

### Zagadnienia powiązane

Równania Maxwella, indukcja magnetyczna, indukcja, superpozycji pól magnetycznych

### Podstawy

Prąd płynący przez jeden lub dwa sąsiednie, proste przewody wytwarza wokół nich pole magnetyczne. Ustalimy zależność tych pól od odległości przewodów i od natężenia prądu.

### Wyposażenie

Przewodniki prądu, zestaw 4 szt.	06400-001
Cewka, 6 zwojów	06510-001
Cewka 140 zwojów, 6 gniazd wtykowych	06526-011
Urządzenie zaciskowe	06506.00 1
Rdzeń żelazny, sztabkowy, blaszkowy, krótki	06500-001
Rdzeń żelazny, kształt U, blaszkowy	06501-001
Prostownik nastawny 15 VAC / 12 VDC / 5A	13530-931
Teslomierz cyfrowy	13610-931

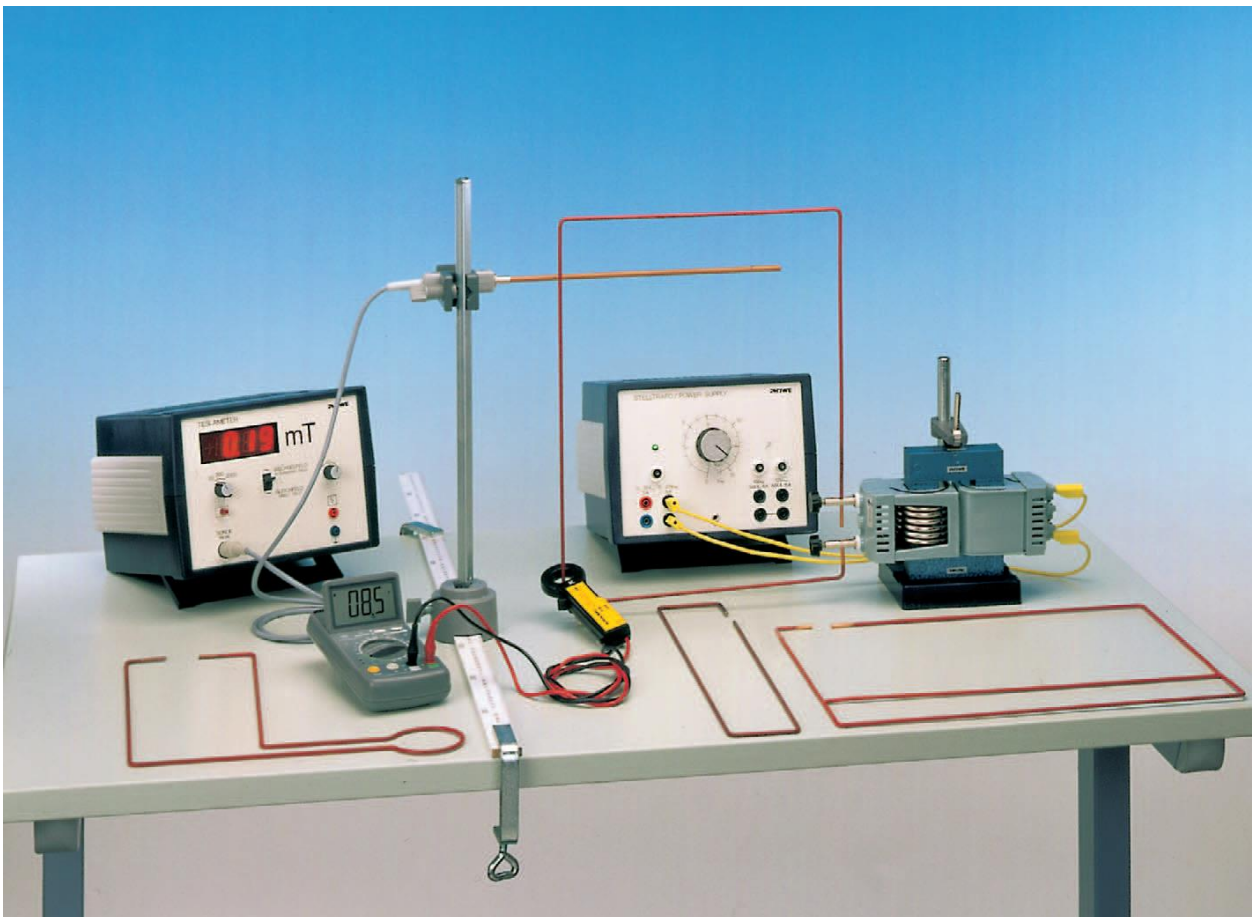
Sonda Halla, osiowa	13610-011
Przekładnia prądowa	07091-001
Przymiar, $l = 1000$ mm	03001-001
Stopka okrągła statywu Phywe	02006-551
Drażek statywu Phywe, $l = 400$ mm	02026-551
Zacisk podwójny Phywe	02040-551
Zwornica (ścisk)	02014-002
Przewód, 50 cm, 32 A, żółty	07361-022

### Zadania

Wyznaczenie zależności indukcji magnetycznej:

1. prostego przewodu od natężenia prądu,
2. prostego przewodu od odległości od niego,
3. dwóch równoległych przewodów, w których płynie prąd o tym samym zwrocie, od odległości od jednego z nich - na linii je łączącej
4. dwóch równoległych przewodów, w których płynie prąd w przeciwnych kierunkach, od odległości od jednego z nich - na linii je łączącej

Rys. 1: Zestaw pomiarowy do wyznaczanie pola magnetycznego w przestrzeni zewnętrznej przewodów prostych.



## Przygotowanie i wykonanie doświadczenia

Zestaw eksperymentalny przedstawiono na Rysunku 1. Transformator prądowy jest używany do pomiaru natężenia prądu wtórnego (20 A - 120 A). Ponieważ natężenia prądu pierwotnego i wtórnego zależą od siebie liniowo, można mierzyć również natężenie prądu pierwotnego. Jednak wcześniej należy przygotować krzywą kalibracji natężeń prądu pierwotnego/wtórnego dla każdego przewodu. Ze względu na silne ogrzewanie się przewodów, natężenie prądu musi być korygowane o czas „rozgrzewania”. Może nastąpić przesunięcie fazy między transformatorem „zestaw konstrukcyjny” i miernikiem pola magnetycznego, co daje złudzenie „ujemnego” pola magnetycznego (minimum dla wskaźnika pola magnetycznego podczas wzrostu natężenia prądu). Można temu zapobiec przez odwrócenie polaryzacji pierwotnej transformatora. Wyższe natężenia prądu wtórnego, można uzyskać, w krótkim czasie, przez połączenie stałego i zmiennego napięcia szeregowo w zasilaczu. Należy zwrócić uwagę na prawidłowy kąt fazowy.

## Teoria i ocena

Pierwsze równanie Maxwella dla przypadku, gdy pole elektryczne  $\vec{E}$  - zmienne w czasie, nie występuje:

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 \int_A \vec{j} \cdot d\vec{a} \quad (1)$$

wraz z czwartym równaniem Maxwella:

$$\int_A \vec{B} \cdot d\vec{a} = 0 \quad (2)$$

dostarcza informacji na temat związku pomiędzy poziomem natężenia prądu  $I$  przepływającego przez obszar  $A$ :

$$I = \int_A \vec{j} \cdot d\vec{a}$$

i wytwarzaną indukcją magnetyczną  $B$ .

$C$  jest obwiednią  $A$ .

$A'$  jest pewnym danym obszarem zamkniętym.

$\vec{j}$  jest gęstością prądu elektrycznego.

$\mu_0$  jest przenikalnością magnetyczną próżni,

$$\mu_0 = 1.26 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}.$$

Z równań (1) i (2) uzyskujemy, dla długiego prostego przewodu:

$$|\vec{B}| = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I}{|\vec{r}|} \quad (3)$$

gdzie  $\vec{r}$  jest odległością przewodu od punktu, w którym dokonujemy pomiaru pola magnetycznego.

Kierunek  $\vec{B}$  jest prostopadły do  $\vec{r}$  oraz do  $\vec{j}$ .

Dla przewodu skończonego uzyskamy z zapisu przedstawionego na Rysunku 2:

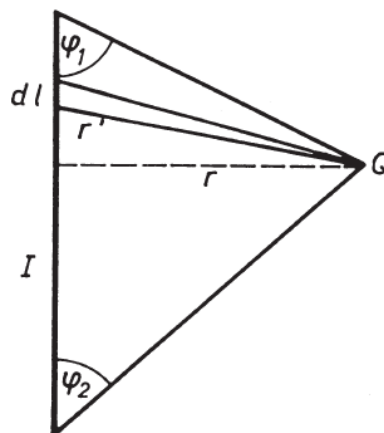
$$d\vec{B} = \frac{1}{4\pi} \mu_0 \frac{I}{r^3} d\vec{l} \times \vec{r},$$

(Biot-Savart)

i stąd:

$$|\vec{B}| = \frac{\mu_0 I}{4\pi r} (\cos \phi_1 - \cos \phi_2).$$

Rys. 2. Wkład odcinka przewodu  $d\vec{l}$  do pola magnetycznego w punkcie  $Q$ .



Ze współczynnika nachylenia prostej, dla wartości mierzonych na Rysunku 3 uzyskamy zależność wykładniczą:

$$Y = A \cdot X^B$$

wykładnik:

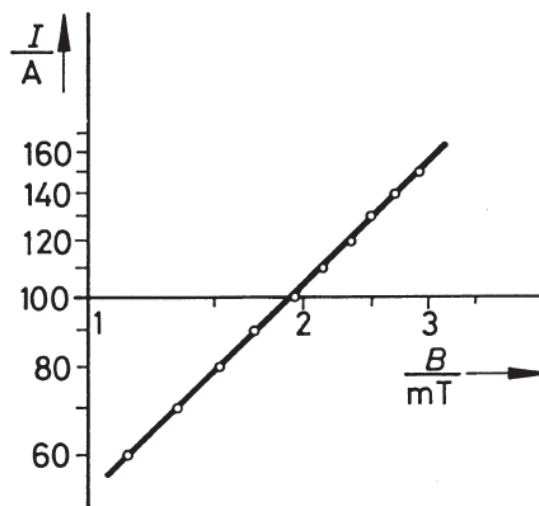
$$B = 0,97 \pm 0,01 \quad (\text{patrz (3)})$$

i współczynnik nachylenia:

$$A = 52.91 \pm 0.01 \text{ A/mT}$$

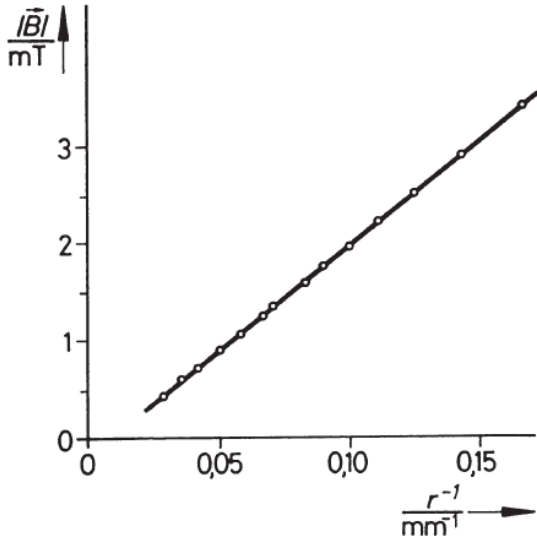
wraz z równaniem (3) daje:

$$\mu_0 = 1.3 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}.$$



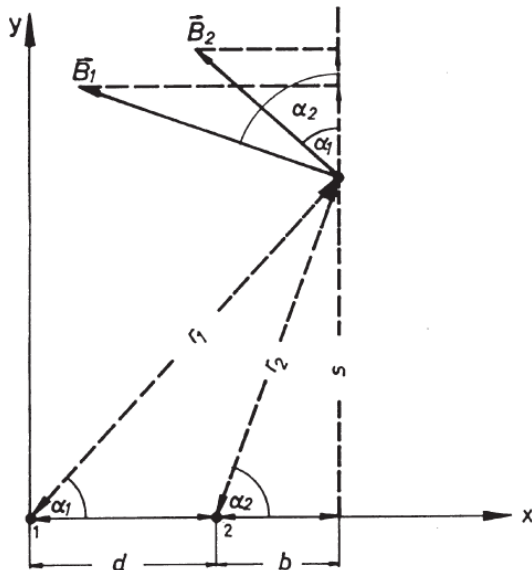
Rys. 3: Zależność między wartością natężenia prądu a polem magnetycznym dla długiego przewodu (odległość między przewodem a punktem pomiarowym: 1,1 cm).

Rys. 4: Indukcja pola magnetycznego długiego przewodu w funkcji odległości ( $I = 100$  A).



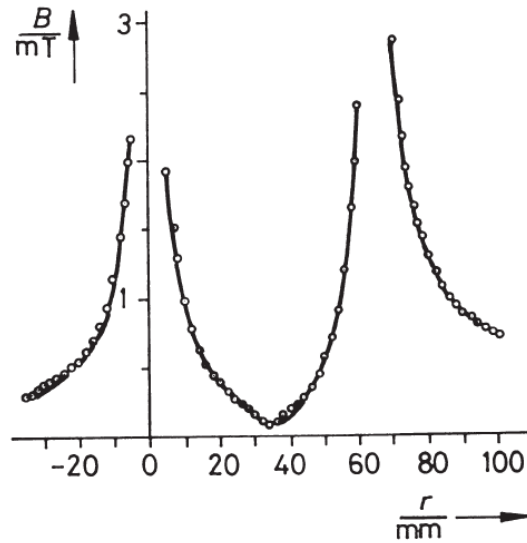
Ze względu na małe zerowe odchylenie urządzenia oraz działaniem drugiego przewodu i transformatora „zestawu konstrukcyjnego”, pomiary należy przeprowadzić dla niewielkich odległości (ok. 3 cm) i dla dużych natężeń prądu (ok. 100 A).

W przypadku dwóch równoległych przewodów w kierunku osi  $z$ , oba prądy powinny płynąć w tym samym kierunku ( $p = 1$ ) lub w kierunkach przeciwnych ( $p = -1$ ), nakładanie się pól magnetycznych daje, w punkcie  $Q$ , składniki  $B_x$  i  $B_y$ , opisane na Rysunku 5.



Rys. 5: Pole magnetyczne dwóch przewodów 1 i 2.

Rys. 6: Zależność składnika pola magnetycznego  $B_y$  dwóch równoległych przewodów na osi  $x$  od odległości od jednego z nich, jeżeli prąd w obu przewodach płynie w tym samym kierunku.



$$B_x = |\vec{B}_1| \sin\alpha_1 + p \cdot |\vec{B}_2| \sin\alpha_2$$

$$= \frac{\mu_0 I}{2\pi \cdot s} (\sin^2\alpha_1 + p \cdot \sin^2\alpha_2)$$

$$B_y = |\vec{B}_1| \cos\alpha_1 + p \cdot |\vec{B}_2| \cos\alpha_2$$

$$= \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left( \frac{1}{b+d} \cdot \cos^2\alpha_1 + p \cdot \frac{1}{b} \cdot \cos^2\alpha_2 \right)$$

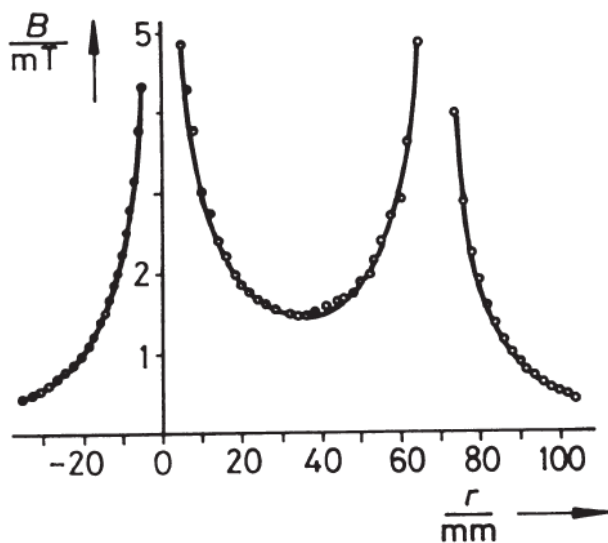
Dla  $Q$  na osi  $x$ , otrzymujemy ( $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$ )

$$B_y = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left( \frac{1}{b+d} + p \cdot \frac{1}{b} \right).$$

Pik przy minimalnym polu magnetycznym pochodzi z odbicia ujemnego pola magnetycznego na dodatnie wartości, wynika to z tego, że przyrząd pomiarowy wskazuje jedynie wartości bezwzględne. Różne wartości pola magnetycznego przy  $r = -5$  mm i  $r = 5$  mm są wynikiem dodatkowego lub subtraktywnego nałożenie na siebie pól magnetycznych przewodów 1 i 2.

Wzrost tej indukcji magnetycznej przewodu 2 w porównaniu z przewodem 1 dla  $r = 65$  mm, w porównaniu z  $r = 5$  mm, jest wynikiem większej gęstości prądu w przewodzie 2, co wynika z rezystancji elementu łączącego przewody. Na koniec, poza przewodem 2 ( $r = 75$  mm), skutek działania przewodu 3 staje się zauważalny. Jest on równoległy do przewodów 1 i 2, ale prąd w nim przepływa w przeciwnym kierunku do przewodów 1 i 2, i w ten sposób wzmacnia on pole magnetyczne w tym obszarze.

Rys. 6: Zależność składowa pola magnetycznego  $B_y$  dwóch równoległych przewodów na osi  $x$  od odległości od jednego z nich, jeżeli prąd w obu przewodach płynie w dwóch różnych kierunkach ( $I = 107$  A).



Wzmocnienie pola można wyraźnie zobaczyć w obszarze pomiędzy dwoma przewodami, porównując z osłabieniem w obszarze poza dwoma przewodami.