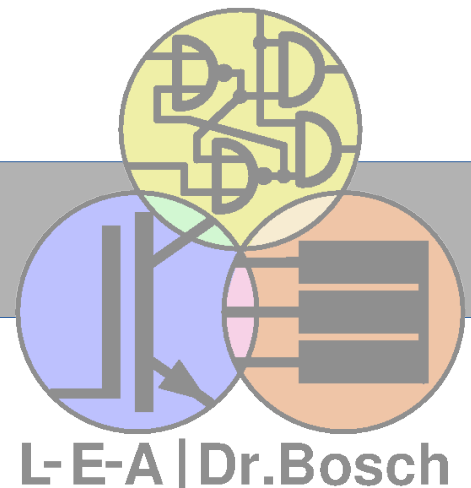


Dienstleistungen rund um den elektrischen Antrieb

# Leistungs-Elektronik & Antriebe

Entwicklung – Schulung – Beratung



## Versuch *Haftmagnet*

Untersuchung von  
Haftmagneten durch  
Messungen und  
numerische Simulation  
nach der Finite-  
Elemente-Methode  
(FEM) mit dem freien  
Programm *FEMM*

Version 4 vom 1. 6. 2015  
Erstellt von V. Bosch

# Inhaltsverzeichnis

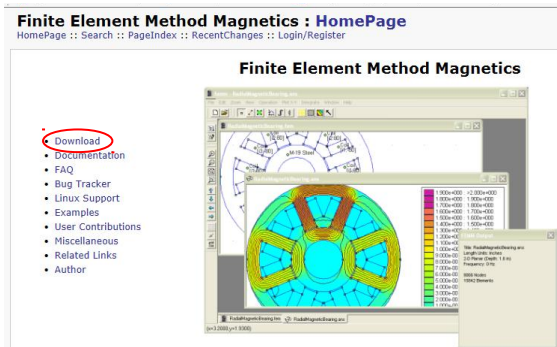
<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>2</b>
<b>1. Installation und Start der Software.....</b>	<b>3</b>
<b>2. Modellierung der Geometrie.....</b>	<b>5</b>
<b>3. Zuordnung der Materialien bzw. Materialeigenschaften.....</b>	<b>6</b>
<b>4. Berandung der Simulation zeichnen.....</b>	<b>9</b>
<b>5. Werkstoff-Zuweisung.....</b>	<b>10</b>
<b>6. Randbedingungen setzen.....</b>	<b>12</b>
<b>7. Vernetzung und Berechnung.....</b>	<b>13</b>
<b>8. Ergebnisse anzeigen - Postprozessor.....</b>	<b>14</b>
<b>9. Verschieben von Objekten.....</b>	<b>17</b>

# 1. Installation und Start der Software

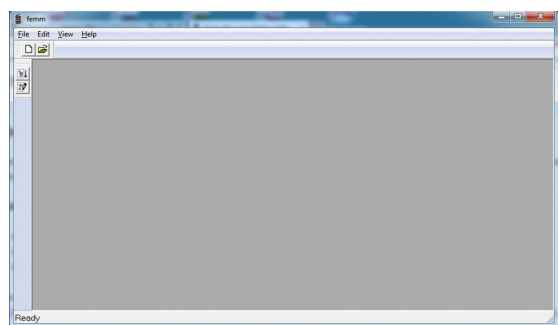
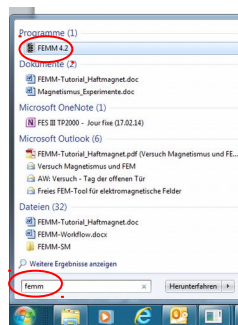
Dieser Versuch benutzt das freie FEM-Software-Paket *FEMM* für Windows.

Es kann von der Internet-Side

<http://www.femm.info> kostenlos heruntergeladen werden.

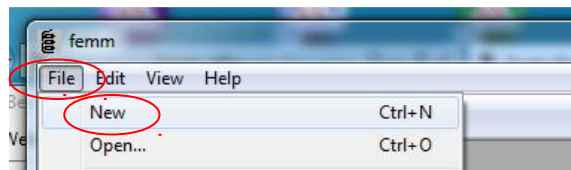


Nach der Installation Programm **femm.exe** starten:

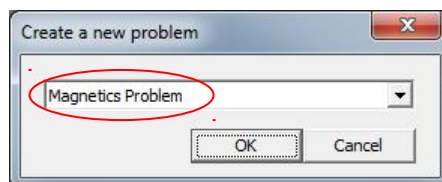


## Anlegen eines neuen Projekts zur Berechnung eines Magnetfeldes

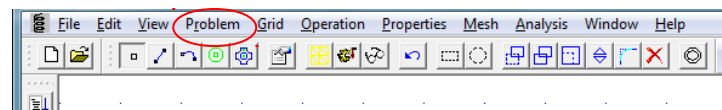
-> **File**  
-> **New**



*Magnetics Problem*  
-> **OK**



## Eigenschaften der Magnetfeld-Berechnung definieren

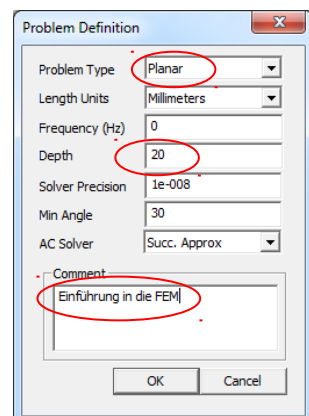


-> **Problem**

*Planar*: 2-dimensionales (ebenes) Problem.

*Depth*: Ausdehnung senkrecht zur Zeichenebene, hier gleich der Länge des Magnets.

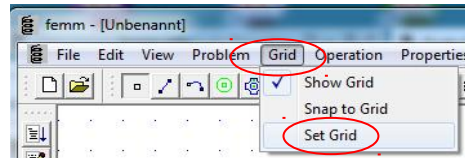
*Comment*: Optionaler Kommentar



## Darstellung der Zeichenebene

-> Grid

-> Set Grid

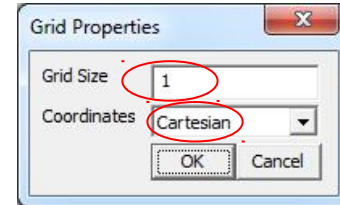


Grid Size

Coordinates

Rastergitter in mm

*Cartesian*: Darstellung in  
kartesischen Koordinaten (x/y)



## 2. Modellierung der Geometrie

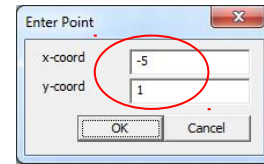
**Eingabe des Magnets:** Der Magnet wird in Seitenansicht dargestellt. Er erscheint somit als Rechteck das 10mm breit und 5mm hoch ist.

Eckpunkte eingeben

-> **Operate on Nodes**



-> **Tabulatortaste** drücken: Eingabe der Koordinaten



Linke untere Ecke: x-coord: -5 y-coord: 1

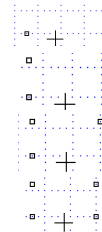
Linke obere Ecke: x-coord: -5 y-coord: 6

Rechte obere Ecke: x-coord: 5 y-coord: 6

Rechte untere Ecke: x-coord: 5 y-coord: 1

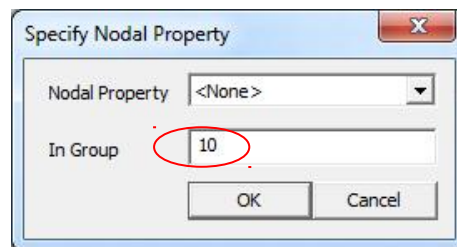
Rechts-Klick auf alle Punkte nacheinander

**Leertaste** drücken



*In Group: 10*

Die Nummer 10 wird dem Magnet zugeordnet.



-> **OK**

Kanten definieren: Verbindungslinien zwischen den Punkten

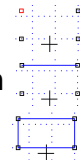
-> **Operate on Segments**



Punkt links oben mit rechter Maustaste anklicken

Punkt rechts oben mit rechter Maustaste anklicken

Diese Schritte mit allen vier Seiten des Rechtecks wiederholen

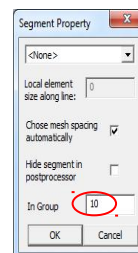


Rechts-Klick auf alle Linien nacheinander

-> **Leertaste** drücken

*In Group: 10*

-> **OK**



**Eingabe der Eisenplatte** (Rechteck, 78mm breit und 6mm hoch)

-> Eingabe der Koordinaten: -> **Tabulatortaste** drücken

Linke obere Ecke: x-coord: -39 y-coord: 0

Linke untere Ecke: x-coord: -39 y-coord: -6

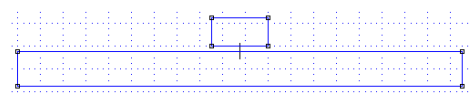
Rechte obere Ecke: x-coord: 39 y-coord: -6

Rechte untere Ecke: x-coord: 39 y-coord: 0

Die Punkte der Gruppe 20 zuweisen

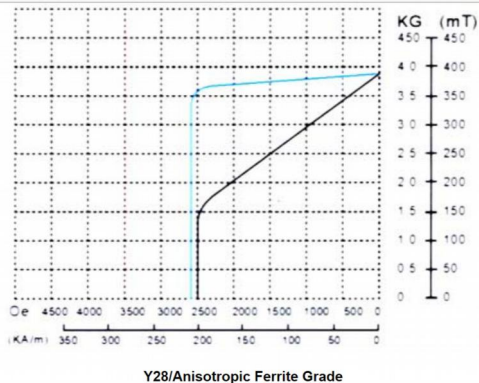
Verbindungslinien, wie oben

Die Linien der Gruppe 20 zuweisen



### 3. Zuordnung der Materialien bzw. Materialeigenschaften

#### Magnetwerkstoff Y28 modellieren



Material	Br		HcB		HcJ		(BH) max	
	mT	KG	KA/m	KOe	KA/m	KOe	KJ/m <sup>3</sup>	MGOe
Y8T	200~235	2.0~2.35	125~160	1.57~2.01	210~280	2.64~3.52	6.5~9.5	0.8~1.2
Y20	320~380	3.2~3.8	135~190	1.70~2.38	140~195	1.76~2.45	18.0~22.0	2.3~2.8
Y22H	310~360	3.1~3.6	220~2500	2.77~3.14	280~320	3.52~4.02	20.0~24.0	2.5~3.0
Y23	320~370	3.2~3.7	170~190	2.14~2.38	190~230	2.39~2.89	20.0~25.5	2.5~3.2
Y25	360~400	3.6~4.0	135~170	1.70~2.14	140~200	1.76~2.51	22.5~28.0	2.8~3.5
Y26H	360~390	3.6~3.9	220~250	2.77~3.14	225~255	2.83~3.21	23.0~28.0	2.9~3.5
Y27H	370~400	3.7~4.0	205~250	2.58~3.14	210~255	2.64~3.21	25.0~29.0	3.1~3.7
Y28	370~400	3.7~4.0	175~210	2.20~2.64	180~220	2.26~2.77	26.0~30.0	3.3~3.8
Y30	370~400	3.7~4.0	175~210	2.20~2.64	180~220	2.26~2.77	26.0~30.0	3.3~3.8
Y30H-1	380~400	3.8~4.0	230~275	2.89~3.46	235~290	2.95~3.65	27.0~32.0	3.4~4.1
Y30H-2	395~415	3.95~4.15	275~300	3.46~3.77	310~335	3.90~4.21	28.5~32.5	3.5~4.0

Quellen: <http://www.magnets.com.cn/in2ai.htm> und [http://www.chinamagnets.com/Ferrite\\_Magnet.html](http://www.chinamagnets.com/Ferrite_Magnet.html)

Werte der Magnetisierungskurve B(H), also Flussdichte B (in Tesla) über der Feldstärke H (in A/m) aus dem Diagramm entnehmen, z.B. mittels des Programms **g3data** (<http://www.frantz.fi/software/g3data.php>)

1	Y28 Entmagnetisier	
2	Feldstärke	Flussdichte
3	H (A/m)	B (T)
4	-202241,91	0,00010742
5	-202203,931	0,03200277
6	-202172,858	0,06043124
7	-202144,547	0,09163321
8	-202112,783	0,12976895
9	-198678,154	0,15124944
10	-192866,768	0,16578728
11	-174963,748	0,1885977
12	-155268,147	0,21140102
13	-132438,292	0,23696542
14	-108714,219	0,2646064
15	84541,3097	0,28155222

Kurve in den Ursprung verschieben, indem von jedem Feldstärke-Wert (Spalte A) der erste Wert (Zelle A4) subtrahiert wird:

1	A	B	C
2	Y28 Entmagnetisierungskur		
3	Feldstärke	H verschoben	Flussdichte
4	H (A/m)	H (A/m)	B (T)
5	-202241,91	=A4-\$A\$4	0,00010742
6	-202203,931	37,978404	0,03200277
7	-202172,858	69,051644	0,06043124
8	-202144,547	97,362819	0,09163321
9	-202112,783	129,126575	0,12976895
10	-198678,154	3563,755383	0,15124944
11	-192866,768	9375,141802	0,16578728
12	-174963,748	27278,16173	0,1885977
13	-155268,147	46973,76235	0,21140102
14	-132438,292	69803,61712	0,23696542
15	-108714,219	93527,6907	0,2646064

Die Werte der Spalten B und C in eine Textdatei exportieren.

1	A	B	C
2	Y28 Entmagnetisierungskur		
3	Feldstärke	H verschoben	Flussdichte
4	H (A/m)	H (A/m)	B (T)
5	-202241,91	0	0,00010742
6	-202203,931	37,978404	0,03200277
7	-202172,858	69,051644	0,06043124
8	-202144,547	97,362819	0,09163321
9	-202112,783	129,126575	0,12976895
10	-198678,154	3563,755383	0,15124944
11	-192866,768	9375,141802	0,16578728
12	-174963,748	27278,16173	0,1885977
13	-155268,147	46973,76235	0,21140102
14	-132438,292	69803,61712	0,23696542
15	-108714,219	93527,6907	0,2646064

Das Dezimaltrennzeichen Komma durch einen Punkt ersetzen. Die Textdatei unter dem Namen **Y28.dat** abspeichern

Y28.dat - Editor	
Datei	Bearbeiten
0	0.000107425
37.978404	0.032002774
69.051644	0.060431237
97.362819	0.09163321
129.126575	0.129768953
3563.755383	0.15124944
9375.141802	0.165787278
27278.16173	0.188597699
46973.76235	0.211401018
69803.61712	0.236965417
93527.6907	0.264606396

-> **Properties** -> **Materials**

Property Definition

Property Name:

Add Property

Delete Property

Modify Property

OK

Block Property

Name: Y28

B-H Curve: Nonlinear B-H Curve

Linear Material Properties

Relative  $\mu_x$ : 1

Relative  $\mu_y$ : 1

$\phi_{hx}$ , deg: 0

$\phi_{hy}$ , deg: 0

Nonlinear Material Properties

Edit B-H Curve

$\phi_{hmax}$ , deg: 0

Coercivity

$H_c$ , A/m: 192500

Electrical Conductivity

$\sigma$ , MS/m: 0

Source Current Density

$J$ , MA/m<sup>2</sup>: 0

Special Attributes: Lamination & Wire Type

Not laminated or stranded

Lam thickness, mm: 0

Lam fill factor: 1

Number of strands: 0

Strand dia, mm: 0

OK

Cancel

-> **Add Property**

Name: Y28

B-H-Curve: Nonlinear B-H Curve

Coercivity  $H_c$ : 192500 (Mittelwert für  $H_{cB}$  aus obiger Werkstofftabelle)

-> **Edit B-H Curve**

B-H Curve Data

B-H Curve for: Y28

B, Tesla

H, Amp/m

Plot B-H Curve

Log Plot B-H Curve

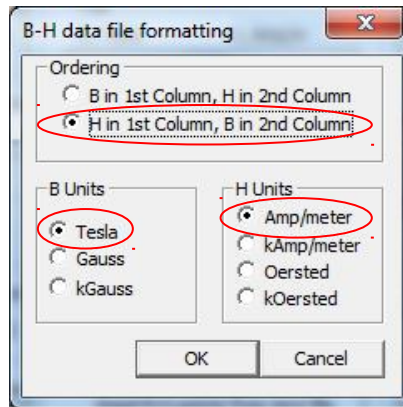
Read B-H points from text file

OK

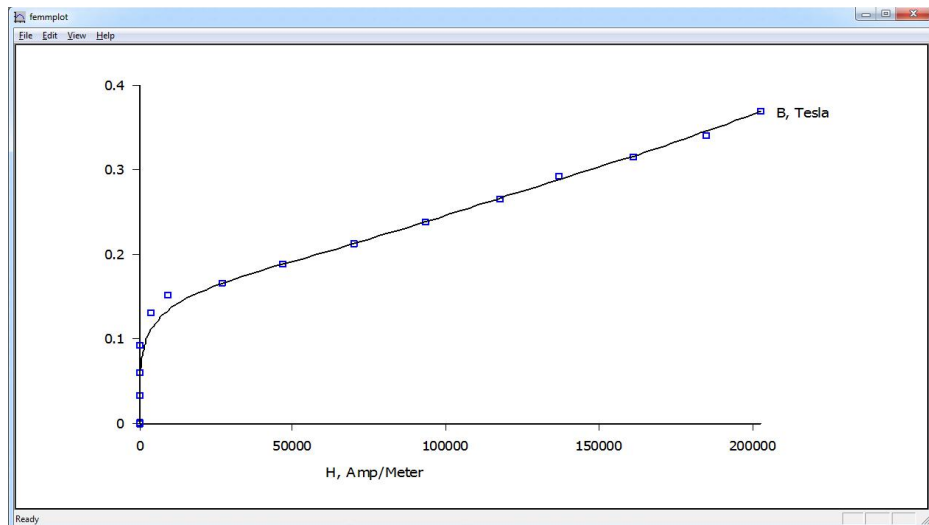
Cancel

-> Read B-H points from text file

**Y28.dat** auswählen



-> Plot B-H Curve



-> OK -> OK -> OK

## Weitere Werkstoffe aus Bibliothek auswählen

-> Properties -> Materials Library

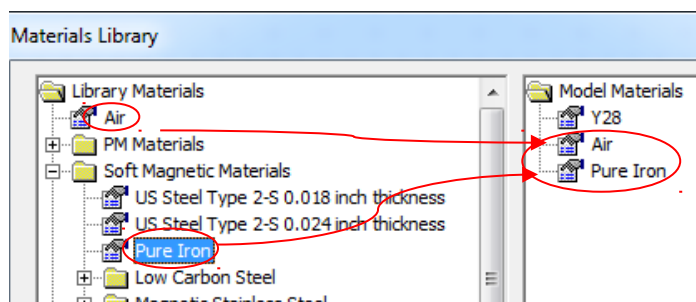
Links-Klick-> Air In rechtes Teilfenster hinüberziehen

Ordner *Soft Magnetic Materials* öffnen

Links-Klick-> Pure Iron

in rechtes Teilfenster hinüberziehen


-> OK






## 4. Berandung der Simulation zeichnen

Kreis mit Radius 80mm um den Ursprung des Koordinatensystems legen

-> **Operate on Nodes** 

**Tabulator-Taste** Koordinaten  $x=-80$   $y=0$  und  $x=80$   $y=0$  eingeben

Rechts-Klick auf beide Knoten -> **Leertaste** In Group 1000

-> **Operate on arc segments** 

Links-Klick auf rechten Punkt (80/0),

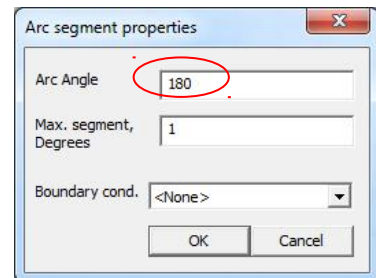
anschließend Links-Klick auf linken

Punkt (-80/0)

Winkel des Segments in Winkelgrad eingeben:

*Arc Angle*: 180

-> **OK**



Links-Klick auf linken Punkt (80/0),

anschließend Links-Klick auf rechten

Punkt (-80/0)

-> **OK**

Rechts-Klick auf beide Segmente -> **Leertaste** In Group: 1000

## 5. Werkstoff-Zuweisung

-> Operate on block labels



### Magnet

Links-Klick in die Mitte des Magnets

Rechts-Klick auf den soeben erzeugten Knoten

-> Leertaste

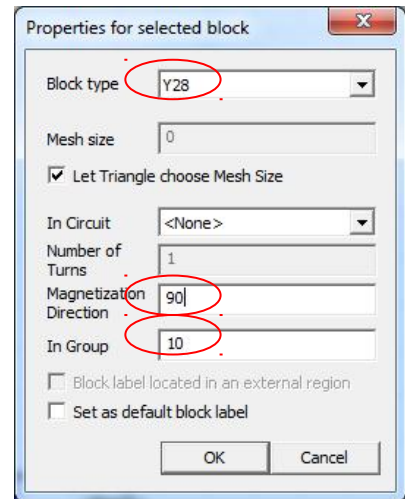
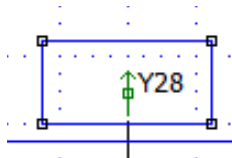
Block type: -> Y28

Magnetization Direction: 90

In Group: 10

-> OK

Ergebnis:



### Eisenplatte

Links-Klick in die Mitte der Eisenplatte

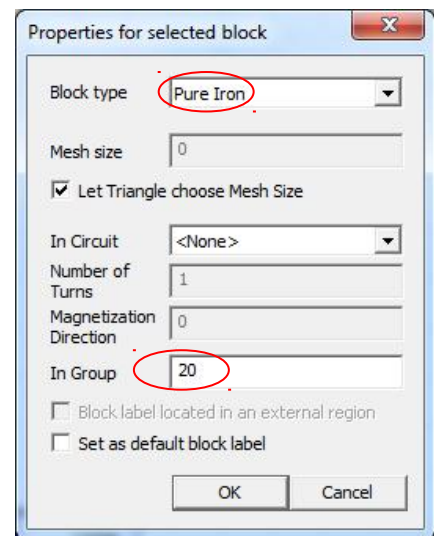
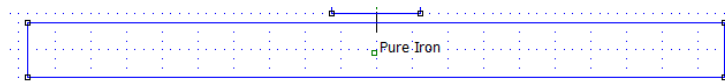
Rechts-Klick auf den soeben erzeugten Knoten

-> Leertaste

Block type: Pure Iron

In Group: 20

Ergebnis:



## Hintergrund-Material festlegen

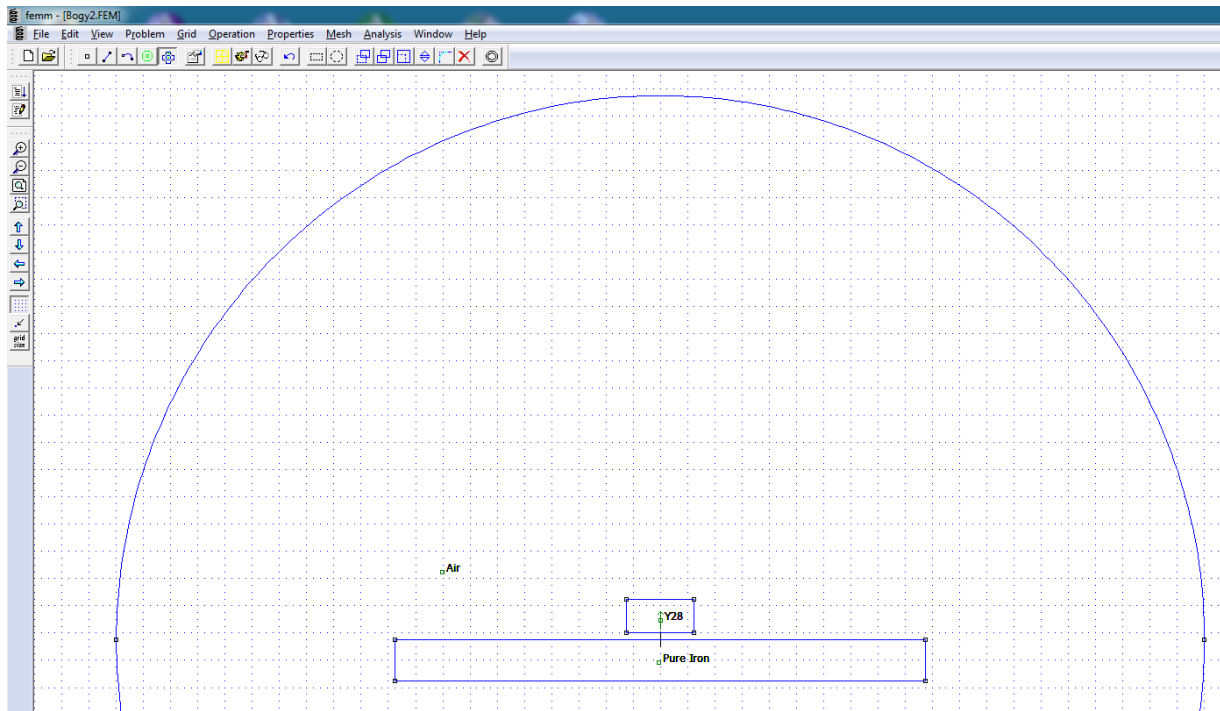
Links-Klick innerhalb des Kreises, aber außerhalb von Eisen oder Magnet

Rechts-Klick auf den soeben erzeugten Knoten

-> Leertaste

*Block type:* Air

*In Group:* 1000



## 6. Randbedingungen setzen

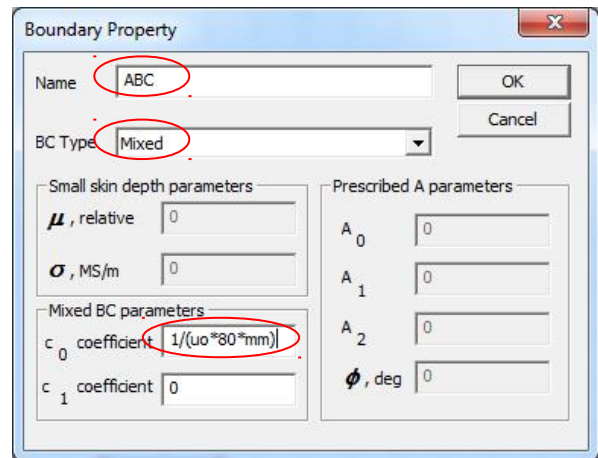
-> Properties -> Boundary -> Add Property

Name: ABC  
 BC Type: Mixed  
 $c_0$  coefficient:  $1/(u_0 \cdot 80 \cdot \text{mm})$   
 $c_1$  coefficient: 0

-> OK


ABC: asymptotic boundary condition,  
 $80 \cdot \text{mm}$  = Radius des Kreises

-> OK



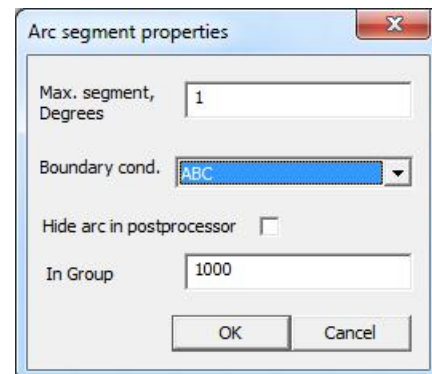
The dialog box 'Boundary Property' has the following fields and values:

- Name: ABC
- BC Type: Mixed
- Small skin depth parameters:
  - $\mu$ , relative: 0
  - $\sigma$ , MS/m: 0
- Mixed BC parameters:
  - $c_0$  coefficient:  $1/(u_0 \cdot 80 \cdot \text{mm})$
  - $c_1$  coefficient: 0
- Prescribed A parameters:
  - $A_0$ : 0
  - $A_1$ : 0
  - $A_2$ : 0
  - $\phi$ , deg: 0

-> Operate on arc segments 

Rechts-Klick auf beide Kreissegmente -> Leertaste

Boundary cond.: ABC

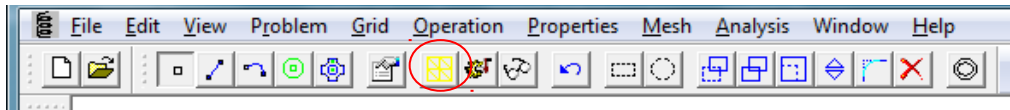


The dialog box 'Arc segment properties' has the following fields and values:

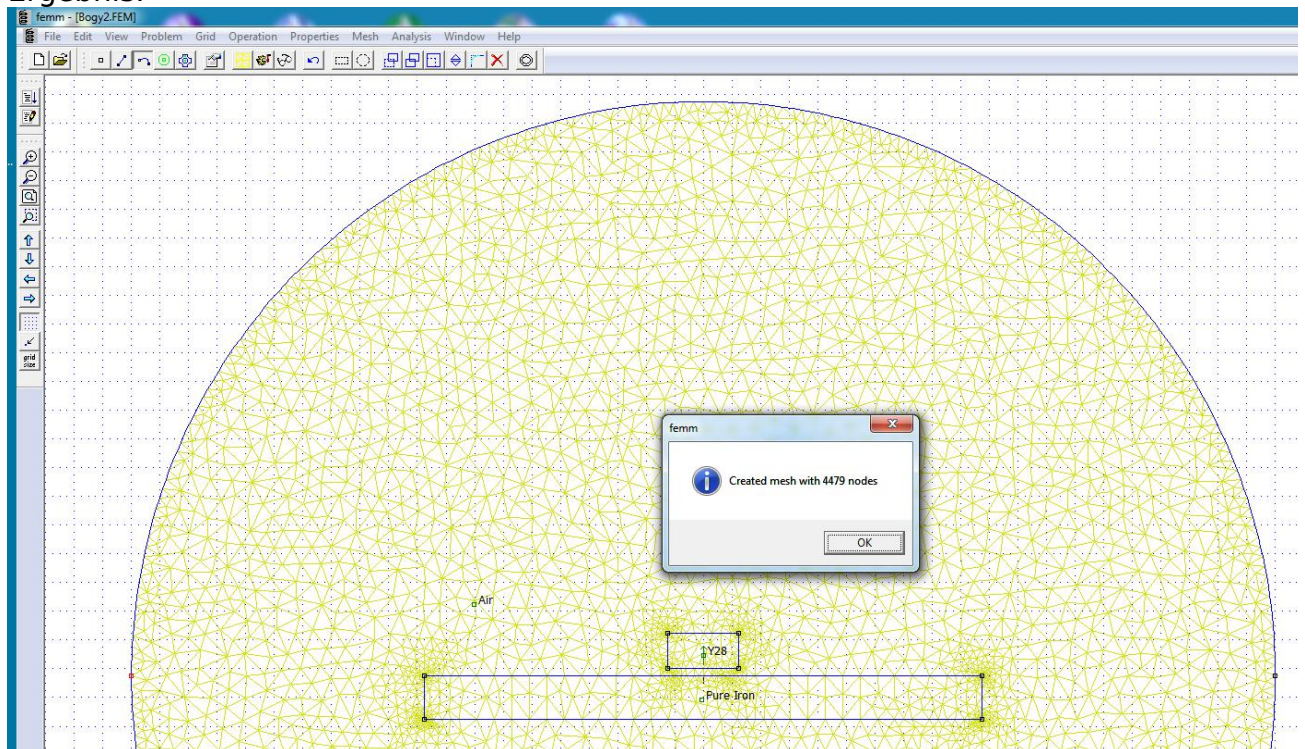
- Max. segment, Degrees: 1
- Boundary cond.: ABC
- Hide arc in postprocessor: ☐
- In Group: 1000

## 7. Vernetzung und Berechnung

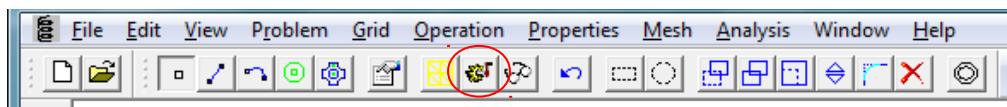
Vernetzung starten -> Run mesh generator



Ergebnis:

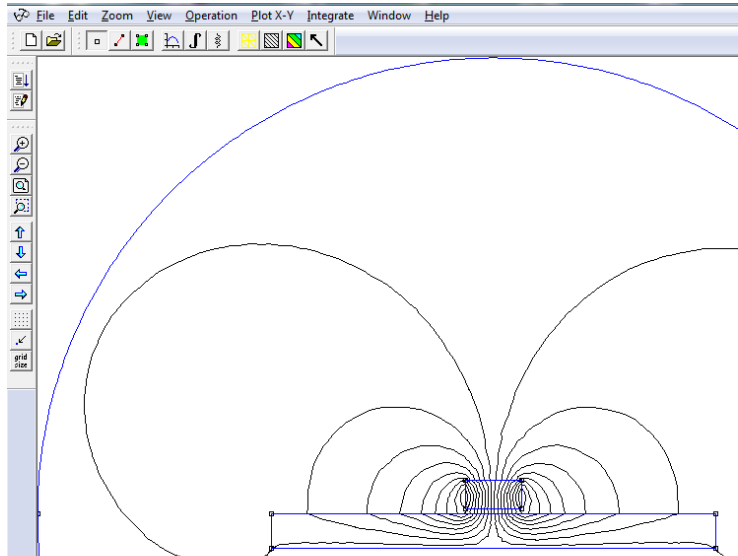
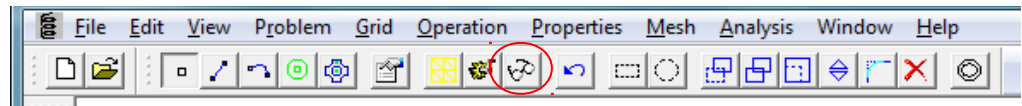


Berechnung, Solver starten -> Run analysis



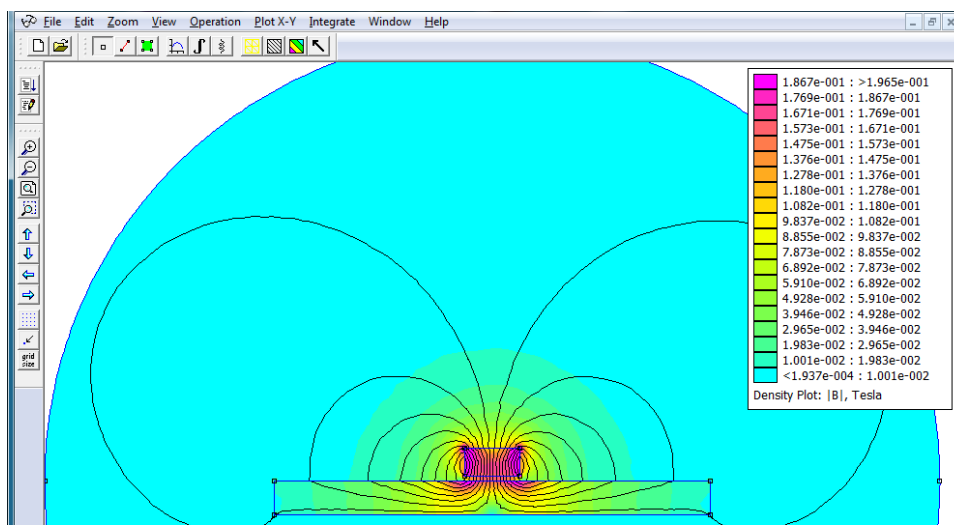
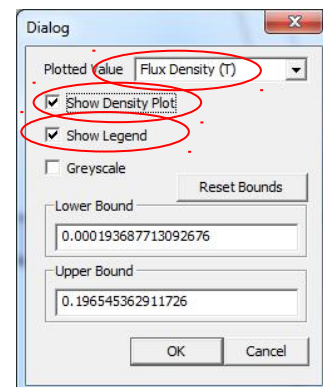
## 8. Ergebnisse anzeigen - Postprozessor

-> View results

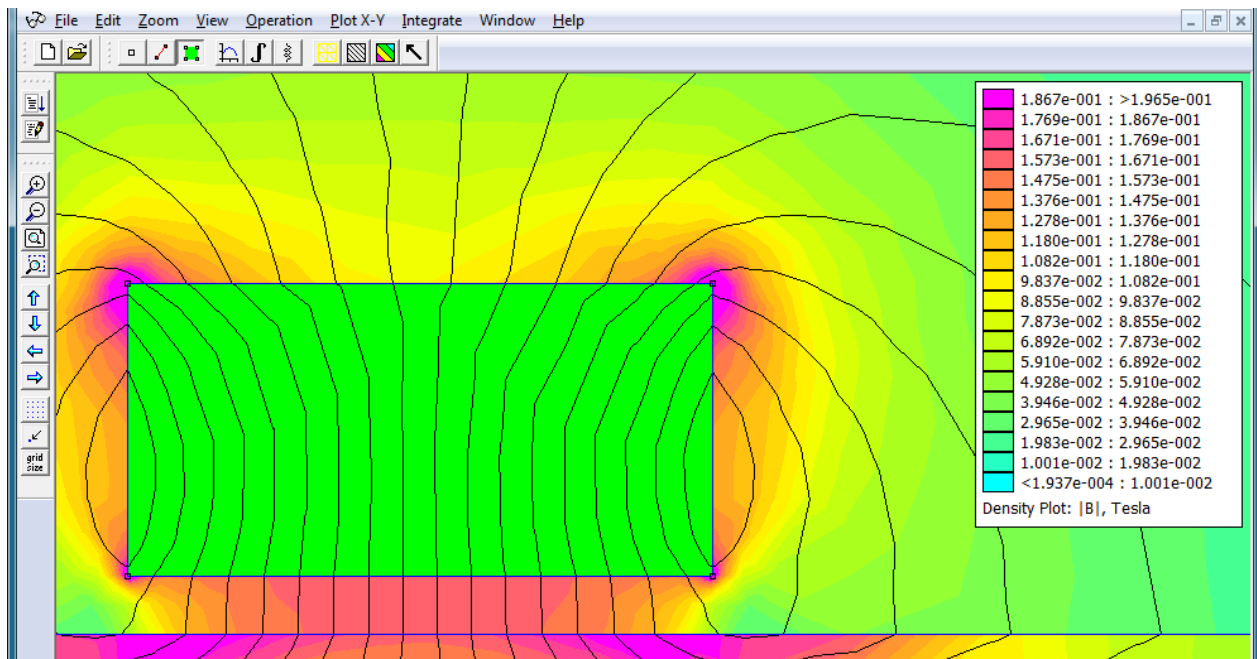


### 11.1 Bunte Darstellung der Flussdichte

->  ->  
->







Aus der Farbskala kann eine Flussdichte von ca. 0,16 T zwischen Magnet und Eisenplatte abgelesen werden

### Ermittlung der Haltkraft

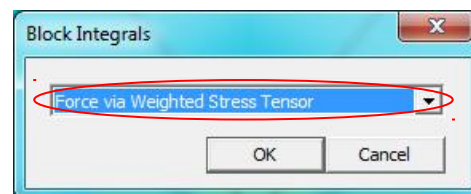
Gruppenmodus aktivieren



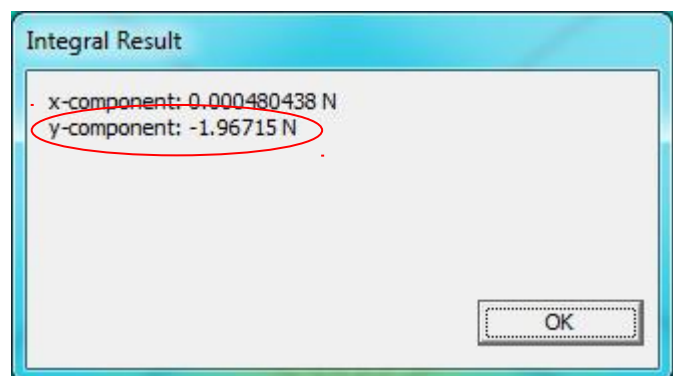
Links-Klick in den Magnet

-> Menue Integrate ->

-> OK



Die Kraft auf den Magnet wirkt in der Senkrechten (y), nach unten (negatives Vorzeichen). Sie beträgt 1,96715 N bei einer Magnet- und Eisenlänge von 20mm (in die Zeichenebene hinein) und unter Vernachlässigung der axialen Streuung.




## Darstellung der magnetischen Flussdichte im Luftspalt

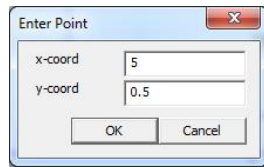
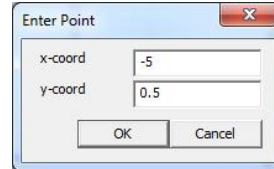
Linie erzeugen, entlang der die Flussdichte angezeigt werden soll:

Geomentrie-Editor öffnen (Hauptmenu)

Eckpunkte eingeben:


-> **Operate on Nodes** 

-> **Tabulatortaste** drücken: Eingabe der Koordinaten

Rechts-Klick auf beide Punkte -> **Leertaste** -> In Group 100 -> **OK**

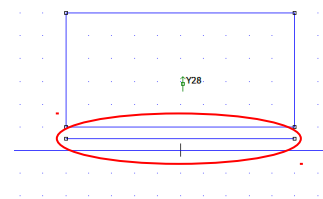
Verbindungsline zwischen den Punkten ziehen:

-> **Operate on Segments** 


beide Punkte anklicken:

Rechts-Klick auf Linie -> **Leertaste**

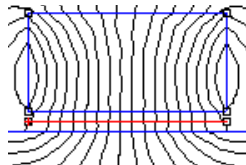
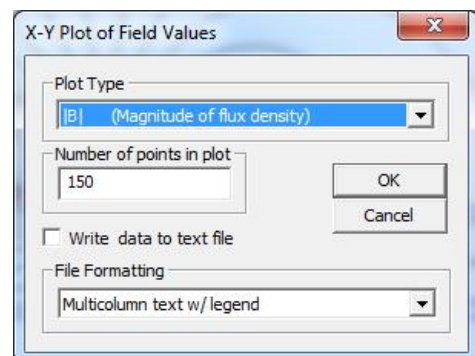
-> In Group 100 -> **OK**



In den Postprozessor wechseln: 

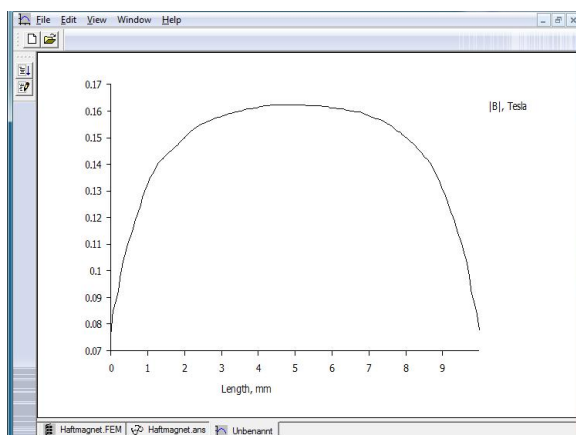
**Operate on Contours** 

Beide Endpunkte der Linie anklicken:

Menue -> **Plot X-Y**

-> **OK**



Eine Linie kann durch Drücken der Shift-Taste nach dem Anklicken von Anfangs- und Endpunkt in ein Kreissegment verwandelt werden. Die Reihenfolge von Anfangs- und Endpunkt gibt die Richtung des Segments vor, der gewünschte Winkel wird in die Eingabemaske eingetragen.



## 9. Verschieben von Objekten

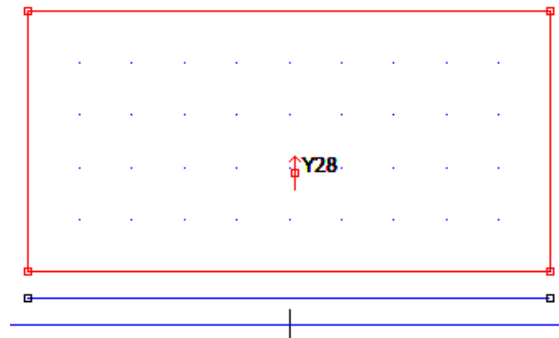
Soll die Kraft für einen anderen Abstand zwischen Magnet und Eisenplatte berechnet werden, so muss der Magnet verschoben werden.

Geomentrie-Editor öffnen (Hauptmenu)

Operate on groups of objects ->



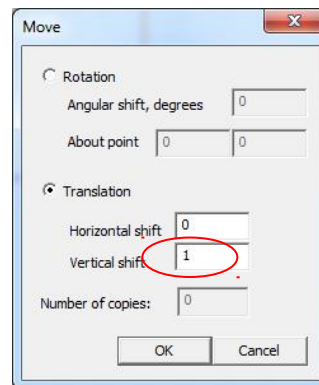
Rechts-Klick in den Magnet



Move/Rotate selected objects ->



->



-> OK

Ergebnis:

