

```

etable,volumen,volu      !Volumen=Fläche
etable,jele,jt,z         !Stromdichte im Element
etable,bele,b,y         !Flussdichte im Element
smult,fvele,jele,bele   !Volumenkraftdichte
smult,fele,fvele,volumen !Kraft im Element
ssum

```

Wie erwartet, ergibt sich der gleiche Zahlenwert. (Auf analoge Weise ließe sich auch die ordentliche Vektorproduktbildung vollziehen.)

Vergleich mit linienhaften Leitern

Macht man die Querschnitte klein und die Abstände groß, kann mit der geschlossenen Gleichung für linienhafte Leiter verglichen werden.

$$\frac{F}{l} = \frac{\mu \cdot I_1 \cdot I_2}{2 \cdot \pi \cdot d}$$

Bei $I_1 = I_2 = 100 \text{ A}$ und einem Abstand von $d = 10 \text{ mm}$ ergibt sich nach dieser Gleichung eine längenbezogene Kraft von $0,2 \text{ N/m}$. ANSYS liefert mit dem o.a. Programm bei kleinem quadratischen Querschnitt (2 mm) der Leiter einen Wert von $0,0819$ für die betrachtete Hälfte. Die Werte liegen in der gleichen Größenordnung.

3.12 Kopplung zwischen zwei Wicklungen

Zunächst sollen zwei Wicklungen mit konstanter Stromdichte untersucht werden. Die Anordnung wird durch die beiden Hauptinduktivitäten und die Koppelinduktivität bzw. den Koppelfaktor beschrieben. Abb. 3.12-1 zeigt eine prinzipielle Anordnung.

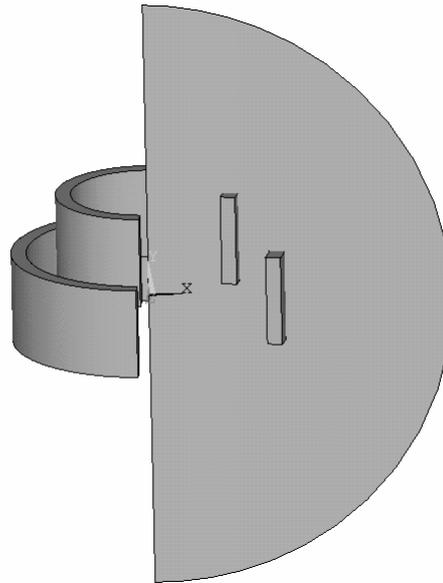


Abb. 3.12-1 Anordnung der Wicklungen und der Berechnungsebene

Wegen der Rotationssymmetrie der Anordnung kann zweidimensional axialsymmetrisch gerechnet werden.

Die Induktivitäten sind nur von der Geometrie abhängig.

Die geometrischen Abmessungen sind am Programmanfang vereinbart.

Programm

```

!Kopplung zweier Wicklungen
!eine Wicklung (Kupfer) stromdurchflossen
!zweidimensional axialsymmetrisch
!Ermittlung Hauptinduktivitäten und Koppelfaktor
!Strom-Speisung
wadi=5e-3      !Wanddicke
abst=10e-3    !Abstand der Wicklungen radial
wihol=30e-3   !Wicklungs-Höhe
wiradau2=30e-3 !Wicklungs-Radius außen
wiradin1=wiradau2+abst !Wicklungs-Radius innen
wiradau1=wiradin1+wadi !Wicklungs-Radius außen
wiradin2=wiradau2-wadi !Wicklungs-Radius innen
wiho2=30e-3   !Wicklungs-Höhe
versatz=-20e-3 !Versatz beider Wicklungen untereinander
beradin=60e-3 !Bereichs-Radius innen
beradau=120e-3 !Bereichs-Radius außen
beradau=100e-3

```

Für die spätere Verwendung werden Stromdichten festgelegt und die Wicklungsquerschnitte ermittelt.

```

stromd1=1000      !Stromdichte in Wicklung1
stromd2=stromd1  !Stromdichte in Wicklung2
wizahl1=10       !Windungszahl Wicklung1
wizahl2=1        !Windungszahl Wicklung2
awil=(wiradau1-wiradin1)*wihol !Wicklungsfläche

```

```
awi2=(wiradau2-wiradin2)*wiho2 !Wicklungsfläche
mw=(wiradau1-wiradin1)/4 !Maschenweite
```

Nach dem Aufruf des Preprozessors werden Elementtypen und Materialien vereinbart. Für das spätere Ansprechen der einzelnen Wicklungen ist die Vergabe getrennter Materialnummern zweckmäßig, obwohl es sich um das gleiche Material handeln kann.

```
/prep7
et,1,plane53,,,1 !Luft, Leiter
et,2,infin110,,,1 !Rand
mp,murx,1,1 !Luft
mp,murx,2,1 !Wicklung1
mp,murx,3,1 !Wicklung2
```

Dann wird die Geometrie vereinbart. Die Einzelflächen werden überlagert und die neuen Flächennummern für die spätere Verwendung festgehalten.

```
!-----Geometrie-----
pcirc,0,beradau,-90,90
pcirc,0,beradin,-90,90
rectng,wiradin1,wiradau1,-wiho1/2,wiho1/2
rectng,wiradin2,wiradau2,-wiho2/2+versatz,wiho2/2+versatz
aovlap,all
aplot
!A3:Wick1 A4:Wick2 A6:Bereich innen A5:Bereich außen
```

Danach können die einzelnen Flächen vernetzt werden.

```
!-----Vernetzung--Leiter-----
mshape,0,2d !Vernetzen mit Vierecken
mshkey,1
esize,mw !Maschenweite
mat,2
amesh,3
mat,3
amesh,4
!----Vernetzung---Luft-----
csys,1 !Zylinderkoordinaten
lsel,s,loc,x,beradin,beradau
lsel,u,loc,x,beradin
lsel,u,loc,x,beradau
lesize,all,,,4,1/4
esize,,16
mat,1
amesh,5
mshkey,0
esize,mw*8
amesh,6
!-----Rand-----
```

```

nsel,s,loc,x,beradau
esln
emodif,all,type,2
sf,all,inf
csys,0      !kartesische Koordinaten

```

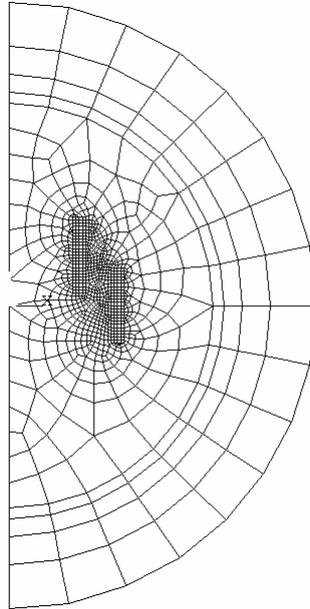


Abb. 3.12-2 Vernetzte Berechnungsfläche

In Abb. 3.12-2 sind die Elemente nach der Vernetzung dargestellt.

Zuerst soll die Wicklung 1 erregt werden. Dazu wird ihr eine Stromdichte eingepreßt. Der Wert ist beliebig (lineare Verhältnisse). Er kürzt sich nachher heraus.

```

!---Stromvorgabe-----
esel,s,mat,,2
bfe,all,js,,,,stromd1

```

Dann kann die Lösung für den ersten Fall angefordert werden. Das Ergebnis kann durch Darstellung der Flusslinien (Abb. 3.12-3) kontrolliert werden.

```

allsel
!-----
/solu
solve
!-----
/post1
plf2d

```

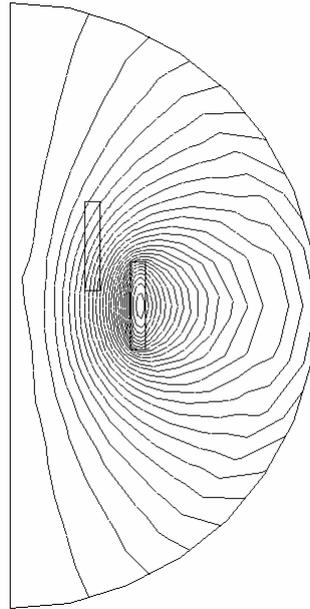


Abb. 3.12-3 Flusslinien, Wicklung 1 erregt

Die Hauptinduktivität der Wicklung 1 (L_1) ergibt sich aus dem Quotienten von mit dieser Wicklung verknüpftem Fluss durch den verursachenden Strom.

$$L_1 = \frac{\Psi_{11}}{I_1}$$

```
!--Stromdichte mal Fläche ist Durchflutung--
!--Strom ist Durchflutung durch Windungszahl
strom1=stromd1*awi1/wizahl1
```

Für jedes Element der Wicklung wird der umfasste Fluss durch das Integral über das Vektorpotenzial längs des Weges des ringförmigen Elementes ermittelt.

$$\Psi_e = \int \vec{A} \, d\vec{s}$$

Vektorpotenzial und Wegelement haben die gleiche Richtung. Der Wert des Vektorpotenzials ist für ein Element konstant und der gesamte Weg ist ein Kreisring. Aus allen wird ein Mittelwert gebildet. Dazu werden die Werte der Elemente in eine Elemente-Tafel geschoben.

```
!--Ermittlung phi-mittel-in W1--
pi=3.1415
esel,s,mat,,2           !Alle Elemente der Wicklung 1
*get,eanz,elem,,count  !Anzahl der Elemente
etable,az,a,z          !Vektorpotenzial des Elementes
etable,radius,cent,x   !Radius des Elementes
```

Dann erfolgt die Multiplikation und die Summation (Integration).

```
smult,ephi,az,radius,2,pi !Multiplikation
ssum                       !entpricht Integration
```

Der aufsummierte Wert für den Fluss wird der Variablen `phisum` zugewiesen und der Mittelwert gebildet. Daraus wird die Induktivität `L1` ermittelt.

```
*get,phisum,ssum,,item,ephi
phimit11=phisum/eanz      !Mittelwert
l1=phimit11*wizahl1/strom1 !Hauptinduktivität L1
```

Im Output-Fenster kann der Wert 9,68 μH abgelesen werden.

Auf analoge Weise wird der durch `I1` herrührende die Wicklung 2 durchsetzende Fluss ermittelt.

```
!--Ermittlung phi-mittel in W2
esel,s,mat,,3      !Wicklung2
*get,eanz,elem,,count
etable,az,a,z
etable,radius,cent,x
smult,ephi,az,radius,2,pi
ssum
*get,phisum,ssum,,item,ephi
phimit21=phisum/eanz
l21=phimit21*wizahl2/strom1
```

Damit ergibt sich der Wert der Koppelinduktivität `L21` zu 0,265 μH .

Im zweiten Fall soll nun die andere Wicklung erregt werden. Dazu wird wieder der Lösungsprozessor aufgerufen und die vorige Stromdichteeinprägung gelöscht.

```
!-----Speisung der Wicklung2-----
/solu
esel,s,mat,,2
bfede,all,all
```

Dann kann die Wicklung 2 mit einer Stromdichte beaufschlagt und neu gelöst werden.

```
esel,s,mat,,3      !Wicklung2
bfe,all,js,,,stromd2
allsel
solve
!-----
/post1
plf2d
```

Abb. 3.12-4 zeigt die neue Flussausbildung. In dieser Anordnung werden wiederum die Induktivitäten bestimmt.

```
strom2=stromd2*awi2/wizahl2
!--Ermittlung phi-mittel-in W2--
esel,s,mat,,3
```

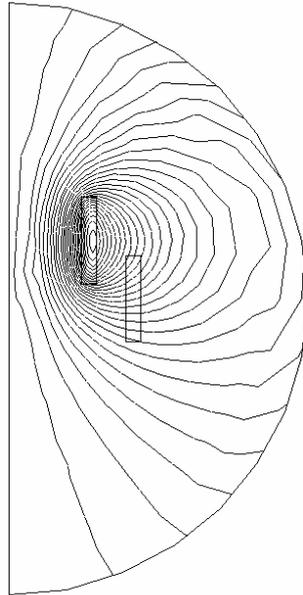


Abb. 3.12-4 Flusslinien, Wicklung 2 erregt

```

*get,eanz,elem,,count
etable,az,a,z
etable,radius,cent,x
smult,ephi,az,radius,2,pi
ssum
*get,phisum,ssum,,item,ephi
phimit22=phisum/eanz
l2=phimit22*wizahl2/strom2

```

Im Output-Fenster kann der Wert 0,0489 μH abgelesen werden.

```

!--Ermittlung phi-mittel in W1
esel,s,mat,,2
*get,eanz,elem,,count
etable,az,a,z
etable,radius,cent,x
smult,ephi,az,radius,2,pi
ssum
*get,phisum,ssum,,item,ephi
phimit12=phisum/eanz
l12=phimit12*wizahl1/strom2

```

Damit ergibt sich der Wert der Koppelinduktivität L_{12} zu 0,265 μH . Er ist erwartungsgemäß genauso groß wie L_{21} .

Der Koppelfaktor ergibt sich nach der Definition

$$M = L_{12} = L_{21} = k\sqrt{L_1 \cdot L_2}$$

$$k = l_{12} / \sqrt{l_1 \cdot l_2}$$

zu $k = 0,386$.