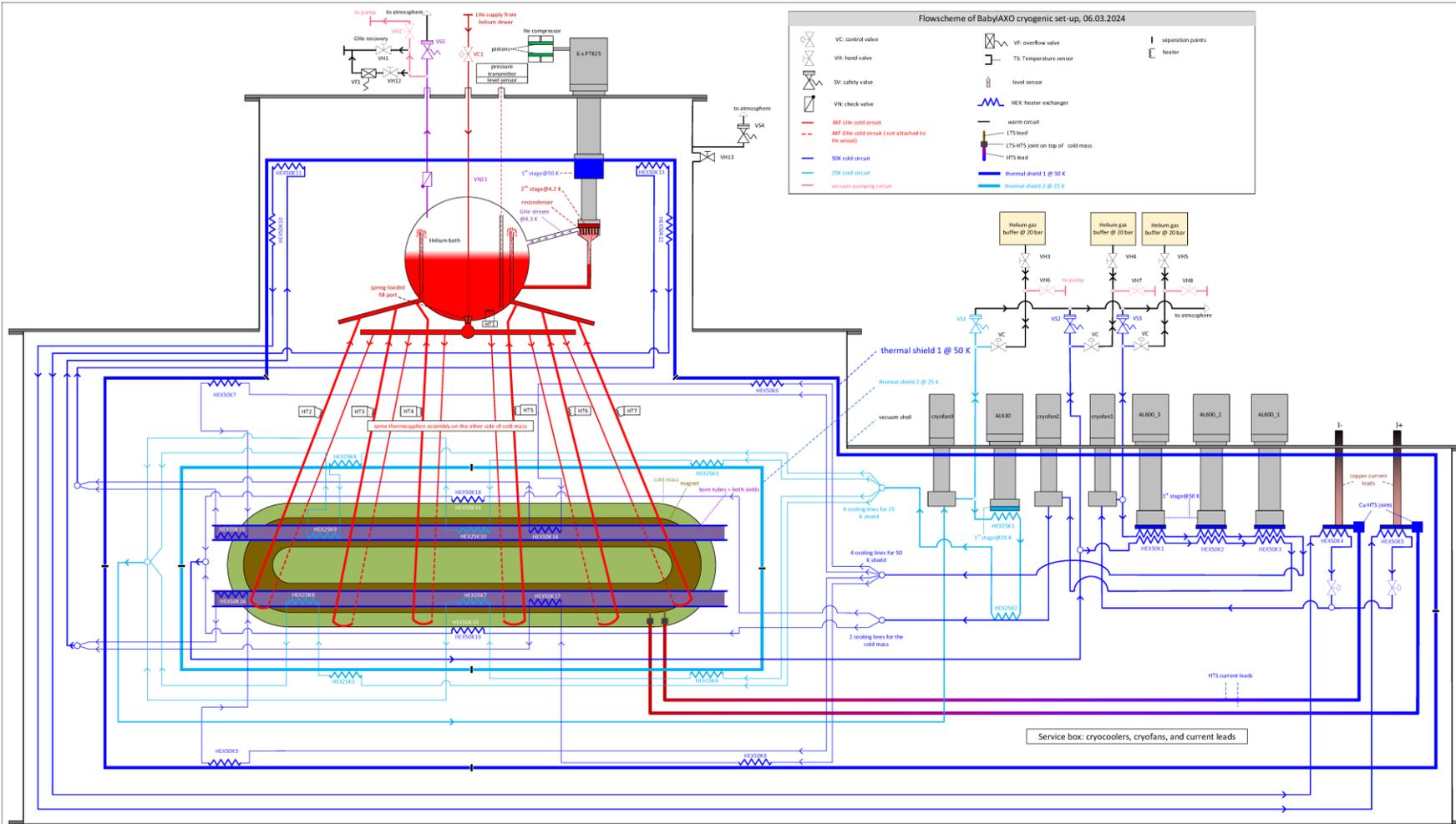
- Der Wärmeeintrag erwärmt und verdampft ein Teil des Helium; es kommt zur Konvektion und Blasenbildung (2-Phasen Helium)
- Das warme Helium steigt auf und wird oben an den Rekondensatoren wieder abgekühlt => Zirkulation
- Ist der Winkel $>5^\circ$ zur Waagerechten (in jeder Magnetposition!), dann sprechen wir von einem aktiven Siphon (Blasen steigen auf Grund der Gravitation auf und „reißen“ das LHe mit).
- Je höher der Wärmefluss, umso höher der Massenstrom (LHe) => selbstregulierende Kühlung.
- Leitungen, mit LHe gefüllt, sind gut thermisch an dem zu kühlenden Bauteil angebunden.



Kalte Masse mit Kühlrohren (Siphonprinzip)

Die Magnetkühlung

Kühlkonzept...



Kühlkonzept:

- Kühlung der Kalten Masse mittels Siphonkonzept (Rückverflüssigung mit 6-8 PT425)
- Die Kalte Masse ist von 2 thermischen Schilden umgeben mit $T=25\text{K}$ (1 AL630 Kühler) und $T=50\text{K}$ (3 AL600) und Cryofans
- Zusätzliche Kühlung der Stromzuführungen bei 50K (auch mit den 3 Als)
- Kühlschleife zum Abkühlen des Magneten mit allen Kühlern zusammen (extra Schleife)

Die Magnetkühlung

Bauteile für die Kühlung...

PT425-RM

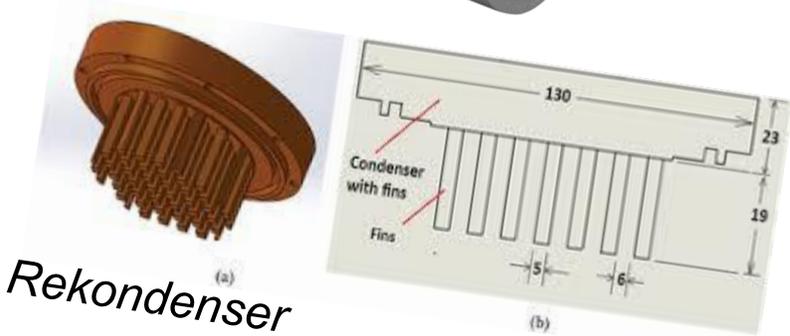


AL600



Wärmetauscher

AL630



Rekondensator



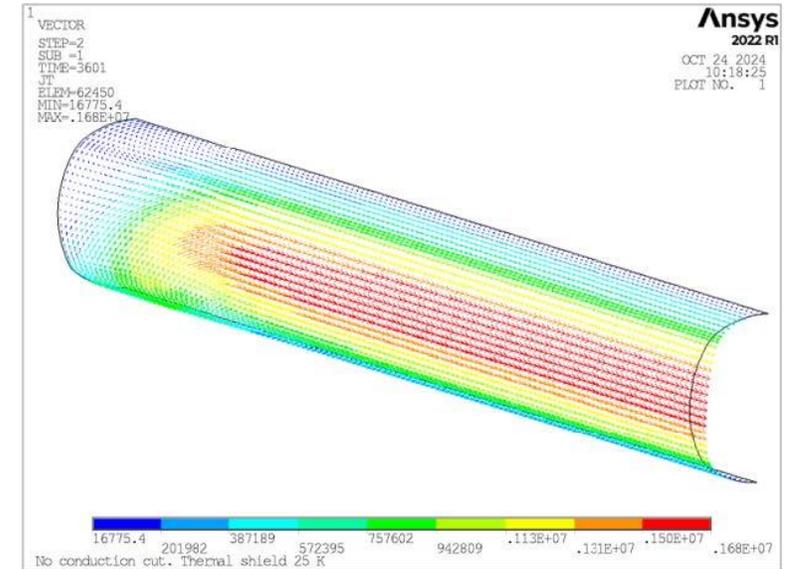
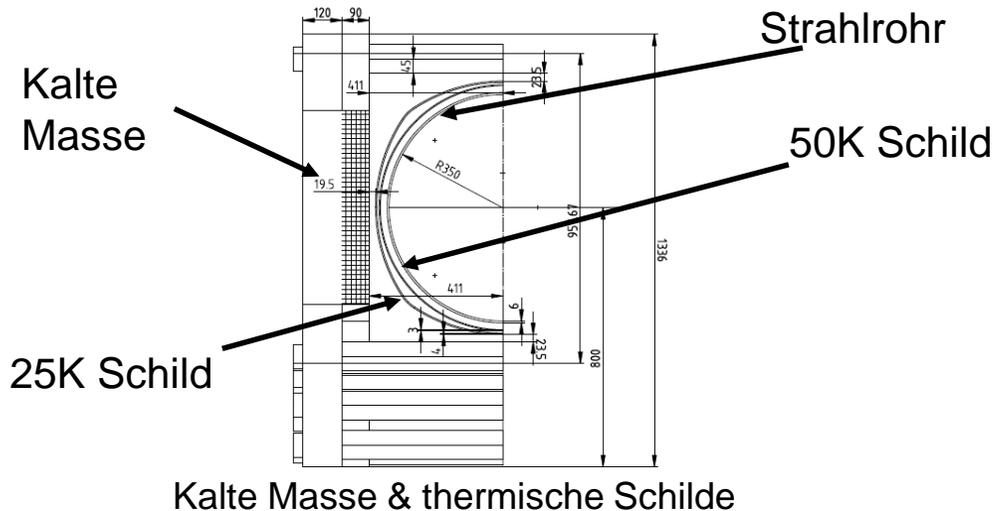
Cryoventilatoren

Magnet – weiteres Engineering

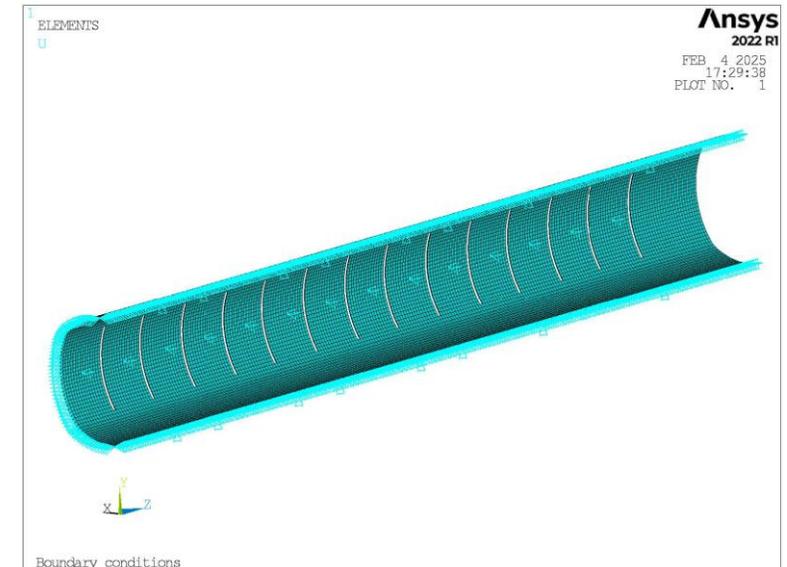
Mechanische Betrachtung der thermischen Schilde

Anforderungen an die thermischen Schilde

- Resultierende elektromagnetische Kräfte durch WW von B-Feld und Wirbelströmen: Bis zu 35 kN.
- Problemlösung: Unterbrechung der Wirbelströme durch longitudinales (an den Polen) und axiales Teilen des Schildes sowie der Integration von radialen Schlitzen.



Stromdichte (FEM)



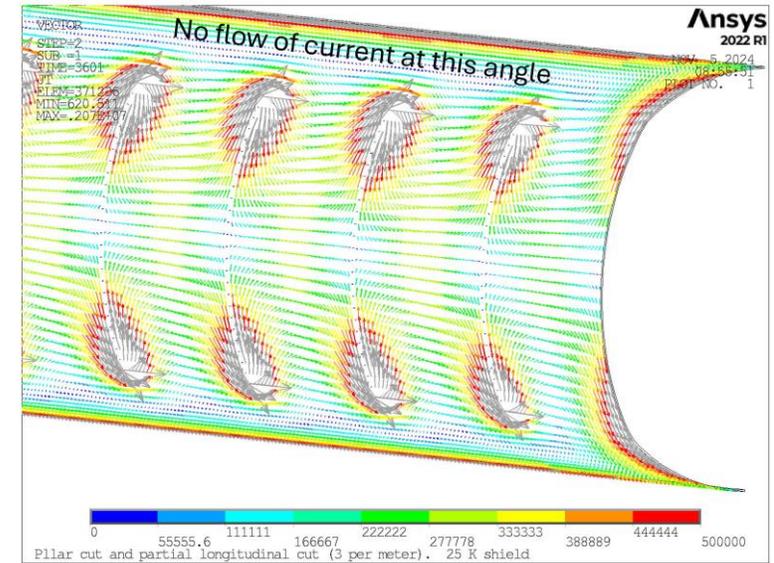
Finale Schildgeometrie

Magnet – weiteres Engineering

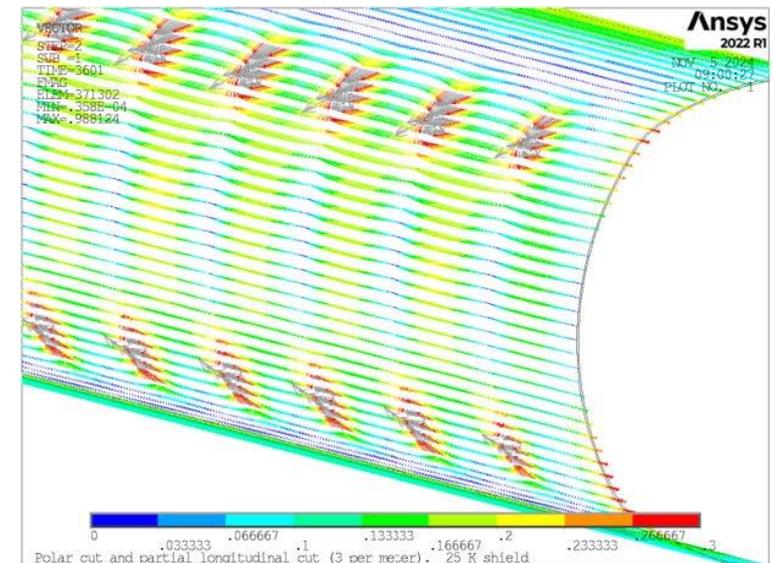
Mechanische Betrachtung der thermischen Schilde

Anforderungen an die thermischen Schilde

- Resultierende elektromagnetische Kräfte: Bis zu 35 kN.
- Problemlösung: Unterbrechung der Wirbelströme durch longitudinales (an den Polen) und axiales Teilen des Schildes sowie der Integration von radialen Schlitzen.
- Ergebnis:
 - ⇒ Reduzierung der Kräfte auf 3kN.
 - ⇒ 3mm Blechdicke ist ausreichend, um plastische Verformung zu vermeiden.
 - ⇒ Berücksichtigung der thermischen Eigenschaften liefert finale Dicke von 4mm.



Stromdichte (FEM)



Knotenkräfte (FEM)

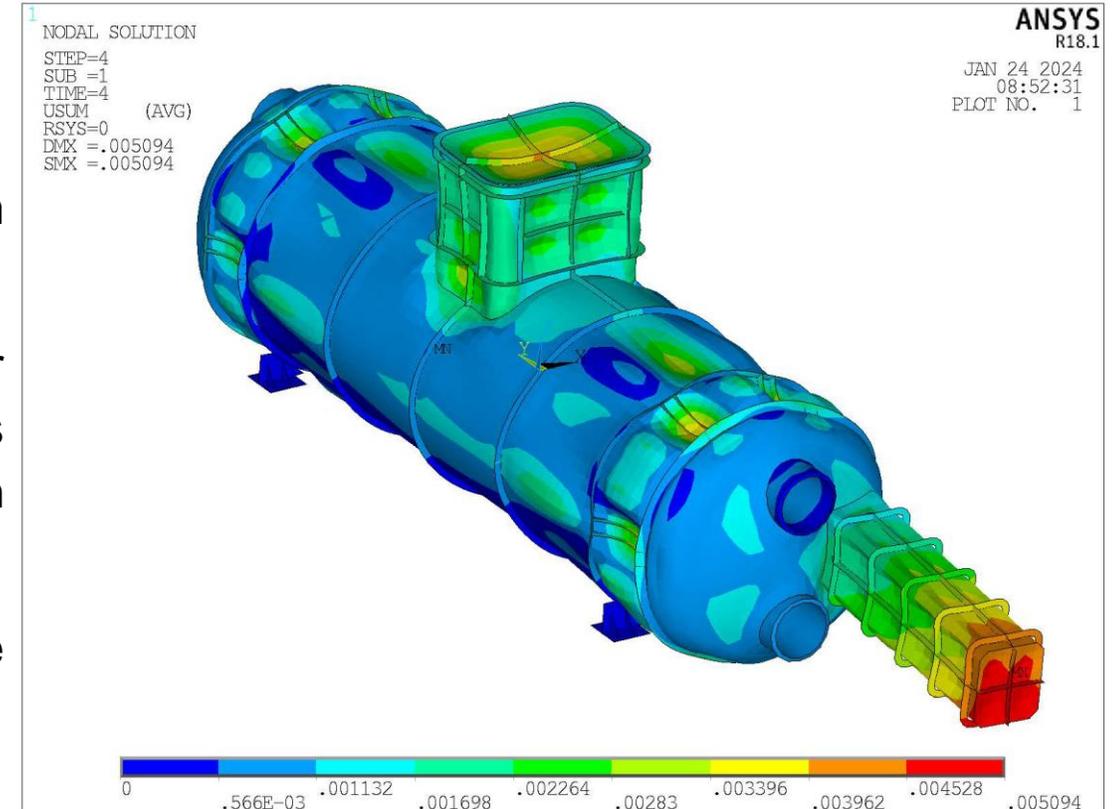
Magnet – weiteres Engineering

Mechanische Betrachtung des Vakuumbehälters

Verformungsbetrachtung des äußeren Vakuumbehälters:

- Was muss betrachtet werden?
 - Vakuumkräfte
 - Neigung: Während des Betriebs $\pm 26^\circ$, aber beim Herablassen in HERA-Süd $\pm 65^\circ$
 - Thermische Kräfte: Thermische Schrumpfung der kalten Masse und der Schilde während des Abkühlens. Hieraus resultieren punktuelle Kräfte an den Aufhängepunkten, die recht hoch sein können.
 - Um das Gewicht zu reduzieren ohne die mechanische Stabilität zu verlieren, werden Rippen eingearbeitet.

Ergebnis: Thermische Effekte sind dominierend!

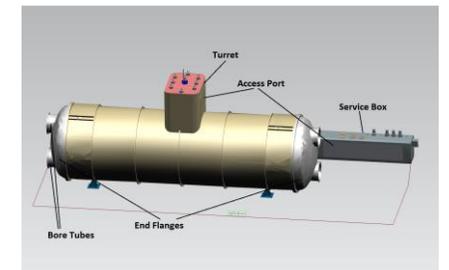
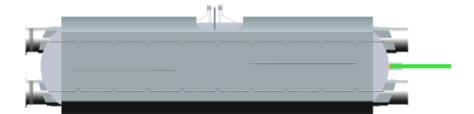
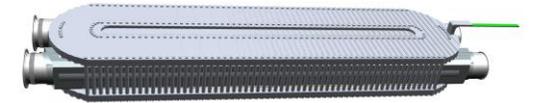
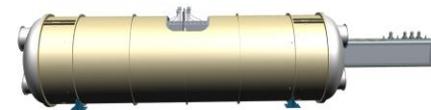
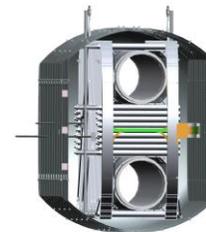
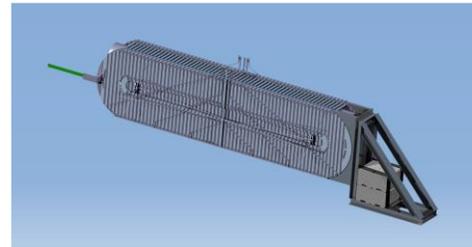
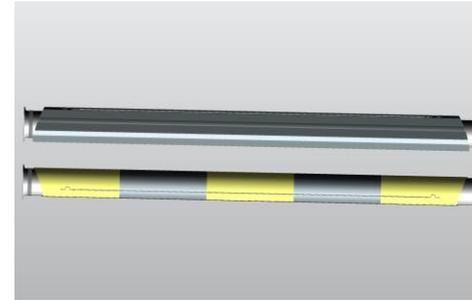


Verformung des Vakuumbehälters (vorläufige FEM)

Magnetbau

Zusammenbau

- Zusammenbau des Magneten muss gut geplant werden.
- Die Werkzeuge für den Zusammenbau werden bereits früh identifiziert
 - Bau der Spule (Kabelisolation, Wickeln, Verbindung der Leiter, Imprägnierung, etc.)
 - Temporäre Aufhängungen
 - Kragarm
- Identifikation von Demonstrator und Mock-ups
 - Test des Supraleiters
 - Kupferdummy zur Verifizierung des Wicklungsprozesses
 - Mechanischer und thermischer Demonstrator (runterskalierter Aufbau)
 - Unterbaugruppen
- Begleitend: Aufwendige Qualitätskontrolle



Magnetbau

BabyIAXO Magnet

Zusammenfassung

Kurz und bündig:

- Der Bau von großen supraleitenden Dipolmagneten ist anspruchsvoll und herausfordernd.
- Insbesondere die Kräfteverteilung im kaltem Bereich muss detailliert betrachtet werden.
- Ein neues Kühlkonzept basierend auf der Nutzung von Kryokühlern wurde entwickelt.
- Der Zusammenbau wurde simuliert und entsprechende Werkzeuge identifiziert.
- Die Einbindung der Qualitätskontrolle erfolgte bereits zu einem frühen Zeitpunkt.

Ausblick:

- CDR ist beinahe fertig.
- Nächster Schritt: Definition des finalen Designs (TDR & MTS).
- Finanzierung noch in Arbeit, aber bereits positive Zeichen aus der Politik (auch eingebunden in Exzellenzcluster mehrerer Universitäten sowie DFG-Vorschläge).
- Geplanter Baustart: 2027.

Vielen Dank!

Kontakt

Deutsches Elektronen-
Synchrotron DESY

www.desy.de

Jörn Schaffran

ALPS

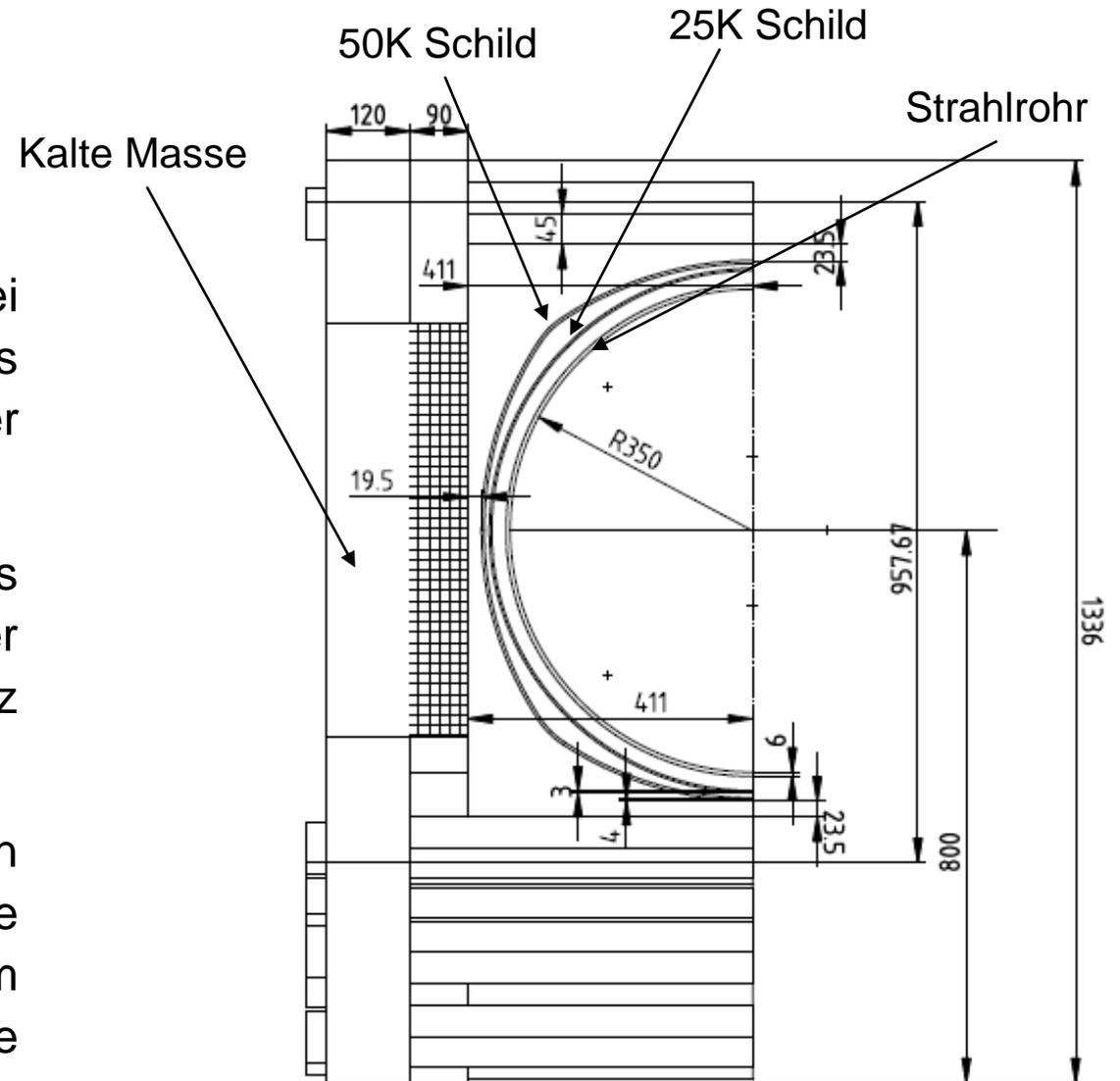
Joern.schaffran@desy.de

Backup-Magnet

Mechanische Betrachtung der thermischen Schilde

Anforderungen an die thermischen Schilde

- Es gibt 2 thermische Schilde (25K & 50K), wobei jedes sowohl aus einem Außen- (kalte Masse) als auch Innenteil (Strahlrohre) besteht => hier betrachten wir die Innenteile, da ungünstigerer Fall.
- Der Temperaturgradient über ein thermisches Schilde darf nicht hoch sein ($\pm 5\text{K}$) => minimierter Wärmeeintrag (Material: Aluminium) => kein Platz aber möglichst hohe Stabilität.
- Problem: Während des Hochfahrens des Magneten werden in den Aluminiumblechen Wirbelströme erzeugt, die wiederum in Wechselwirkung mit dem Magnetfeld treten => hohe Lorenzkkräfte auf die Schilde!



Kalte Masse & thermische Schilde