

**Katalog
von
Feldausbildungen
und
Stromdichteverteilungen
(zweidimensional)**

Inhalt

- 1 Leiter bei Gleichstrom (Magnetfeld konstanter Ströme)
- 2 Eisenleiter bei Gleichstrom
- 3 Leiter bei Stromanstieg
- 4 Leiter mit induzierten Strömen

1 Leiter bei Gleichstrom

1.1 Ein Rundleiter

Ausgangspunkt für die Betrachtungen ist ein unendlich langer gerader Leiter mit kreisförmigem Querschnitt mit dem Radius $R = 5,64 \text{ mm}$ (Querschnittsfläche: 100 mm^2) in einem umgebenden Raum (Luft) mit dem Radius von 60 mm . (zweidimensionale Betrachtung) In diesem Leiter fließt ein Strom von $I = 10 \text{ kA}$. Die Stromdichte beträgt also 100 A/mm^2 bzw. $100 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$. Jeder Strom wird von einem Feld begleitet. Dieses Feld ermöglicht den Energietransport. Der Strom verteilt sich gleichmäßig über den gesamten Querschnitt. Damit entstehen die geringsten Verluste im Leiter. Die Energie, die das den Strom begleitende Feld beinhaltet, kann über die Induktivität beschrieben werden.

$$W = \frac{L \cdot I^2}{2}$$

Die Ausbildung dieses Feldes kann nach dem Durchflutungsgesetz leicht ermittelt werden.

Im Inneren des Leiters beträgt die Feldstärke

$$0 \leq r \leq R \quad H_{(r)} = \frac{I}{2\pi R^2} r$$

und außerhalb

$$R \leq r < \infty \quad H_{(r)} = \frac{I}{2\pi} \frac{1}{r}$$

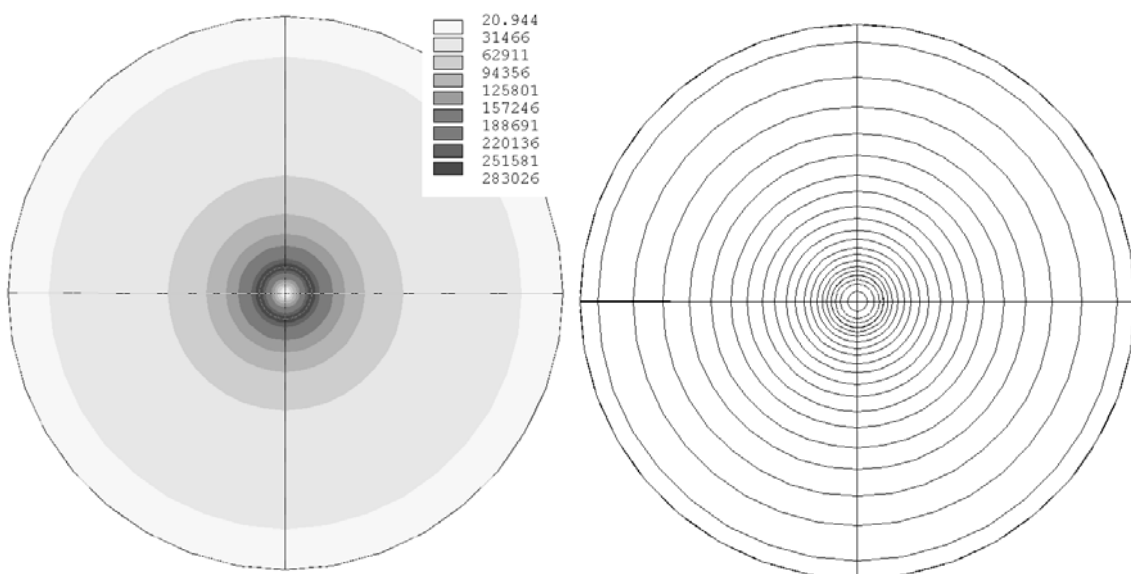


Abb. 1.1 Betrag der magnetischen Feldstärke und Flusslinien beim Rundleiter

Die magnetische Feldstärke H ist tangential gerichtet. Eine Linie konstanter Feldstärke fällt mit der Körperkante des Leiters zusammen. Deshalb ist es besonders sinnvoll, zwischen innerer und äußerer Induktivität des Leiters zu unterscheiden.

Aus der Identität

$$\frac{1}{2} LI^2 = \frac{1}{2} \int \mathbf{B} \cdot \mathbf{H} \cdot dV$$

kann mit

$$dV = 2\pi r \ell dr$$

die Induktivität

$$L = \frac{\mu}{I^2} \int H^2 dV$$

ermittelt werden.

Im Leiterinneren ergibt sich der auf die Länge bezogene Wert zu

$$\frac{L_i}{\ell} = \frac{\mu}{2\pi R^4} \int_0^R r^3 dr = \frac{\mu}{8\pi}$$

und außerhalb

$$\frac{L_a(r)}{\ell} = \frac{\mu}{2\pi} \int_R^r \frac{1}{r} dr = \frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{r}{R}$$

Die Integration für die Ermittlung der äußeren Induktivität über den Radius von R bis unendlich liefert den Wert unendlich. Praktisch kann es aber einen einzelnen Leiter ohne Rückleiter nicht geben. Deshalb ist die Bestimmung einer äußeren Induktivität hier auch nicht sinnvoll.

In der numerischen Untersuchung ergibt sich für die innere Induktivität der erwartete Wert von 50 nH/m.

1.2 Ein Rechteckleiter

Aus dem Rundleiter des vorangegangenen Abschnitts wird nun gedanklich ein rechteckiger Leiter geformt. Er hat die gleiche Querschnittsfläche ($20 \times 5 \text{ mm}^2$) wie der runde Leiter und wird vom gleichen Strom durchflossen.

In Abb. 1.2 ist der Betrag der magnetischen Feldstärke angegeben. Hier fällt die Leiterkante nicht mit einer Feldlinie (Linie konstanten Vektorpotentials) zusammen.

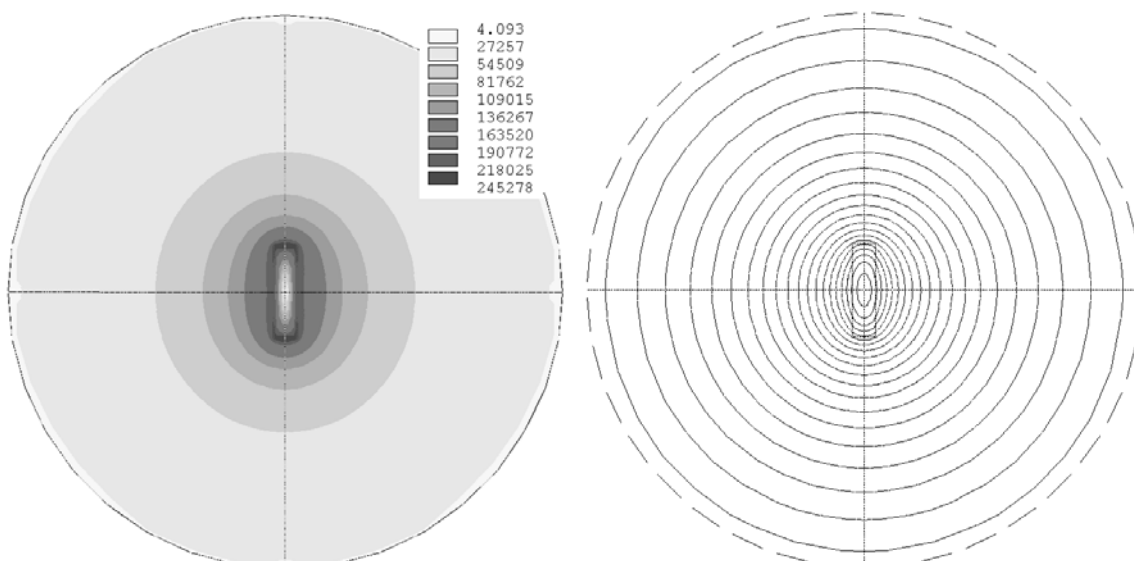


Abb. 1.2 Betrag der magnetischen Feldstärke und Flusslinien beim Rechteckleiter

Die innere Induktivität beträgt 31,0 nH/m.

1.3 Zwei parallele Rundleiter (Doppelleitung)

Aus zwei Rundleitern des ersten Abschnitts wird nun eine Doppelleitung gebildet. Abb. 1.3 zeigt die geometrische Anordnung. Für künftige beispielhafte Anordnungen wird $a = 3R$ gewählt.

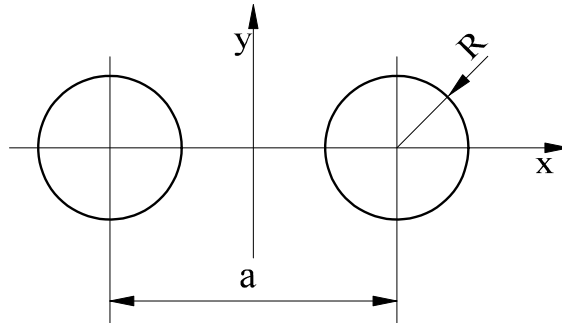


Abb. 1.3 Geometrie der Doppelleitung

Werden beide Leiter gegenseitig vom gleichen Strom durchflossen, ergibt sich die Abb. 1.4 angegebene Feldstärkeverteilung.

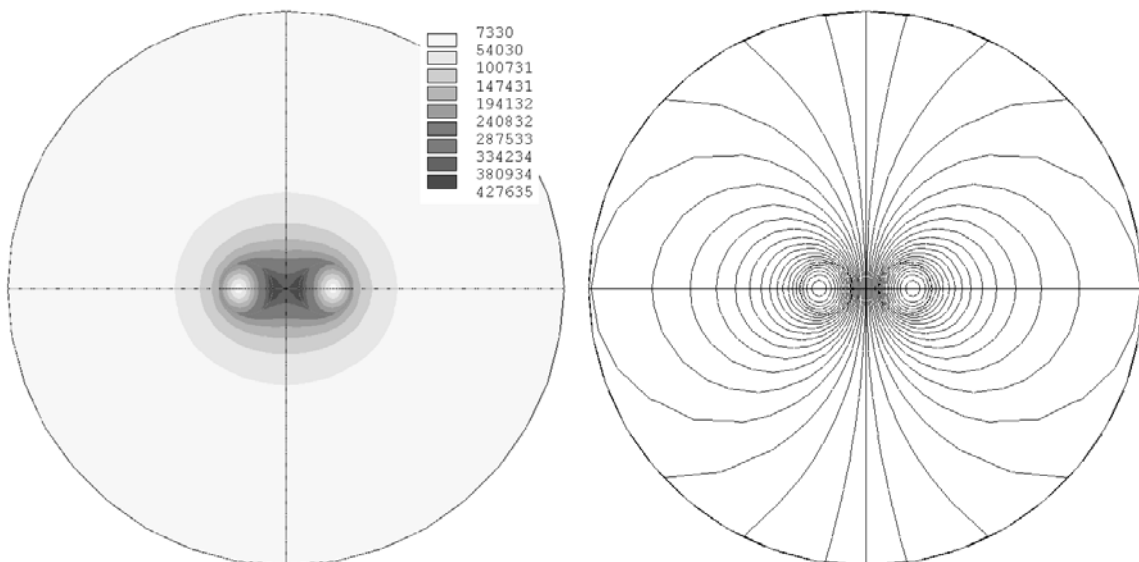


Abb. 1.4 Feldstärkeverteilung und Flusslinien der Doppelleitung gegenseitig durchflossen

Die innere Induktivität der Leitung beträgt 123 nH/m und die äußere 416 nH/m. Für diese Anordnung existiert eine geschlossene Lösung (Sommerfeld „Elektrodynamik“).

$$L'_{\text{ges}} = \frac{\mu}{\pi} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{a}{R} \right)$$

Für $a = 3R$ liefert diese Gleichung 539 nH/m, was eine sehr gute Übereinstimmung mit der numerischen Lösung bedeutet.

Werden die beiden Leiter gleichsinnig vom Strom durchflossen, ergibt sich in Abb. 1.5 angegebene Feldstärkeverteilung.

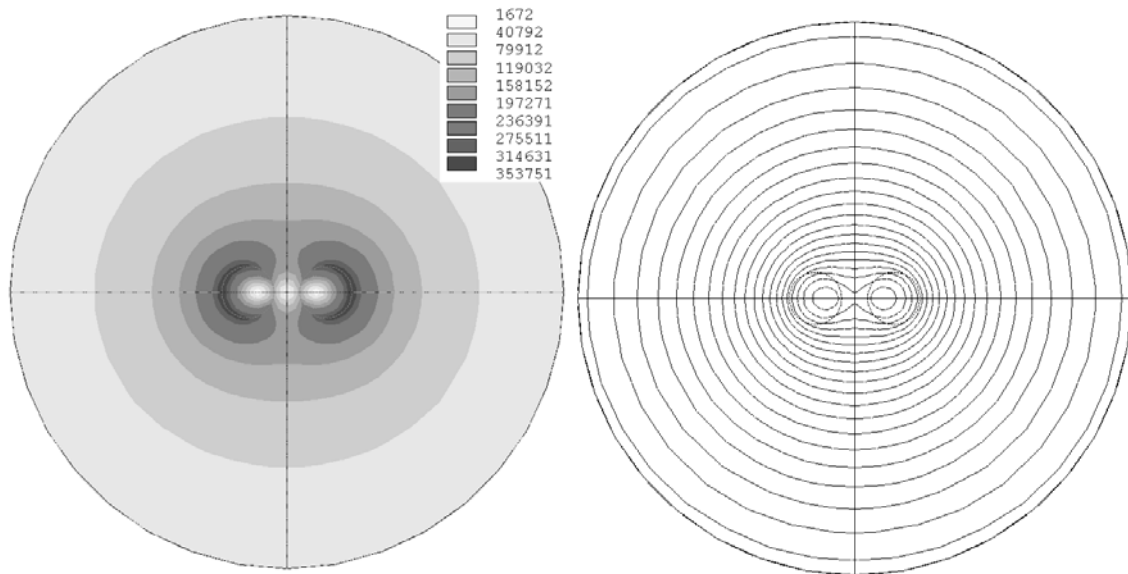


Abb. 1.5 Feldstärkeverteilung und Flusslinien der Doppelleitung gleichsinnig durchflossen

Die innere Induktivität der Leitung beträgt 123 nH/m. In hinreichend großem Abstand verhält sich diese Leitung wie ein einzelner Leiter.

1.4 Zwei parallele Rechteckleiter (Doppelleitung)

Aus zwei Rechteckleitern des zweiten Abschnitts wird nun eine Doppelleitung gebildet. Abb. 1.6 zeigt die geometrische Anordnung. Für künftige beispielhafte Anordnungen wird $a = 1,5 b$ gewählt.

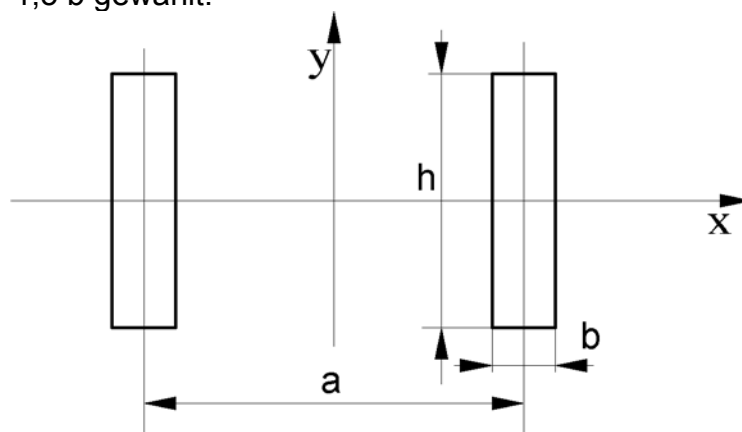


Abb. 1.6 Geometrie der Doppelleitung

Werden beide Leiter gegensinnig vom gleichen Strom durchflossen, ergibt sich die Abb. 1.7 angegebene Feldstärkeverteilung.

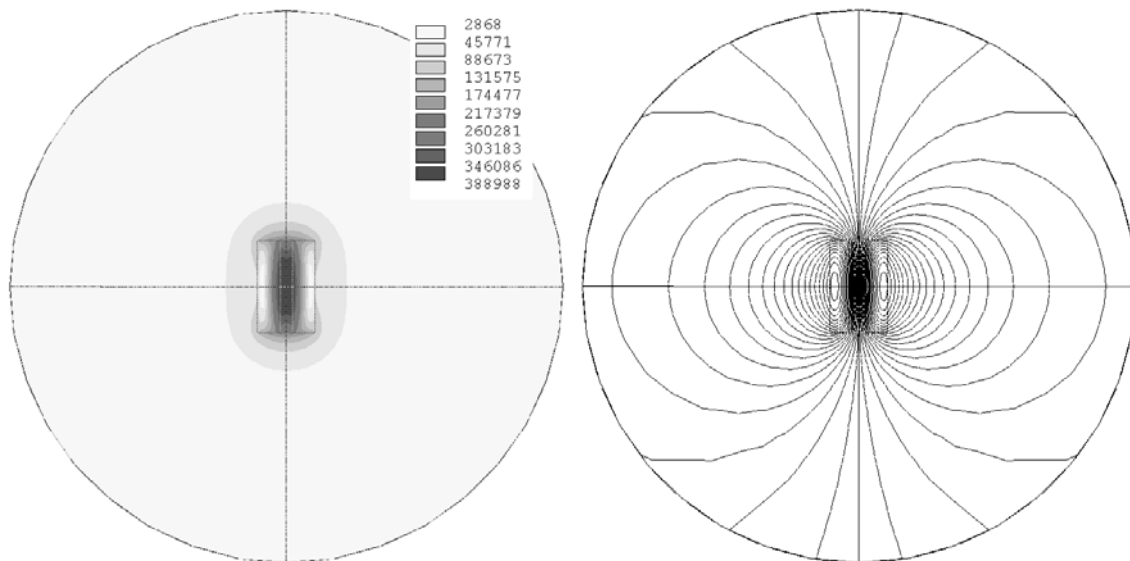


Abb. 1.7 Feldstärkeverteilung und Flusslinien der Doppelleitung gegenseinnig durchflossen

Die innere Induktivität der Leitung beträgt 91 nH/m und die äußere 144 nH/m.

Werden die beiden Leiter gleichsinnig vom gleichen Strom durchflossen, ergibt sich die in Abb. 1.8 angegebene Feldstärkeverteilung.

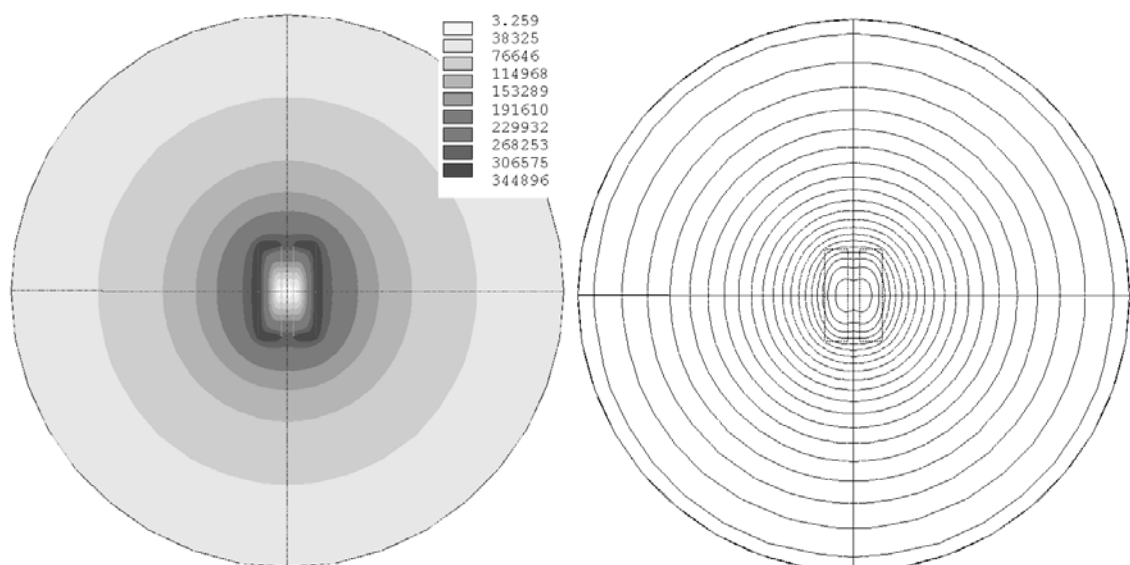


Abb. 1.8 Feldstärkeverteilung und Flusslinien der Doppelleitung gleichsinnig durchflossen

Die innere Induktivität der Leitung beträgt 138 nH/m. Zwei gleichsinnig durchflossene parallele Leiter wirken wie ein durchgeschnittener einzelner Leiter.

1.5 Eine kreisförmige ebene Windung

Aus einem Rechteckleiter des zweiten Abschnitts wird nun eine Windung gebogen. Der innere Radius beträgt 20 mm.

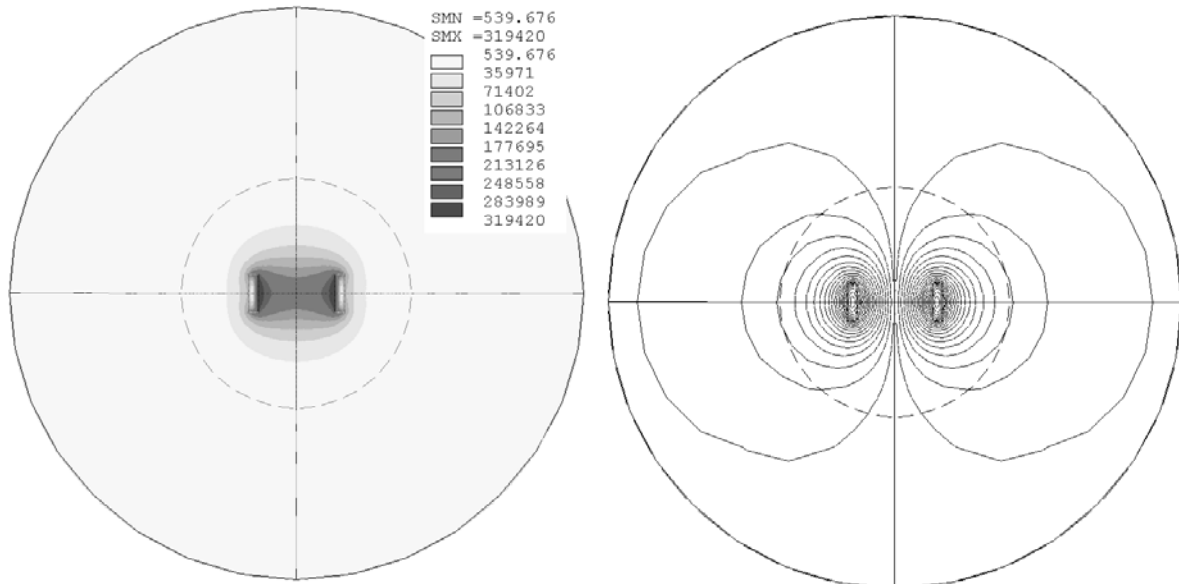


Abb. 1.9 Feldstärkeverteilung und Flusslinien der Windung

Der Schnitt der Feldausbildung einer Windung hat Ähnlichkeiten mit dem Schnitt durch eine Doppelleitung. Die innere Induktivität der Windung beträgt 5,12 nH und die äußere 37,9 nH.

In Abb. 1.10 ist die sich einstellende Stromdichteverteilung dargestellt.

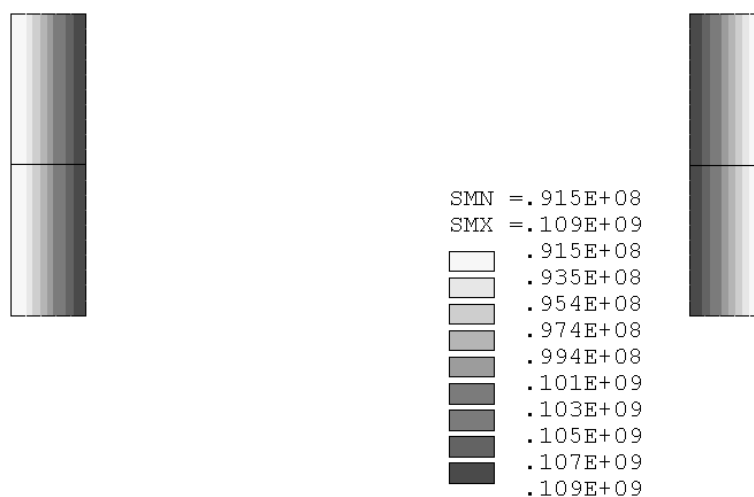


Abb. 1.10 Stromdichteverteilung in der Windung

Dadurch, dass der Weg für den Strom innen kürzer ist, ist hier auch die Stromdichte höher.

2 Eisenleiter bei Gleichstrom ($\mu_r=100$)

2.1 Ein Rundleiter

Ausgangspunkt für die Betrachtungen ist ein unendlich langer gerader Leiter mit kreisförmigem Querschnitt mit dem Radius $R = 5,64 \text{ mm}$ (Querschnittsfläche: 100 mm^2) in einem umgebenden Raum (Luft) mit dem Radius von 60 mm . In diesem Leiter fließt ein Strom von $I = 10 \text{ kA}$. Jeder Strom wird von einem Feld begleitet. Dieses Feld ermöglicht den Energietransport. Der Strom verteilt sich gleichmäßig über den gesamten Querschnitt. Damit entstehen die geringsten Verluste im Leiter. Die Energie, die das den Strom begleitende Feld beinhaltet, kann über die Induktivität beschrieben werden.

$$W = \frac{L \cdot I^2}{2}$$

Die Ausbildung dieses Feldes kann nach dem Durchflutungsgesetz leicht ermittelt werden.

Im Inneren des Leiters beträgt die Feldstärke

$$0 \leq r \leq R \quad H_{(r)} = \frac{I}{2\pi R^2} r$$

und außerhalb

$$R \leq r < \infty \quad H_{(r)} = \frac{I}{2\pi} \frac{1}{r}$$

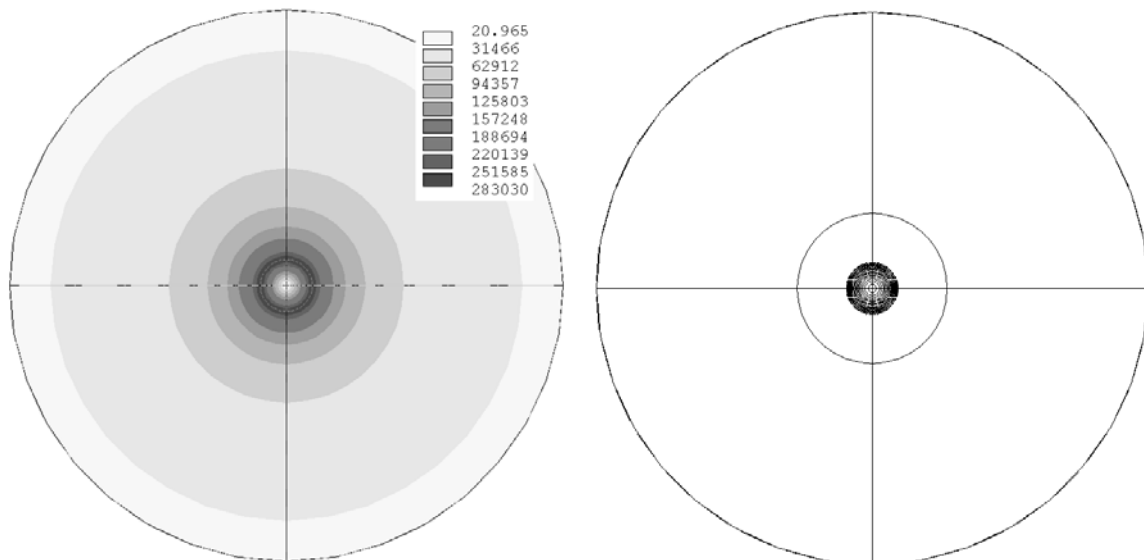


Abb. 2.1 Betrag der magnetischen Feldstärke und Flusslinien beim Rundleiter

Die magnetische Feldstärke H ist tangential gerichtet. Eine Linie konstanter Feldstärke fällt mit der Körperkante des Leiters zusammen. Deshalb kann es sinnvoll sein, zwischen innerer und äußerer Induktivität des Leiters zu unterscheiden.

Aus der Identität

$$\frac{1}{2}LI^2 = \frac{1}{2} \int \mathbf{B} \cdot \mathbf{H} \cdot dV$$

kann mit

$$dV = 2\pi r \ell dr$$

die Induktivität

$$L = \frac{\mu}{I^2} \int H^2 dV$$

ermittelt werden.

Im Leiterinneren ergibt sich der auf die Länge bezogene Wert zu

$$\frac{L_i}{\ell} = \frac{\mu}{2\pi R^4} \int_0^R r^3 dr = \frac{\mu_0 \cdot \mu_{rel}}{8\pi}$$

und außerhalb

$$\frac{L_a}{\ell} = \frac{\mu}{2\pi} \int_R^{\infty} \frac{1}{r} dr = \frac{\mu_0 \cdot \mu_{rel}}{2\pi} \ln \frac{r}{R}$$

Die Integration für die Ermittlung der äußeren Induktivität über den Radius von R bis unendlich liefert den Wert unendlich. Praktisch kann es aber einen einzelnen Leiter ohne Rückleiter nicht geben. Deshalb ist die Bestimmung einer äußeren Induktivität hier auch nicht sinnvoll.

In der numerischen Untersuchung ergibt sich für die innere Induktivität der erwartete Wert von 5000 nH/m.

2.2 Ein Rechteckleiter

Aus dem Rundleiter des vorangegangenen Abschnitts wird nun gedanklich ein rechteckiger Leiter geformt. Er hat die gleiche Querschnittsfläche ($20 \cdot 5 \text{ mm}^2$) wie der runde Leiter und wird vom gleichen Strom durchflossen.

In Abb. 2.2 ist der Betrag der magnetischen Feldstärke angegeben. Hier fällt die Leiterkante nicht mit einer Feldlinie (Linie konstanten Vektorpotentials) zusammen.

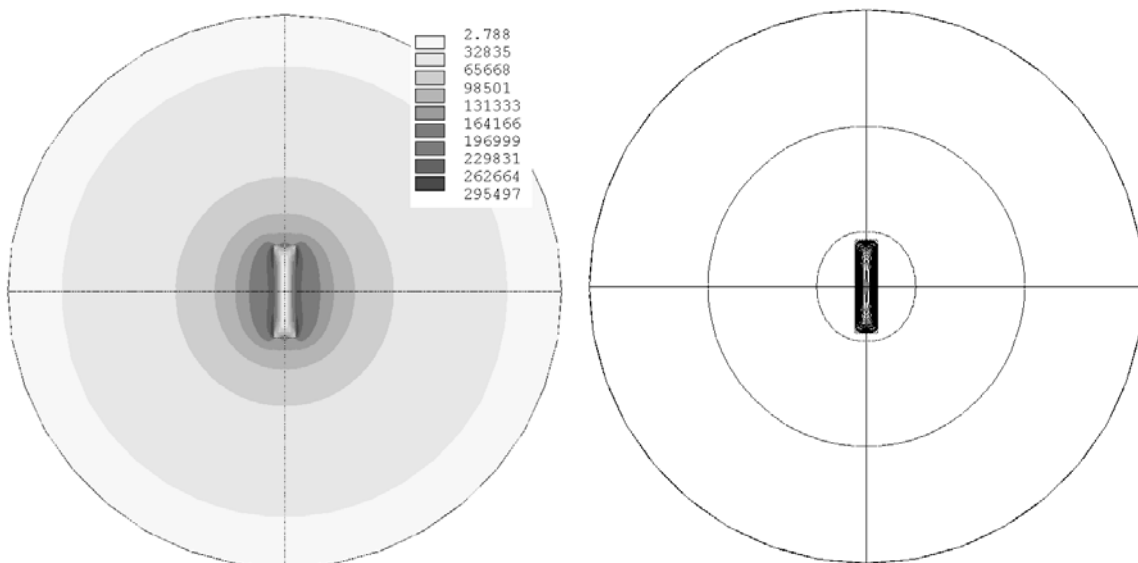


Abb. 2.2 Betrag der magnetischen Feldstärke und Flusslinien beim Rechteckleiter

Die innere Induktivität beträgt 2205 nH/m.

2.3 Zwei parallele Rundleiter (Doppelleitung)

Aus zwei Rundleitern aus dem ersten Abschnitt wird nun eine Doppelleitung gebildet. Abb. 2.3 zeigt die geometrische Anordnung. Für künftige beispielhafte Anordnungen wird $a = 3R$ gewählt.

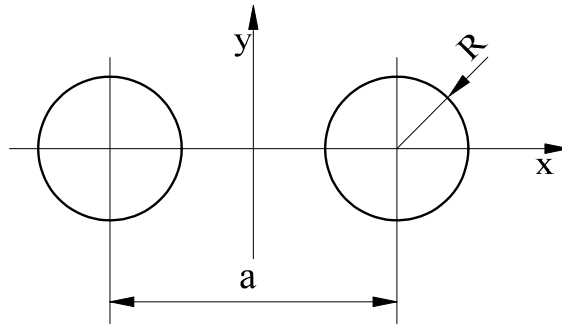


Abb. 2.3 Geometrie der Doppelleitung

Werden beide Leiter gegenseitig vom Strom durchflossen, ergibt sich die Abb. 2.4 angegebene Feldstärkeverteilung.

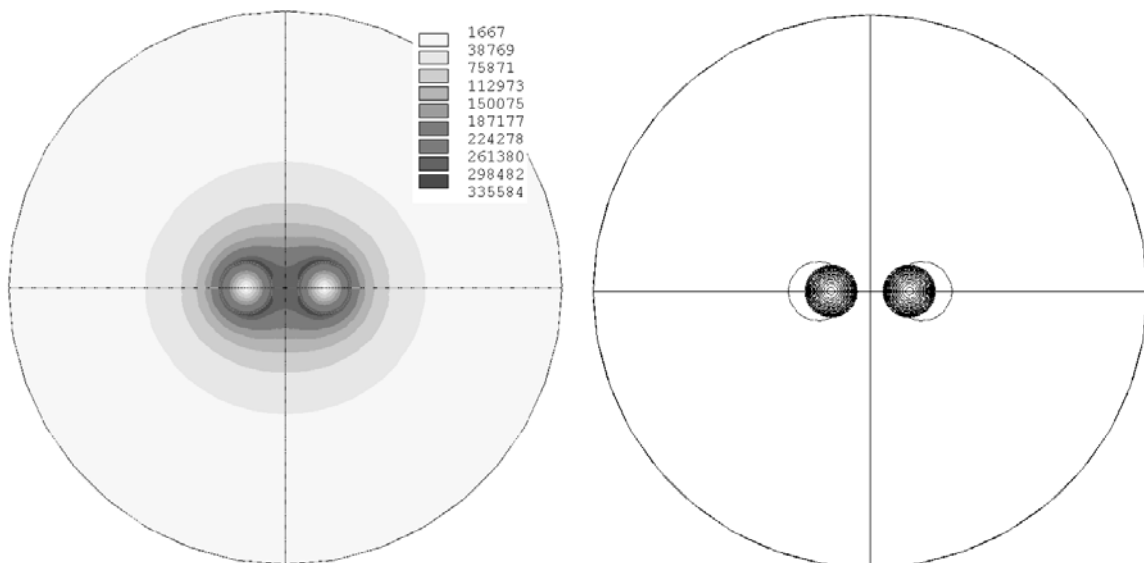


Abb. 2.4 Feldstärkeverteilung und Flusslinien der Doppelleitung gegenseitig durchflossen

Die innere Induktivität der Leitung beträgt 10000 nH/m und die äußere 479 nH/m .

Werden die beiden Leiter gleichsinnig vom Strom durchflossen, ergibt sich die in Abb. 2.5 angegebene Feldstärkeverteilung.

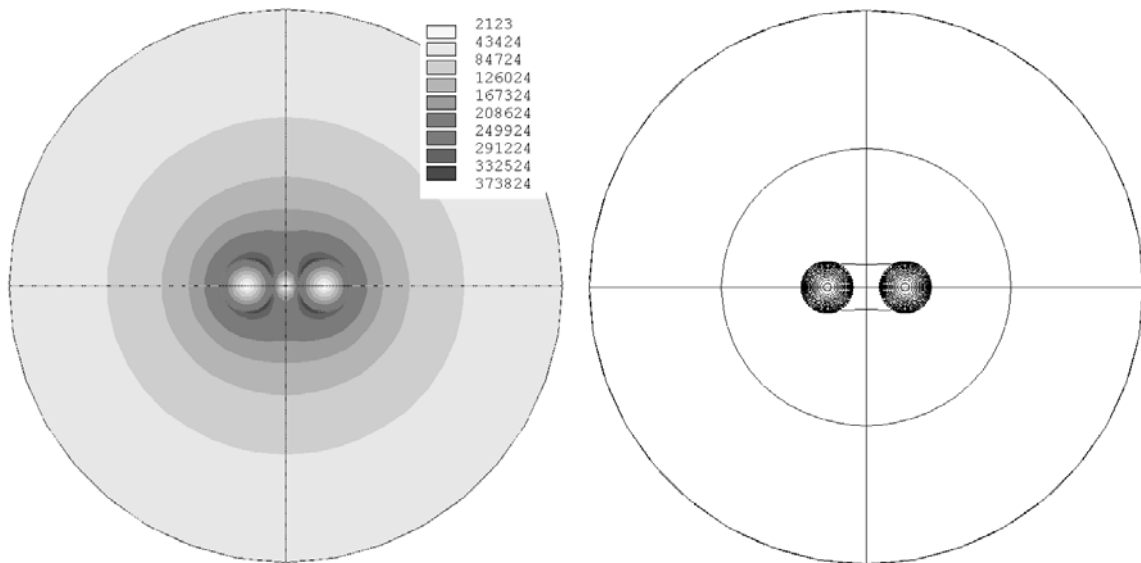


Abb. 2.5 Feldstärkeverteilung und Flusslinien der Doppelleitung gleichsinnig durchflossen

Die innere Induktivität der Leitung beträgt 10000 nH/m. In hinreichend großem Abstand verhält sich diese Leitung wie ein einzelner Leiter.

2.4 Zwei parallele Rechteckleiter (Doppelleitung)

Aus zwei Rechteckleitern aus dem zweiten Abschnitt wird nun eine Doppelleitung gebildet. Abb. 2.6 zeigt die geometrische Anordnung. Für künftige beispielhafte Anordnungen wird $a = 1,5 b$ gewählt.

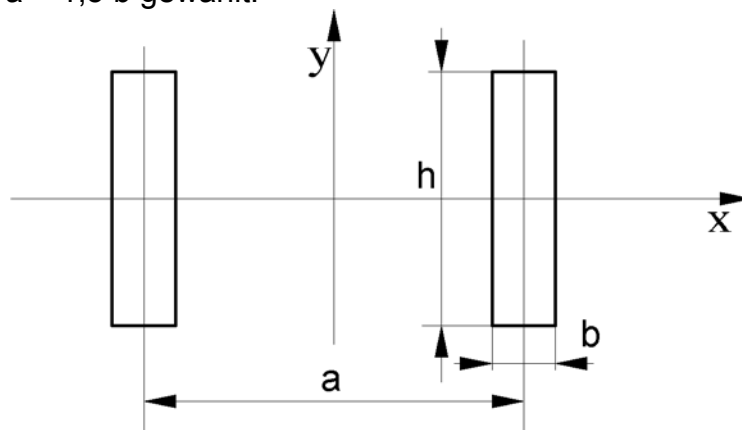


Abb. 2.6 Geometrie der Doppelleitung

Werden beide Leiter gegensinnig vom Strom durchflossen, ergibt sich die Abb. 2.7 angegebene Feldstärkeverteilung.

2 Eisenleiter bei Gleichstrom (($r=100$))

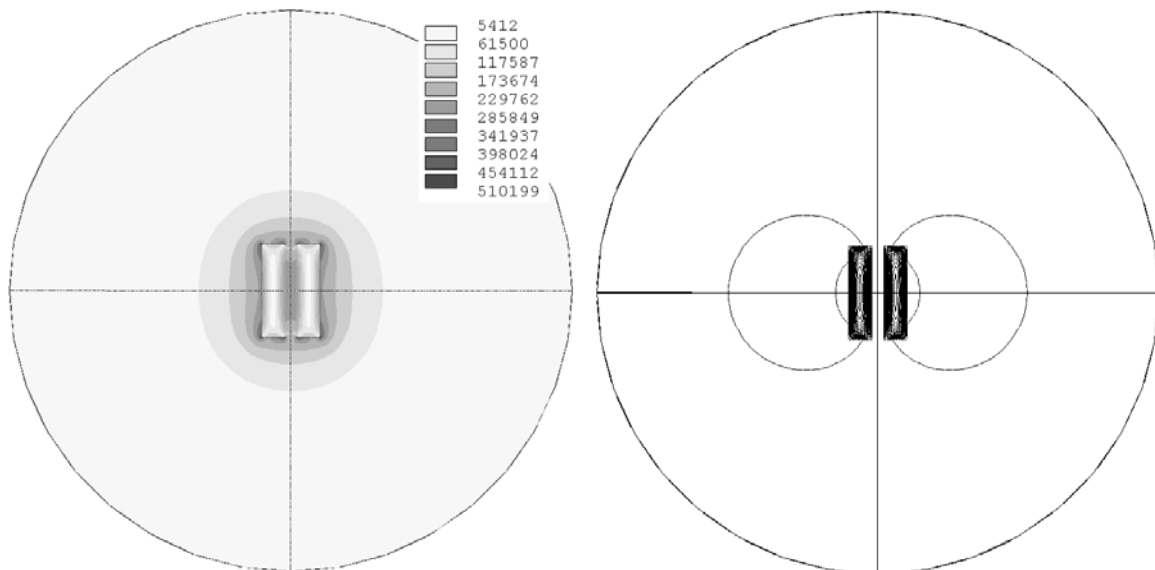


Abb. 2.7 Feldstärkeverteilung und Flusslinien der Doppelleitung gegenseitig durchflossen

Die innere Induktivität der Leitung beträgt 4416 nH/m und die äußere 349 nH/m.

Werden die beiden Leiter gleichsinnig vom Strom durchflossen, ergibt sich die in Abb. 2.8 angegebene Feldstärkeverteilung.

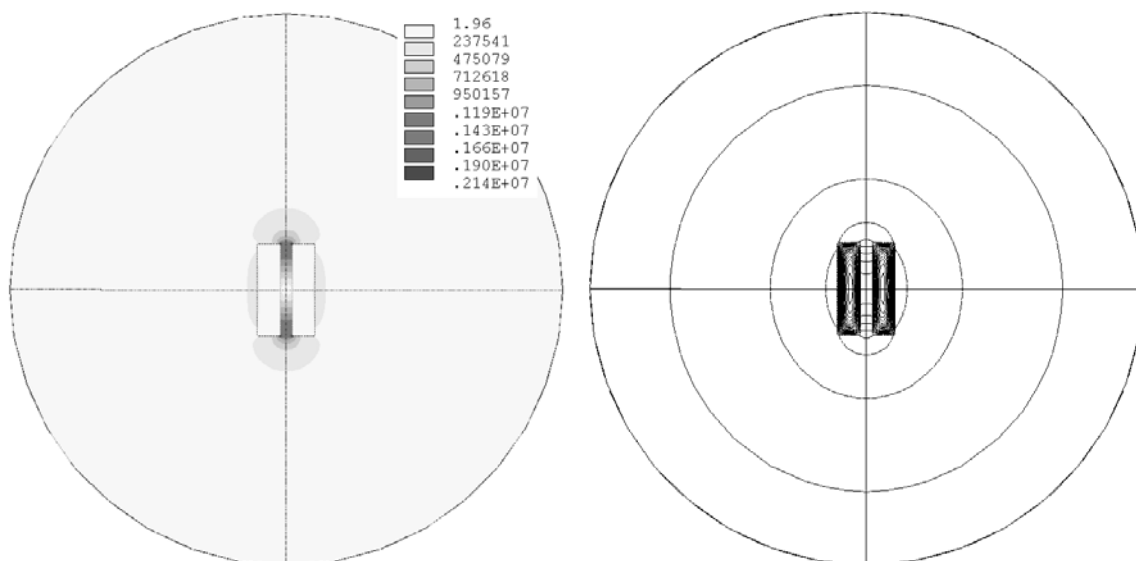


Abb. 2.8 Feldstärkeverteilung und Flusslinien der Doppelleitung gleichsinnig durchflossen

Die innere Induktivität der Leitung beträgt 4497 nH/m. Zwei gleichsinnig durchflossene parallele Leiter wirken wie ein durchgeschnittener einzelner Leiter.

2.5 Eine kreisförmige ebene Windung

Aus einem Rechteckleiter aus dem zweiten Abschnitt wird nun eine Windung gebogen. Der innere Radius beträgt 20 mm.

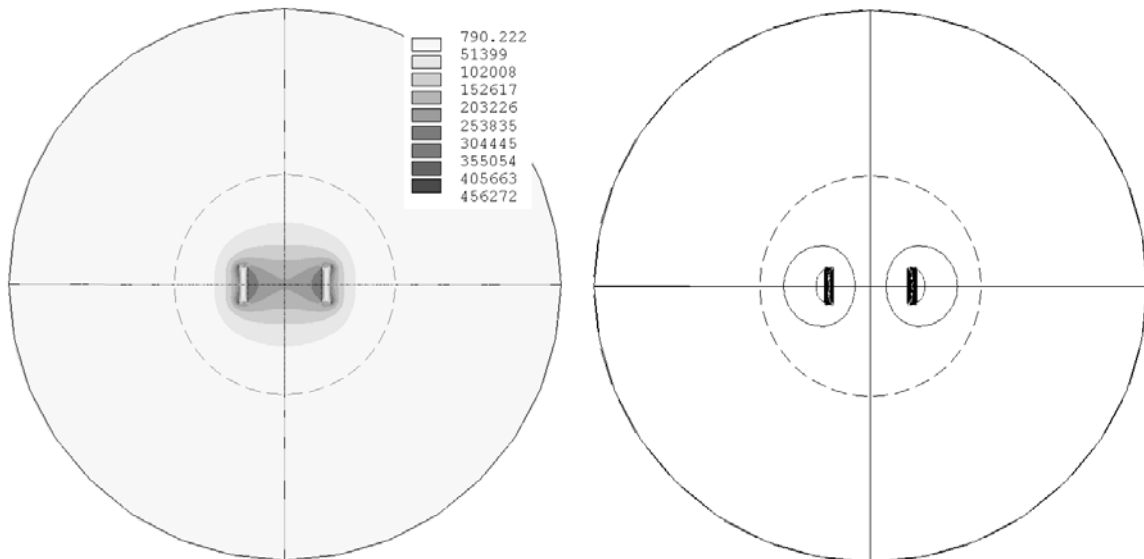


Abb. 2.9 Feldstärkeverteilung und Flusslinien der Windung

Der Schnitt der Felddausbildung einer Windung hat Ähnlichkeiten mit dem Schnitt durch eine Doppelleitung. Die innere Induktivität der Windung beträgt 476 nH und die äußere 112 nH.

3 Leiter bei Stromanstieg

3.1 Ein Rundleiter

Ausgangspunkt für die Betrachtungen ist ein sehr langer gerader Leiter mit kreisförmigem Querschnitt mit dem Radius $R = 5,64 \text{ mm}$ (Querschnittsfläche: 100 mm^2) in einem umgebenden Raum (Luft) mit dem Radius von 60 mm .

In diesen Rundleiter (Material: Kupfer) soll nun eine Halbwelle des in Abb. 3.1 dargestellten sinusförmigen Stromes (Amplitude 10 kA) mit der Dauer von $100 \mu\text{s}$ (entspricht 5 kHz) eingeprägt werden.

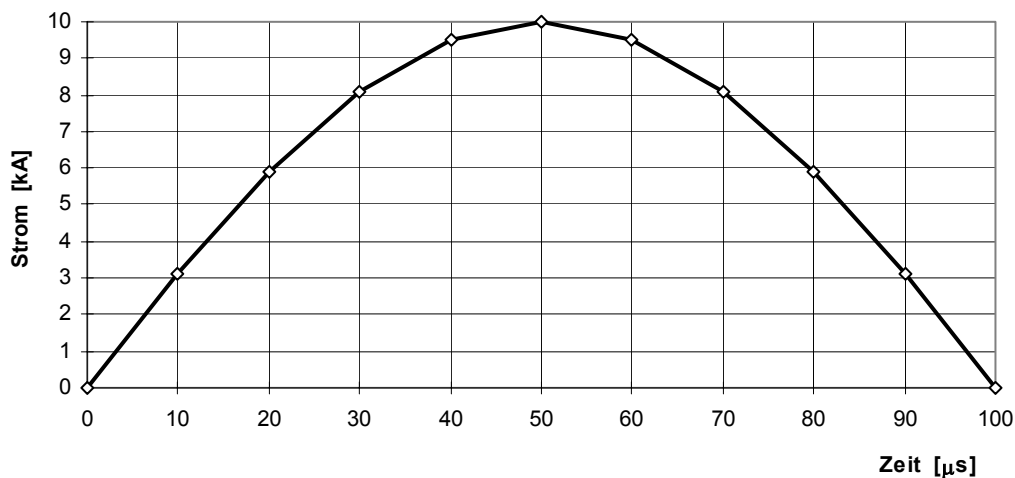


Abb. 3.1 eingepprägter Strom

In Abb. 3.2 ist die Verteilung der Stromdichte über dem Radius des Leiters in 10 Zeitschritten dargestellt. Der Strom beginnt am Rand des Leiters zu fließen. Bis zum Zeitpunkt des Strommaximums ist die Stromdichte am Rand jeweils am größten. Danach nimmt sie außen ab (einschließlich Vorzeichenumkehr), während sie weiter innen im Leiter noch erhalten bleibt. Zum Ende des betrachteten eingepprägten Stromes ($t = 100 \mu\text{s}$) ist der Gesamtstrom null, obwohl noch Stromdichten im Leiterinneren vorhanden sind. Es ist im Inneren des Leiters noch Energie gespeichert, die von außen aber nicht merkbar ist.

3 Leiter bei Stromanstieg

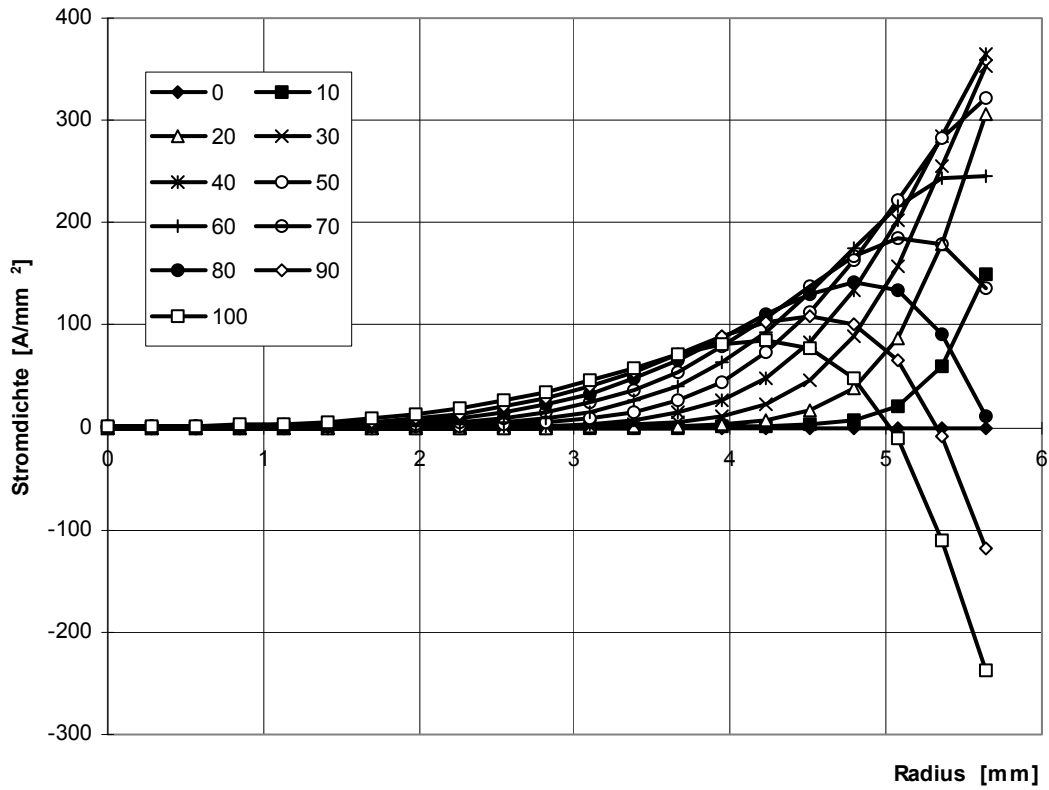


Abb. 3.2 Stromdichte über dem Radius während des Pulses
(Parameter: Zeitpunkte (μs) gemäß Abb. 3.1)

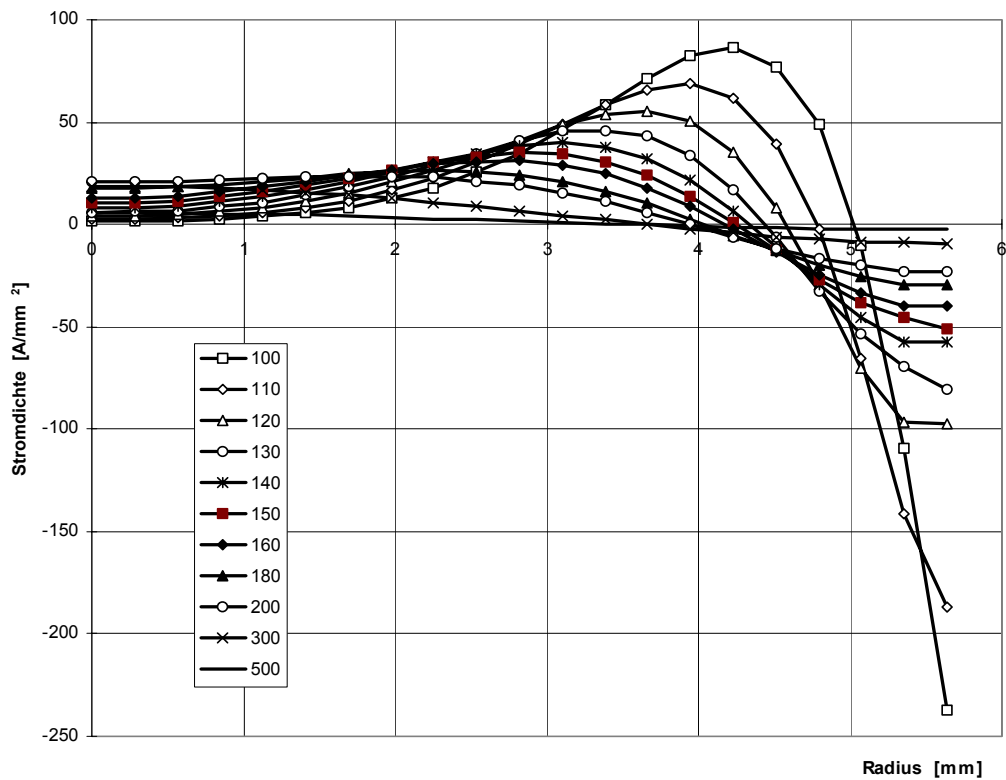


Abb. 3.3 Stromdichte über dem Radius nach dem Puls
(Parameter: Zeitpunkte in μs)

Interpretation

In diesem Leiter beginnt ein Strom zu fließen. Mit dem beginnenden Strom muss ein Feld aufgebaut werden. Dazu ist eine Energie nötig. Sie muss von der Quelle geliefert werden. Das Minimumprinzip der Natur lässt den Strom zuerst so fließen, dass ein Minimum an Energie gebraucht wird. Die erforderliche Energie kann über die Induktivität beschrieben werden.

Beim Rundleiter sind die Verhältnisse am einfachsten vorstellbar. Wenn der Strom direkt an der Leiteroberfläche (in einem Bereich mit der Dicke ΔR) fließt, ist im Leiterinneren die Feldstärke Null und damit geht die innere Induktivität auch gegen Null.

Im Leiterinneren ergibt sich der auf die Länge bezogene Wert zu

$$\frac{L_i}{\ell} = \frac{\mu}{2\pi R^4} \int_{R-\Delta R}^R r^3 dr = \frac{\mu}{8\pi} \left(1 - \left(1 - \frac{\Delta R}{R} \right)^4 \right).$$

Außerhalb des Leiters ist die Feldstärke und damit auch die Induktivität nicht von der Stromverteilung im Leiterinneren abhängig. Die betrachtete Anordnung hat also die geringste Induktivität, wenn der Strom direkt an der Leiteroberfläche fließt. (Der Strom wird nicht an die Oberfläche verdrängt, sondern er beginnt an der Oberfläche zu fließen. Beim Einschaltvorgang war ja vorher kein Strom da.) Eine hohe Stromdichte an der Oberfläche bedingt hohe ohmsche Verluste. Um diese geringer werden zu lassen, breitet sich der Strom mit zunehmender Stromflussdauer unter Abnahme der Maximalstromdichte am Rand ins Leiterinnere aus.

3.2 Ein Rechteckleiter

Für einen Rechteckleiter lässt sich die Stromdichte nicht so gut darstellen, wie für den kreisrunden Leiter. Deshalb soll zum Zeitpunkt des Strommaximums die Stromdichteverteilung über dem Querschnitt ermittelt werden. Abb. 3.3 zeigt das Ergebnis. Der Strom fließt hauptsächlich in den Ecken und an der schmalen Kante. Er beginnt also mittelpunktsfern. Die längenbezogene innere Induktivität zu diesem Zeitpunkt beträgt 11,4 nH/m.

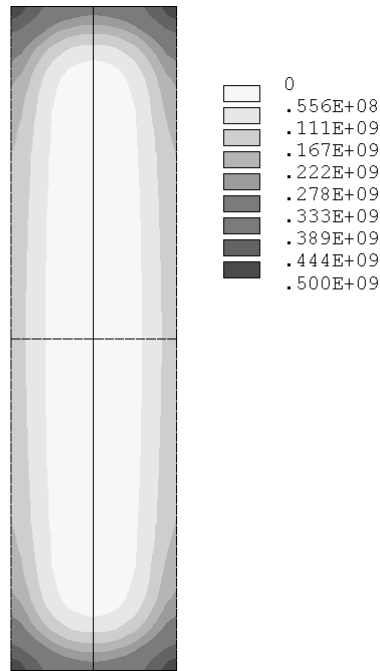


Abb. 3.3 Stromdichteverteilung im Strommaximum

3.3 Zwei parallele Rundleiter (Doppelleitung)

Wenn auch hier der Strom während seines Anstieges nur an der Oberfläche fließen würde, ließe sich die Induktivität analog zur Kapazität (mittels zweier Linienladungen) ermitteln. Damit würde zur Ausbildung des Feldes ein relativ großes Volumen benutzt und damit eine große Induktivität gebildet, die eine große Energie braucht, um den Strom zu begleiten. Das Minimumprinzip der Natur lässt den Strom aber vorwiegend an den einander zugewandten Seiten der Leiter fließen. Damit ist eine kleinere Energie erforderlich.

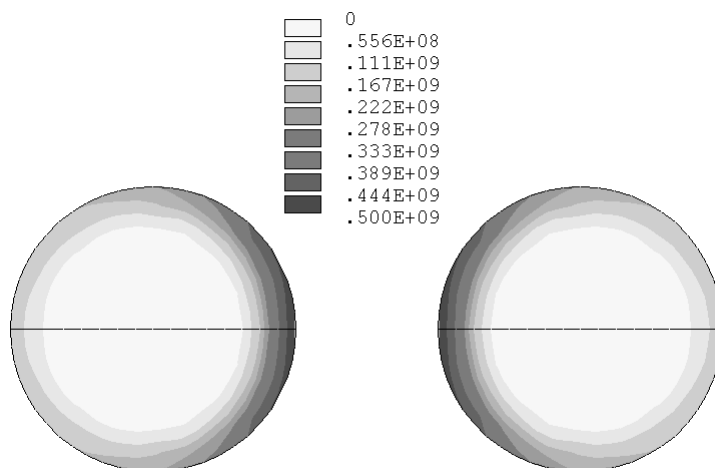


Abb. 3.4 Stromdichteverteilung im Strommaximum gegenseitig durchflossen

Abb. 3.4 zeigt das Ergebnis der numerischen Berechnung. Die längenbezogene innere Induktivität der gesamten Leitung zu diesem Zeitpunkt beträgt 36,3 nH/m und die äußere 387 nH/m. Damit ist die Gesamtinduktivität ca. 20% kleiner als bei Gleichstrom.

Wird die Leitung gleichsinnig durchflossen, ergibt sich die in Abb. 3.5 angegebene Stromdichteverteilung.

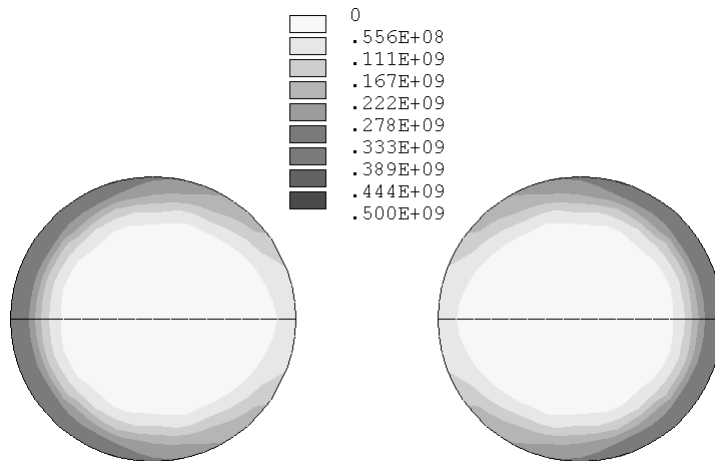


Abb. 3.5 Stromdichteverteilung im Strommaximum gleichsinnig durchflossen

Die längenbezogene innere Induktivität der gesamten Anordnung zu diesem Zeitpunkt beträgt 33,8 nH/m.

3.4 Zwei parallele Rechteckleiter (Doppelleitung)

Werden bei der aus zwei Schienen gebildeten Doppelleitung die Leiter gegensinnig durchflossen, fließt der Strom vorwiegend an den einander zugewandten Seiten. Ersatzweise könnte man sich dafür zwei dünne Schienen mit homogener Stromdichte vorstellen. Dort ist leicht einsehbar, dass eng beieinander liegende Schienen ein kleineres Fenster aufspannen und damit eine geringere Induktivität verursachen.

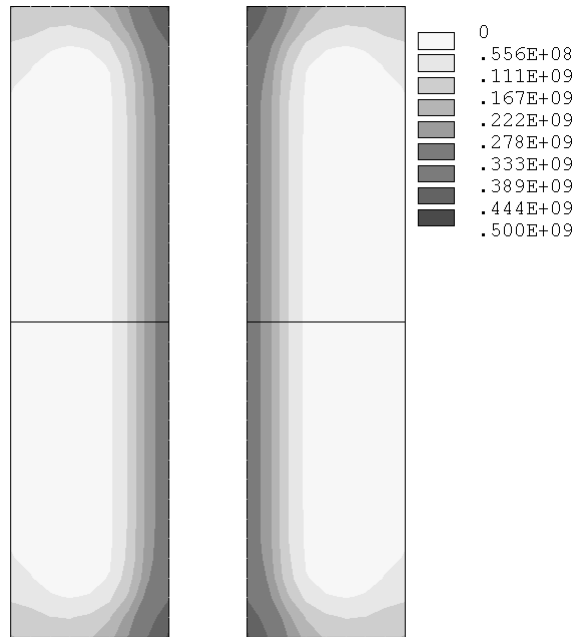


Abb. 3.6 Stromdichteverteilung in der Doppelleitung gegensinnig durchflossen

Die innere Induktivität der Leitung beträgt 32,3 nH/m und äußere 125,9 nH/m.

Gleichsinnig durchflossene Schienen kann man sich in etwa als durchgeschnittene ursprünglich gemeinsame Leiter vorstellen. Sie wirken ähnlich wie ein Rechteckleiter und bei ihm fließt der Strom für eine minimale Induktivität mittelpunktsfern. (Vergleiche Abb. 3.3) Abb. 3.7 zeigt die Stromdichteverteilung.

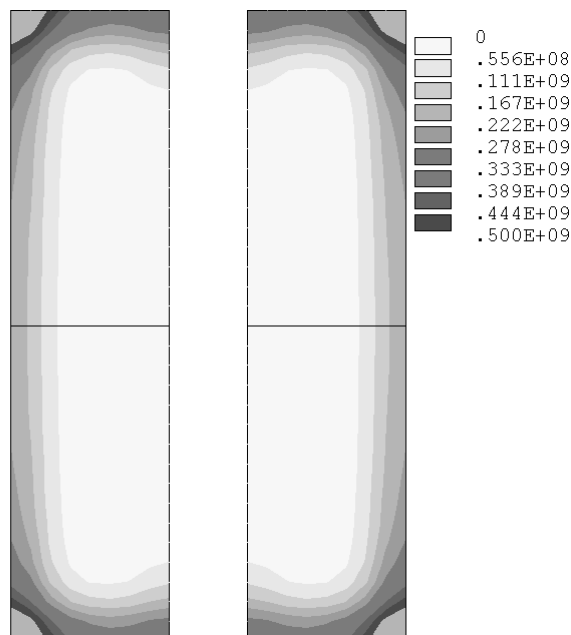


Abb. 3.6 Stromdichteverteilung in der Doppelleitung gleichsinnig durchflossen

Die innere Induktivität einer solchen Leitung beträgt 33,5 nH/m.

3.5 Eine Windung

Wird aus einem Rechteckleiter eine Windung gebogen (Windungsradius = Leiterhöhe), ergibt sich die in Abb. 3.7 dargestellte Stromdichteverteilung.

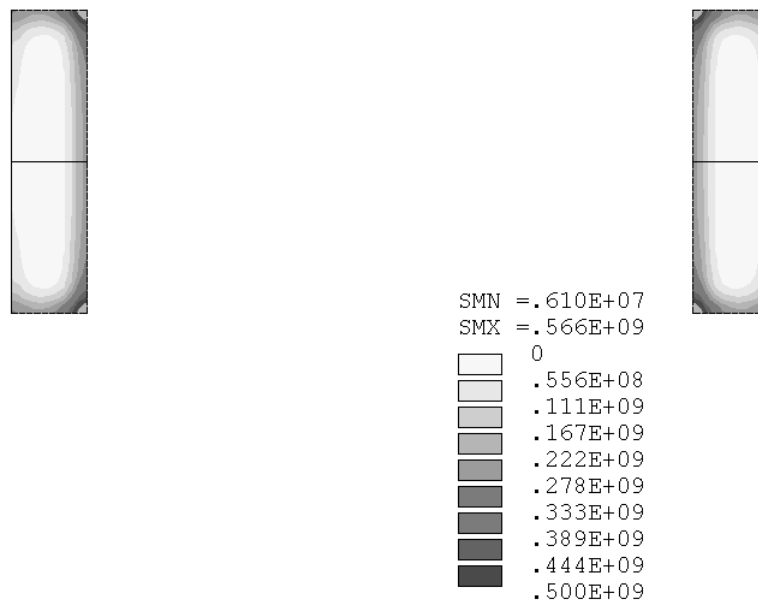


Abb. 3.7 Stromdichteverteilung in der Windung

Der Strom fließt vor allem an der Innenseite, da dadurch die geringste Induktivität entsteht. Sehr stark sind die inneren Ecken strombelastet. Hier wird der durch die Graustufendarstellung in Abb. 3.7 bis 500 A/mm^2 festgelegte Wert überschritten. (Maximalwert: 566 A/mm^2)

Die innere Induktivität der Windung beträgt $1,74 \text{ nH}$ und die äußere $36,28 \text{ nH}$.

4 Leiter mit induzierten Strömen

4.1 Vorbemerkung

Es soll die Stromdichteverteilung in mehreren induktiv gekoppelten Leitern untersucht werden. Für eine gute Vergleichbarkeit der Anordnungen untereinander wird gemeinsam für alle Anordnungen für den Leiter mit eingprägtem Strom ein Leiterquerschnitt von 100 mm^2 und als Werkstoff Kupfer angesetzt.

In den speisenden Leiter (Material: Kupfer) wird nun eine Halbwelle des in Abb. 4.1 dargestellten sinusförmigen Stromes (Amplitude 10 kA) mit der Dauer von $100 \mu\text{s}$ (entspricht 5 kHz) eingprägt.

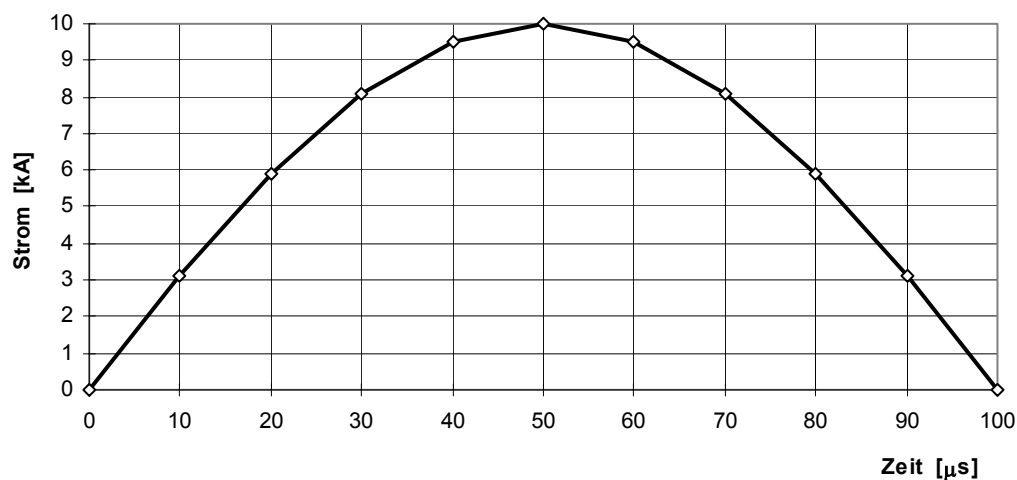


Abb. 4.1 eingprägter Strom

Die Berechnung erfolgt transient (Schaltvorgang). Die Ergebnisse werden zum Zeitpunkt des Strommaximums ($50 \mu\text{s}$) dargestellt.

Für die angenommenen Werte beträgt die mittlere Stromdichte (Stromdichte bei Gleichstrom)

$$J_m = \frac{10 \text{ kA}}{100 \text{ mm}^2} = 0,1 \cdot 10^9 \frac{\text{A}}{\text{m}^2} .$$

In den nachfolgenden Darstellungen wird dieser Wert durch die Angabe $.1\text{E}+09$ repräsentiert. Die Berechnungen werden unter Ausnutzung von Symmetrien nur für den notwendigen Teil durchgeführt. Die berechneten Ergebnisse werden danach an den Symmetrielinien gespiegelt dargestellt

4.2 Zwei parallele Rechteckleiter

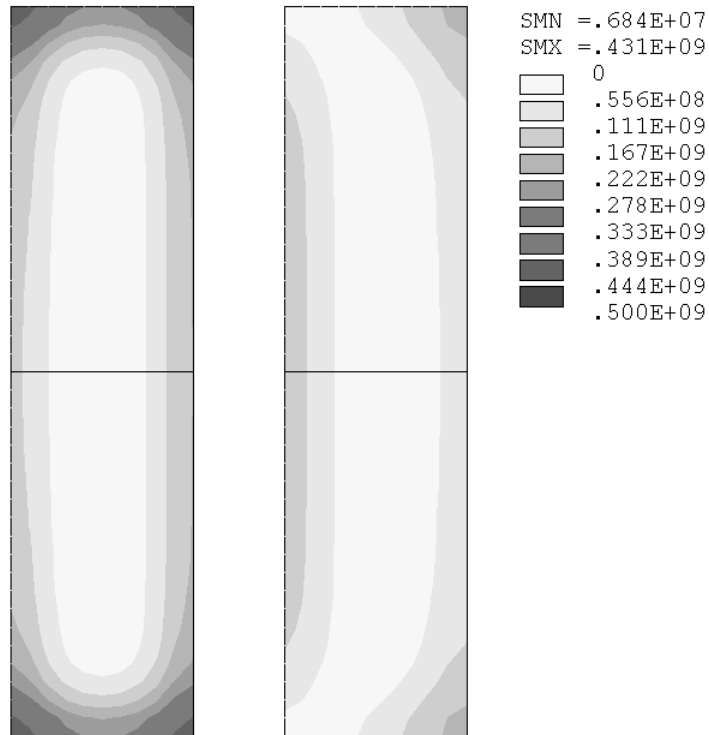


Abb. 4.2.1 Betrag der Stromdichte in beiden Leitern

In den linken Leiter wird der Strom eingepreßt. In dem parallel liegenden rechten Leiter (endlicher Länge) werden Spannungen induziert, die einen kreisförmigen Strom treiben. Auf der dem eingespeisten Leiter zugewandten Seite fließt der Strom entgegengesetzt zum eingepreßten Strom und auf der abgewandten Seite in gleicher Richtung wie der eingepreßte Strom. In der Summe ist der Strom null.

4.3.1 Zwei konzentrische Windungen symmetrisch (äußere gespeist)

wiradin=32e-3	!Windungs-Radius innen
wiradau=42e-3	!Windungs-Radius außen
wiho=50e-3	!Windungs-Höhe
roradau=30e-3	!Rohr-Radius-außen
roradin=26e-3	!Rohr-radius-innen
roho=80e-3	!Rohr-Höhe
vers=0e-3	!Versatz

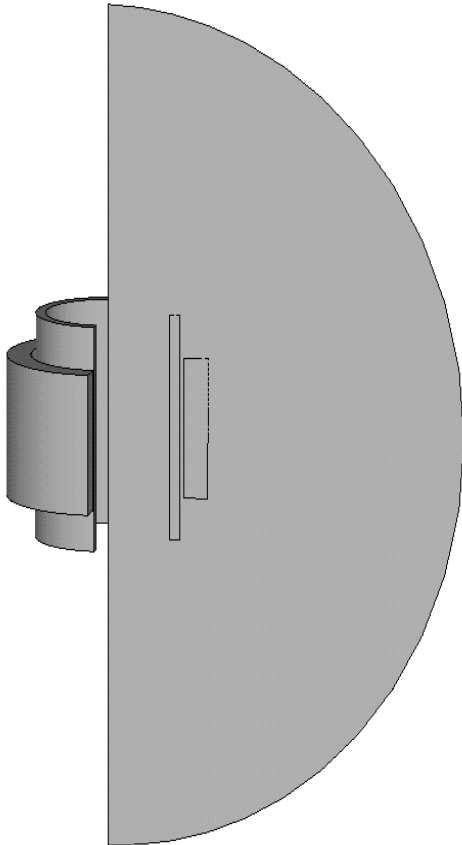


Abb. 4.3.1.1 Geometrie der beiden Windungen mit Berechnungsebene

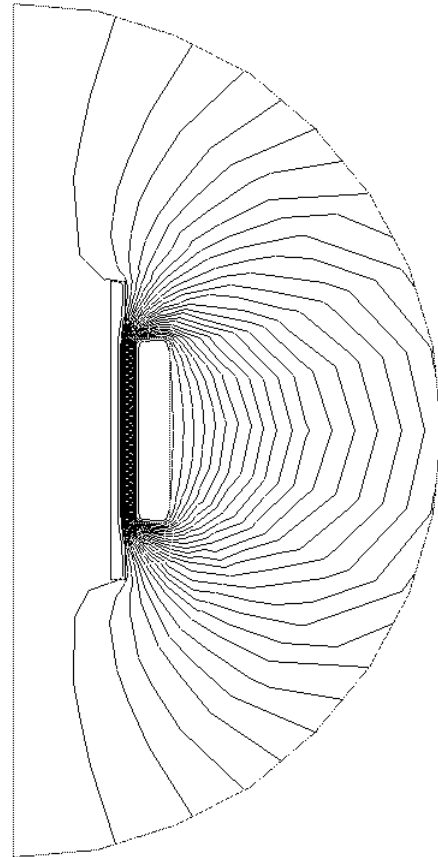


Abb. 4.3.1.2 Magnetflusslinien

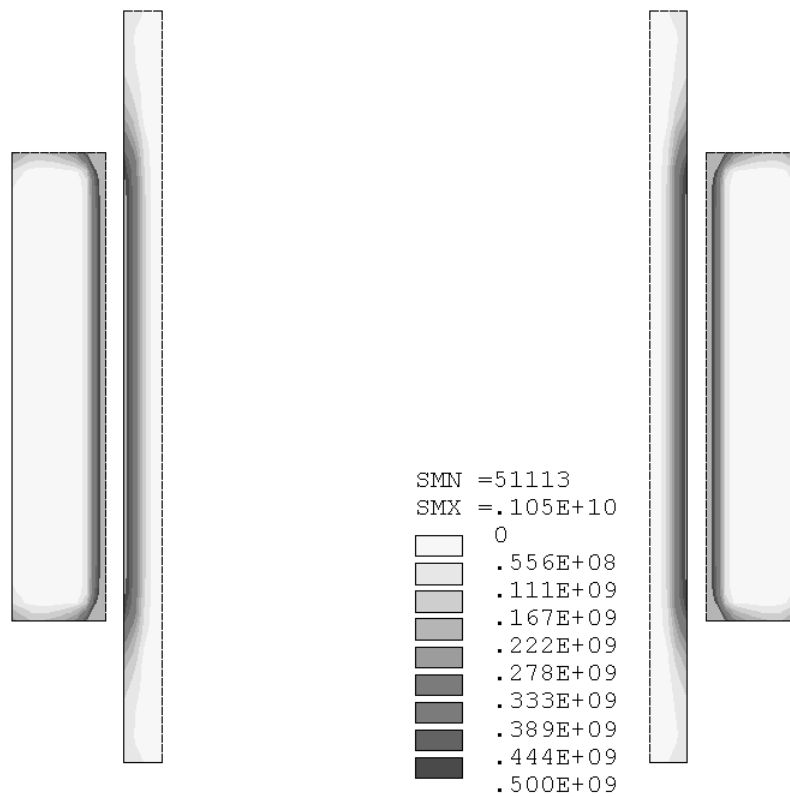


Abb. 4.3.1.3 Betrag der Stromdichte in beiden Windungen

Die Induktivität beträgt 24,02 nH.

Der Strom in der inneren Windung (Rohr) beträgt 96 % des eingprägten Stroms der äußeren Windung.

Nimmt man die innere Windung heraus, vergrößert sich die Induktivität auf 92,7 nH.

4.3.2 Zwei konzentrische Windungen mit Längsversatz (äußere gespeist)

```
wiradin=32e-3      !Windungs-Radius innen  
wiradau=42e-3      !Windungs-Radius außen  
wiho=50e-3         !Windungs-Höhe  
roradau=30e-3      !Rohr-Radius-außen  
roradin=26e-3      !Rohr-radius-innen  
roho=80e-3         !Rohr-Höhe  
vers=15e-3         !Versatz
```

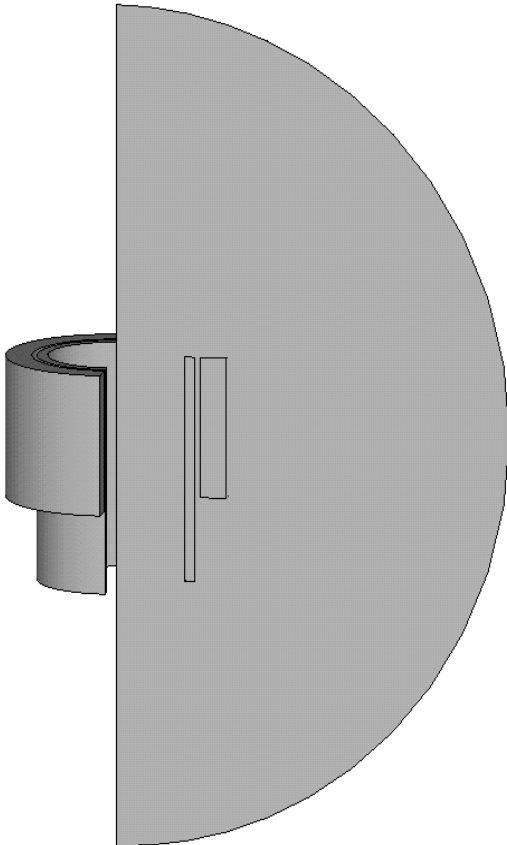


Abb. 4.3.2.1 Geometrie der beiden Windungen mit Berechnungsebene

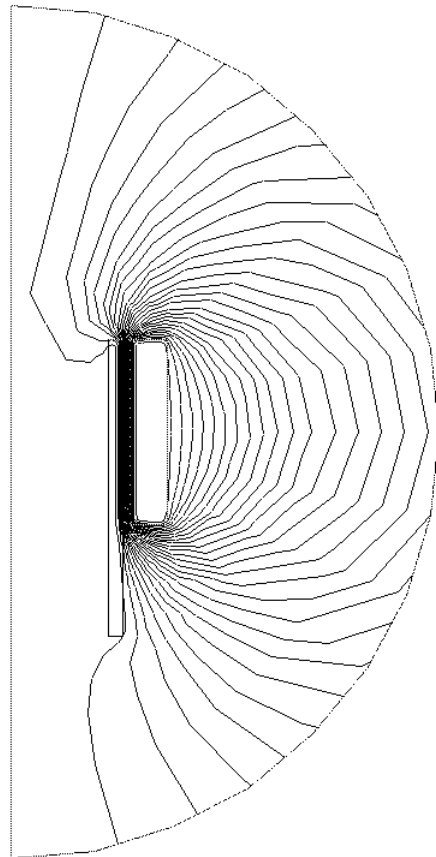


Abb. 4.3.2.2 Magnetflusslinien

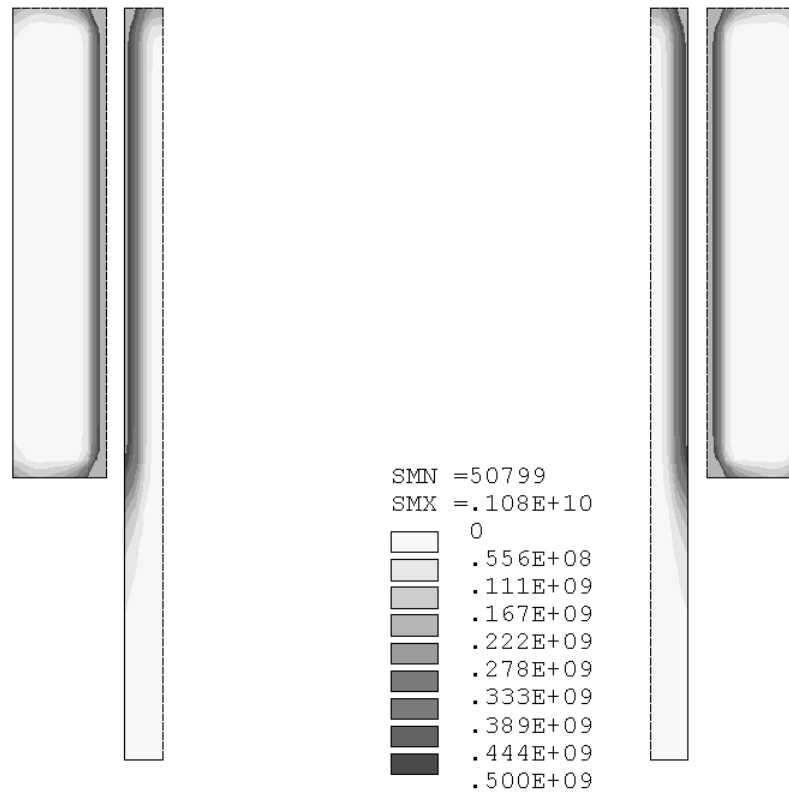


Abb. 4.3.2.3 Betrag der Stromdichte in beiden Windungen

Die Induktivität beträgt 24,46 nH.

Der Strom in der inneren Windung (Rohr) beträgt 94 % des eingprägten Stroms der äußeren Windung.

4.4.1 Zwei konzentrische Windungen (innere gespeist)

wiradin=20e-3	!Windungs-Radius innen
wiradau=24e-3	!Windungs-Radius außen
wiho=50e-3	!Windungs-Höhe
roradau=30e-3	!Rohr-Radius-außen
roradin=26e-3	!Rohr-Radius-innen
roho=80e-3	!Rohr-Höhe

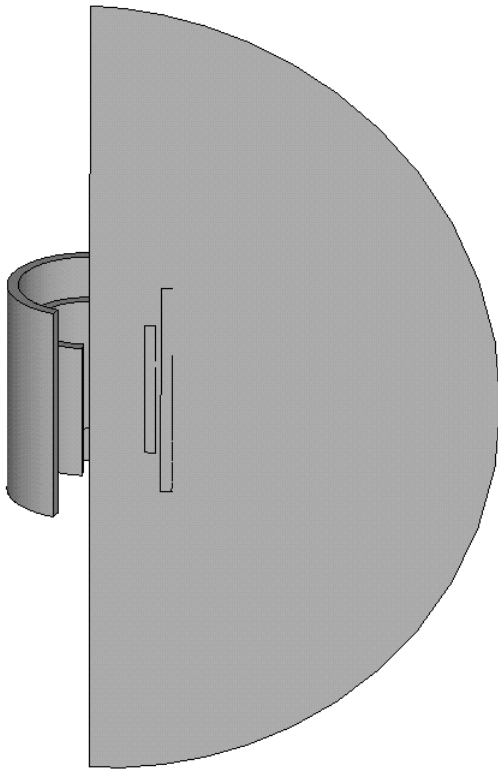


Abb. 4.4.1.1 Geometrie der beiden Windungen mit Berechnungsebene

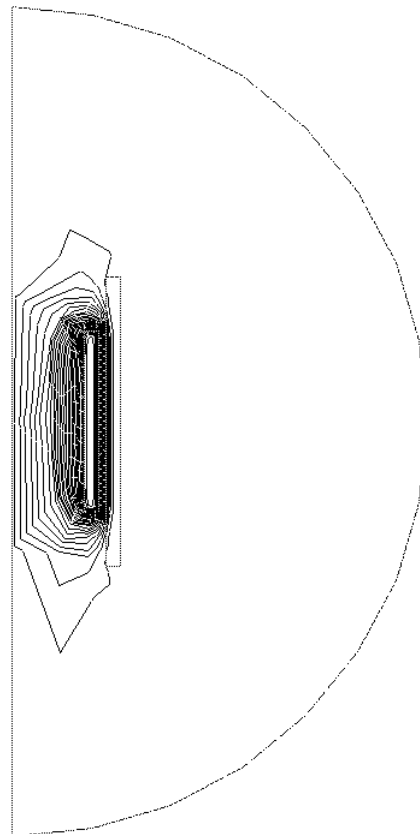


Abb. 4.4.1.2 Magnetflusslinien

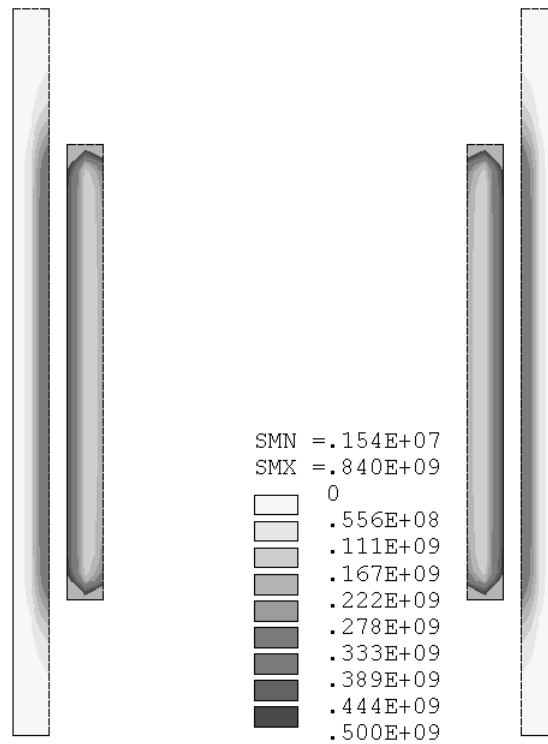


Abb. 4.4.1.3 Betrag der Stromdichte in beiden Windungen

Die Induktivität beträgt 15,19 nH.

Der Strom in der äußeren Windung (Rohr) beträgt 68,8 % des eingepprägten Stroms der inneren Windung