

**ACCEL****Report/  
Bericht**

Report Number/  
Berichtsnummer 1812 – BP – 7432 – 0

---

Place/Ort Bergisch Gladbach Date/Datum 1. Oktober 2007

---

Subject/Thema  
**Barrel-Magnet  
für Uni Bonn**

Author/  
Verfasser Phone/  
Telefon Signature/  
Unterschrift

A. Hobl 2592  
M. Meyer-Reumers 3528

---

Project/Projekt  
**Barrel-Magnet-Studie  
Project-No. 1812**

Release/  
Freigabe  
Dr. D. Krischel 4051

---

Distribution/Verteiler:  
Prof. Beck, Uni Bonn  
DKR, MMR, AHO

---

**Zusammenfassung**

In der vorliegenden Machbarkeitsstudie wird untersucht, wie ein supraleitender Magnet einen existierenden normalleitenden Aluminiumleiter-Solenoiden unter Beibehaltung der Eisenabschirmung ersetzen kann. Hierbei soll die magnetische Flußdichte auf 2.0 T beziehungsweise 2.5 T erhöht werden.

Die supraleitende Spule wird im Hinblick auf Homogenität und Supraleitereigenschaften ausgelegt. Die magnetische Abschirmung wird untersucht.

Zusätzlich zu einem Kryostatdesign mit rekondensierenden Kryokühlern im Turm und der Spule im Heliumbad werden weitere Alternativen vorgestellt und bewertet.

## Inhalt

Zusammenfassung .....	1
1 Einleitung .....	4
2 Magnetische Auslegung .....	5
2.1 Geometrie .....	5
2.2 Materialdaten .....	7
2.3 Leiterdaten .....	8
2.4 Ergebnisse .....	8
2.4.1 Feldverläufe und Feldhomogenität .....	8
2.4.2 Streufelder .....	18
2.4.3 Auslastung der Loadline .....	26
2.4.4 Kräfte, Energie und Induktivität .....	31
3 Quenchsicherheit .....	33
4 Kryostat .....	34
4.1 Konstruktion .....	34
4.2 Kryobilanz .....	35
4.2.1 Kryostat mit Versorgungsturm .....	35
4.2.2 Externer Versorgungskryostat .....	36
4.3 Alternative Kryokonzepte .....	37
4.3.1 Heliumkreislauf als Konvektionskreis .....	37
4.3.2 Kryogenfreies System .....	37
5 Netzgerät .....	39
6 Konstruktionsentwurf .....	40

## Abbildungen

Abbildung 1: Modellgeometrie .....	5
Abbildung 2: Spulenabmessungen in mm .....	6
Abbildung 3: BH – Kurve ST-37.....	7
Abbildung 4: Feldverlauf auf der Achse für $B_{(0,0,0)} = 2.5 \text{ T}$ .....	8
Abbildung 5: Feldverlauf auf der Achse für $B_{(0,0,0)} = 2.0 \text{ T}$ .....	9
Abbildung 6: $ B  \text{ [T]}$ in der xy – Ebene, $ B _{(0,0,0)} = 2.5 \text{ T}$ .....	10
Abbildung 7: $ B  \text{ [T]}$ in der xy – Ebene, $ B _{(0,0,0)} = 2.0 \text{ T}$ .....	11
Abbildung 8: $ B  \text{ [T]}$ in der yz – Ebene, $ B _{(0,0,0)} = 2.5 \text{ T}$ .....	12
Abbildung 9: $ B  \text{ [T]}$ in der yz – Ebene, $ B _{(0,0,0)} = 2.0 \text{ T}$ .....	13
Abbildung 10: Feldhomogenität [%] in yz – Ebene, $ B _{(0,0,0)} = 2.5 \text{ T}$ .....	14
Abbildung 11: Feldhomogenität [%] in yz – Ebene, $ B _{(0,0,0)} = 2.0 \text{ T}$ .....	15
Abbildung 12: Feldhomogenität [%] in yz – Ebene mit begrenzter Skala, $ B _{(0,0,0)} = 2.5 \text{ T}$ .....	16
Abbildung 13: Feldhomogenität [%] in yz – Ebene mit begrenzter Skala, $ B _{(0,0,0)} = 2.0 \text{ T}$ .....	17
Abbildung 14: Streufeld $ B  \text{ [T]}$ in der xy – Ebene, $ B _{(0,0,0)} = 2.5 \text{ T}$ .....	18
Abbildung 15: Streufeld $ B  \text{ [T]}$ in der xy – Ebene, $ B _{(0,0,0)} = 2.0 \text{ T}$ .....	19
Abbildung 16: Streufeld $ B  \text{ [T]}$ in der XZ – Ebene, $ B _{(0,0,0)} = 2.5 \text{ T}$ .....	20
Abbildung 17: Streufeld $ B  \text{ [T]}$ in der XZ – Ebene, $ B _{(0,0,0)} = 2.0 \text{ T}$ .....	21
Abbildung 18: $ B  \text{ [T]}$ auf der Eisenoberfläche, $B_{(0,0,0)} = 2.5 \text{ T}$ .....	22
Abbildung 19: $ B  \text{ [T]}$ auf der Eisenoberfläche, $B_{(0,0,0)} = 2.0 \text{ T}$ .....	23
Abbildung 20: Magnetische Polarisierung $J \text{ [T]}$ auf der Eisenoberfläche, $B_{(0,0,0)} = 2.5 \text{ T}$ .....	24
Abbildung 21: Magnetische Polarisierung $J \text{ [T]}$ auf der Eisenoberfläche, $B_{(0,0,0)} = 2.0 \text{ T}$ .....	25
Abbildung 22: Schematische Darstellung einer Loadline.....	26
Abbildung 23: $ B  \text{ [T]}$ auf der Spulenoberfläche, $B_{(0,0,0)} = 2.5 \text{ T}$ .....	27
Abbildung 24: Loadline für ein Zentralfeld von $B_{(0,0,0)} = 2.5 \text{ T}$ .....	28
Abbildung 25: $ B  \text{ [T]}$ auf der Spulenoberfläche, $B_{(0,0,0)} = 2.0 \text{ T}$ .....	29
Abbildung 26: Loadline für ein Zentralfeld von $B_{(0,0,0)} = 2.0 \text{ T}$ .....	30
Abbildung 27: Externer Versorgungskryostat am Beispiel eines supraleitenden Zyklotrons.....	35
Abbildung 28: Seitenansicht eines bauähnlichen Kryostaten inklusive der verdeckten Bauteile	41
Abbildung 29: Ansicht eines bauähnlichen Kryostaten in Achsrichtung inklusive der verdeckten Bauteile .....	42

## Tabellen

Tabelle 1: Spulenkräfte, $ B (0,0,0) = 2.5 \text{ T}$ .....	31
Tabelle 2: Spulenkräfte, $ B (0,0,0) = 2.0 \text{ T}$ .....	32
Tabelle 3: Kryostat, Baumaße .....	34
Tabelle 4: Kryobilanz, Versorgungsturm am Kryostaten, Schildtemperatur 55 K .....	36
Tabelle 5: Kryobilanz, externer Versorgungskryostat, Schildtemperatur 80 K .....	37

Reportnumber/  
Berichtsnummer 1812 – BP – 7432 – 0  
Date/Datum 1. Oktober 2007  
Page/Seite 4 von 42

## **1 Einleitung**

Die vorliegende Studie untersucht das Design eines Supraleitenden Solenoid-Magneten, der bis zu 2.5 T auf der magnetischen Achse erzeugt. Der Magnet soll zur Reduktion des Streufeldes in ein bereits existierendes Eisenjoch eingesetzt werden.

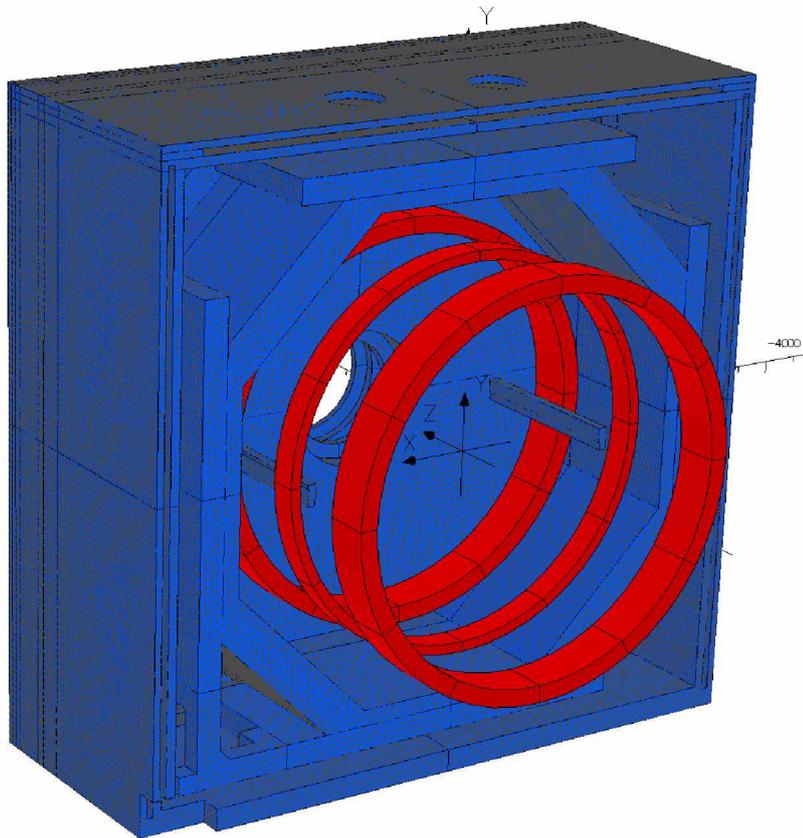
Verschiedene Spulenkonfigurationen und Kühlschemata werden untersucht im Hinblick auf Feldgenauigkeit, kryogene Kühlung und Kryostatdesign.

## 2 Magnetische Auslegung

### 2.1 Geometrie

Als Grundlage für das FEM Modell dient ein CAD Modell der Universität Bonn. Das CAD Modell weist einen hohen Detaillierungsgrad auf. Damit das FEM Modell vernetzt werden kann, werden sehr kleine Elemente wie z.B. Bohrungen mit kleinen Durchmessern aus der Struktur entfernt. Abbildung 1 zeigt die bereits vernetzte Modellgeometrie, wie sie mit OPERA 3D nachfolgend berechnet und ausgewertet wird.

1./Okt/2007 13:11:27



Vector Fields  
 software for electromagnetic design

**Abbildung 1: Modellgeometrie**

Das im Report verwendete Koordinatensystem ist:

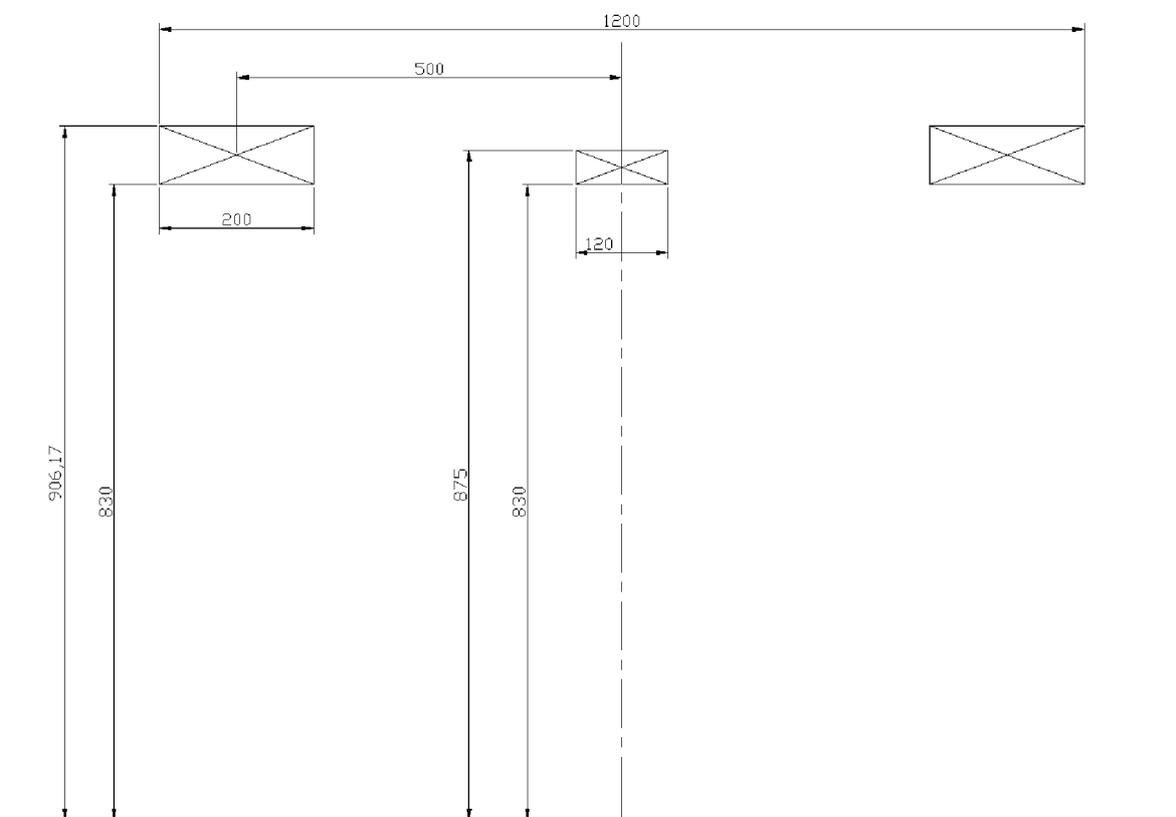
- x: horizontal, senkrecht zur Feldrichtung
- y: vertikal, senkrecht zur Feldrichtung
- z: Feldrichtung, Rotationsachse der Solenoidspulen



**ACCEL**

Reportnummer/ 1812 – BP – 7432 – 0  
Berichtsnummer  
Date/Datum 1. Oktober 2007  
Page/Seite 6 von 42

Die rot dargestellten Spulen wurden so optimiert, dass die Feldhomogenität im Bereich  $\pm 270$  mm um den Spulenmittelpunkt entlang der Magnetachse und einem Durchmesser von  $d = 540$  mm möglichst gut ist. In Abbildung 2 sind die Spulen mit Abmessungen bei einer Temperatur von  $T = 4.2$  K dargestellt. Zur besseren Darstellung ist nur die Geometrie oberhalb der Rotationsachse mit bemaßten Radien abgebildet.

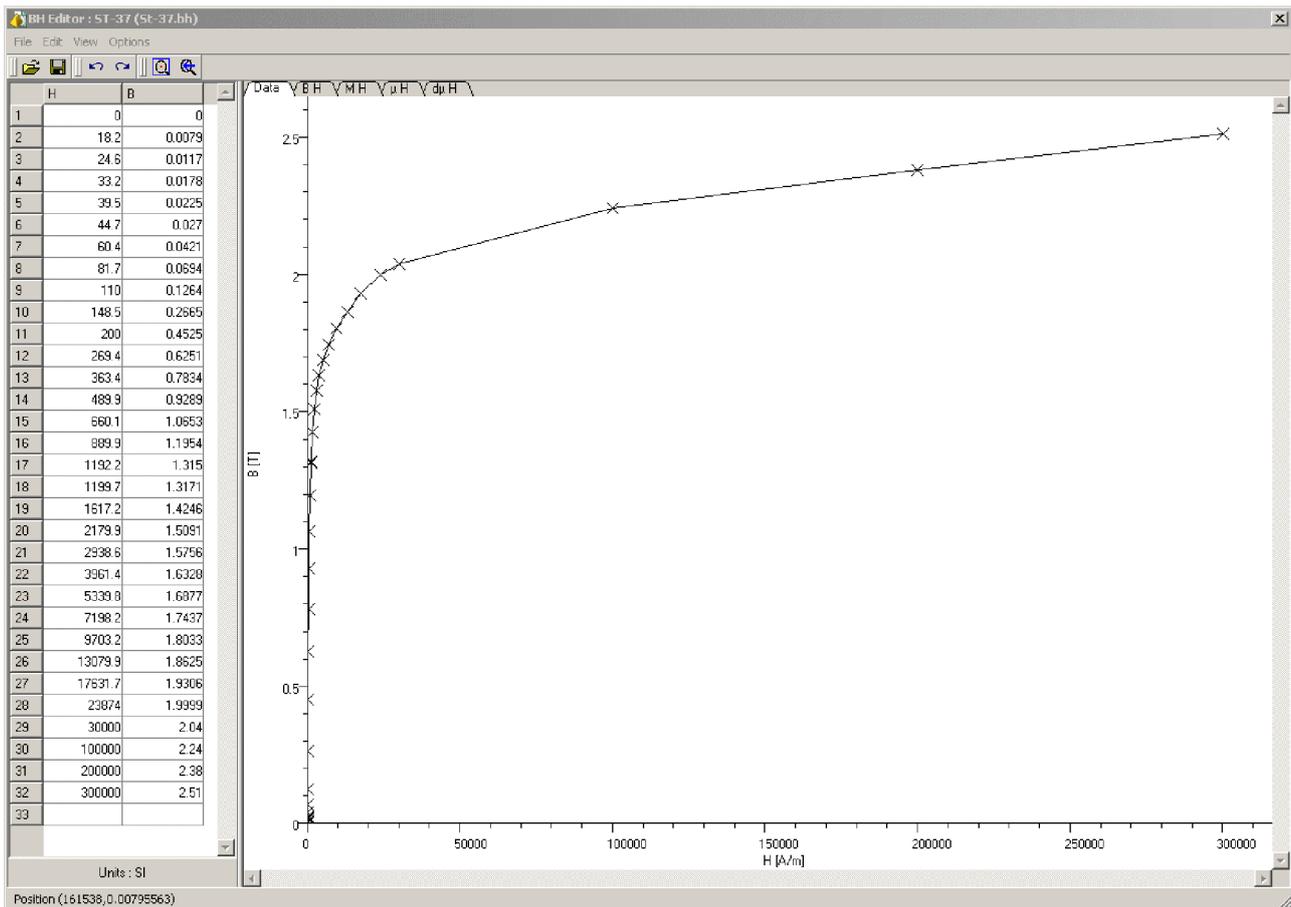


**Abbildung 2: Spulenabmessungen in mm**

Reportnummer/ 1812 – BP – 7432 – 0  
 Berichtsnummer  
 Date/Datum 1. Oktober 2007  
 Page/Seite 7 von 42

## 2.2 Materialdaten

Es liegen keine genauen Angaben über das ferromagnetische Material der bereits existierenden Eisenstruktur vor. Deshalb wird für die Berechnungen angenommen, dass die Struktur aus ST 37 besteht. Abweichungen im Verlauf der BH – Kurve des tatsächlichen Materials zur angenommenen BH – Kurve können zu Ungenauigkeiten in den Resultaten führen. So kann z.B. eine niedrigere Sättigungsmagnetisierung des Eisens zu höheren Streufeldern führen. Die Sättigungsmagnetisierung der verwendeten Kurve beträgt ca. 2.13 T. In Abbildung 3 ist die Materialkurve sowohl graphisch als auch tabellarisch dargestellt. Dabei ist die magnetische Induktion B in T und die magnetische Feldstärke H in  $\text{Am}^{-1}$  angegeben.



**Abbildung 3: BH – Kurve ST-37**



ACCEL

Reportnumber/ 1812 – BP – 7432 – 0  
 Berichtsnummer  
 Date/Datum 1. Oktober 2007  
 Page/Seite 8 von 42

## 2.3 Leiterdaten

Für die Berechnung wird ein Standardleiter des Herstellers Alstom verwendet. Kennwerte des Supraleiters:

Hersteller: Alstom  
 Bezeichnung: C36  
 Isolierter Leiterdurchmesser: 1.5 mm  
 Unisolierter Leiterdurchmesser: 1.42 mm  
 Verhältnis Kupfer zu Supraleiter: 4.1  
 Anzahl der Filamente: 36  
 Benötigte Leiterlänge: ca. 94.5 km

## 2.4 Ergebnisse

### 2.4.1 Feldverläufe und Feldhomogenität

Abbildung 4 zeigt den Verlauf der axialen Feldkomponente  $B_z$  [T] entlang der Magnetachse von  $z = -1500$  mm bis  $z = 1500$  mm bei einem Feld von  $B_z = 2.5$  T im Magnetzentrum.

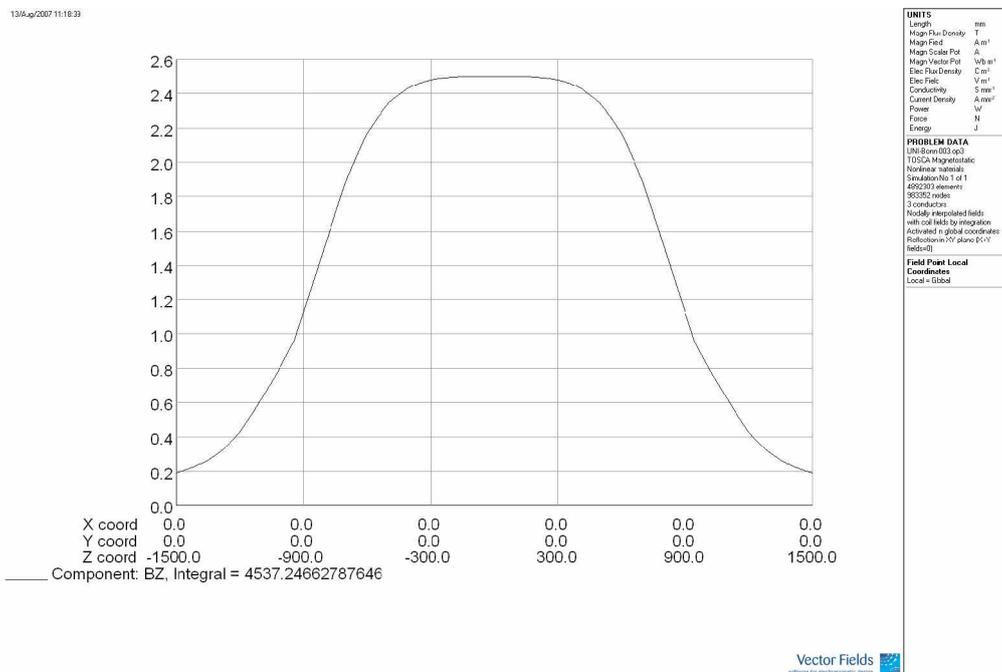


Abbildung 4: Feldverlauf auf der Achse für  $B_{(0,0,0)} = 2.5$  T

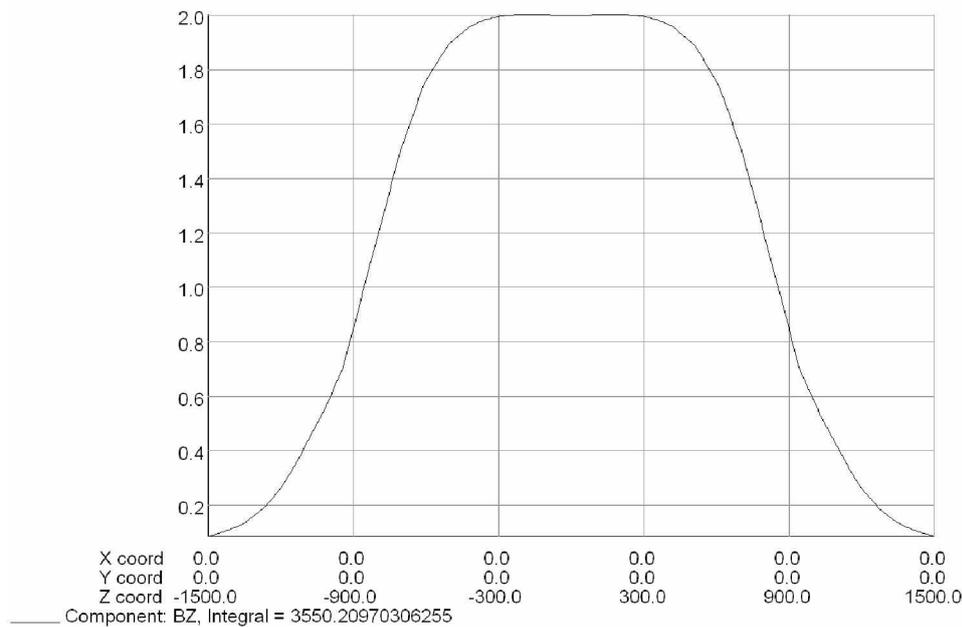


ACCEL

Reportnummer/ 1812 – BP – 7432 – 0  
Berichtsnummer  
Date/Datum 1. Oktober 2007  
Page/Seite 9 von 42

Abbildung 5 zeigt den Verlauf der axialen Feldkomponente  $B_z$  [T] entlang der Magnetachse von  $z = -1500$  mm bis  $z = 1500$  mm bei einem Feld von  $B_z = 2.0$  T im Magnetzentrum.

19/Sep/2007 12:53:56



UNITS	
Length	mm
Magn Flux Density	T
Magn Field	A m <sup>-1</sup>
Magn Scalar Pot.	A
Magn Vector Pot.	Wb/m <sup>2</sup>
Elec Flux Density	D m <sup>-2</sup>
Elec Field	V m <sup>-1</sup>
Conductivity	S mm <sup>-1</sup>
Current Density	A mm <sup>-2</sup>
Power	W
Force	N
Energy	J

PROBLEM DATA	
URL	Simu0059.vp3
TOSCA	Magnetostatic
Nonlinear materials	
Simulation No	4 of 4
4830055 elements	
500225 nodes	
3 conductors	
Nodally interpolated fields:	
with cell fields by integration	
Activated in global coordinates	
Reflection in XY plane (X/Y field=0)	

Field Point Local Coordinates	
Local	-Global

Vector Fields  
software for electromagnetic analysis

Abbildung 5: Feldverlauf auf der Achse für  $B_{(0,0,0)} = 2.0$  T



ACCEL

Reportnumber/ 1812 – BP – 7432 – 0  
Berichtsnummer  
Date/Datum 1. Oktober 2007  
Page/Seite 10 von 42

Abbildung 6 zeigt die magnetische Induktion  $|B|$  [T] im Bereich von  $x = -25$  mm bis 25 mm und  $y = -25$  mm bis 25 mm. Das Feld im Magnetzentrum beträgt  $|B|_{(0,0,0)} = 2.5$  T.

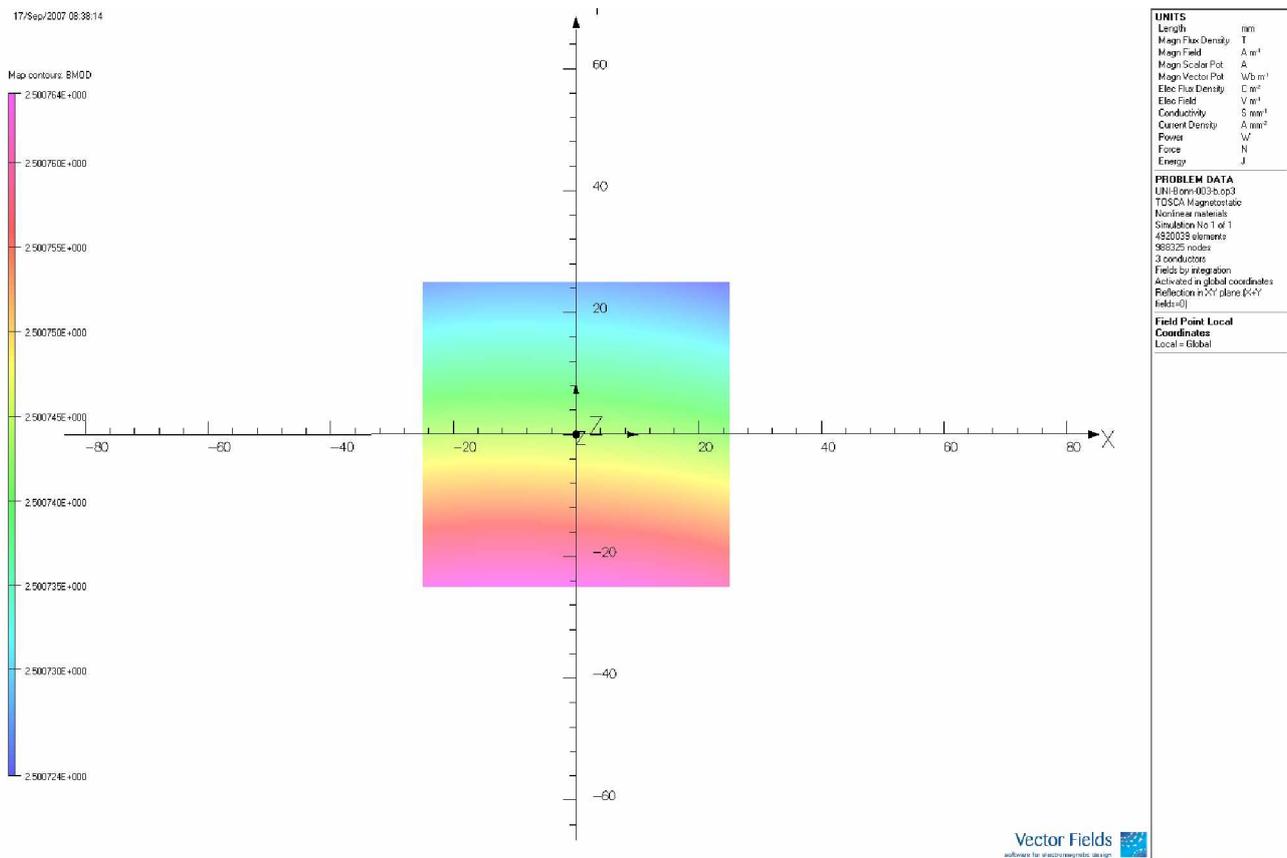


Abbildung 6:  $|B|$  [T] in der  $xy$  – Ebene,  $|B|_{(0,0,0)} = 2.5$  T



# ACCEL

Reportnumber/ 1812 – BP – 7432 – 0  
Berichtsnummer  
Date/Datum 1. Oktober 2007  
Page/Seite 11 von 42

Abbildung 7 zeigt die magnetische Induktion  $|B|$  [T] im Bereich von  $x = -25$  mm bis 25 mm und  $y = -25$  mm bis 25 mm. Das Feld im Magnetzentrum beträgt  $|B|_{(0,0,0)} = 2.0$  T.

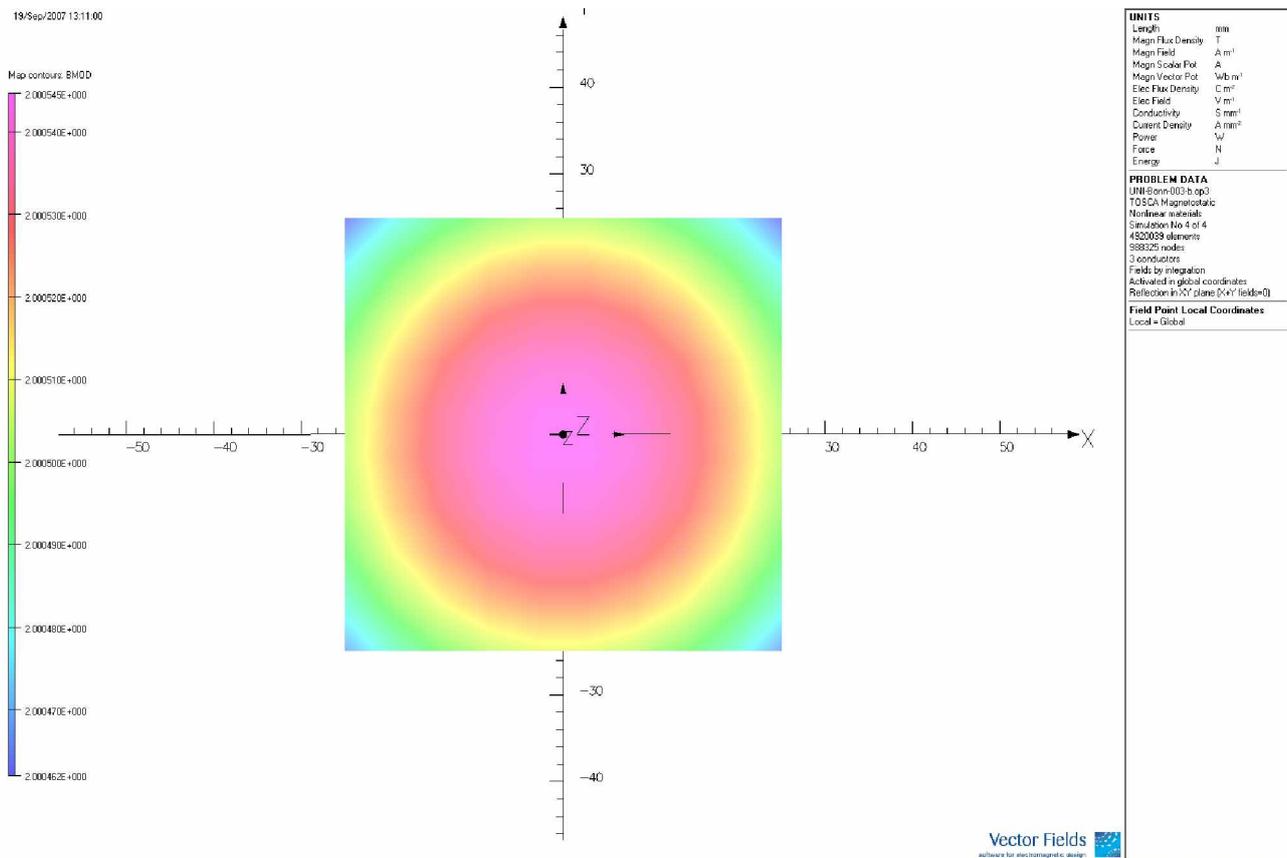


Abbildung 7:  $|B|$  [T] in der  $xy$  – Ebene,  $|B|_{(0,0,0)} = 2.0$  T



# ACCEL

Reportnumber/ 1812 – BP – 7432 – 0  
Berichtsnummer  
Date/Datum 1. Oktober 2007  
Page/Seite 12 von 42

Abbildung 8 zeigt die magnetische Induktion  $|B|$  [T] im Bereich von  $y = -25$  mm bis 25 mm und  $z = -25$  mm bis 25 mm. Das Feld im Magnetzentrum beträgt  $|B|_{(0,0,0)} = 2.5$  T.

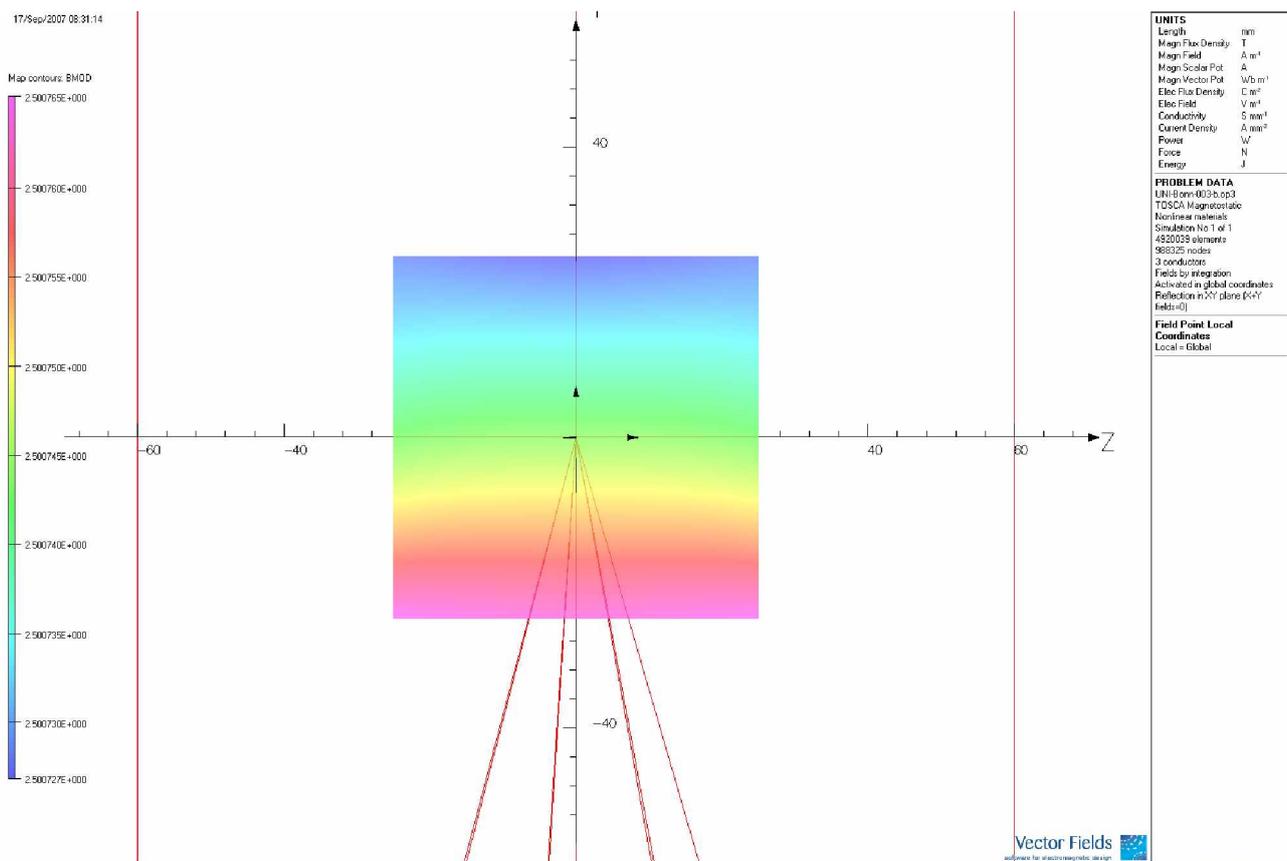


Abbildung 8:  $|B|$  [T] in der yz – Ebene,  $|B|_{(0,0,0)} = 2.5$  T



# ACCEL

Reportnumber/ 1812 – BP – 7432 – 0  
Berichtsnummer  
Date/Datum 1. Oktober 2007  
Page/Seite 13 von 42

Abbildung 9 zeigt die magnetische Induktion  $|B|$  [T] im Bereich von  $y = -25$  mm bis 25 mm und  $z = -25$  mm bis 25 mm. Das Feld im Magnetzentrum beträgt  $|B|_{(0,0,0)} = 2.0$  T.

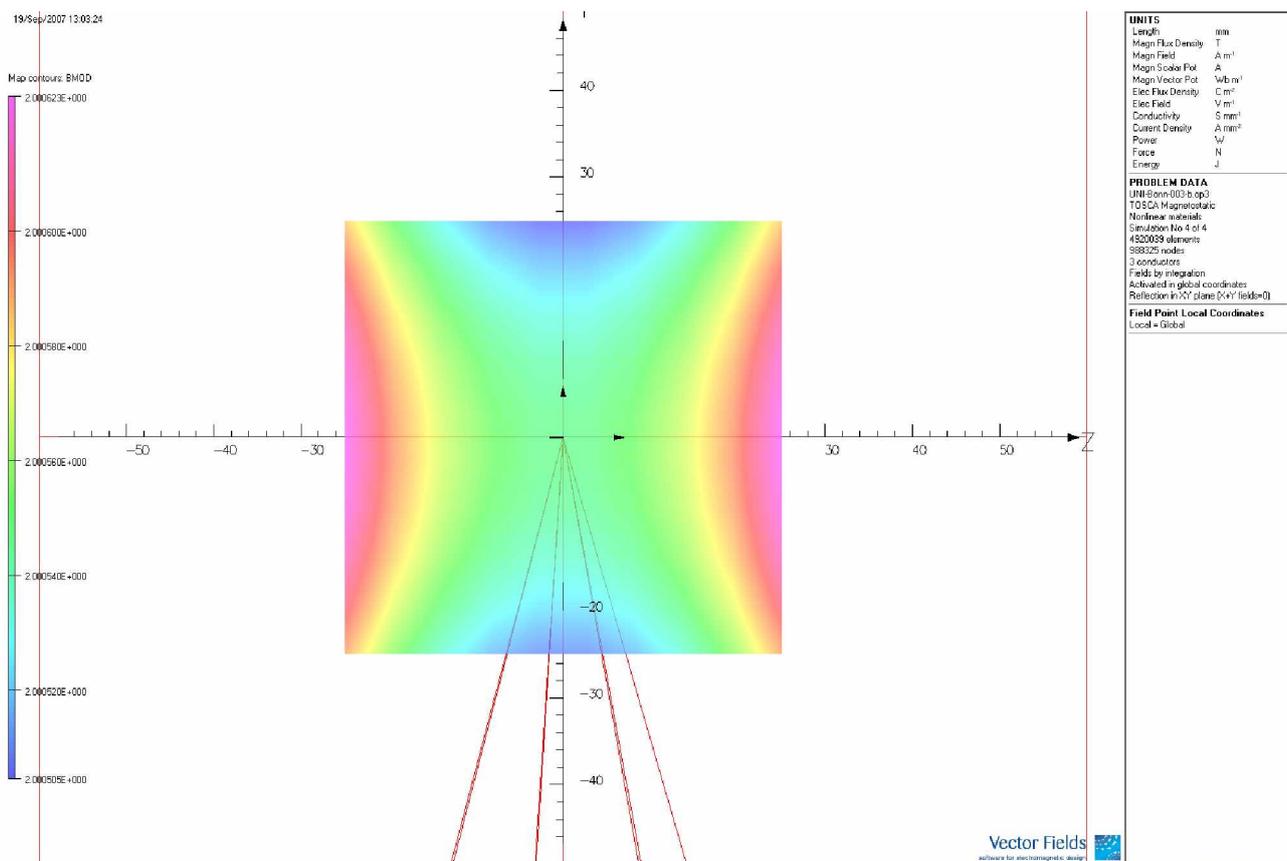


Abbildung 9:  $|B|$  [T] in der  $yz$  – Ebene,  $|B|_{(0,0,0)} = 2.0$  T



ACCEL

Reportnummer/ 1812 – BP – 7432 – 0  
Berichtsnummer  
Date/Datum 1. Oktober 2007  
Page/Seite 14 von 42

In Abbildung 10 ist die Feldhomogenität [%] in der yz – Ebene im Bereich von y = -270 mm bis y = 270 mm und z = -270 mm bis z = 270 mm dargestellt. Das Feld im Magnetzentrum beträgt  $|B|_{(0,0,0)} = 2.5 \text{ T}$ .

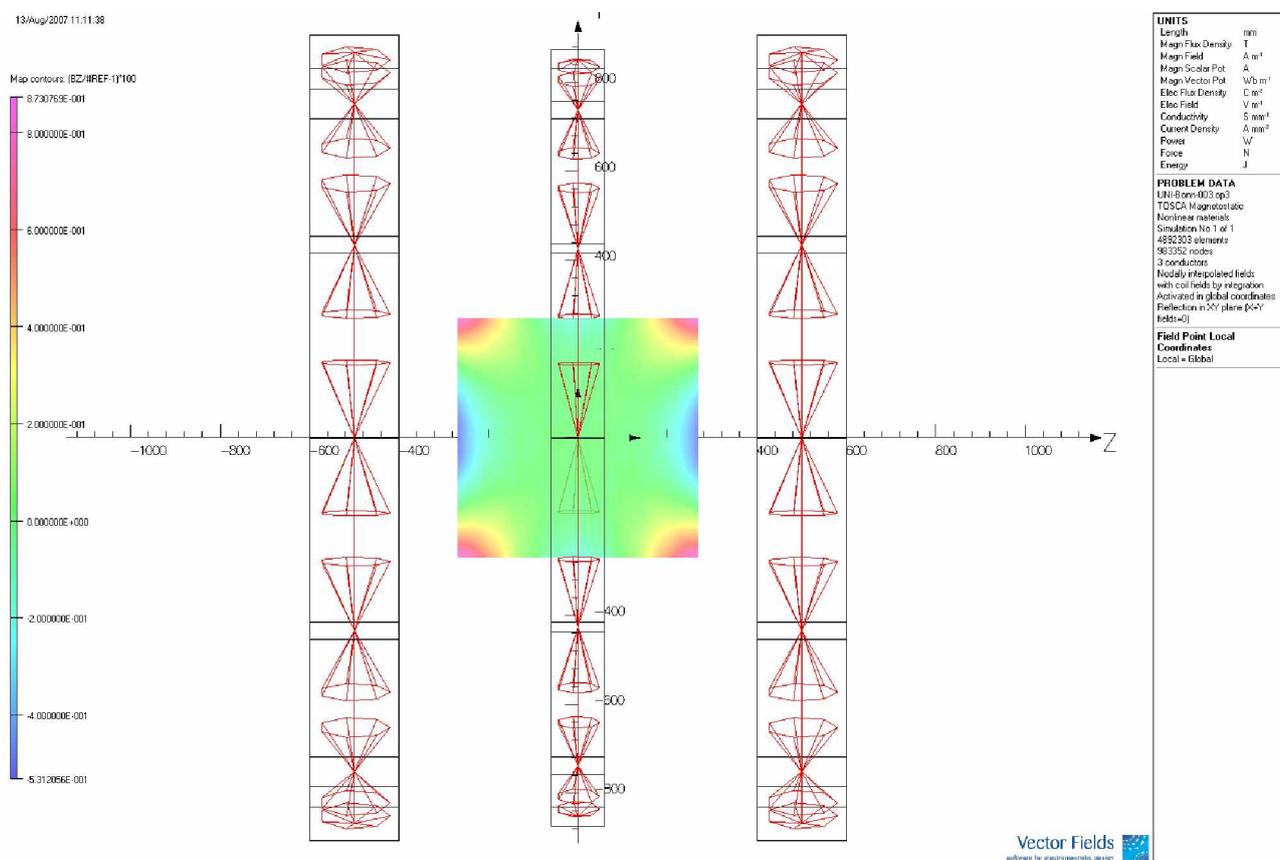


Abbildung 10: Feldhomogenität [%] in yz – Ebene,  $|B|_{(0,0,0)} = 2.5 \text{ T}$



ACCEL

Reportnumber/ 1812 – BP – 7432 – 0  
Berichtsnummer  
Date/Datum 1. Oktober 2007  
Page/Seite 15 von 42

In Abbildung 11 ist die Feldhomogenität [%] in der yz – Ebene im Bereich von y = -270 mm bis y = 270 mm und z = -270 mm bis z = 270 mm dargestellt. Das Feld im Magnetzentrum beträgt  $|B|_{(0,0,0)} = 2.0 \text{ T}$ .

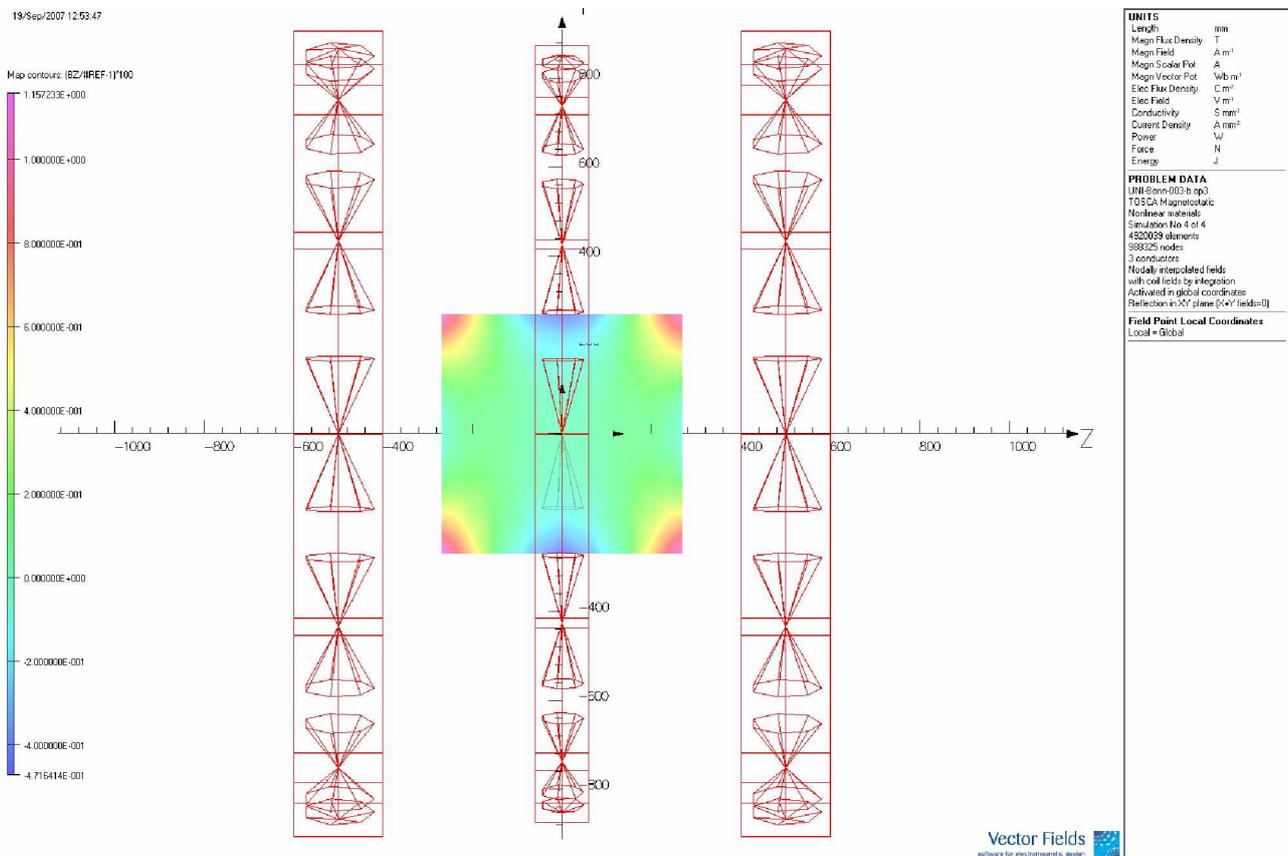


Abbildung 11: Feldhomogenität [%] in yz – Ebene,  $|B|_{(0,0,0)} = 2.0 \text{ T}$



ACCEL

Reportnummer/ 1812 – BP – 7432 – 0  
Berichtsnummer  
Date/Datum 1. Oktober 2007  
Page/Seite 16 von 42

In Abbildung 12 ist die Feldhomogenität [%] in der yz – Ebene im Bereich von y = -270 mm bis y = 270 mm und z = -270 mm bis z = 270 mm dargestellt. Die Skala ist auf ein Maximum von 0.5 % und ein Minimum von -0.5 % begrenzt. Das Feld im Magnetzentrum beträgt  $|B|_{(0,0,0)} = 2.5 \text{ T}$ .

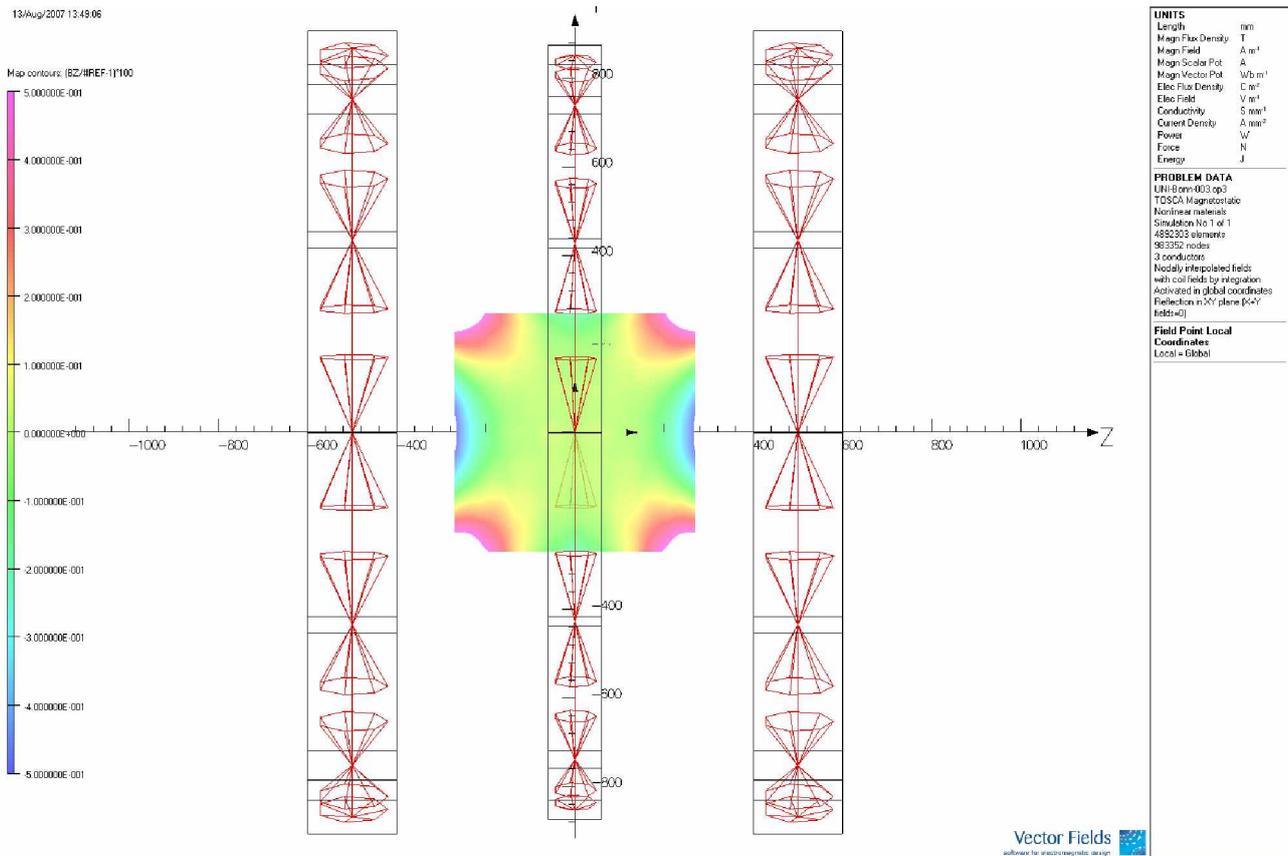


Abbildung 12: Feldhomogenität [%] in yz – Ebene mit begrenzter Skala,  $|B|_{(0,0,0)} = 2.5 \text{ T}$



ACCEL

Reportnumber/ 1812 – BP – 7432 – 0  
Berichtsnummer  
Date/Datum 1. Oktober 2007  
Page/Seite 17 von 42

In Abbildung 13 ist die Feldhomogenität [%] in der yz – Ebene im Bereich von y = -270 mm bis y = 270 mm und z = -270 mm bis z = 270 mm dargestellt. Die Skala ist auf ein Maximum von 0.5 % und ein Minimum von -0.5 % begrenzt. Das Feld im Magnetzentrum beträgt  $|B|_{(0,0,0)} = 2.0 \text{ T}$ .

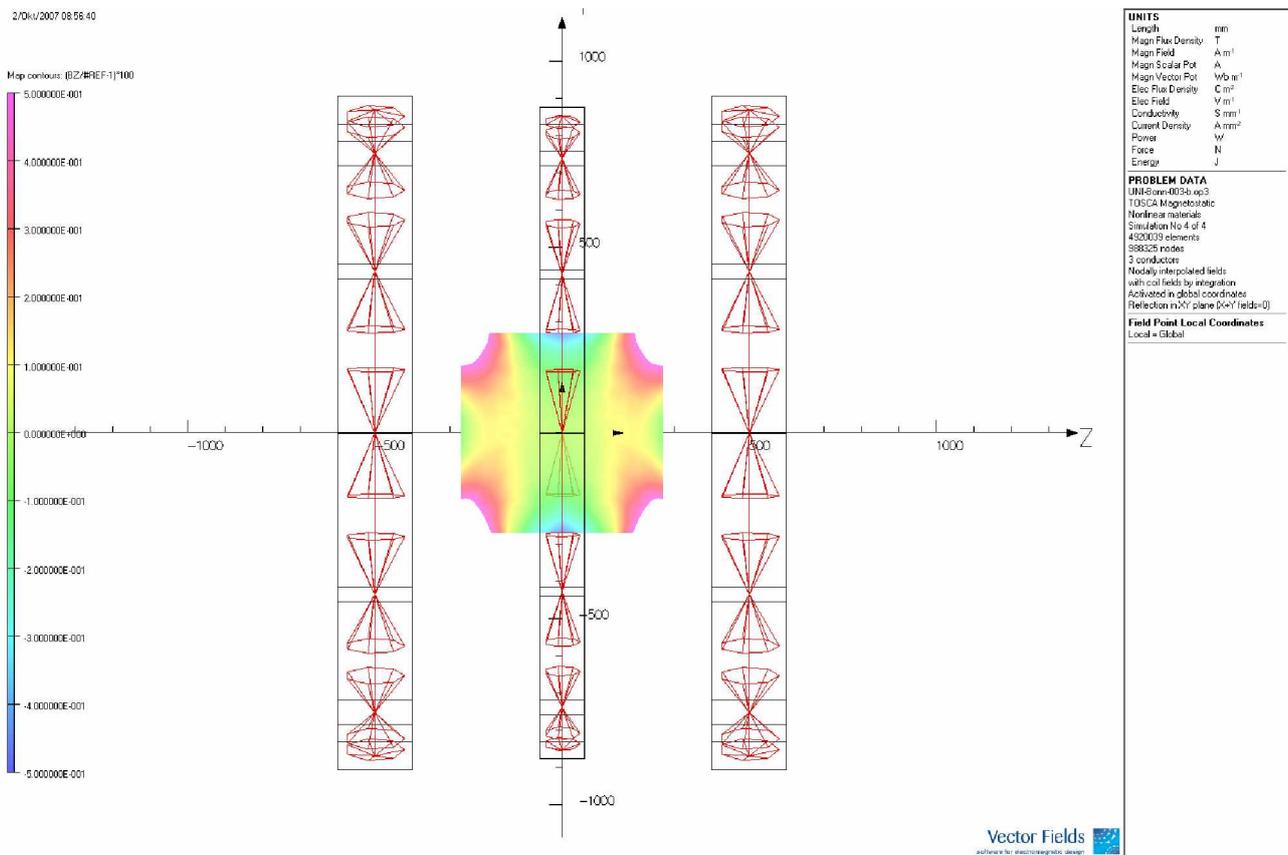


Abbildung 13: Feldhomogenität [%] in yz – Ebene mit begrenzter Skala,  $|B|_{(0,0,0)} = 2.0 \text{ T}$

Wie in den Homogenitätsbildern zu sehen ist, sind sehr große Volumenbereiche innerhalb einer Homogenität von  $\pm 0.2 \%$ . Lediglich in den Ecken ist die Homogenität niedriger.





ACCEL

Reportnumber/ 1812 – BP – 7432 – 0  
Berichtsnummer  
Date/Datum 1. Oktober 2007  
Page/Seite 19 von 42

In Abbildung 15 ist das Streufeld  $|B|$  in [T] in der xy – Ebene dargestellt. Die einzelnen Linien sind Linien gleichen Feldes. Die Auswertung wird im Bereich  $x = -7000$  mm bis  $x = 7000$  mm und  $y = -7000$  mm bis  $7000$  mm durchgeführt. Das Feld im Magnetzentrum beträgt  $|B|_{(0,0,0)} = 2.0$  T.

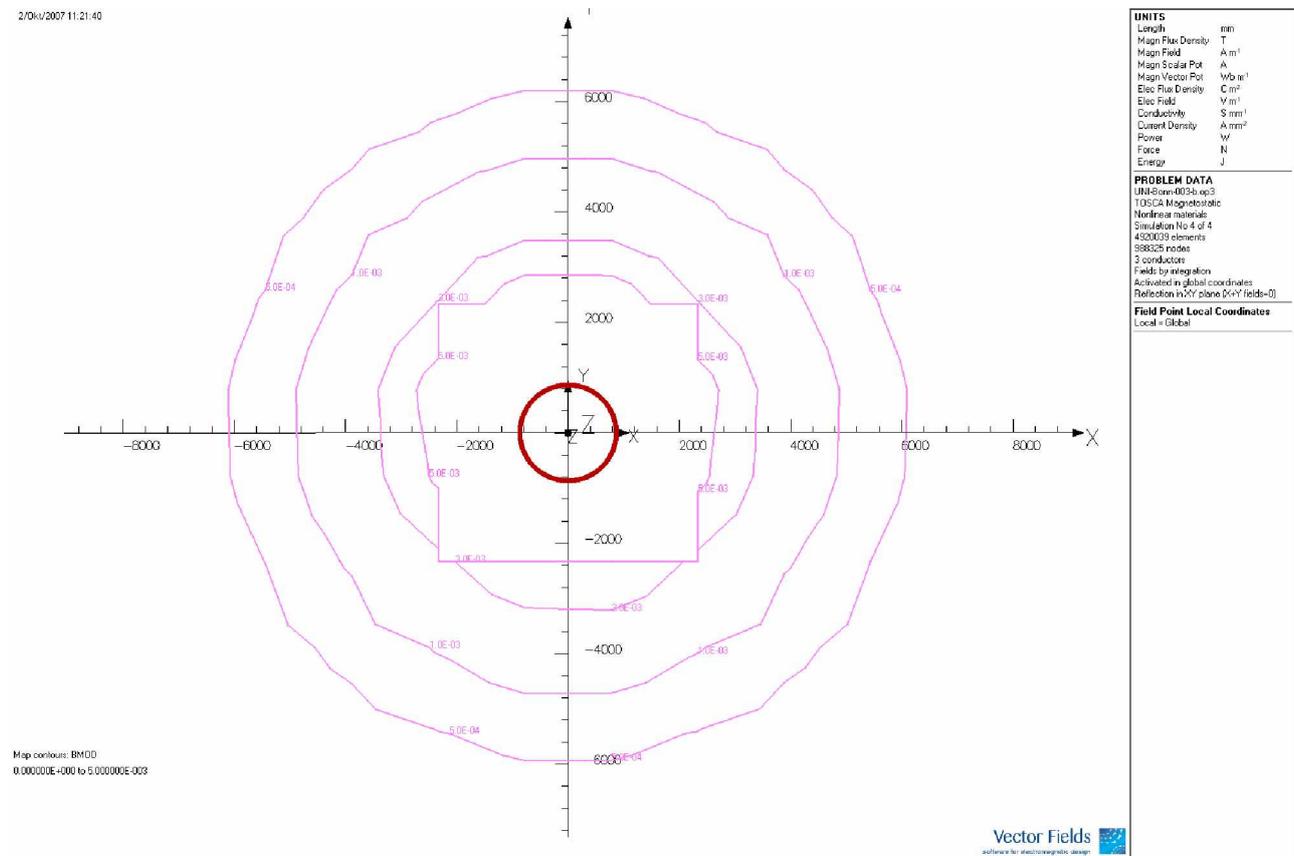


Abbildung 15: Streufeld  $|B|$  [T] in der xy – Ebene,  $|B|_{(0,0,0)} = 2.0$  T



ACCEL

Reportnummer/ 1812 – BP – 7432 – 0  
Berichtsnummer  
Date/Datum 1. Oktober 2007  
Page/Seite 20 von 42

In Abbildung 16 ist das Streufeld  $|B|$  in [T] in der XZ – Ebene dargestellt. Die einzelnen Linien sind Linien gleichen Feldes. Die Auswertung wird im Bereich  $x = -7000$  mm bis  $x = 7000$  mm und  $y = -7000$  mm bis  $7000$  mm durchgeführt. Das Feld im Magnetzentrum beträgt  $|B|_{(0,0,0)} = 2.5$  T.

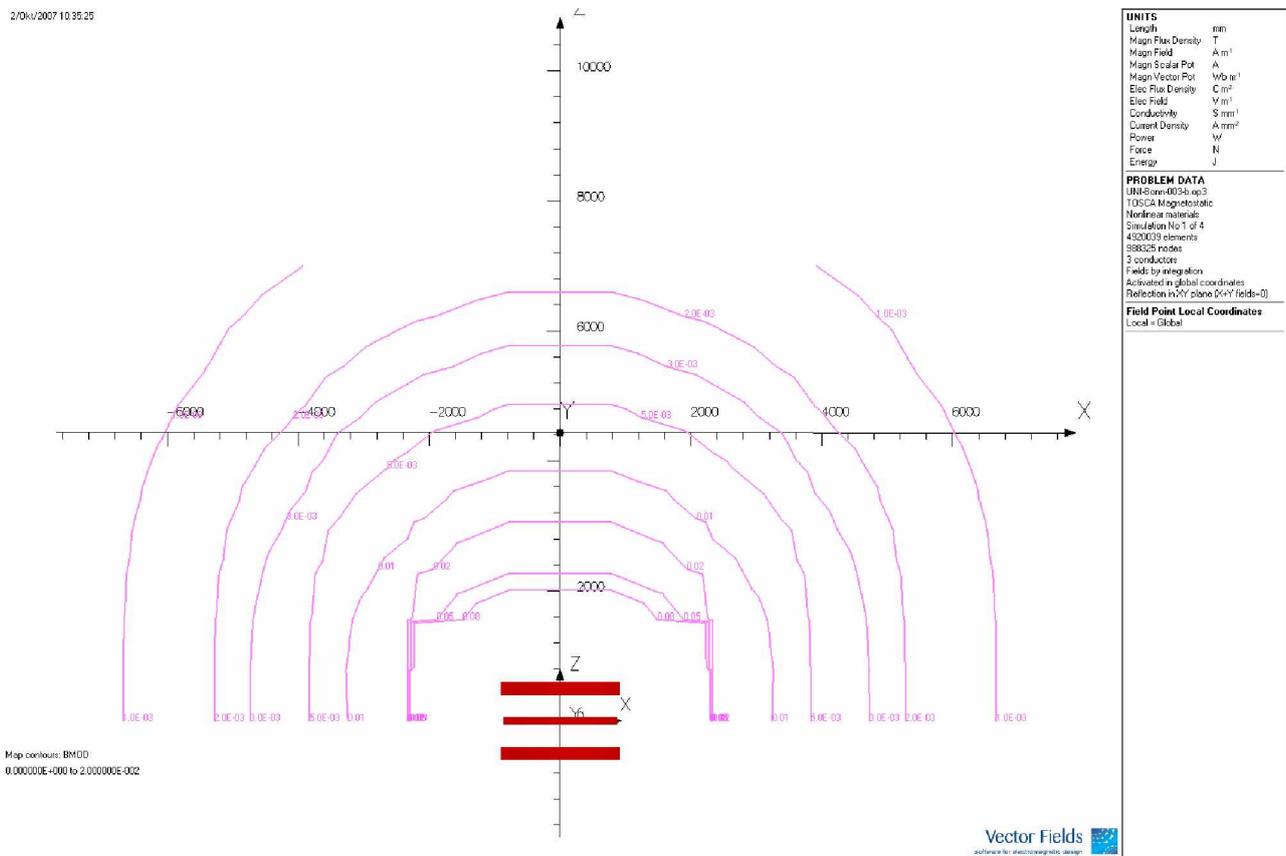


Abbildung 16: Streufeld  $|B|$  [T] in der XZ – Ebene,  $|B|_{(0,0,0)} = 2.5$  T



ACCEL

Reportnumber/ 1812 – BP – 7432 – 0  
Berichtsnummer  
Date/Datum 1. Oktober 2007  
Page/Seite 21 von 42

In Abbildung 17 ist das Streufeld  $|B|$  in [T] in der XZ – Ebene dargestellt. Die einzelnen Linien sind Linien gleichen Feldes. Die Auswertung wird im Bereich  $x = -7000$  mm bis  $x = 7000$  mm und  $y = -7000$  mm bis  $7000$  mm durchgeführt. Das Feld im Magnetzentrum beträgt  $|B|_{(0,0,0)} = 2.0$  T.

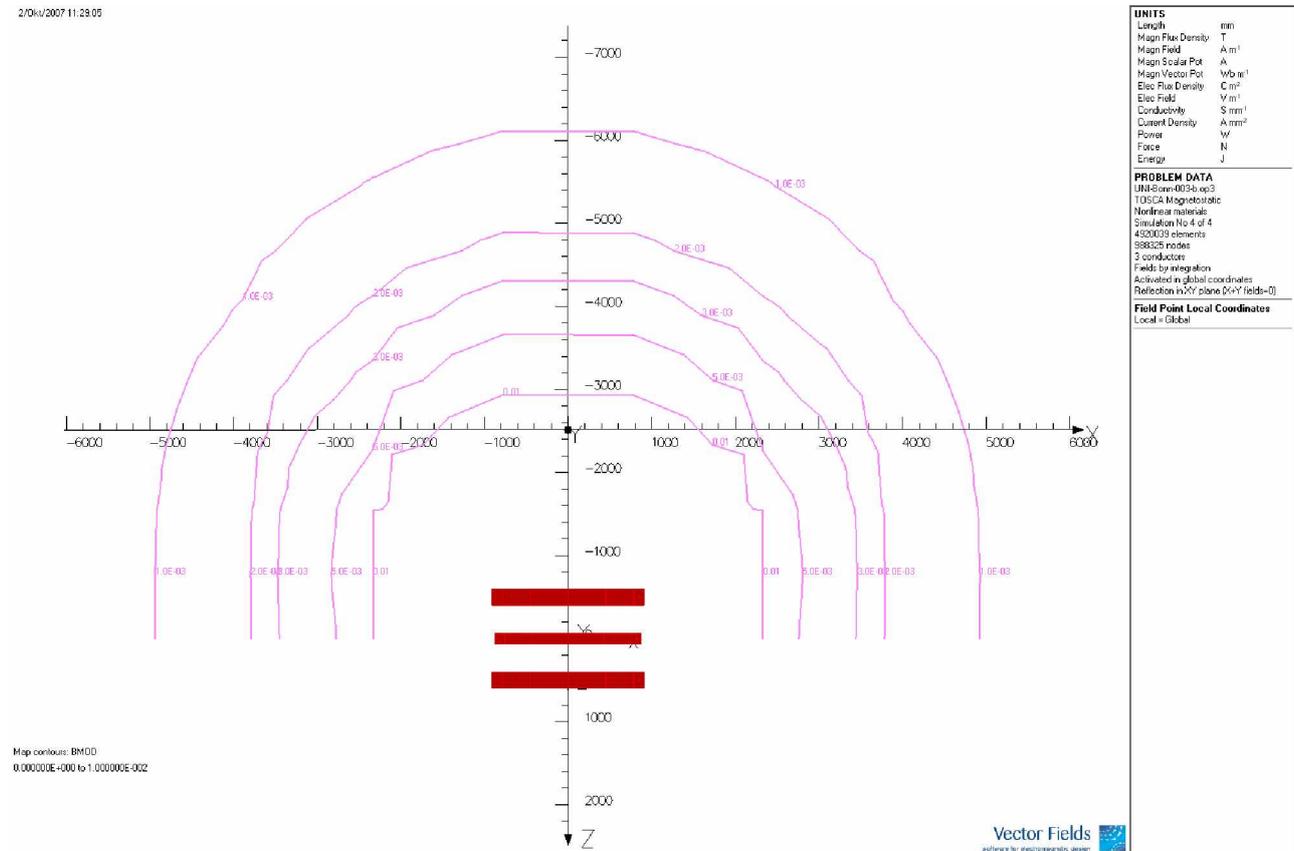


Abbildung 17: Streufeld  $|B|$  [T] in der XZ – Ebene,  $|B|_{(0,0,0)} = 2.0$  T



ACCEL

Reportnummer/ 1812 – BP – 7432 – 0  
Berichtsnummer  
Date/Datum 1. Oktober 2007  
Page/Seite 22 von 42

Abbildung 18 zeigt die magnetische Induktion  $|B|$  in T auf der Eisenoberfläche bei einem Feld von  $B_z = 2.5$  T im Magnetzentrum.

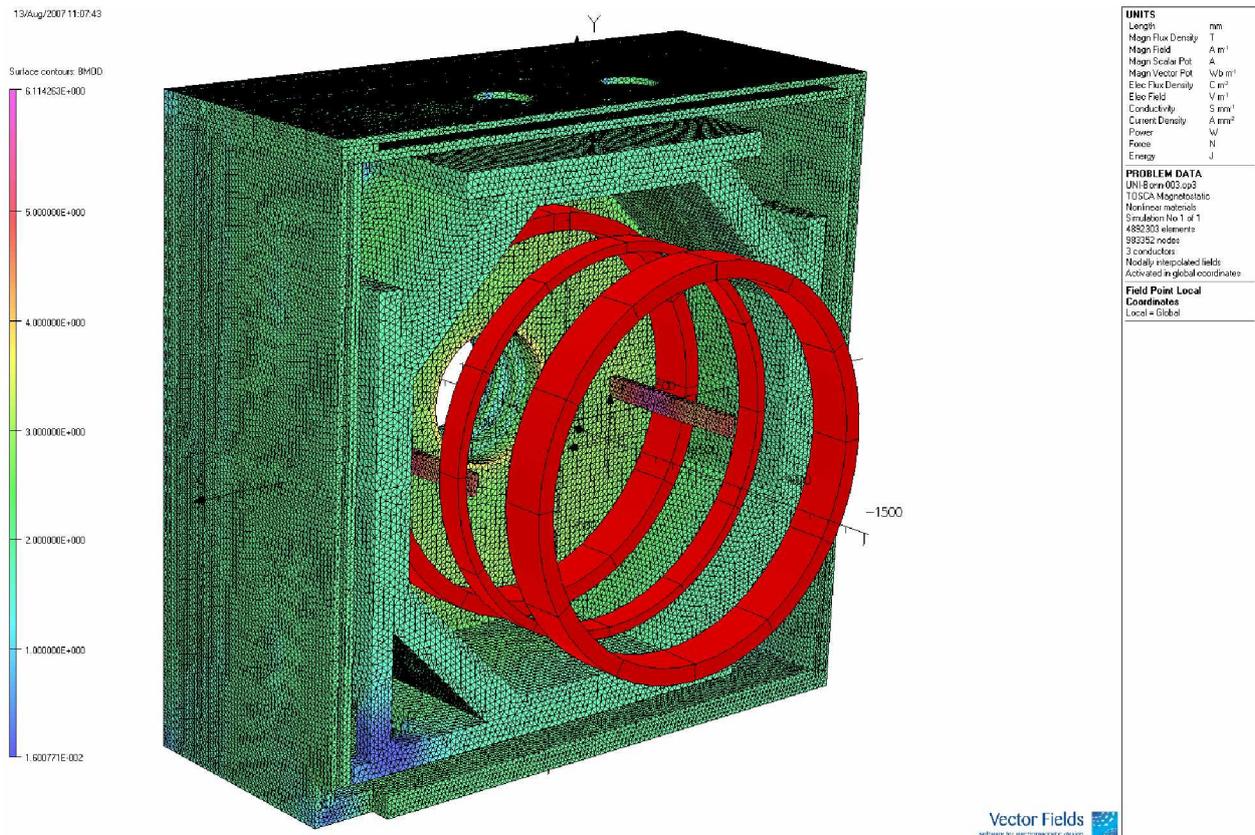


Abbildung 18:  $|B|$  [T] auf der Eisenoberfläche,  $B_{(0,0,0)} = 2.5$  T



ACCEL

Reportnummer/ 1812 – BP – 7432 – 0  
Berichtsnummer  
Date/Datum 1. Oktober 2007  
Page/Seite 23 von 42

Abbildung 19 zeigt die magnetische Induktion  $|B|$  in T auf der Eisenoberfläche bei einem Feld von  $B_z = 2.0$  T im Magnetzentrum.

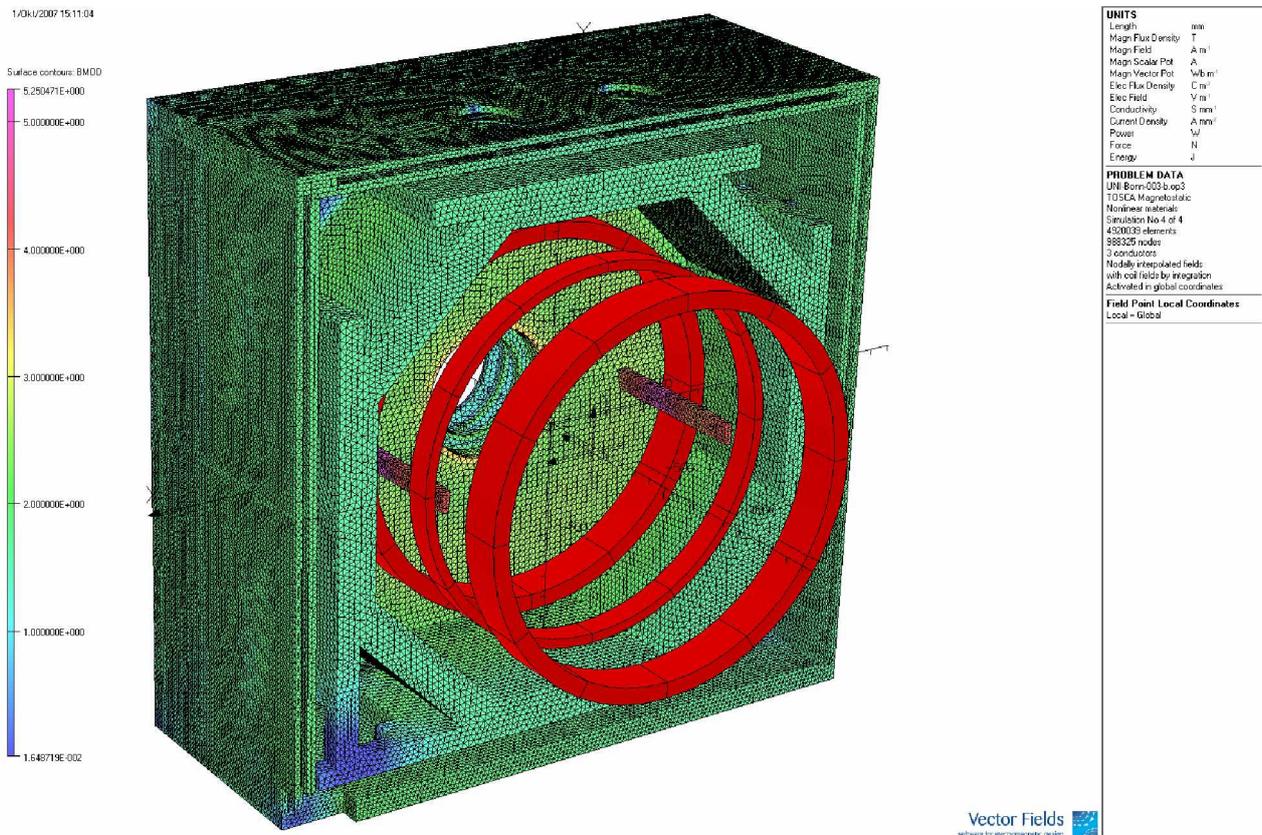


Abbildung 19:  $|B|$  [T] auf der Eisenoberfläche,  $B_{(0,0,0)} = 2.0$  T



ACCEL

Reportnumber/ 1812 – BP – 7432 – 0  
Berichtsnummer  
Date/Datum 1. Oktober 2007  
Page/Seite 24 von 42

Abbildung 20 zeigt die magnetische Polarisierung  $J$  [T] auf der Eisenoberfläche. Es ist deutlich zu erkennen, dass große Bereiche teilweise bzw. vollständig in Sättigung gehen. Das Feld im Magnetzentrum beträgt  $|B|_{(0,0,0)} = 2.5$  T.

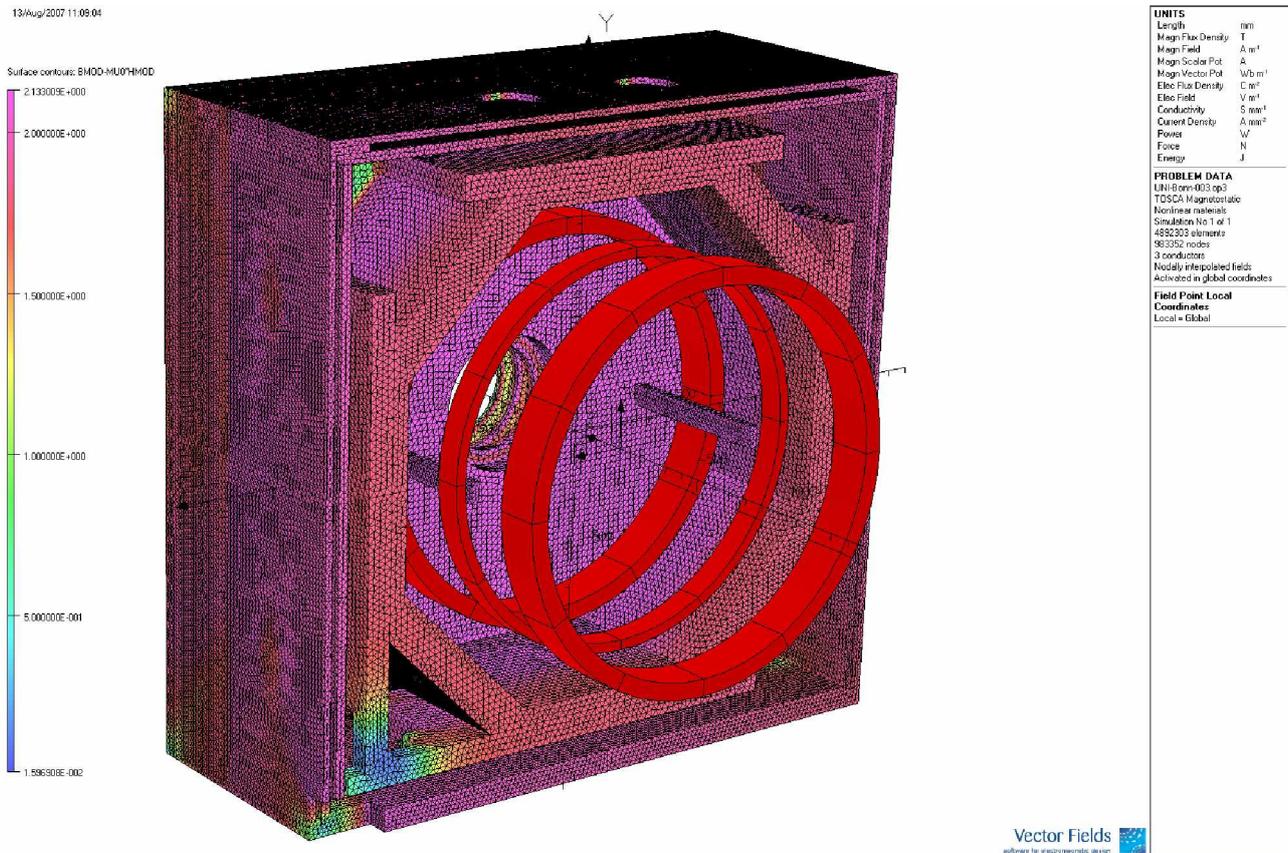


Abbildung 20: Magnetische Polarisierung  $J$  [T] auf der Eisenoberfläche,  $B_{(0,0,0)} = 2.5$  T



ACCEL

Reportnummer/ 1812 – BP – 7432 – 0  
Berichtsnummer  
Date/Datum 1. Oktober 2007  
Page/Seite 25 von 42

Abbildung 21 zeigt die magnetische Polarisierung  $J$  [T] auf der Eisenoberfläche bei einem Zentralfeld von  $|B|_{(0,0,0)} = 2.0$  T.

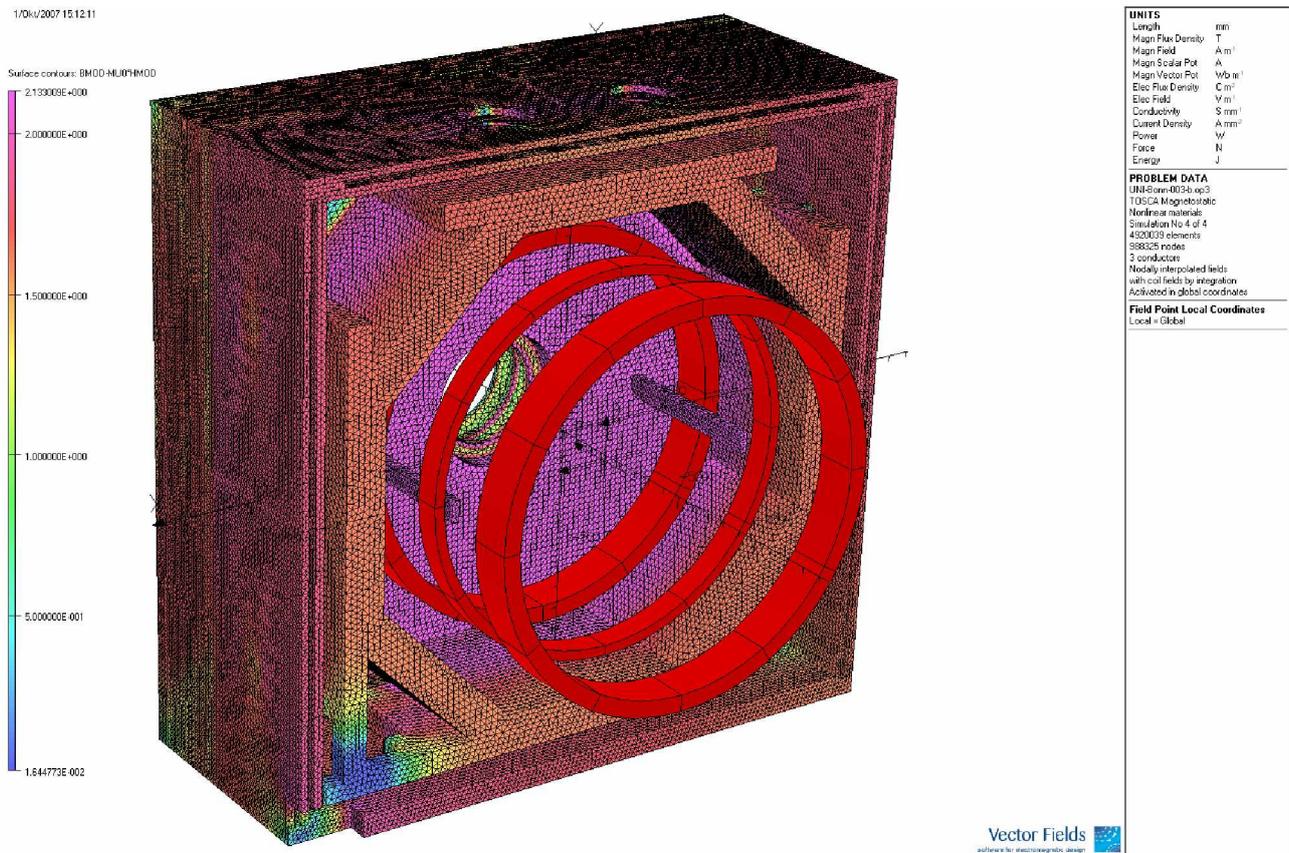


Abbildung 21: Magnetische Polarisierung  $J$  [T] auf der Eisenoberfläche,  $B_{(0,0,0)} = 2.0$  T



### 2.4.3 Auslastung der Loadline

Abbildung 22 zeigt eine schematische Darstellung einer Loadline. Als Ausgangspunkt dienen die Angaben des Herstellers bezüglich des kritischen Stroms in Abhängigkeit des Feldes an der Spulenoberfläche (schwarze Punkte). Um die Auslastung der Loadline bestimmen zu können, wird ein Fit für diese Punkte bestimmt (magenta farbener Polygon). Der Arbeitspunkt ergibt sich aus dem maximalen Feld auf der Spulenoberfläche und dem Betriebsstrom im Supraleiter (grüner Punkt). Die Loadline ist die Verbindungslinie zwischen dem Punkt ( $I=0A$ ,  $B=0T$ ) und dem Betriebspunkt des Magnetsystems und endet auf dem Fit der  $I_c(B)$  Kurve. Als „Auslastung der Loadline“ wird der Abstand [%] zwischen Punkt ( $I=0A$ ,  $B=0T$ ) und dem Betriebspunkt bezeichnet. Der Abstand [%] zwischen dem Betriebspunkt und dem Schnittpunkt der Loadline mit dem Fit wird als „margin to quench“ bezeichnet.

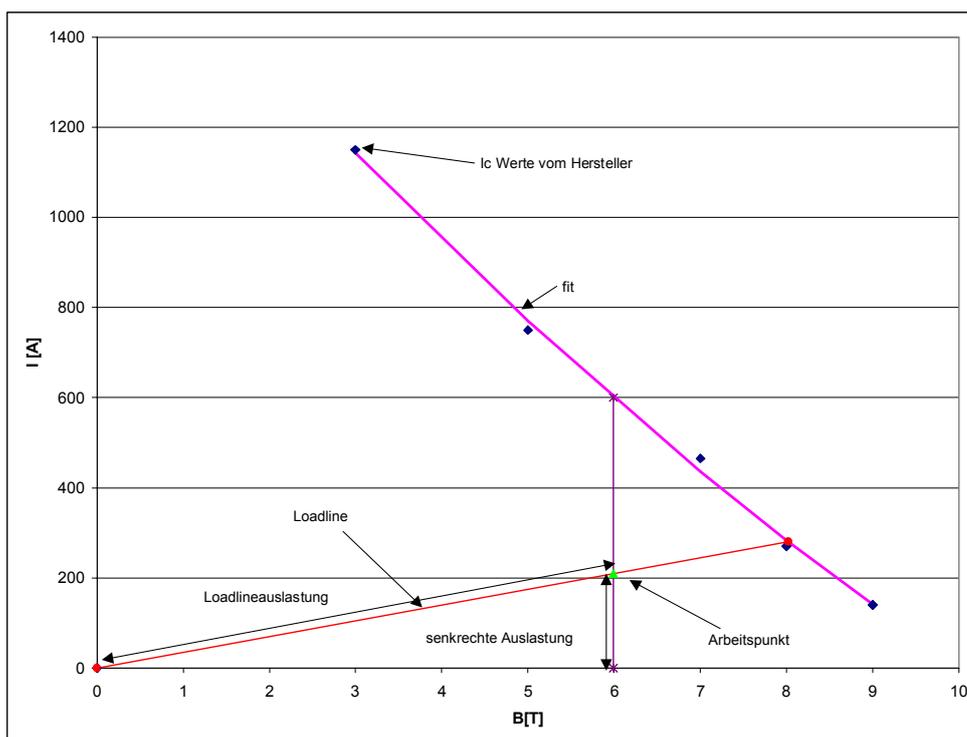


Abbildung 22: Schematische Darstellung einer Loadline



ACCEL

Reportnummer/  
Berichtsnummer 1812 – BP – 7432 – 0  
Date/Datum 1. Oktober 2007  
Page/Seite 27 von 42

Abbildung 23 zeigt die magnetische Induktion  $|B|$  [T] auf der Spulenoberfläche für ein Zentralfeld von  $|B|_{(0,0,0)} = 2.5$  T. Das maximal Feld beträgt  $|B| = 5.57$  T.

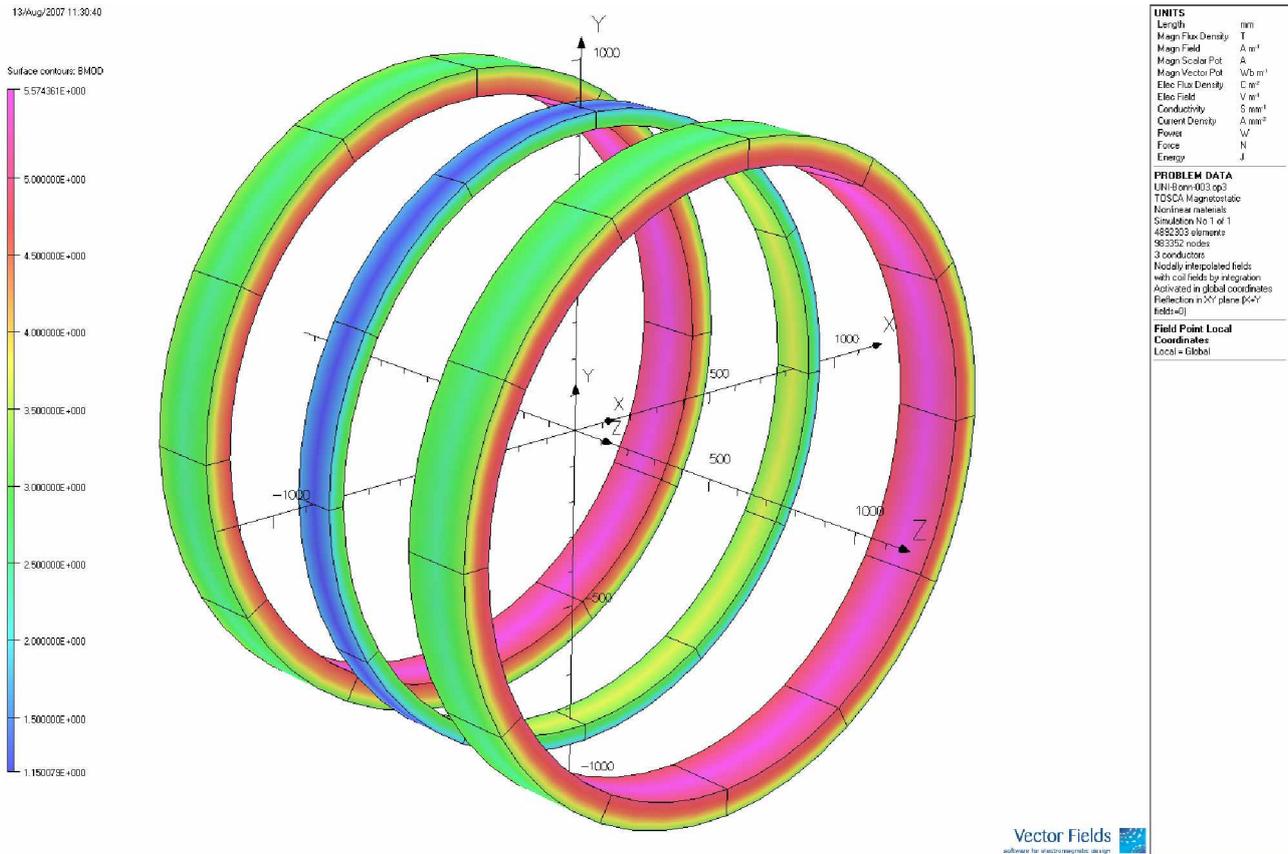


Abbildung 23:  $|B|$  [T] auf der Spulenoberfläche,  $B_{(0,0,0)} = 2.5$  T

Reportnummer/ 1812 – BP – 7432 – 0  
 Berichtsnummer  
 Date/Datum 1. Oktober 2007  
 Page/Seite 28 von 42

Abbildung 24 zeigt die Loadline des berechneten Magnetsystems für ein Zentralfeld von  $B_{(0,0,0)} = 2.5$  T.

### Berechnung der Loadlineauslastung:

### Rundleiter

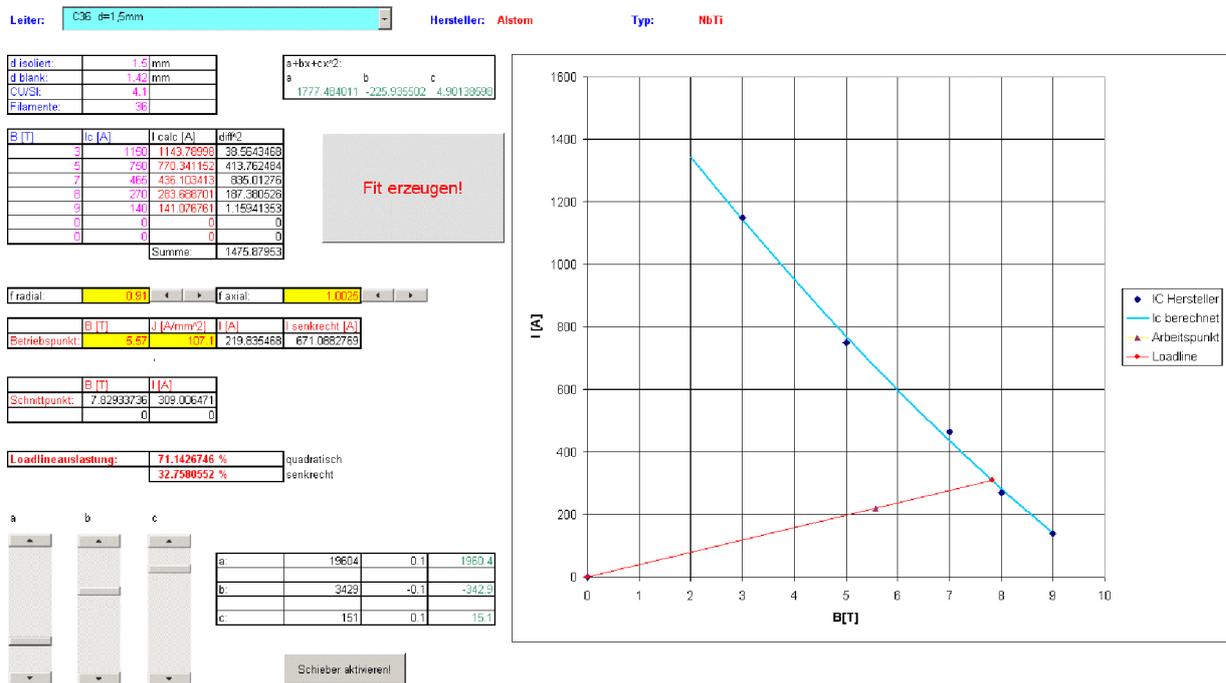


Abbildung 24: Loadline für ein Zentralfeld von  $B_{(0,0,0)} = 2.5$  T

Bei einer maximalen magnetischen Flußdichte von  $|B|_{\max} = 5.57$  T und einem Betriebsstrom von  $I = 219.8$  A ergibt sich eine Auslastung der Loadline von 71.1 % (senkrechte Auslastung: 32.8 %). Der „margin to quench“-Wert beträgt demnach 28.9 %. Für dieses Solenoidsystem wurde die Auslastung niedrig gewählt, um einerseits angesichts der Baugröße und der gespeicherten Energie die Stromdichten niedrig zu halten, was vorteilhaft für das Quenchverhalten ist, und andererseits eine Optimierung auf eine möglichst gute Feldhomogenität im spezifizierten Auswertungsbereich zu erlauben.

Eine niedrige Loadline-Auslastung ermöglicht einen sehr stabilen Betrieb des Magneten mit hohen Sicherheits- und Temperaturmargen.



ACCEL

Reportnumber/ 1812 – BP – 7432 – 0  
Berichtsnummer  
Date/Datum 1. Oktober 2007  
Page/Seite 29 von 42

Abbildung 25 zeigt die magnetische Induktion  $|B|$  [T] auf der Spulenoberfläche für ein Zentralfeld von  $|B|_{(0,0,0)} = 2.0$  T. Das maximal Feld beträgt  $|B| = 4.33$  T.

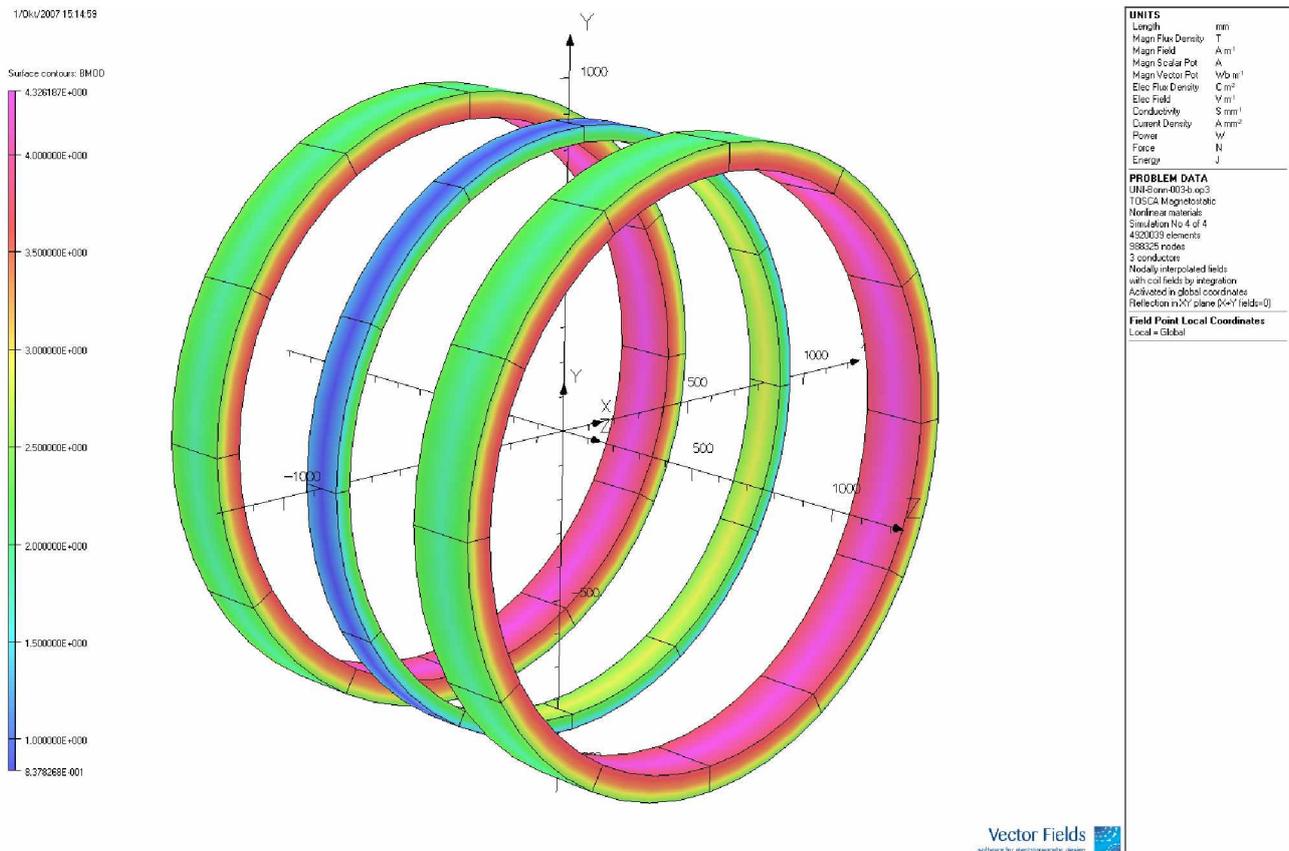


Abbildung 25:  $|B|$  [T] auf der Spulenoberfläche,  $B_{(0,0,0)} = 2.0$  T

Reportnummer/ 1812 – BP – 7432 – 0  
 Berichtsnummer  
 Date/Datum 1. Oktober 2007  
 Page/Seite 30 von 42

Abbildung 26 zeigt die Loadline des berechneten Magnetsystems für ein Zentralfeld von  $B_{(0,0,0)} = 2.0$  T.

### Berechnung der Loadlineauslastung:

### Rundleiter

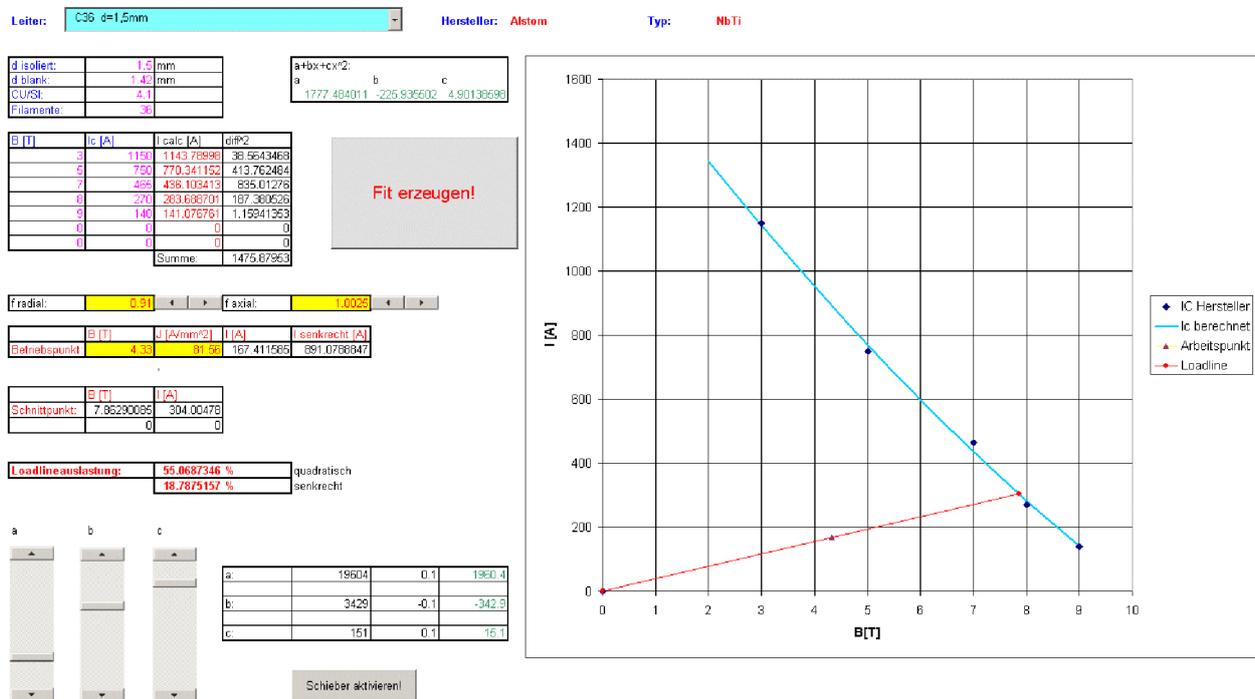


Abbildung 26: Loadline für ein Zentralfeld von  $B_{(0,0,0)} = 2.0$  T

Bei einer maximalen magnetischen Flußdichte von  $|B|_{\max} = 4.33$  T und einem Betriebsstrom von  $I=219.9$  A ergibt sich eine Auslastung der Loadline von 55.1 % (senkrechte Auslastung: 18.8 %). Der „margin to quench“-Wert beträgt demnach 44.9 %.

Reportnummer/ 1812 – BP – 7432 – 0  
 Berichtsnummer  
 Date/Datum 1. Oktober 2007  
 Page/Seite 31 von 42

## 2.4.4 Kräfte, Energie und Induktivität

### Energie:

Zentralfeld  $|B|_{(0,0,0)} = 2.5 \text{ T} \rightarrow E = 12.4 \text{ MJ}$

Zentralfeld  $|B|_{(0,0,0)} = 2.0 \text{ T} \rightarrow E = 7.6 \text{ MJ}$

### Induktivität:

Die Induktivität, berechnet aus  $\frac{2E}{I^2}$ , ist wegen der Nichtlinearitäten des Eisenmaterials keine Konstante:

Zentralfeld  $|B|_{(0,0,0)} = 2.5 \text{ T} \rightarrow L = 513.14 \text{ H}$

Zentralfeld  $|B|_{(0,0,0)} = 2.0 \text{ T} \rightarrow L = 544.49 \text{ H}$

### Kräfte:

Zentralfeld  $|B|_{(0,0,0)} = 2.5 \text{ T}$ :

Kraft [N]	Linker Solenoid (negativer Z – Bereich)	Mittelsolenoid	Rechter Solenoid (positiver Z – Bereich)
$F_x$	-1339	-98	-1339
$F_y$	-1218	-2599	-1218
$F_z$	1101679	0	-1101679

**Tabelle 1: Spulenkräfte,  $|B|(0,0,0) = 2.5 \text{ T}$**

Reportnumber/ 1812 – BP – 7432 – 0  
 Berichtsnummer  
 Date/Datum 1. Oktober 2007  
 Page/Seite 32 von 42

Zentralfeld  $|B|_{(0,0,0)} = 2.0 \text{ T}$ :

Kraft [N]	Linker Solenoid (negativer Z – Bereich)	Mittelsolenoid	Rechter Solenoid (positiver Z – Bereich)
$F_x$	-410	-211	-410
$F_y$	642	-884	642
$F_z$	195734	0	-195734

**Tabelle 2: Spulenkräfte,  $|B|(0,0,0) = 2.0 \text{ T}$**

### **3 Quenchsicherheit**

Da keine wesentlichen Komplikationen aus den Quenchrechnungen erwartet werden, ist im Rahmen dieser Studie eine detaillierte Quenchanalyse nicht vorgesehen. Die Absicherung der Spulen kann, wie häufig, über kalte Dioden erfolgen. Es muss verhindert werden, dass während eines Quenches die linke und rechte Spule unsymmetrisch bestromt werden, da dies zu hohen Nettokräften zwischen den Spulen und dem ferromagnetischen Eisen führen würde. Aus diesem Grund werden die Spulen in 2 oder mehr Sektionen gewickelt, und jeweils 2 identische Sektionen von linker und rechter Spule in Reihe geschaltet.

Durch die Schutzbeschaltung mit Dioden werden insbesondere die Spannungen während eines Quenches begrenzt. Dies trifft sowohl für die an den Spulenanschlüssen anliegenden als auch für die spuleninternen Spannungen zu.

Während des Quenches werden im Schild, insbesondere im Innenrohr, Wirbelströme induziert. Diese wechselwirken wiederum mit den Feldern der Spulen, so dass hohe Kräfte zwischen Schild und Spulen auftreten können. Die Umfangsspannungen im Schild wurden abgeschätzt und liegen deutlich oberhalb der für Kupfer zulässigen Werte. Das Schildinnenrohr muss also entweder geometrisch, zum Beispiel durch Schlitzten, vor den hohen Umfangsströmen geschützt werden, oder alternativ muss für das Innenrohr ein Material wie Messing oder Aluminium gewählt werden.

## 4 Kryostat

### 4.1 Konstruktion

Die prinzipielle Konstruktion eines solchen des Kryostaten ist im Abschnitt 6 gezeigt. Diese Zeichnung dient nur zur Veranschaulichung des generellen Layouts. Gegenüber der Zeichnung müssen die Spulen- und Behältermaße gemäß Abbildung 1 geändert werden, und die im Abschnitt 6 gezeigten radialen Durchbrüche entfallen. Die tatsächlichen, vorläufigen Maße sind in Tabelle 3 aufgelistet.

	Durchmesser	Länge	radiale Spalte / Dicke	axiale Spalte / Dicke	Bemerkung
Vakuumbehälter Innenrohr	1530	1570			
Schild Innenrohr	1580	1350	25	110	Wandstärke 3, Kupfer
WiKörper / He-Behälter Innenrohr	1620	1265	20	42.5	
Spule Innendurchmesser	1660	1205	20	30	
Spule Aussendurchmesser	1820	1205	80	0	
Heliumbehälter außen auf Spule	1900	1265	40	30	
Schilddurchmesser Aussenrohr	1960	1350	30	42.5	Wandstärke 3, Kupfer
Kryostat Aussenrohr (Flansch)	2120	1570	80	110	Flansch trägt dick auf

**Tabelle 3: Kryostat, Baumaße**

Der beiliegende Konstruktionsentwurf sieht vor, dass ein Heliumturm oben auf den Kryostaten gesetzt wird. In diesem Turm befinden sich die zweistufigen Kältemaschinen, die sowohl das abdampfende Helium rückverflüssigen, als auch das Schild und die Hochtemperatur-Supraleiter-Stromzuführungen kühlen.

Die Aufhängungen von Strahlungsschild und Heliumbehälter mit inliegender Spule bestehen aus glasfaserverstärktem Kunststoff. Die Aufhängungen der Spulen müssen eine hohe Steifigkeit besitzen, um im Falle von Alignmentfehlern oder Unsymmetrien zwischen Spulen und Eisen ein weiteres Dezentrieren zu verhindern.

Die Kleinkältemaschinen benötigen eine jährliche Wartung, die bei entsprechender Konzeption aber ohne Aufwärmen des Kryostaten erfolgen kann.

Alternativ könnte man nur einen kleinen Durchbruch durch das Eisen auf der Oberseite nutzen, und einen separaten Versorgungskryostaten aufstellen, der mit dem Magnetkryostaten lediglich durch ein Rohr verbunden ist, siehe Abbildung 27. Ein solcher externer Kryostat bietet große Vorteile bei Betrieb, Wartung sowie magnetischer Abschirmung, erhöht andererseits aber die Kosten, den Montageaufwand und den Gesamtwärmeeintrag.



**Abbildung 27: Externer Versorgungskryostat am Beispiel eines supraleitenden Zyklotrons**

## 4.2 Kryobilanz

### 4.2.1 Kryostat mit Versorgungsturm

In die Kryobilanz gehen die Verluste des ‚klassischen‘ Kryostaten als statische Verluste ein, siehe Tabelle 5. Den größten Anteil an den Heliumverlusten haben der Turmbereich sowie die 2 Stromzuführungen. Im Bereich des Turmes muss das Eisen eine Öffnung von etwa 500 – 600 mm Durchmesser besitzen. In diesem Bereich wäre eine zusätzliche magnetische Abschirmung als Zylinderwand um den Turm nötig.



Source	Losses 55 K W	Losses 4 K W
Radiation	43.7	0.44
Instrumentation	0.1	0.01
Turret heat conduction helium gas	18.2	0.64
Support, G 10 Rods	2.5	0.17
Turret, Conduction	5.7	0.26
Current leads	30.0	0.09
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>1.6</b>

**Tabelle 4: Kryobilanz, Versorgungsturm am Kryostaten, Schildtemperatur 55 K**

Aus der Wärmebilanz ist ersichtlich, dass – bei entsprechend sorgfältiger Ausführung der Kryotechnik – das System mit nur 2 Kleinkältemaschinen mit einer Leistung von jeweils mindestens 1 W bei 4 K auskommen kann. Die Anschlussleistung der Kryoanlage wäre dann bei lediglich etwa 15 kW.

#### **4.2.2 Externer Versorgungskryostat**

Wenn man einen externen Versorgungskryostaten vorsieht, wird nur eine kleine Öffnung von weniger als 200 mm Durchmesser im Eisen benötigt. Durch die Verbindung (Hals) zwischen Versorgungskryostaten und Magnetkryostaten kann man aber – abhängig von der Entfernung der beiden Kryostate – das Schild in der Regel nicht mehr durch eine rein wärmeleitungstechnische Anbindung an die Kältemaschinen kühlen, da der Wärmetransportweg durch den Hals zu lange wird beziehungsweise zu große Kupferquerschnitte erfordern würde. In diesem Fall eignet sich flüssiger Stickstoff in einem Konvektionskreislauf als Wärmetransportmedium in Analogie zum Heliumkreislauf. Dies hätte allerdings zur Folge, dass das Strahlungsschild etwa bei 80 K statt bei unter 60 K wäre. Dies erhöht drastisch den Wärmeeintrag durch Strahlung auf die Kaltmasse bei 4 K, zusätzlich zur größeren Fläche. An den ersten Stufen der Kältemaschinen wäre dann ein Kondensator, der den Stickstoff rückverflüssigt.

Die Wärmebilanz für den Kryostaten mit externem Versorgungskryostaten und höherer Schildtemperatur ist in Tabelle 5 aufgelistet.



Source	Losses 80 K W	Losses 4 K W
Radiation	55.2	1.89
Instrumentation	0.1	0.02
Turret heat conduction helium gas	22.6	1.86
Support, G 10 Rods	2.2	0.26
Turret, Conduction	6.2	0.66
Current leads	30.0	0.09
<b>Total</b>	<b>116</b>	<b>4.8</b>

**Tabelle 5: Kryobilanz, externer Versorgungskryostat, Schildtemperatur 80 K**

Durch den externen Kryostaten und die höhere Schildtemperatur steigt der Wärmeeintrag auf das 4 K-Niveau. In diesem Fall sollten 4 Kleinkältemaschinen eingeplant werden. Die Anschlußleistung der Kryolanlage wäre dann etwa 30 kW.

### 4.3 Alternative Kryokonzepte

#### 4.3.1 Heliumkreislauf als Konvektionskreis

Statt die Spulen in einen Heliumbehälter einzubauen, kann man mit einem wesentlich kleineren Heliuminventar die Spulen auch über einen Konvektionskreis kühlen. Ein kleiner Behälter befindet sich dann am kalten Ende der Kryokühler, in dem die zweite Stufe das abdampfende Helium rückverflüssigt. Das flüssige Helium wird dann in Leitungen zuerst an den tiefsten Punkt und dann aufsteigend um die Spulen geführt. Die Vorteile eines solchen Systems sind das geringe Heliuminventar und die Tatsache, dass der Heliumraum dann in der Regel kein Druckbehälter ist.

Nachteilig ist, dass bereits kurz nach einem Ausfall der Kälteanlage die Erwärmung der Spulen beginnt. Eine zusätzliche Schwierigkeit ist, dass sich alle Verschaltungen der Spulen im Vakuumraum befinden, elektrisch isoliert sein müssen und trotz dessen zuverlässig gekühlt werden müssen.

Beim Rampen des Magneten muss in dieser Konfiguration die Ramprate so klein gewählt werden, dass die in den Spulen entstehenden Hysterese- und Wirbelstromverluste instantan von der Kälteanlage zurückgekühlt werden können, da es praktisch kein Gasvolumen gibt, das die vorübergehend höheren Verluste abpuffern könnte. Die Gesamtenergie der Verluste wird in der Größenordnung von 10 kJ liegen. Mit einer überschüssigen Kondensationsleistung von 1 W dürfte die Rampe nicht schneller als 3 Stunden sein.

Auf der Kostenseite ergeben sich in der Herstellung keine gravierenden Vor- oder Nachteile.

#### 4.3.2 Kryogenfreies System

Kryogenfreie Systeme beruhen auf reiner Wärmeleitung zwischen den Kältemaschinen und den Schilden und Spulen. Eine kryogenfreie Lösung wird wegen der Größe dieses Magneten hier nicht in Betracht gezogen; wir empfehlen für große System die Kühleigenschaften einer Flüssig-

Reportnumber/  
Berichtsnummer 1812 – BP – 7432 – 0  
Date/Datum 1. Oktober 2007  
Page/Seite 38 von 42

keit, nämlich den effektiven Wärmetransport über Konvektion, die wirkungsvolle Oberflächenkühlung über Verdampfung sowie die Wärmekapazität der Flüssigkeit und des Gases.

Reportnumber/  
Berichtsnummer 1812 – BP – 7432 – 0  
Date/Datum 1. Oktober 2007  
Page/Seite 39 von 42

## **5 Netzgerät**

Die Induktivität des Magnetsystems beträgt etwa 500 H. Zum Laden des Magneten innerhalb von einer Stunde benötigt das Netzgerät eine Spannung von 30 V. Die Leistung liegt dann bei etwa 7 kW. In dieser Strom- und Leistungsklasse sind sowohl wasser- wie auch luftgekühlte Netzgeräte erhältlich.

Reportnumber/ 1812 – BP – 7432 – 0  
Berichtsnummer  
Date/Datum 1. Oktober 2007  
Page/Seite 40 von 42

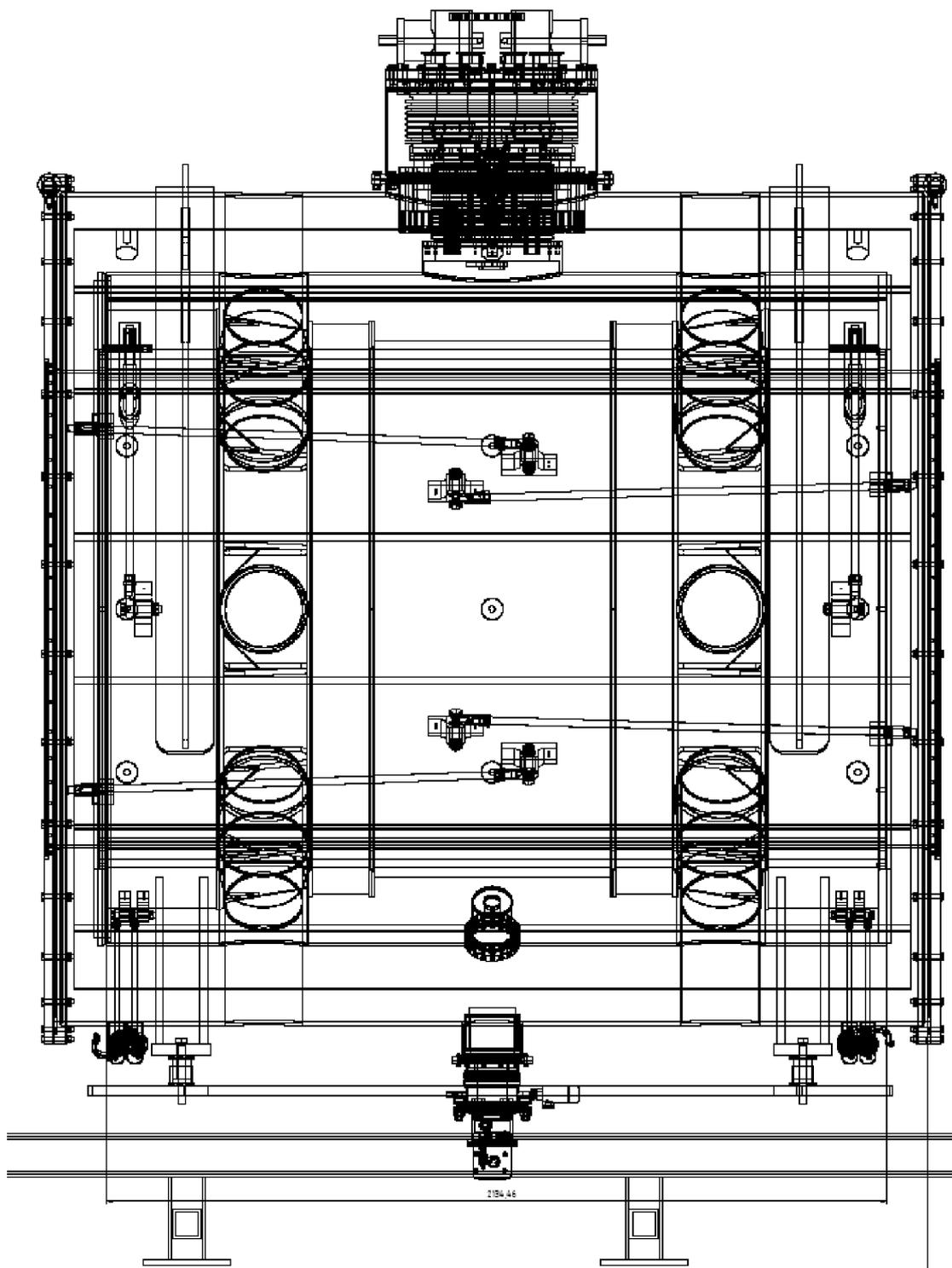
## **6 Konstruktionsentwurf**

Die folgenden Abbildungen Abbildung 28 und Abbildung 29 zeigen den Entwurf eines bauähnlichen Systems. Alle wesentlichen Komponenten wie Spulen, Behälter, Aufhängung und Versorgungsturm sind gezeigt.



**ACCEL**

Reportnumber/ 1812 – BP – 7432 – 0  
Berichtsnummer  
Date/Datum 1. Oktober 2007  
Page/Seite 41 von 42



**Abbildung 28: Seitenansicht eines bauähnlichen Kryostaten inklusive der verdeckten Bauteile**

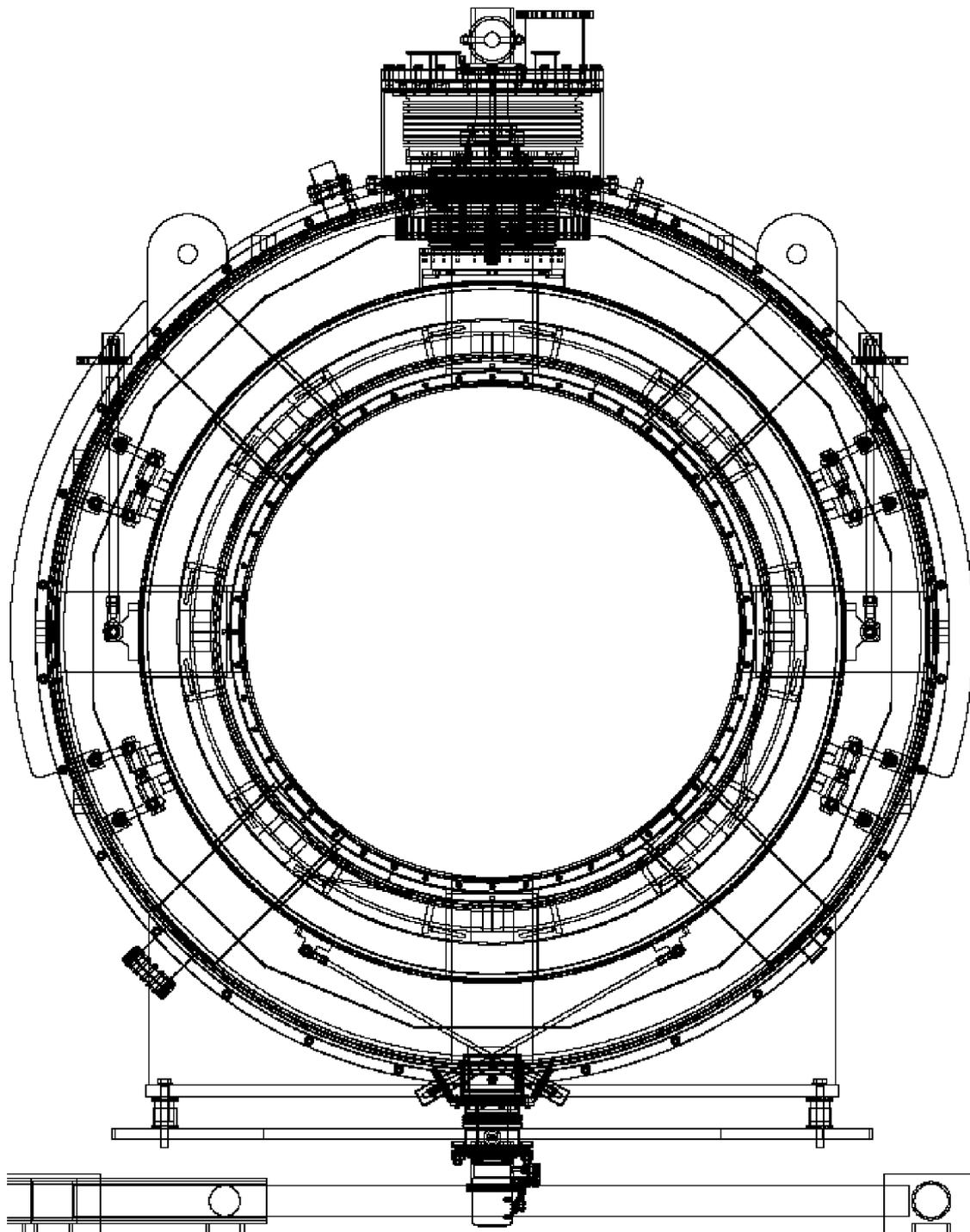
Weitergabe sowie Vervielfältigung dieser Unterlage, Verwertung und Mitteilung ihres Inhaltes nicht gestattet, soweit nicht ausdrücklich zugestanden. Zuwiderhandlungen verpflichten zu Schadensersatz. Alle Rechte für den Fall der Patenterteilung oder GM-Eintragung vorbehalten.

Copying of this document, and giving it to others and the use or communication of the contents thereof, are forbidden without express authority. Offenders are liable to the payment of damages. All rights are reserved in the event of the grant of a patent or the registration of a utility model or design.



**ACCEL**

Reportnumber/ 1812 – BP – 7432 – 0  
Berichtsnummer  
Date/Datum 1. Oktober 2007  
Page/Seite 42 von 42



**Abbildung 29: Ansicht eines bauähnlichen Kryostaten in Achsrichtung inklusive der verdeckten Bauteile**

Weitergabe sowie Vervielfältigung dieser Unterlage, Verwertung und Mitteilung ihres Inhaltes nicht gestattet, soweit nicht ausdrücklich zugestanden. Zuwiderhandlungen verpflichten zu Schadenersatz. Alle Rechte für den Fall der Patenterteilung oder GM-Eintragung vorbehalten.

Copying of this document, and giving it to others and the use or communication of the contents thereof, are forbidden without express authority. Offenders are liable to the payment of damages. All rights are reserved in the event of the grant of a patent or the registration of a utility model or design.