

## 3 Stationäres Magnetfeld

### 3.1 Dauermagnete

#### 3.1.0 Parametervereinbarung

Das Verhalten von Dauermagneten wird in fast allen Fällen mit der magnetischen Hysterese im 2. Quadranten, d.h. mittels der sog. Entmagnetisierungskurve beschrieben, siehe Abb. 3-0-1 links. Generell wird entweder die Kurve der magnetischen Polarisation  $J(H)$  oder die der Flussdichte  $B(H)$  betrachtet.  $J$  hängt mit der Magnetisierung  $M(H)$  über

$$J(H) = \mu_0 \cdot M(H)$$

zusammen und  $B$  und  $J$  sind über die sogenannte Konstitutionsrelation verknüpft: In Abb. 3.1.0-1 sind zwei verschiedene Koerzitivfeldstärken  $jH_c$  und  $bH_c$  angegeben. In Produktkatalogen von Dauermagnetherstellern bezeichnen diese Größen den Betrag der Gegenfeldstärke, der notwendig ist, die Polarisation bzw. Flussdichte zu Null zu kompensieren.

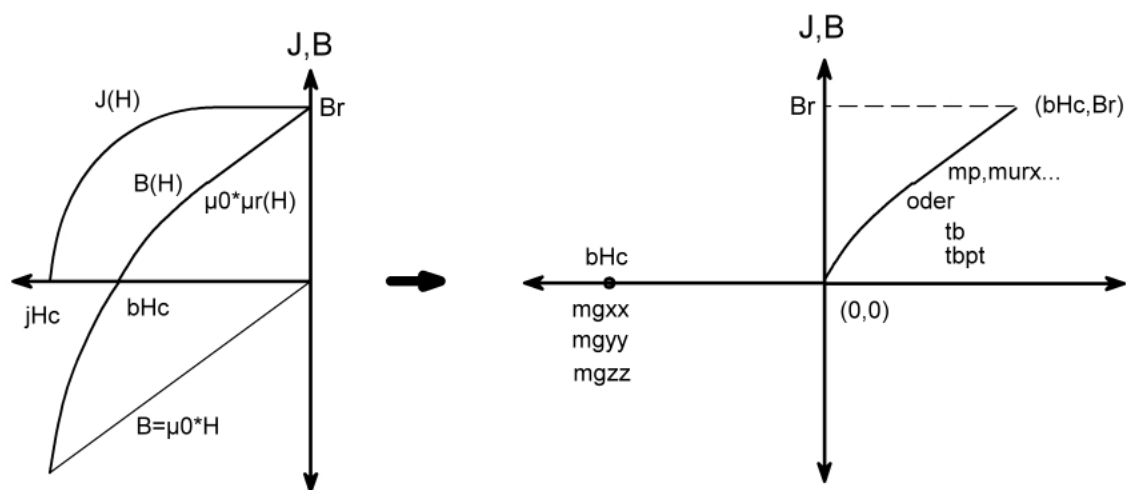


Abb. 3.1.0-1 Entmagnetisierungskurve und Eingabe von Dauermagneten in Ansys durch Betrag und Richtung von  $bH_c$  sowie der ins Positive transformierten  $B(H)$ -Kurve.

Bei der Behandlung von Dauermagneten mit ANSYS benötigt man die  $B(H)$  Kurve zwischen der Remanenzinduktion  $Br$  und der Koerzitivfeldstärke  $bH_c$ . In diesem Bereich wird  $B(H)$  auch mittels

$$B(H) = Br + \mu_0 \cdot \mu_r(H) \cdot H$$

beschrieben. Für viele Dauermagnetwerkstoffe, z.B. für Sinterwerkstoffe auf Selten-Erd-Basis, ist die relative Permeabilität  $\mu_r$  bis  $bH_c$  konstant und bewegt sich meist im Bereich zwischen 1.0 und 1.2. Für andere Dauermagnetwerkstoffe liegen aber auch

mehr oder weniger starke Nichtlinearitäten vor. Dies gilt insbesondere für Alnico-Materialien oder manche kunststoffgebundene Magnete.

In ANSYS erfolgt die Eingabe des relevanten B(H) Bereichs zum einen mittels Eingabe von  $bH_c$  über **mp,mgxx** sowie **mp,mgyy** und **mp,mgzz**. Im allgemeinen 3D-Fall sind alle drei Komponenten zu verwenden, denn mit ihnen wird die Richtung der Magnetisierung bzw. Polarisation angegeben und es gilt:

$$bH_c = \sqrt{mgxx^2 + mgyy^2 + mgzz^2}$$

Zum anderen wird die Steigung der B(H)-Kurve oberhalb  $bH_c$  durch Transformation in den ersten Quadranten wie in Abb. 3.1.0-1 rechts behandelt. D.h. die Kurve zwischen  $(-bH_c,0)$  und  $(0,Br)$  verschiebt sich so, dass sie im Nullpunkt beginnt und bei  $(bH_c,Br)$  endet. Die Eingabe erfolgt im Fall nichtlinearer Kurven dann mittels der Kommandos **tb** und **tbpt** so wie bei weichmagnetischen Materialien, allerdings nur zwischen den Punkten  $(0,0)$  und  $(bH_c,Br)$ . Im linearen Fall wird die dann konstante relative Permeabilität  $\mu$  mittels **mp,murx** eingegeben.

Macht man bei der Eingabe der Steigung keine weiteren Angaben, so wird diese im Raum als isotrop angenommen. Dies führt in der Regel zu korrekten Resultaten, da sich in den meisten Fällen  $\mu$  nur wenig von 1 unterscheidet. Führt ein Werkstoff wie zum Beispiel Alnico jedoch zu hohen Steigungen, so handelt man sich bei isotroper Betrachtung unerwünschte Flussleiteffekte in die Richtungen senkrecht zur Magnetisierung ein. Daher sollte man hier z.B. mittels **mp,mury** und **mp,murz** die Permeabilität senkrecht zur Polarisation gleich 1 setzen.

Das Eingeben der Permeabilität = 1 senkrecht zur Magnetisierung ist jedoch nur dann umsetzbar, wenn die Polarisation in nur in eine Raumrichtung weist. Es ist daher und aus weiteren Gründen ein guter Stil, die Magnetisierung stets in die X-Richtung zu definieren, d.h. **mgyy** und **mgzz** bleiben Null. Die Magnetisierung wird dann durch ein mit **local** gesondert definiertes Koordinatensystem, welches später durch **esys** und **emodif** in die Elemente eingebracht wird, in die gewünschte Raumrichtung gedreht. Mittels **local** lassen sich auch andere als kartesische Koordinatensysteme definieren, so dass sich z.B. auch radial gerichtete Polarisationen leicht eingeben lassen.

Beispiel:

Befehlssequenz für einen Magnetwerkstoff mit stark nichtlinearer Entmagnetisierungskurve, dessen Remanenzpolarisation in der X,Y-Ebene in Richtung  $45^\circ$  zeigen soll: Das Material soll die Materialnummer 2 erhalten. Es sollen empirische, nichtlineare Daten zur B(H)-Kurve zwischen  $(-bH_c,0)$  und  $(0,Br)$  vorliegen, Einheiten (A/m,T):

```
(-160 000, 0),
(-150 000, 0.21),
(-130 000, 0.36),
(-100 000, 0.47),
(-40 000,0.57),
(0,0.60).
```

Hieraus folgt:

**bHc=0.16e6**

**! (A/m)**

**(Br=0.6T)**

```

emunit,mks          !Daten werden im SI-System betrachtet
mp,mgxx,2,bHc      !Definition bHc, Magnetisierung
                   !vorerst in positive x-Richtung
tb,bh,2            !Eingabe der Entmagnetisierungskurve
                   !verschoben in den ersten Quadranten
tbpt,defi,-0.16e6+bhc,0
tbpt,defi,-0.15e6+bhc,0.21
tbpt,defi,-0.130e6+bhc,0.36
tbpt,defi,-0.1e6+bhc,0.47
tbpt,defi,-0.04e6+bhc,0.57
tbpt,defi,0+bhc,0.60

mp,murx,2,0        !Permeabilität 0 veranlasst ANSYS in
                   !diese Richtung die mit tb definierte
                   !H-abhängige Permeabilität zu
                   !verwenden
mp,mury,2,1        !Permeabilität senkrecht =1 setzen um
                   !Flussleiteffekte zu vermeiden
mp,murz,2,1

```

Die Eingabe von tbPlot,bh,2 liefert die in Abb. 3.1.0-2 gezeigte Darstellung, anhand derer die eingegebenen Wert kontrolliert werden können.

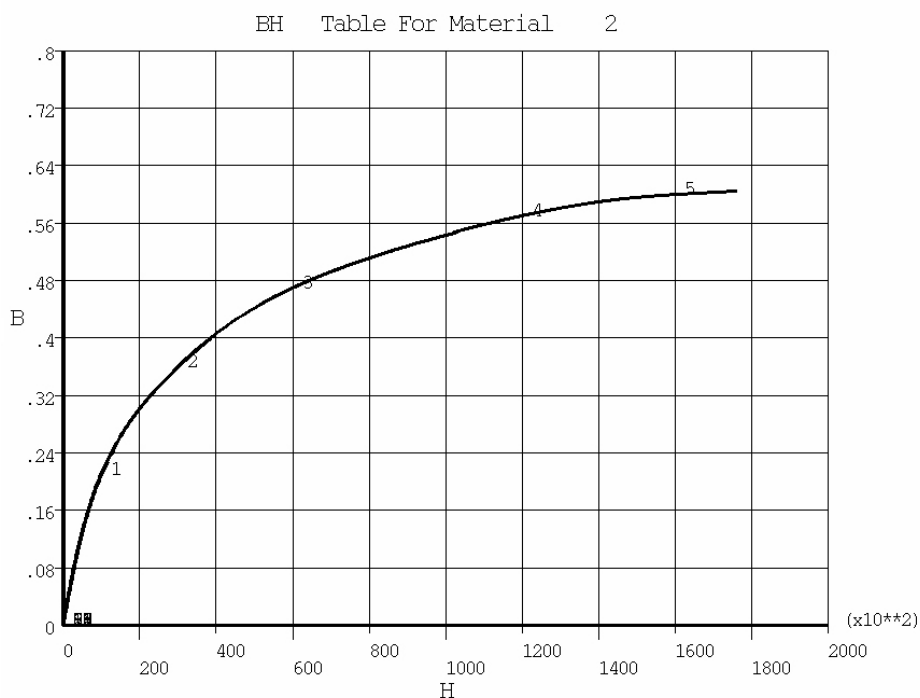


Abb. 3.1.0-2 Vereinbarte Kennlinie

Nach erfolgter Vernetzung des Dauermagnetbereichs mit Materialnummer 2 erfolgt das Rotieren der Magnetisierung in die richtige Richtung nun so:

```

local,11,0,,,,45 !Koordinatensystem mit Nummer 11 um
                  !45° rotiert um z-Achse erstellen
esel,s,mat,,2

```

```

csys,11          !ursprüngliches Koordinatensystem
                 !durch gedrehtes ersetzen
emodif,all,esys
allsel

```

Verwendet man statt obigem lokalem Koordinatensystem nun `local,11,1,,,,,45`, so erhält man statt einer homogenen Magnetisierung wegen des nun gültigen zylindrischen Koordinatensystems eine radiale Polarisierung.

Wäre statt einem Material mit nichtlinearer Entmagnetisierungskurve ein lineares Material mit gleichem  $bH_c$  und  $B_r$  einzugeben gewesen, so würde eine konstante relative Permeabilität von

$$\frac{B_r}{\mu_0 \cdot bH_c} = \frac{0.6 \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2}}{1.256e-6 \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot 0.16e6 \frac{\text{A}}{\text{m}}} = 3.0$$

vorliegen. Obige Befehlssequenz würde sich dann ändern zu:

```

emunit,mks
mp,mgxx,2,bHc
mp,murx,2,3.0
mp,mury,2,1 !kann weggelassen werden, wenn  $\mu_r$  nahe 1
mp,murz,2,1 !kann weggelassen werden, wenn  $\mu_r$  nahe 1

local,11,0,,,,,45          !local,11,1,,,,,45 bei radialer
                             !Magnetisierung
esel,s,mat,,2
csys,11
emodif,all,esys
allsel

```

### 3.1.1 Magnetfeld eines Dauermagneten mit axialer Magnetisierung

Ein Dauermagnet in der geometrischen Ausführung als Ring mit axialer Magnetisierung, wie ihn Abb. 3.1.1.-1 zeigt, soll hier untersucht werden.

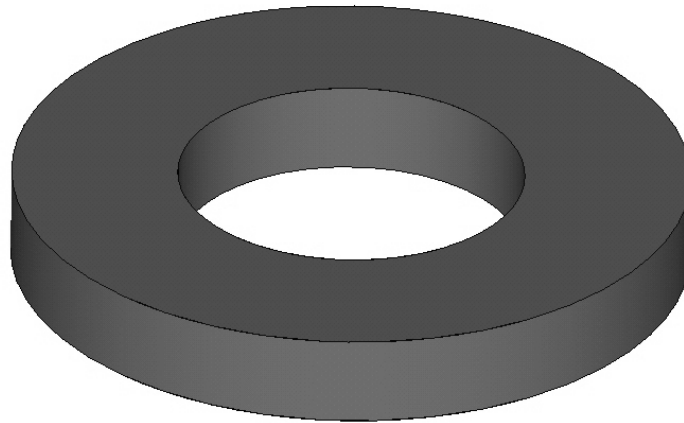


Abb. 3.1.1-1 Ringmagnet

Folgende Daten des aus Neodymium-Eisen-Bor (NdFeB) bestehenden Magneten seien bekannt:

Außendurchmesser	40 mm
Innendurchmesser	23 mm
Höhe	6 mm
Koerzitivfeldstärke $B_H C$	$0,808 \cdot 10^6$ A/m
rel. remanente Permeabilität	1,07
Dichte	7,4 g/cm <sup>3</sup>
Remanenz	1,1 T

Quelle: <http://www.ibs-magnet.de/products/dauermagnete/neodelta.php>

Da der Magnet rotationssymmetrisch und die Magnetisierung axial ausgerichtet ist, ist eine rotationssymmetrische Ausbildung des Feldes zu erwarten. Daher kann das Problem mit einem zweidimensionalen rotationssymmetrischen Modell berechnet werden. Dazu muss die Querschnittsfläche des Magneten und die der umgebenden Luft modelliert werden. Die Modellgeometrie ist in Abb. 3.1.1-2 dargestellt.

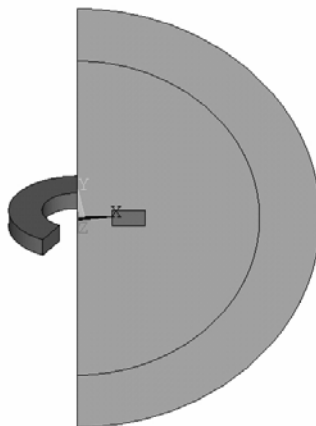


Abb. 3.1.1-2 Berechnungsfläche (Ringmagnet geschnitten dargestellt)

Das Modell wird folgendem Programm beschrieben. Am Beginn ist etwas Kommentar zur Zielstellung des Programms sinnvoll. Danach erfolgt die Vereinbarung der Geometrieparameter. Dazu werden leicht lesbare Parameternamen gewählt.

```

!Ring-Magnet axial magnetisiert

!-----Parameter-----
magradau=0.5*40e-3      !Magnet-Radius- Außen
magradin=0.5*23e-3     !Magnet-Radius- Innen
magho=6e-3             !Höhe Magnet
beradin=60e-3          !Bereich-Radius-Innen
rand=6e-6              !Rand
beradau=beradin+rand   !Bereich-Radius-Außen

```

Für die zweidimensionale Berechnung von Magnetfeldern über das Vektorpotential steht der Elementtyp `plane53` zur Verfügung. Der Elementtyp wird zum rotations-symmetrischen, wenn die Keyoption 3 auf 1 gesetzt wird. Dazu muss die Y-Achse die Rotationsachse sein. (Der Elementtyp `plane13` wäre auch zur Berechnung geeignet.) Als Randelement steht `infin110` zur Verfügung. Zur Anpassung an die Knotenzahl des Elementtyps `plane53` wird die Keyoption 2 auf 1 gesetzt. Für die Rotations-symmetrie wird die Keyoption 3 auf 1 gesetzt.

```

!-----Modellerstellung-----
/prep7
et,1,plane53, , ,1      !Magnet, Luft
et,2,infin110, ,1,1    !Rand

```

Zur Festlegung der Materialeigenschaften werden zwei Materialien vereinbart. Material 1 ist Luft. Es wird nur die relative Permeabilität benötigt. Für das Magnetmaterial (Material 2) wird ebenfalls die relative Permeabilität vorgegeben. Die Koerzitivfeldstärke erhält nur für die Y-Komponente einen von Null abweichenden Wert.

```

mp,murx,1,1            !Luft
mp,murx,2,1.07        !Magnet
mp,mgxx,2,0
mp,mgyy,2,0.808e6

```

Entsprechend Abb. 3.1.1-2 wird zuerst die Berechnungsebene als Halbkreisfläche modelliert. Für die Modellierung des Randelementes, (das es nur als Hexaeder gibt) ist es zweckmäßig, den äußeren Rand mit Hexaedern zu vernetzen. Dazu werden hier zwei Halbkreise generiert, die später überlappt werden.

(Für die hier betrachtete Problemstellung würde in Ausnutzung weiterer Symmetrie auch nur ein Viertelkreis ausreichen. Da dieses Modell aber später erweitert werden soll, wird auf diese Vereinfachung hier verzichtet.)

Die Schnittfläche des Ringmagneten wird mit einem Rechteck modelliert. Danach werden alle Flächen überlappt. Die dadurch entstehenden neuen Flächen haben gemeinsame Linien als Begrenzung. Dies ist eine Voraussetzung für die spätere automatische Vernetzung.

```

!----Geometrie-----
pcirc,0,beradau,-90,90
pcirc,0,beradin,-90,90
rectng,magradin,magradau,-magho/2,+magho/2  !Magnet
aovlap,all      !Überlappen der Flächen

```

**!A3:Magnet    A5:Luft innen    A4:Luft außen**

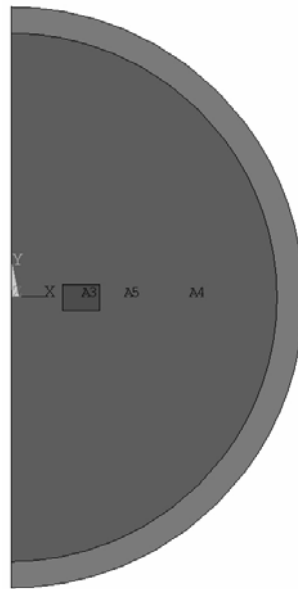


Abb. 3.1.1-3 Flächen des Berechnungsmodells

Für das spätere Ansprechen der Teile des Modells werden die Flächennummern (Ermittlung über Select Entitis Areas) in einer Kommentarzeile festgehalten.

Dann kann die Vernetzung erfolgen. Zuerst wird hier die Fläche für den Magneten vernetzt. Dazu wird der Typ-Zeiger auf Elementtyp 1 und der Materialzeiger auf Material 2 gestellt. Mit `esize` wird die Elementgröße (hier 1 mm) vorgegeben.

```
!----Vernetzung-----
!-----Magnet-----
type,1 $mat,2
esize,1e-3
mshkey,1      !Vernetzungssteuerung
mshape,0,2D   !Vernetzungssteuerung
amesh,3
```

Für die Vernetzung des äußeren Luftbereiches wird der Materialzeiger auf das Material 1 gestellt und die Elementgröße durch die Variable `rand` festgelegt.

```
!-----Luft-außen-----
type,1 $mat,1
esize,rand
amesh,4
```

Die innere Fläche für die Luft ist nicht so regelmäßig berandet, dass sie automatisch mit Hexaedern vernetzt werden kann. Deshalb wird die freie Vernetzung eingestellt

```
!-----Luft-außen-----
mshkey,0      !freie Vernetzung
esize,2e-3
amesh,5
```

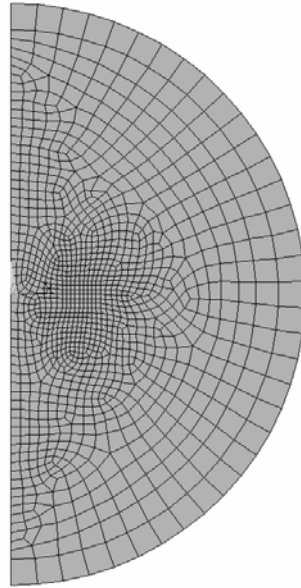


Abb. 3.1.1-4 Vernetzte Berechnungsflächen

Abb. 3.1.1-4 zeigt die vernetzte Berechnungsfläche.

Die Elemente am äußeren Rand sollen nun in Randelemente umgewandelt werden. Dazu müssen sie selektiert werden. Das geschieht über die Umschaltung in ein zylindrisches Koordinatensystem. Danach ist x der Radius. Nun werden alle Knoten mit einem Radius von Bereich außen selektiert. Die an diesen Knoten liegenden Elemente werden selektiert und in Elemente des Typs 2 umgewandelt und für sie das Infinty-Flag gesetzt.

```

!----Randbedingung-----
csys,1      !Zylinderkoordinaten
nselect,s,loc,x,beradau
esln
emodif,all,type,2
sf,all,inf
csys,0      !Rückschaltung in kartesische Koordinaten

```

Dann kann die Lösung angefordert werden. Dazu wird der Lösungsprozessor aufgerufen und mögliche Selektionen rückgängig gemacht.

```

!-----
/solu      !Lösungsprozessor
allsel
solve      !Lösung

```

Zur Auswertung wird der allgemeine Postprozessor aufgerufen und ein Makro zur Flussliniendarstellung gestartet. Eine Flussliniendarstellung ermöglicht die einfachste Plausibilitätsprüfung des Berechnungsergebnisses. Wenn sie nicht den Erwartungen entspricht, ist etwas bei der Modellbildung oder der Berechnung falsch gelaufen.

```

!-----
/post1     !Postprozessor
plf2d     !Flusslinien

```



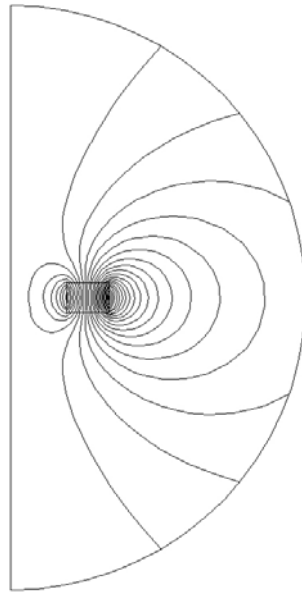


Abb. 3.1.1-5 Flusslinien der Berechnungsflächen

In Abb. 3.1.1-5 ist das Ergebnis angegeben.

### Weitere Auswertungen

Die Flussliniendarstellung in Abb. 3.1.1-5 ergibt sich aus der Rechnung. Sie erfordert beim nicht mit der Rechnung befassten Betrachter etwas Abstraktionsvermögen. Leichter lässt sich Ergebnis erfassen, wenn ein Schnitt durch die reale Anordnung dargestellt wird. Dazu muss das Ergebnis an der Y-Achse gespiegelt werden. Dies ermöglicht folgende Anweisung

```
/expand,2,polar,half,,90  
plf2d
```

Wenn dann noch etwas vergrößert wird, entsteht die in Abb. 3.1.1-6 angegebene Darstellung

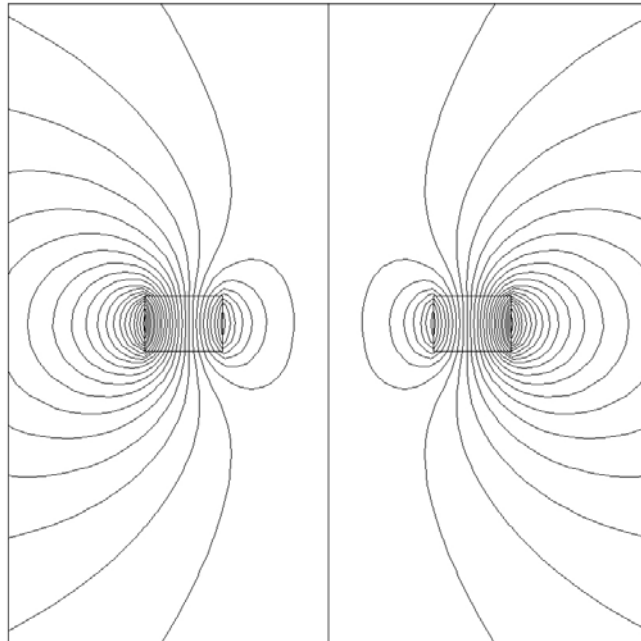


Abb. 3.1.1-6 Flusslinien (Schnitt durch die Gesamtanordnung)

Eine Darstellung des Betrages der magnetischen Flussdichte kann so erfolgen:

```
/plopts,minm,0
plns,b,sum
```

Abb. 3.1.1-7 zeigt das Ergebnis

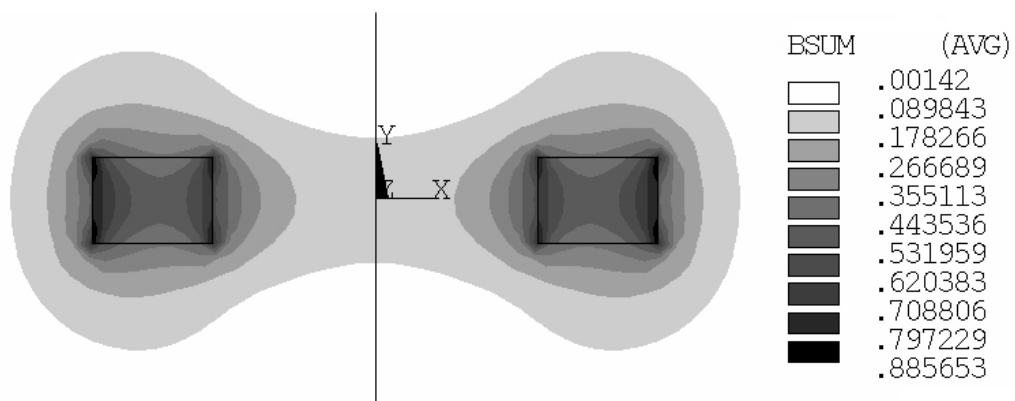


Abb. 3.1.1-7 Betrag der Flussdichte

Besonders instruktiv ist die Darstellung einer Größe als Vektor. Für die Flussdichte zeigt dies Abb. 3.3.1-8 nach den Anweisungen:

```
/show,,1 !Vektor-Modus
/edge,,1 !Elementkanten
plvect,b
/edge !Zurücksetzen
/show !Zurücksetzen
```

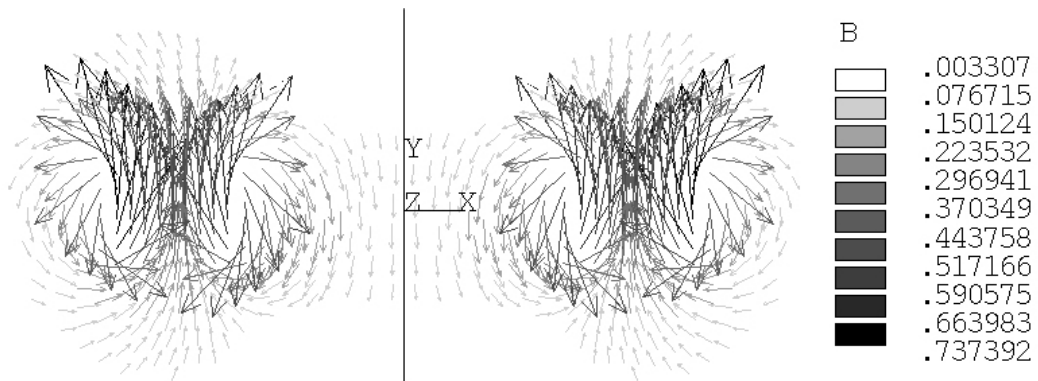


Abb. 3.1.1-8 Betrag der Flussdichte

Eine detailliertere Auswertung kann erfolgen, wenn Werte auf einem durch die Anordnung gelegten Weg in einem Diagramm dargestellt werden. Dazu wird ein Pfad vereinbart und auf ihm die Werte abgefragt und in ein Diagramm übernommen. Zuerst soll ein durch zwei Punkte definierter Pfad in der Symmetrieachse. mit dem Namen "achse" betrachtet werden. Auf ihm werden die Y-Komponente und der Betrag der Flussdichte angegeben.

```

path,achse,2,200,200
ppath,1,,0,-beradau,0    !x,y,z von Punkt1
ppath,2,,0,+beradau,0    !x,y,z von Punkt2
pdef,by,b,y
pdef,bsum,b,sum
plpath,by,bsum

```

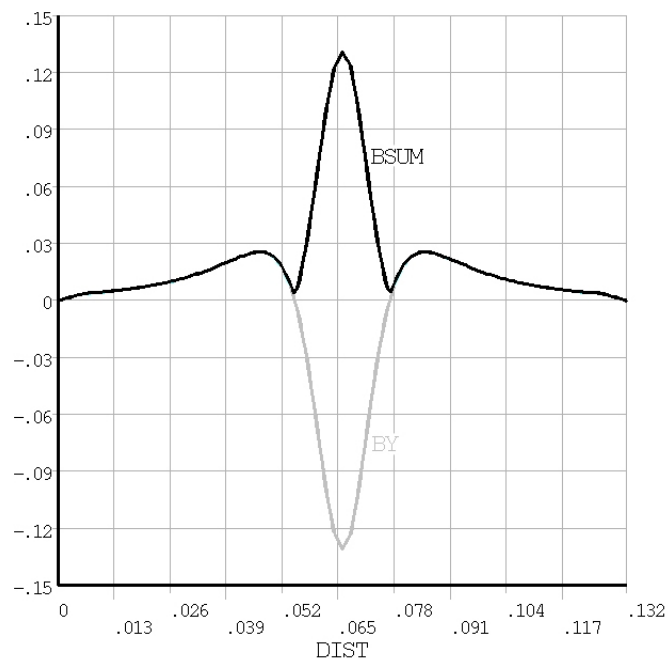


Abb. 3.1.1-9 Flussdichte auf dem Pfad "achse"

Der nächste Pfad mit dem Namen "quer" soll senkrecht zur Achse kurz über dem Magnet verlaufen, dort wo man mit einem Sensor die Flussdichte messen könnte. Um die Darstellung über die Schnittfläche des Gesamtsystems zu führen, werden einfach drei Punkte für die Pfadvereinbarung benutzt. Der erste liegt am Rand, der zweite in der Mitte und der dritte ist derselbe wie der erste. Dadurch wird der Weg durch das Gesamtsystem vorgetäuscht. Auf ihm sollen Betrag, Y-Komponente und X-Komponente dargestellt werden.

```

path,quer,3,200,200
sens=0.5e-3      !Abstand vom Ring
ppath,1,,beradin,magho+sens,0
ppath,2,,0,magho/2+sens,0
ppath,3,,beradin,magho/2+sens,0
pdef,by,b,y
pdef,bx,b,x
pdef,bsum,b,sum
plpath,by,bx,bsum

```

In Abb. 3.1.1-10 ist das Ergebnis angegeben

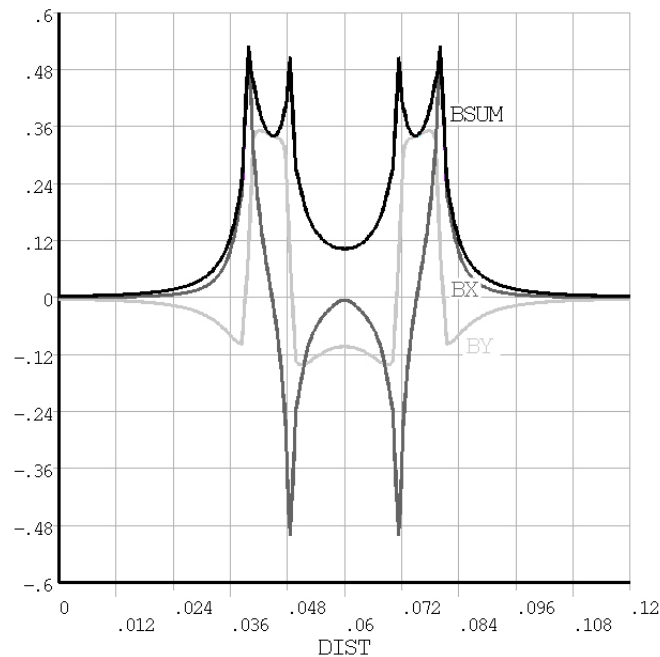


Abb. 3.1.1-10 Flussdichte auf dem Pfad "quer"

Die Größe BX, also die X-Komponente der Flussdichte ist wegen des gewählten zweidimensionalen rotationssymmetrischen Modells die Flussdichte in radialer Richtung.

Die Lage der Pfade ist mit

```

!-----Pfadlage-----
/pbc,path,1
plns,b,sum

```

darstellbar, wie Abb. 3.1.1-11 zeigt.

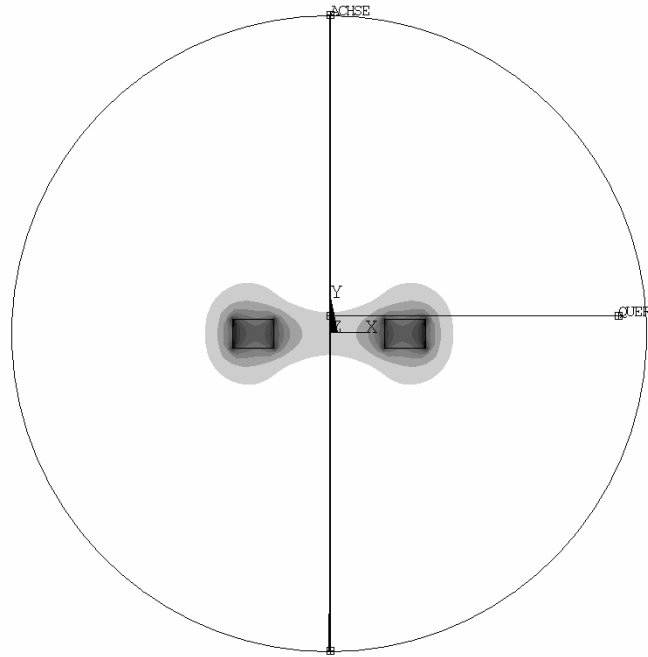


Abb. 3.1.1-11 Pfadlage