

C) Kraftwirkung des magnetischen Feldes.a) Experimente zur Kraft zwischen zwei Leitern

Abb. (1) Zwei Leiterbänder aus geflochtener Kupferlitze werden parallel zueinander aufgehängt. Die beiden einander gegenüberstehenden Metallteile stellen einen *Kondensator* dar. Durch einen Vorversuch wurde die Kapazität  $C = 5 \text{ nF}$  (nanoFarad) ermittelt. Nun werden die unteren Enden an eine Spannungsquelle der Spannung  $U = 1000 \text{ V}$  angeschlossen. Es fließt die Ladung  $Q = C \cdot U = 5 \mu\text{C}$  (mikroCoulomb) auf. Auf der Minusseite haben wir dann einen Elektronenüberschuss, auf der Plusseite einen Elektronenmangel. Der Elektronenmangel entspricht Fehlstellen bzw. Löchern in den Elektronenhüllen der Atome. In den Abb. wird  $1 \mu\text{C}$  jeweils als ein  $\oplus$  bzw. als ein  $\ominus$  symbolisiert. Die *ungleichnamig* geladenen Bänder *ziehen sich an*.

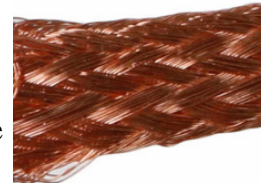
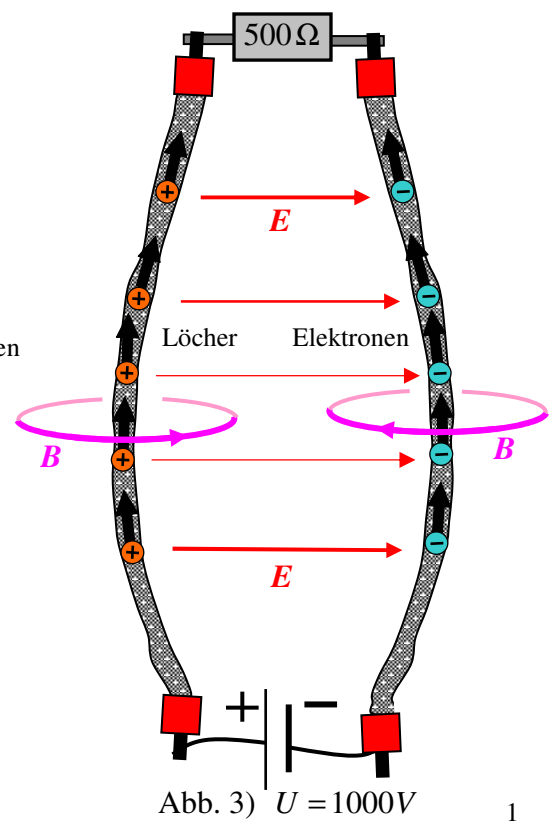
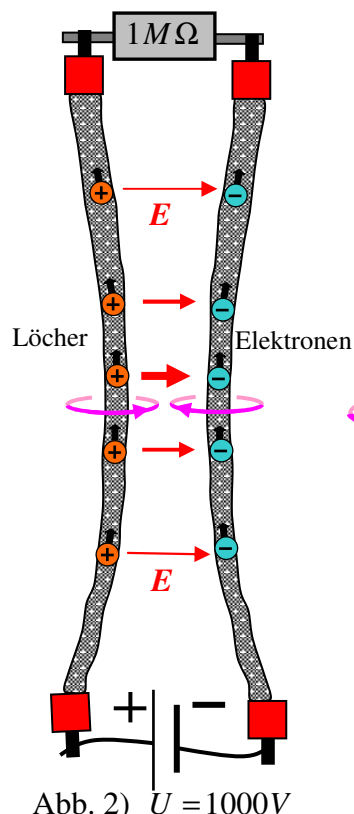
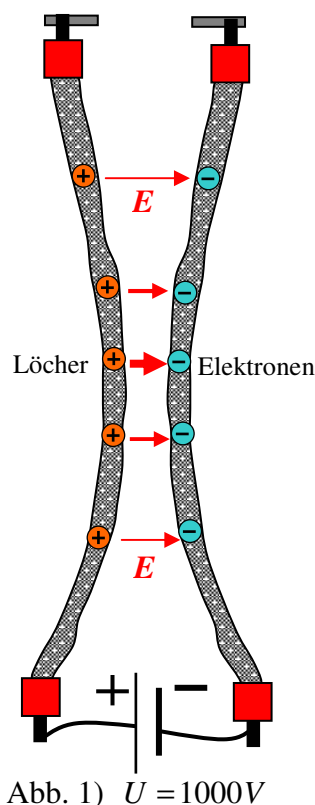


Abb. (2) Nun werden die beiden Bänder an der Oberseite über einen Widerstand von  $R = 1 \text{ M}\Omega$  (MegaOhm) miteinander verbunden, sodass ein Strom der Stärke  $I = U / R = 1 \text{ mA}$  (milliAmpeere) fließt. Im Widerstand rekombinieren dann pro Sekunde  $q = I \cdot \Delta t = 1 \text{ mC}$  positive und negative Ladung. Da die Stromstärke  $I$  weit unter dem Kurzschlussstromwert der Spannungsquelle liegt, ist diese in der Lage, die pro Sekunde rekombinierte Ladungsmenge von  $1 \text{ mC}$  unmittelbar durch erneute Ladungstrennung zu ersetzen. Damit bleibt die Aufladung der Kupferbänder mit  $\pm 5 \mu\text{C}$  voll bestehen und die Bänder *ziehen sich weiterhin an*. Die Abb. zeigt, wie die Kondensatorladungen  $\pm 5 \mu\text{C}$  von der Spannungsquelle zum Verbraucher wandern.

Abb. (3) Nun wird ein Widerstand von  $R = 500 \Omega$  eingesetzt. Die Stromstärke steigt dadurch auf  $I = U / R = 1000 \text{ V} / 500 \Omega = 2 \text{ A}$ . Jetzt rekombinieren pro Sekunde  $q = I \cdot \Delta t = 2 \text{ C}$ . Doch auch diese Ladungsmenge kann die Spannungsquelle erneut trennen, so dass weiterhin fünf Ladungssymbole auf den beiden Bändern zu zeichnen sind. Die Ladungen bewegen sich jetzt jedoch 2000 mal schneller als in Abb.2). Diese Bewegung spielt für die Elektrostatik aber keine Rolle. Nach wie vor sind die Bänder mit  $\pm 5 \mu\text{C}$  aufgeladen und ziehen sich entsprechend an. Doch wir beobachten das Gegenteil, das „Wunder des Magnetismus“: Die Bänder *stoßen sich ab*. Demnach *überlagert* sich der elektrostatischen *Anziehung* eine anders geartete *abstoßende* Kraft. Diese Kraft beruht auf dem *Magnetismus*.



Wir wissen, dass sich ein stromdurchflossener Leiter mit ringförmigen Magnetfeldlinien umgibt. Bisher haben wir die Kraftwirkung des Magnetfeldes durch Kompassnadeln ermittelt.

Die Abb.3) zeigt, dass das Magnetfeld eines stromdurchflossenen Leiters auch auf einen zweiten *Stromfluss* eine Kraft ausübt.

Laufen *ungleichnamige* Ladungsträger *parallel* zueinander, so kommt es zu einer magnetischen *Abstoßung*.

In Abb.4) lassen wir durch die Parallelschaltung der beiden Kupferbänder *gleichnamige* Ladungsträger *parallel* zueinander laufen. Jetzt beobachten wir eine magnetische *Anziehung*.

Merke: Magnetische und elektrostatische Anziehung bzw. Abstoßung folgen bzgl. der Ladungsvorzeichen der umgekehrten Regel.

b) Veranschaulichung der magnetische Anziehung und Abstoßung.

Die Feldlinienrichtung ergibt sich aus der Korkenzieher-Regel.

Für *positive* Ladungsträger nutzt man die *rechte* Hand.

Für *negative* Ladungsträger nutzt man die *linke* Hand.

Interpretation der Abb. 5) und 6):

- Laufen *ungleichnamige* Ladungsträger *parallel* zueinander, so sind die Feldlinien zwischen den Adern gleichgerichtet, das Feld verstärkt sich dort. Außerhalb der Adern sind die Feldlinien entgegengerichtet, das Feld schwächt sich dort ab.

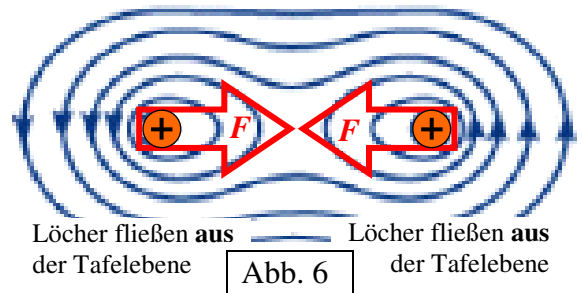
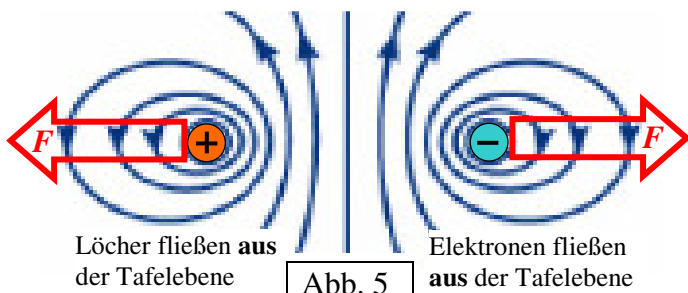
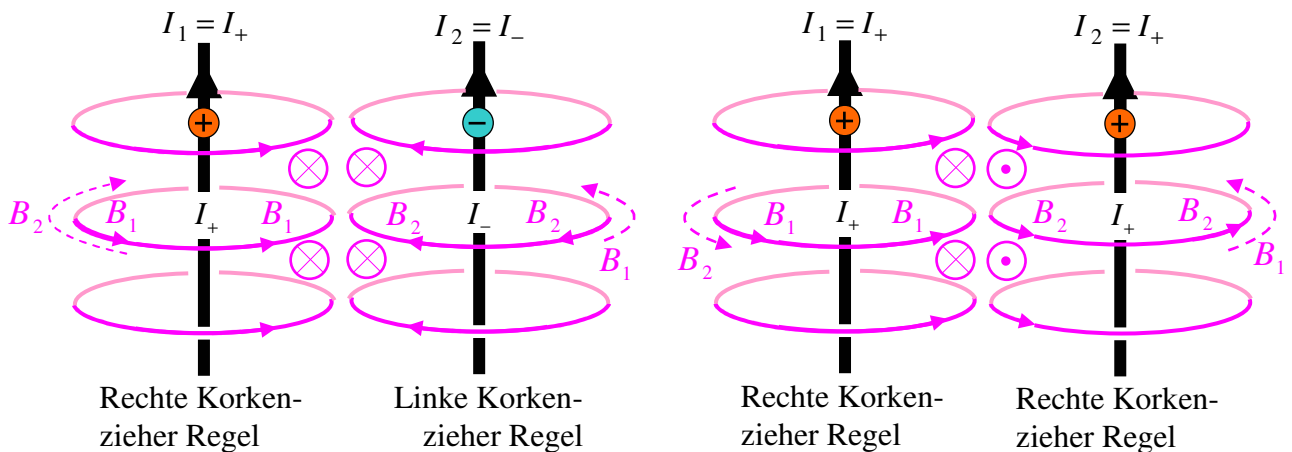
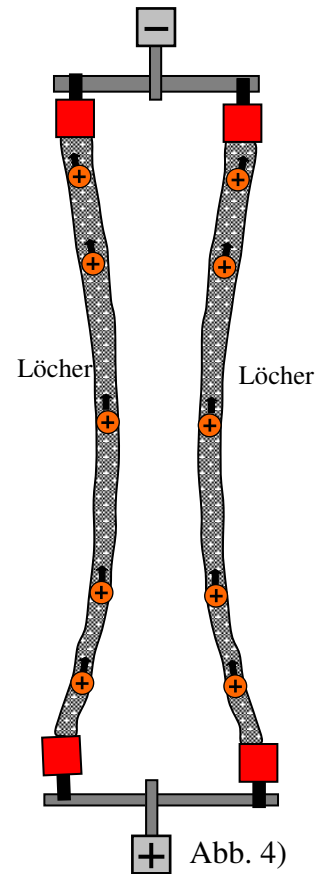
Das verstärkte Feld drückt die Adern aus der Mitte heraus.

Das abgeschwächte Feld zieht die Adern nach außen zu sich. Beide Teilkräfte wirken daher auf die Adern nach außen: Damit ist Abb. 3) *bildlich* veranschaulicht.

- Laufen *gleichnamige* Ladungsträger *parallel* zueinander, so sind die Feldlinien zwischen den Adern entgegengerichtet und außerhalb der Adern gleichgerichtet.

Wieder zieht das schwächere Feld die Adern. Diesmal zieht es sie in die Mitte.

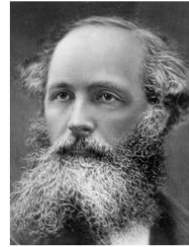
Das verstärkte Feld außerhalb stößt die Adern wieder ab, diesmal in die Mitte. Wieder wirken beide Kräfte in die gleiche Richtung, nämlich nach innen. Damit ist Abb. 4) *bildlich* erklärt.



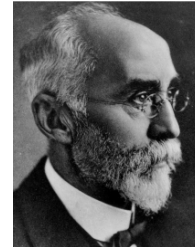
c) Dazwischenschalten der magnetische Flussdichte  $B$ . Die **Drei-Finger-Regel**.

Nachdem der schottische Physiker J.C. *Maxwell* die Gleichungen des Elektromagnetismus gefunden hatte, waren dennoch viele Probleme ungelöst. Insbesondere fehlte die Erklärung der magnetischen Kraft. Diese Erklärung gelang dem niederländischen Mathematiker und Physiker Hendrik Antoon *Lorentz*. Seine „Lorentztransformationen“ wurden dann der Ausgangspunkt von Albert *Einsteins* Relativitätstheorie.

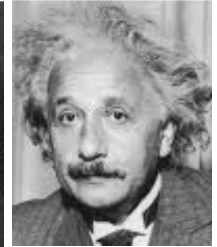
Erst im Rahmen dieser Theorie wurde der Elektromagnetismus dann vollkommen verständlich. Wir werden später noch einen kleinen Exkurs dazu bekommen, inwiefern die magnetische Kraft eine Konsequenz der Relativitätstheorie ist. Das Wesentliche für uns ist jetzt jedoch die Richtungsangabe und die Formel der magn. Kraft, welche H. A. **Lorentz** ermittelt hat. Ihm zu Ehren wird die magnetische Kraft **Lorentzkraft**  $F_L$  genannt.



J. C. Maxwell



H. A. Lorentz



Albert Einstein

1) Die Richtung der Lorentzkraft.

In Abb. 7) und 8) laufen uns mittig Erregerströme  $I_{err}$  mit positiven Ladungsträgern entgegen. Die Richtung der magnetischen Flussdichte  $B$  ergibt sich dann aus der *rechten Korkezieherregel*. Rechts daneben fließt jeweils ein weiterer Strom  $I$  parallel aus der Tafel Ebene heraus. Der Strom  $I$  läuft jeweils *rechtwinklig* zur Flussdichtenrichtung  $B$ .

Wir wissen mittlerweile, dass sich die *ungleichnamige* Ladungen in Abb.7) elektrostatisch zwar anziehen, dass sie sich aber als *gleichgerichtete Ströme abstoßen*. Hält man nun die Ader des Erregerstromes fest, so erfährt die Ader des ungleichnamigen Parallelstromes  $I$  eine Kraft nach rechts. Jetzt betrachten wir nur den

gepunkteten Bereich und nehmen folgende Zuordnung vor:  
Daumen  $\leftrightarrow$  Stromrichtung  
Zeigefinger  $\leftrightarrow$  Flussrichtung  
Mittelfinger  $\leftrightarrow$  Krafrichtung

**Merkregel:**

Linke Hand für Strom  $I$  aus neg. Ladungsträgern  
Rechte Hand für Strom  $I$  aus pos. Ladungsträgern  
Stets:

Daumen: Stromrichtung des Probestromes  $I$ .  
Zeigefinger: Richtung der Flussdichte.  
Mittelfinger: Richtung der Lorentzkraft.

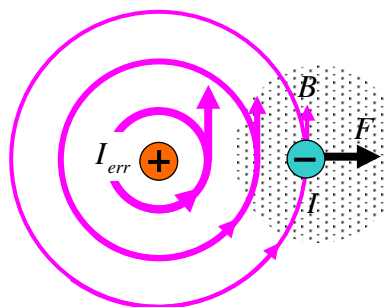


Abb. 7) Seitenansicht:  
Unterschiedliche Ladungen laufen aus der Tafel Ebene heraus.

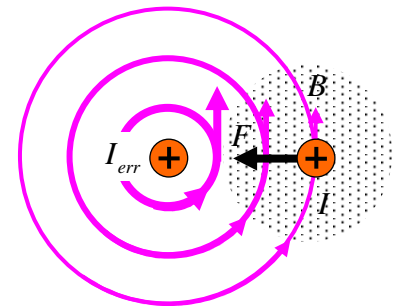
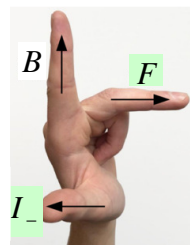


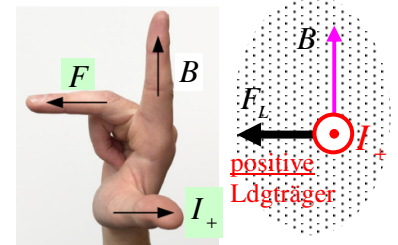
Abb. 8) Seitenansicht:  
Gleiche Ladungen laufen aus der Tafel Ebene heraus.



Aufsicht auf den gepunkteten Bereich:  
**Strom  $I$**  besteht aus **negativen** Ladungsträgern. Sie fließen aus der Tafel Ebene heraus.

**Drei-Finger-Regel der Linke Hand:**

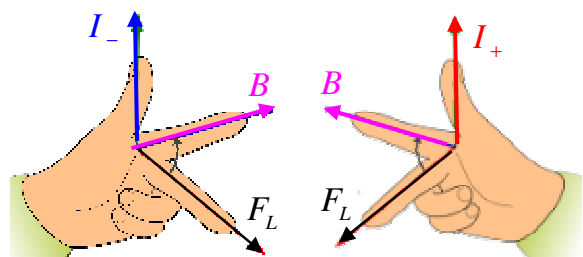
Daumen in Stromrichtung,  
Zeigefinger in  $B$ -Richtung,  
Mittelfinger ergibt Krafrichtung



Aufsicht auf den gepunkteten Bereich:  
**Strom  $I$**  besteht aus **positiven** Ladungsträgern. Sie fließen aus der Tafel Ebene heraus.

**Drei-Finger-Regel der Rechten Hand:**

Daumen in Stromrichtung,  
Zeigefinger in  $B$ -Richtung,  
Mittelfinger ergibt Krafrichtung



d) Die Stärke der Lorentzkraft

Zwischen den Polschuhen eines Hufeisenmagneten lässt sich ein breites homogenes Magnetfeld aufbauen. Im Arbeitsblatt M3 haben wir die Formel

$$B = \frac{\mu_0 \cdot n \cdot I_{err}}{l_{Fe} / \mu_{Fe} + l_L} \text{ für die}$$

Flussdichte ermittelt.

Daten:

Windungszahl  $n = 10000$

Eisenweg  $l_{Fe} = 0,4m$

Luftweg  $l_L = 0,01m$

Eisen:  $\mu_{Fe} = 850$ . Der magn. Widerstand für den  $B$ -Umlauf beträgt  $R_{magn} = l_{Fe} / \mu_{Fe} + l_L = 0,0105$

Damit folgt für  $I_{err} = 10 A \Rightarrow B = 12T$ . Für  $I_{err} = 5 A \Rightarrow B = 6T$ . Für  $I_{err} = 2,5 A \Rightarrow B = 3T$

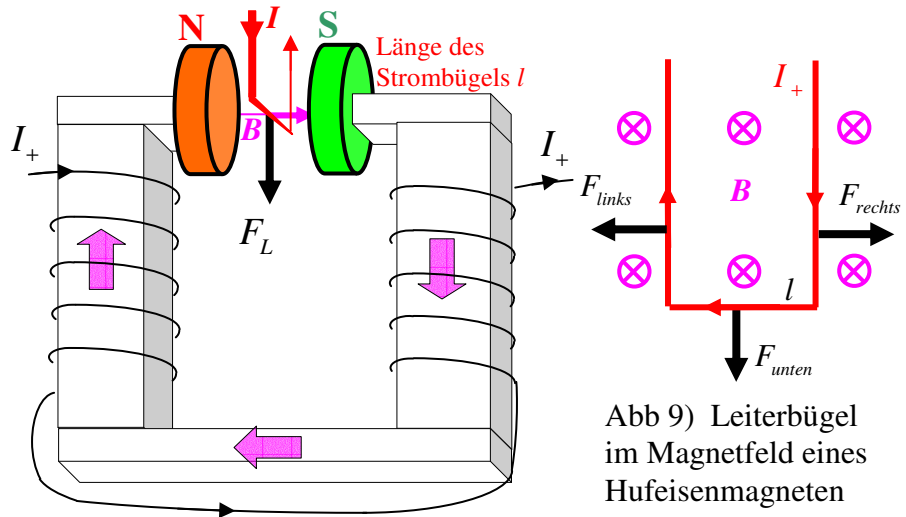


Abb 9) Leiterbügel im Magnetfeld eines Hufeisenmagneten

$B / T$	12	12	12	12	12	12	12	6	3
$l / m$	0,01	0,02	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
$I / A$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,75	1	0,5	0,5	0,5
$F_L / N$	1,34	2,67	4,01	1,34	2,00	2,67	1,34	0,67	0,33

Auswertung:

Nach der Rechten-Drei-Finger-Regel sehen wir, dass der vom positiven (techn. Stromrichtung) Messstrom  $I$  durchflossenen Leiterbügel an den drei im Magnetfeld befindlichen Seiten eine Kraft erfährt. Die seitlichen Kräfte beulen den Bügel minimal aus und kompensieren sich dann. Die Lorentzkraft  $F_L$  misst man daher *nur* am *unteren* Bügelstück. Für dieses verwendet man im Experiment unterschiedliche Längen  $l$ . Der Versuch hat also drei Variablen

- 1) Der Erregerstrom  $I_{err}$  und die daraus folgende Flussdichte  $B$  des Hufeisenmagneten.
- 2) Die Länge  $l$  des Messbügels.
- 3) Die Stärke  $I$  des durch den Bügel geleiteten Messstromes.

Als Ergebnis sehen wir, dass die Lorentzkraft  $F_L$  proportional zu allen drei Größen ist.

Es gilt die **Flib-Formel**  $F_L = l \cdot I \cdot B$ .

Lorentzkraft auf eine freie bewegte Ladung  $\Delta Q$

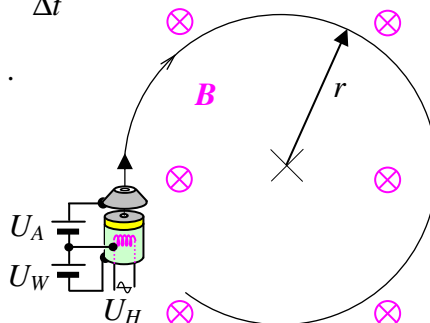
Fließt ein Strom der Stärke  $I$ , so bewegt sich die Ladungsmenge  $\Delta Q$  während der Zeit  $\Delta t$  um

das Stück  $\Delta s = l$  voran. Deshalb gilt  $I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$ . Einsetzen ergibt  $F_L = \Delta s \cdot \frac{\Delta Q}{\Delta t} \cdot B$ .

Verschieben von  $\Delta t$  ergibt  $F_L = \frac{\Delta s}{\Delta t} \cdot \Delta Q \cdot B$ .

Der Quotient  $\Delta s / \Delta t$  ist aber die Geschwindigkeit  $v$  von  $\Delta Q$ .

Die Lorentzkraft auf eine freie Ladung  $q$ , welche sich mit der Geschwindigkeit  $v$  bewegt, folgt also der Formel  $F_L = v \cdot q \cdot B$ .



Fadenstrahlrohr:

Ein mit der Geschw.  $v$  abgeschossenes Elektron bewegt sich auf Grund der Lorentzkraft auf einer Kreisbahn.

Folge mit dem Daumen der linken Hand dem Elektron. Zeigefinger in  $B$ -Richtung, Der Mittelfinger zeigt in die Mitte. Die Lorentzkraft verbiegt die Bahn zu einem Kreis.