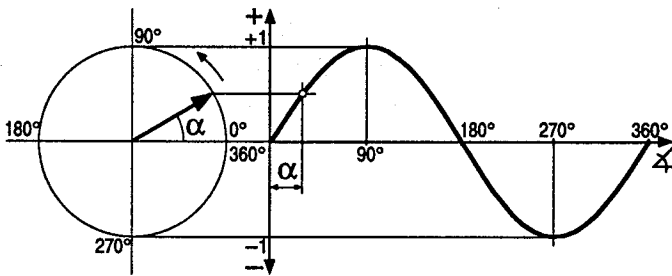


Wechselstrombegriffe

Die Sinuskurve

Die Sinusform ist die Grundform jeder periodischen Schwingung



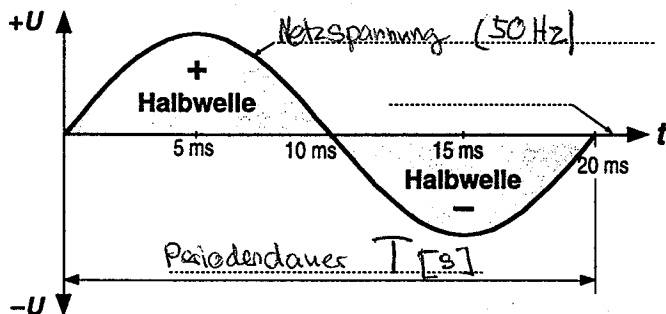
Konstruktion der Sinuslinie durch Projektion einer rotierenden Vektorspitze

Sinusförmige Spannungen und Ströme werden in der Energietechnik angestrebt, weil nur die Sinusform in Induktivitäten und Kondensatoren nicht verändert wird. Zudem lassen sich nur bei der Sinusform auf einfache Weise Berechnungen für Wechselstromkreise durchführen.

Eine verzerrte Kurvenform, die sich periodisch wiederholt, kann in eine sinusförmige Grundkurve und in mehrere, meistens viel kleinere, auch sinusförmige Oberwellen (Harmonische) zerlegt werden. Die Frequenz jeder Oberschwingung ist immer ein ganzzahliges Vielfaches der Grundschwingung.

Je steiler die Flanken einer periodischen Schwingung sind, z.B. bei Phasenanschnittsteuerung oder bei rechteckförmigen Signalen, desto grösser ist die Frequenz der Oberwellen.

Frequenz f und Periodendauer T



Bei unserem Energieverteilnetz (50 Hz) beträgt die Periodendauer 20 ms

Jede Schwingung (Periode) besteht aus einer positiven und einer negativen Halbwelle.

Unter Frequenz versteht man die Anzahl Schwingungen in einer Sekunde

Die Masseinheit für die Frequenz ist

$$1 \text{ Hertz} = \text{Hz} = \frac{1}{\text{s}} = \text{s}^{-1}$$

Unser Energieverteilnetz hat eine Frequenz von 50 Hz, in Amerika sind 60 Hz gebräuchlich.

Die SBB fahren mit $16 \frac{2}{3}$ Hz.

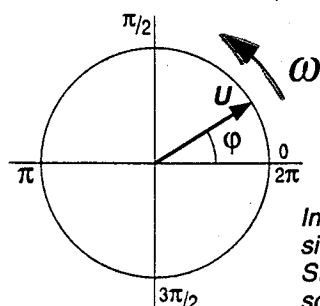
Für eine Schwingung braucht es eine bestimmte Zeit, die sogenannte **Periodendauer T** .

Die Frequenz lässt sich mit T berechnen.

$$f = \frac{1}{T} \left[\frac{1}{\text{s}} \right] \quad T = \frac{1}{f} \left[\text{s} \right]$$

Die Kreisfrequenz

Sinusförmige Spannungen und Ströme entstehen aus einer Drehbewegung; sie lassen sich anstelle des Liniendiagramms auch mit einem rotierenden Vektor (Zeigerdiagramm) darstellen.



Im Zeigerdiagramm denkt man sich den Spannungs- oder Stromvektor mit der Winkelgeschwindigkeit ω umlaufend

Die Winkelgeschwindigkeit dieses Vektors

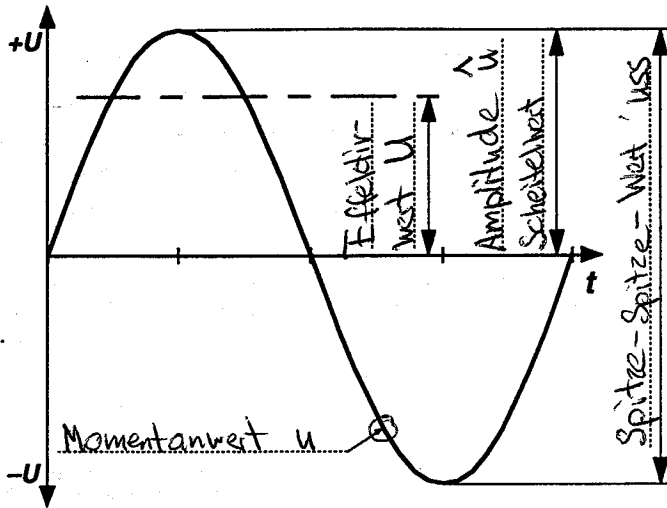
nennen wir Kreisfrequenz

Den Drehwinkel des Zeigers gibt man bei Wechselstromberechnungen im Bogenmass des Einheitskreises (rad) an, d.h. ein Vollkreis hat den Winkelwert 2π .

Da sich der Vektor in einer Sekunde f mal um seinen Anfangspunkt dreht, resultiert für die Kreisfrequenz ω die folgende Formel:

$$\omega = 2\pi \cdot f \text{ in } \text{s}^{-1}$$

Momentanwert, Maximalwert, Effektivwert



Kennwerte bei Wechselspannung

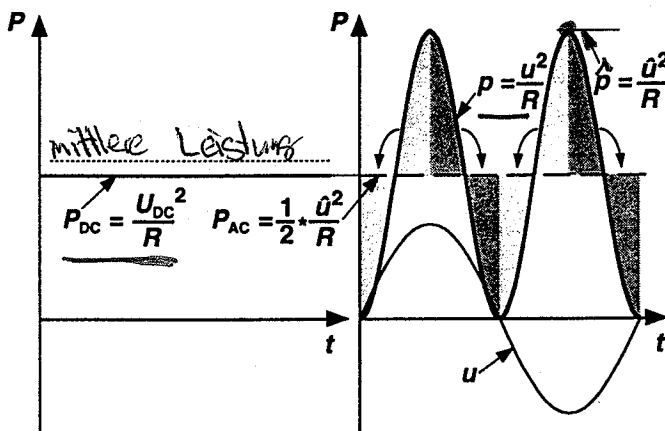
Der Momentanwert oder Augenblickswert wird mit den kleinen Buchstaben u oder i bezeichnet. Zur genauen mathematischen Beschreibung z.B. einer sinusförmigen Spannung ohne Phasenverschiebung, ergibt sich die Formel:

$$u = \hat{u} \cdot \sin(\omega t)$$

Ohne Kenntnis der höheren mathematischen Gesetze ist die Formel jedoch kaum von Nutzen.

Der **Höchstwert** einer Wechselstromgröße hat verschiedene Kennzeichnungen:

Scheitelwert, Maximalwert, Amplitude, Vollauschlag



Die mittlere AC-Leistung entspricht der DC-Leistung, wenn U_{DC} gleich U_{effektiv} ist

Im Formelzeichen wird er mit einem «Dächlein» oder einem Index versehen, z.B.:

$\hat{u}, \hat{i}, U_{\text{Ampl.}}$ oder I_{max}

Die Amplitude einer Wechselspannung ist vor allem bei der Durchschlagsfestigkeit von Isolationen und bei der Dimensionierung von Kondensatoren und Dioden zu berücksichtigen.

Der **Effektivwert** ist der quadratische Mittelwert einer periodischen Schwingung.

Der Effektivwert eines Wechselstromes ist ebenso gross wie der Gleichstromwert mit der gleichen Wärme ng .

$$P_{DC} = \frac{U_{DC}^2}{R} = P_{AC} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\hat{u}^2}{R}$$

$$U_{DC} = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}}$$

$$U = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}} \quad I = \frac{\hat{i}}{\sqrt{2}}$$

Diese Formeln gelten nur für sinusförmige Spannungen und Ströme

Effektivwerte werden wie Gleichstromwerte mit grossen Buchstaben gekennzeichnet. Wird nichts Näheres vermerkt, sind immer Effektivwerte gemeint.

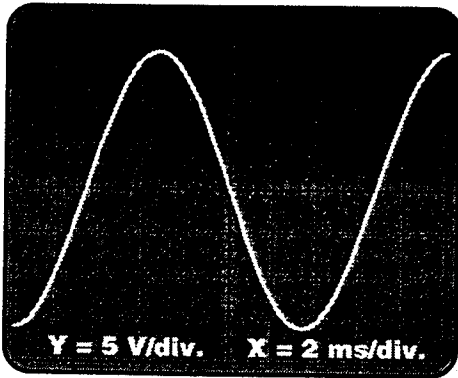
Das Verhältnis zwischen Scheitelwert und Effektivwert ist bei Sinusgrößen $1 : \sqrt{2}$.

Der **Spitze-Spitze-Wert U_{SS}** oder U_{pp} (englisch «peak to peak») ist die Spannung, die zwischen den beiden Scheitelpunkten gemessen wird. Besonders bei der Arbeit mit dem KO (Kathodenstrahloszilloskop) wird häufig die Spitze-Spitze-Spannung bestimmt.

Der Spitze-Spitze-Wert ist der doppelte Scheitelwert

Beispiel zu «Wechselstrombegriffe»:

Auf dem Schirm eines KO ist eine Wechselspannung zu sehen.



- Wie gross sind: a) Amplitude,
b) Effektivwert,
c) Periodendauer,
d) Frequenz,
e) Kreisfrequenz?

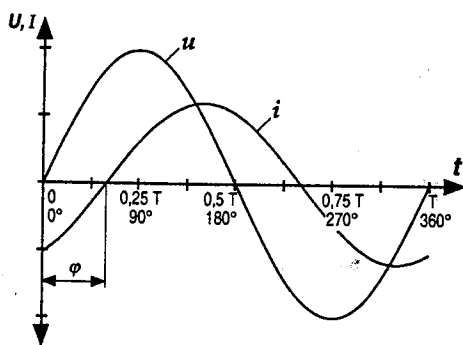
a) Amplitude: $\hat{u} = 10V$

b) $U_{eff} = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}} = \underline{\underline{7.07V}}$

c) Periodendauer $T = 13ms$

d) Frequenz: $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{13ms} = 77Hz$

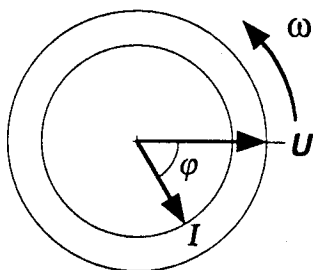
e) Kreisfrequenz: $\omega = 2\pi f = 483 \frac{1}{s}$

Grafische Darstellung von Wechselstromgrössen

Linien- oder Zeitdiagramm

Eine Wechselspannung hat in jedem Augenblick einer Periode einen anderen Wert. Alle Momentanwerte (u , i und p) werden beim **Zeit- oder Liniendiagramm** in Funktion der Zeit massstäblich aufgezeichnet.

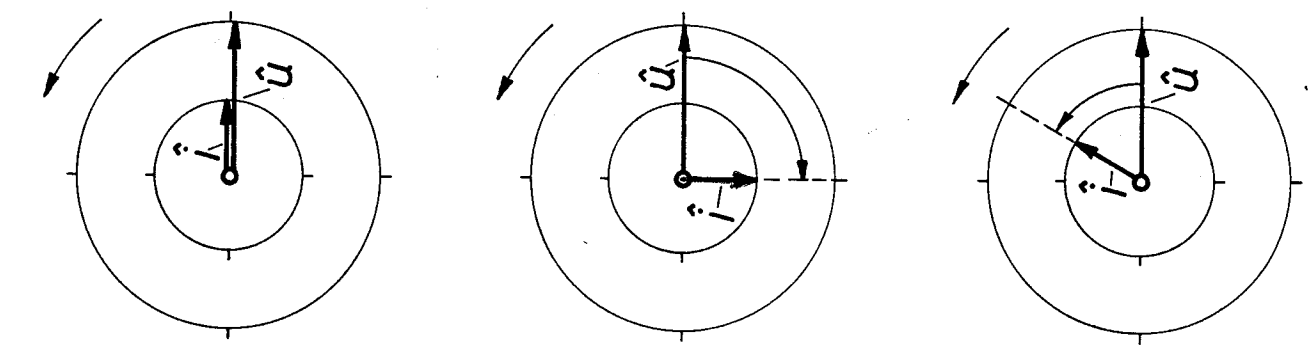
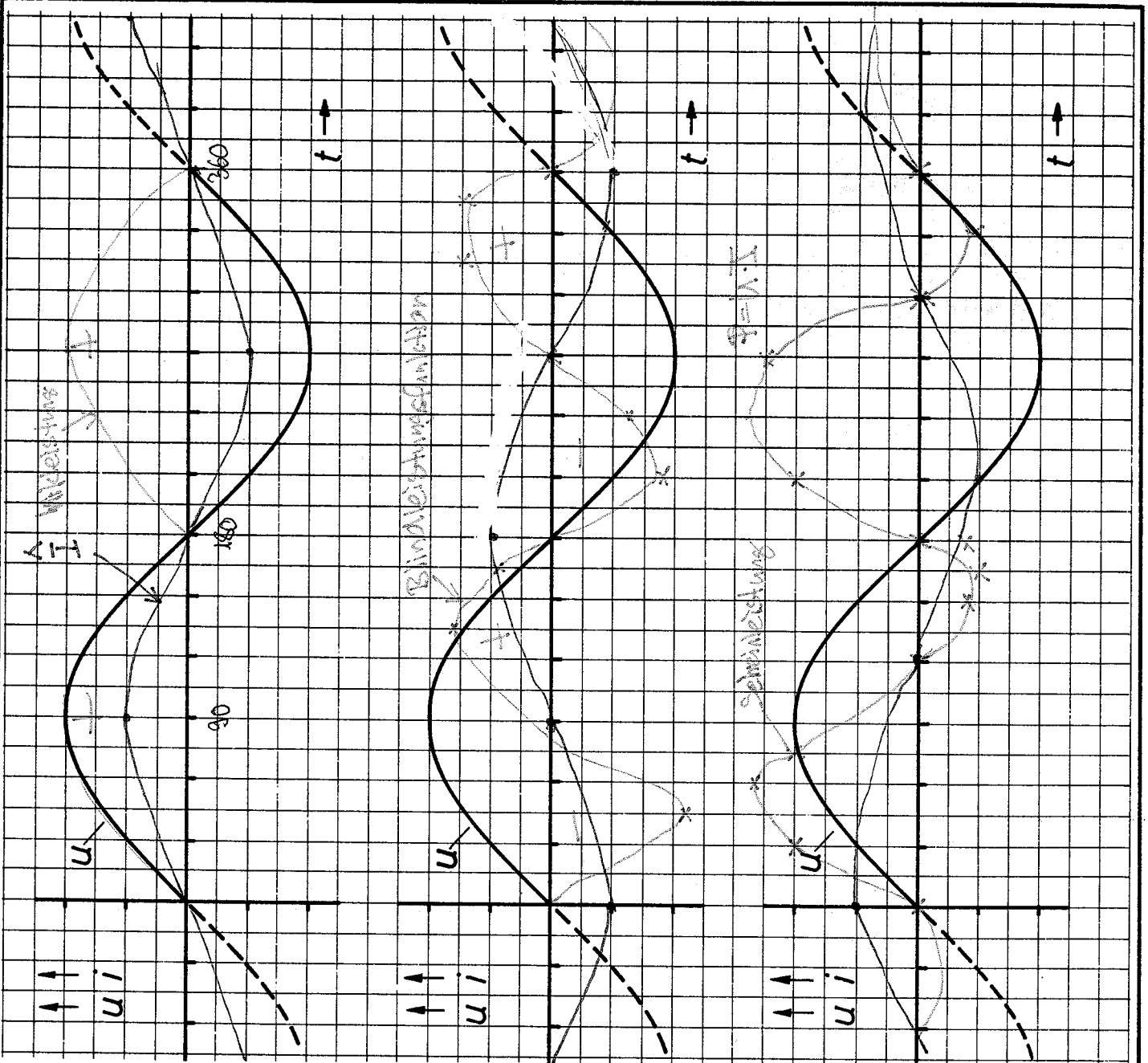
Jede Strecke auf der Zeitachse entspricht einem bestimmten «Drehwinkel» des Generator-Ankers respektive des Vektors. Die Zeitachse wird oft zusätzlich mit Winkelwerten beschriftet, damit Phasenverschiebungswinkel abgelesen werden können.



Zeiger- oder Vektordiagramm

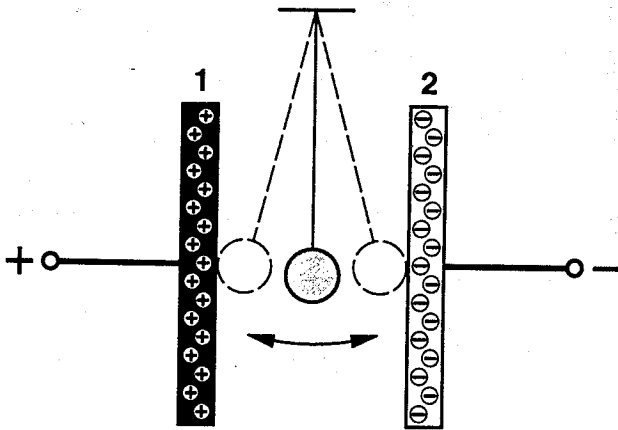
Vereinfacht können sinusförmige Grössen auch durch **Vektor- oder Zeigerdiagramme** gezeigt werden. Dieser Darstellung liegt das Prinzip der Sinuslinien-Konstruktion zugrunde. Den Vektor denkt man sich mit der Kreisfrequenz ω umlaufend. Die Drehrichtung des Vektors ist gegen den Uhrzeigersinn gerichtet; die Ausgangslinie ist waagrecht wie die Zeitachse.

Zeiger und Sinuslinien



Ladung, elektrisches Feld, Kondensator

Die elektrische Ladung



Die Kugel wird zunächst an der Platte 1 positiv geladen, dann von der gleichnamigen Ladung abgestossen und zugleich von der negativen Platte angezogen. An dieser Platte wird die Kugel umgeladen und erneut abgestossen. Der Vorgang wiederholt sich, solange Spannung anliegt.

Die elektrische Ladung ist ein räumlich begrenzter Überschuss oder Mangel an Elektronen.

Elektronenüberschuss ergibt eine negative, Elektronenmangel eine positive Ladung

Elektrische Ladungen üben aufeinander Kraftwirkungen aus:

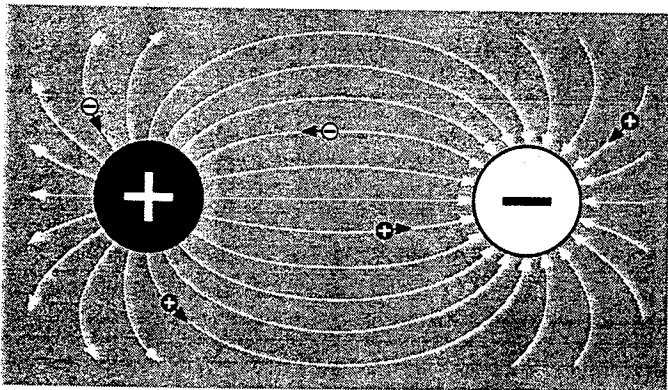
- gleichartige Ladungen stoßen sich ab,
- ungleichartige Ladungen ziehen sich an.

Jede Ladung verursacht eine elektrische Spannung – einen elektrischen «Druck».

Bewegte elektrische Ladung nennen wir Strom. Die Masseinheit für die Ladung ist

Amperesekunden = $1 \text{ As} = 1 \text{ Coulomb}$

Das elektrische Feld



Im Raum zwischen ungleichartig geladenen Körpern lassen sich Kraftwirkungen nachweisen. Man bezeichnet einen solchen Raum als **elektrisches Feld**.

Körper (Pole), zwischen denen eine Spannung herrscht, haben immer unterschiedliche elektrische Ladungen und ein elektrisches Feld.

Im elektrischen Feld lassen sich Kraftwirkungen nachweisen

Elektrische Feldlinien

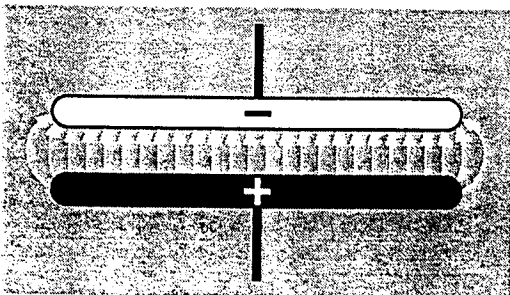
Jedes Feld lässt sich zeichnerisch durch Kraft- oder Feldlinien veranschaulichen.

Die elektrischen Feldlinien verlaufen in Richtung der Kraftwirkung auf eine positive Ladung.

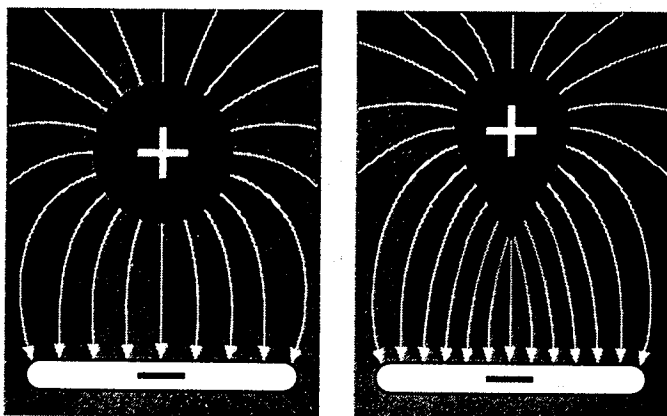
Die Feldlinien haben folgende Eigenschaften:

- Sie beginnen auf positiven und enden bei negativen Ladungen,
- sie treten immer senkrecht aus der Leiteroberfläche aus,
- sie kreuzen oder berühren sich nie.

Verlaufen die Feldlinien parallel und mit gleichmäßigem Abstand, spricht man von einem homogenen Feld.



Zwischen den parallelen, nahe beieinander liegenden Platten eines Kondensators ist das el. Feld homogen.



Die Feldverteilung und damit die Feldstärke ist von der Form der unter Spannung stehenden Körper abhängig

Häufig verlaufen die Feldlinien nicht parallel, das Feld ist inhomogen. Aus den Feldlinienbildern kann man die ungefähre Grösse und die Verteilung der elektrischen Feldstärke erkennen:

Das el. Feld ist dort am stärksten, wo die Feldlinien dichte am grössten ist.

Weisen die geladenen Körper scharfe Kanten oder Spitzen auf, liegen dort die Feldlinien am nächsten beieinander, das heisst die Feldstärke ist dort immer am grössten.

Grosse Flächen und runde Formen führen zu einer gleichmässigen Verteilung der Feldlinien

Die elektrische Feldstärke

Je stärker ein elektrisches Feld ist, desto grösser ist die Kraft, die auf geladene Körper oder auf die Elementarladungen der Atome wirkt.

Die Feldstärke ist ein Mass für die Kraft auf Ladung im elektr. Feld. Masseinheit: V/m

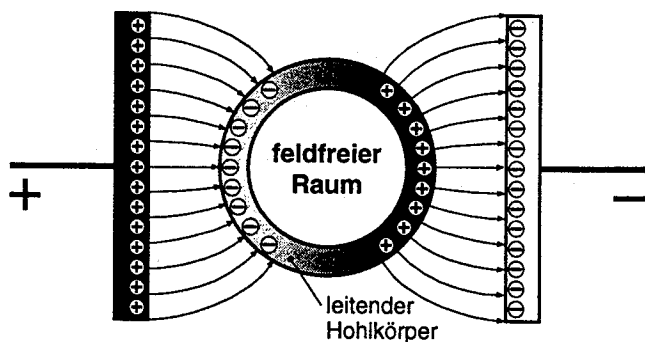
$$E = \frac{U}{l}$$

In einem homogenen Feld ist die Feldstärke um so grösser, je grösser die Spannung und je kleiner der Abstand der Pole ist.

Ist die Feldstärke für ein bestimmtes Isoliermaterial zu gross, kommt es zu einem gewaltsamen Ladungsausgleich zwischen den Polen, der Isolierstoff wird elektrisch «durchschlagen» und dadurch meistens zerstört.

Die Durchschlagfestigkeit ist eine wichtige Kenngrösse für ein Isoliermaterial.

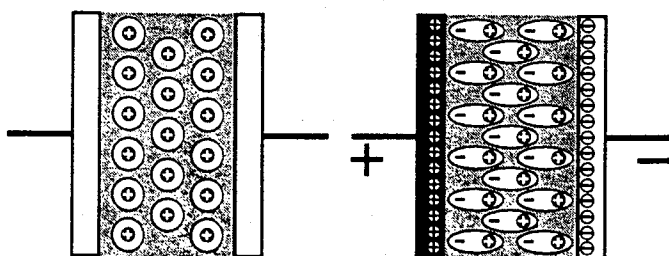
Influenz und dielektrische Polarisation



Abschirmung durch einen Faradayschen Käfig

Unter dem Einfluss eines elektrischen Feldes kommt es in leitenden Materialien zu einer Ladungstrennung (Influenz). Die Oberfläche des leitenden Gebildes wird dadurch aufgeladen.

Das Innere eines leitenden Körpers ist feldfrei \rightarrow Abschirmung



Ladungsverschiebung innerhalb der Moleküle von Isolierstoffen nennt man dielektrische Polarisation

Auch in Nichtleitern kommen Influenzwirkungen zustande, allerdings gibt es kaum freie Elektronen, die abfliessen können. Innerhalb der Atome und Moleküle tritt jedoch eine Ladungsverschiebung ein. Gewisse Moleküle werden «verformt», sie bilden Dipole mit einem positiven und einem negativen Ende (dielektrische Polarisation).

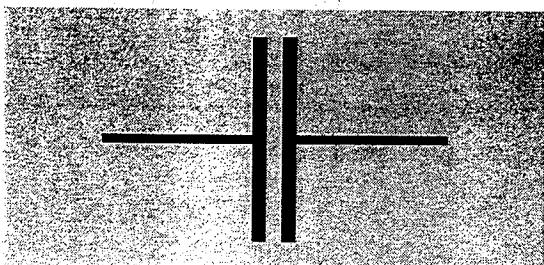
Die dielektrische Polarisation beeinflusst die Kapazität eines Kondensators und die dielektrischen Verluste.

Der Kondensator

Zweck und Verwendung

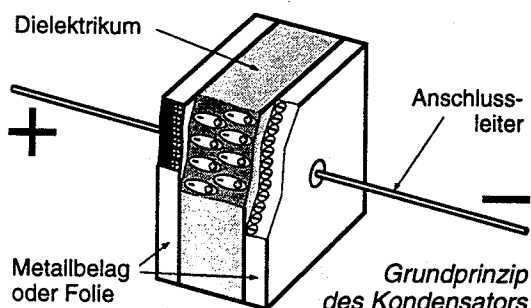
Kondensatoren sind elektrische Bauteile mit einem bestimmten Fassungsvermögen für elektrische Ladung. Ladung beinhaltet Energie und bewirkt eine Spannung. **Zum Laden oder Entladen und dadurch zum Ändern der Spannung braucht es immer eine endliche Zeit.**

Der Kondensator findet in der Praxis zahlreiche Anwendungen mit unterschiedlichsten Aufgaben, die aber alle auf den «Hauptzweck» zurückzuführen sind: **das Speichern von el. Ladung.**



- Glätten von pulsierenden Gleichströmen
- kurzzeit energiequelle z.B. für Blitzlicht
- Zeitverzögerungsschaltung
- Abriegeln von DC und Weiterleiten von AC
- Schältfunken - Entstörung
- Schwingkreise in der Funktechnik
- Starten von einphasigen Motoren

Aufbau des Kondensators



Ein Kondensator besteht (grundsätzlich) aus zwei Leiterplatten die durch eine Isolierschicht voneinander getrennt sind.

Die Isolierschicht heisst **Dielektrikum**; sie besteht aus Werkstoffen, die durch dielektrische Polarisation das elektrische Feld und damit die Kapazität vergrössern.

Die Kapazität C (Fassungsvermögen)

Je nach Bauform und Grösse kann ein Kondensator mehr oder weniger Ladung speichern. Die Kapazität eines Kondensators ist abhängig:

- von den Plattenflächen A
- vom Plattenabstand d
- vom Dielektrikum

Der Werkstoff und die Dicke der Leiterplatten haben keinen Einfluss auf die Kapazität des Kondensators.

Masseinheit: Farad [As/V]

Für jeden als Dielektrikum verwendeten Werkstoff wird die Dielektrizitätszahl (ϵ_r) angegeben. Diese Dielektrizitätszahl sagt aus, wieviel mal grösser die Kapazität eines Kondensators wird, wenn statt Luft dieser Werkstoff als Dielektrikum eingesetzt wird.

Für Luft und Vakuum ist die Dielektrizitätszahl 1, für Öl 2 bis 2.8, für Hartpapier 4 bis 8 und für Keramik 10 bis 10 000.

Die Kapazität eines Plattenkondensators wird nach folgender Formel berechnet:

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{d}$$

- C = Kapazität in As/V (Farad)
- A = Fläche einer Platte in m^2
- d = Plattenabstand in m
- ϵ_r = Dielektrizitätszahl (Faktor)
- ϵ_0 = elektrische Feldkonstante
= $8,85 \cdot 10^{-12}$ As/Vm

Die gespeicherte Ladung

$$Q = C \cdot U$$

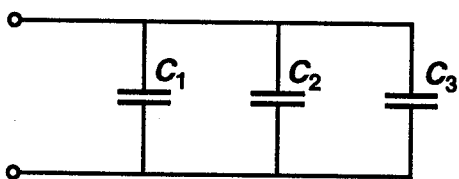
As

Ähnlich wie die in einer Gasflasche enthaltene Gasmenge aus Volumen mal Druck bestimmt wird, berechnet man die in einem Kondensator gespeicherte Ladung mit der Kapazität mal angelegte Spannung.

Schaltung von Kondensatoren

Für Spannung und Strom gelten die gleichen Gesetze wie bei den Widerstandsschaltungen.

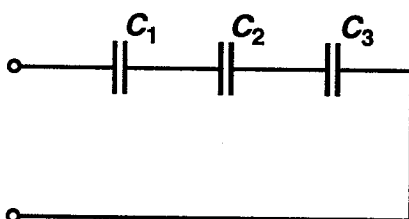
Parallelschaltung:



$$C = C_1 + C_2 + C_3$$

Farad

Serienschaltung:



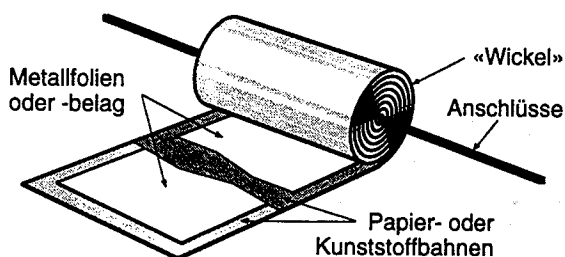
$$C = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}}$$

Farad

Bauformen und Kenngrößen

Beim Einsatz von Kondensatoren müssen Bauform und vor allem bestimmte technische Daten beachtet werden:

Folienkondensatoren



Kenngrößen sind: Nennkapazität,

Toleranz, Nennspannung für AC, DC

Papier-, Kunststoffolien- oder Metallpapierkondensatoren (MP): Metallfolien und als Dielektrikum wirkende Isolierfolien werden zu Wickeln zusammengerollt. Die «Leiterplatten» bestehen aus dünnen Aluminiumfolien oder aus Metallbelägen, die direkt auf das Dielektrikum aufgedampft sind. Als Dielektrikum setzt man imprägnierte Papiere oder Kunststoffolien ein. Die Wickel werden mit Giessharz sowie Bechern oder Rohren aus Aluminium, Kunststoff oder Keramik umhüllt.

Keramik Kondensatoren

Das Dielektrikum besteht aus Oxidkeramik, es hat bis zu 10 000 mal bessere Dielektrizitätszahlen als Luft.

Elektrolytkondensatoren



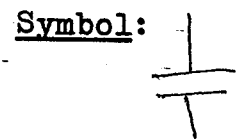
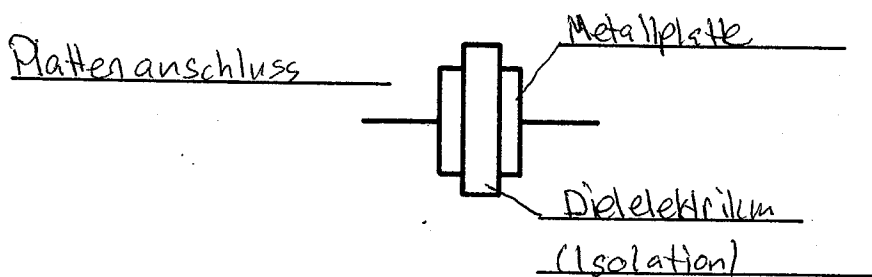
Eine aufgeraute Metallanode – meistens aus Aluminium – ist mit einer isolierenden Oxidschicht bedeckt (Dielektrikum), ein Elektrolyt bildet die Gegenelektrode. Die Oxidschicht wird bei falscher Polung abgebaut. Elektrolytkondensatoren haben Kapazitäten bis zu 1 F.

Drehkondensatoren

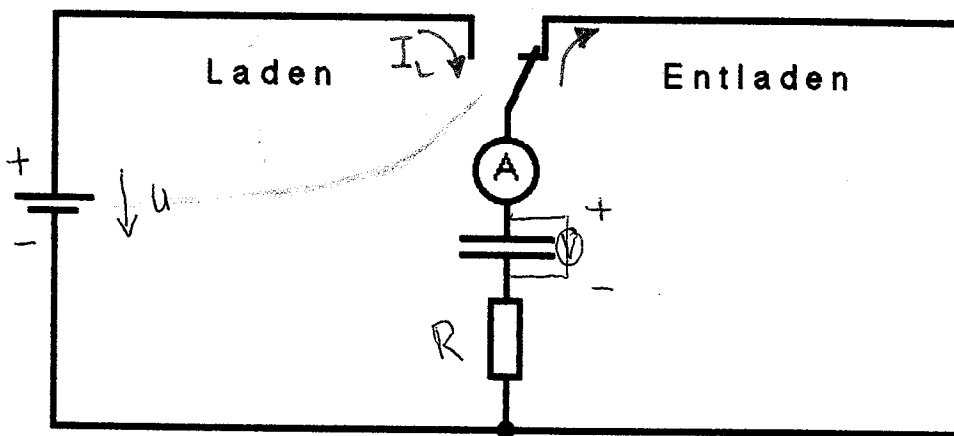
Veränderbare Kapazitäten werden für Mess- und Abstimmvorgänge eingesetzt (z.B. beim Radioapparat).

Kondensator

Grundaufbau eines Kondensators



Ladungsverschiebung im Kondensator



Feststellung:

Laden Beim Laden fließt kurzzeitig ein Strom
Anschließend speichert der Kondensator den Strom.

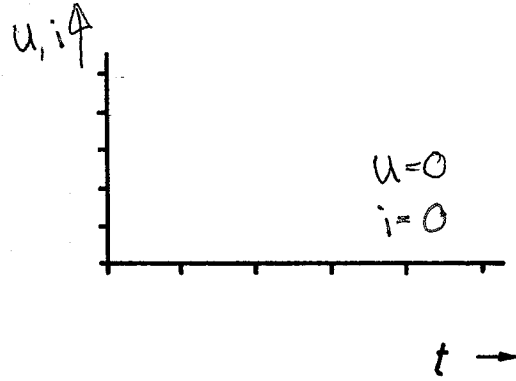
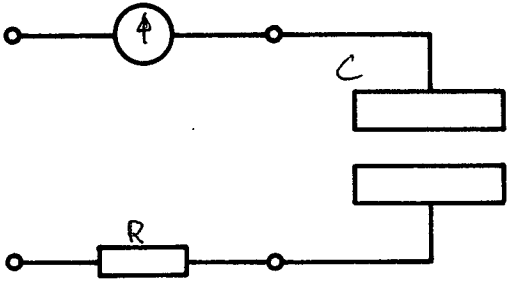
Speichern Der Kondensator kann elektrische Ladungen speichern

Entladen Beim Entladen fließt kurzzeitig ein entgegengesetzter Strom.

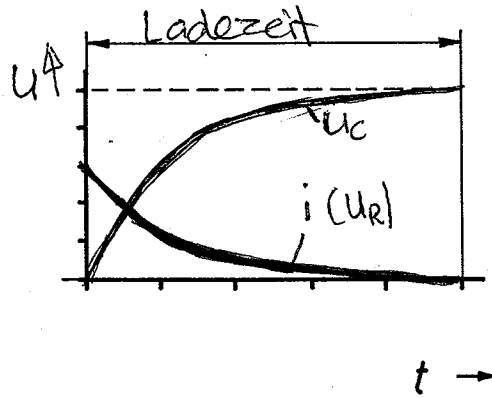
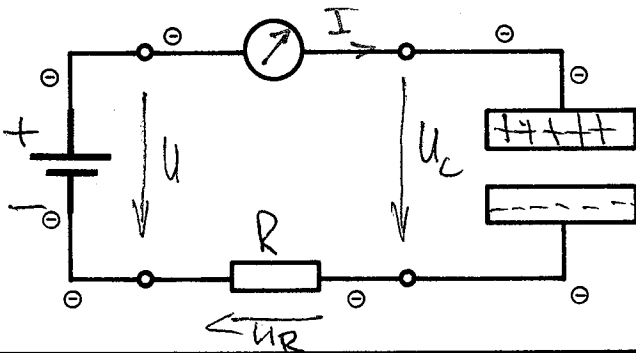
Merke: Ein ungeladener Kondensator wirkt wie ein geschlossener Schalter (Kurzschluss)
Ein geladener Kondensator wirkt wie ein geöffneter Schalter (Unterbruch). Durch das Dielektrikum fließt kein Strom.

Vorgänge:

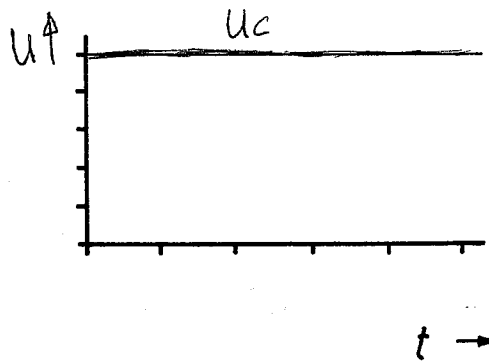
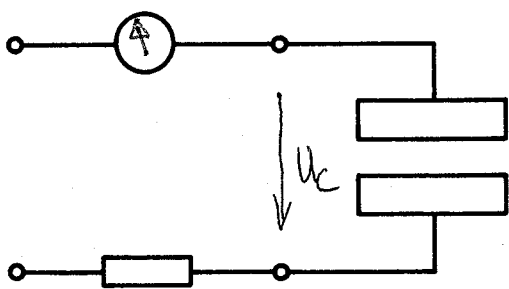
Ungeladen



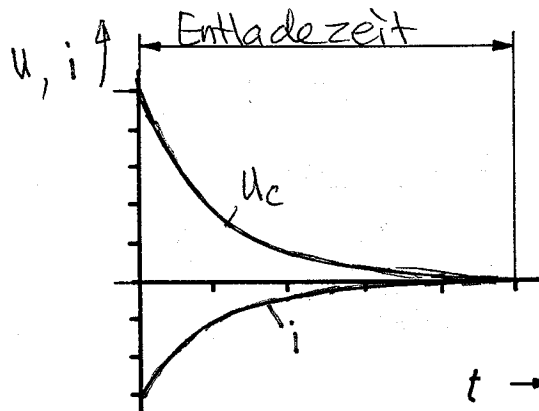
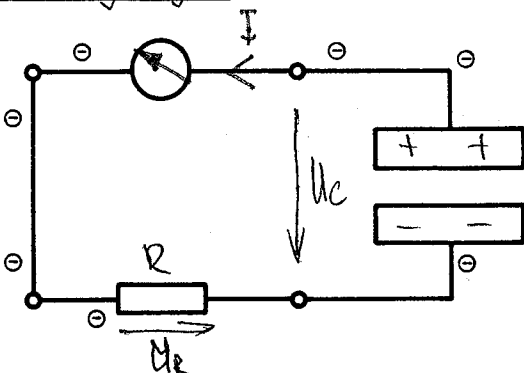
Ladevorgang



Geladen



Entladevorgang



RC-Schaltungen an Gleichspannungen

(4.11.7)

1. Berechnen Sie die Zeitkonstante eines RC-Gliedes mit $R=560\text{k}\Omega$ und $C=0,1\mu\text{F}$.
2. Wie gross ist die Zeitkonstante bei $R=18\text{k}\Omega$ und $C=15\text{nF}$?
3. Die Zeitkonstante eines RC-Gliedes beträgt 360ms .
a) Wie gross ist der Widerstand, wenn die Kapazität $200\mu\text{F}$ ist?
4. Die Zeitkonstante des RC-Gliedes am Verstärkereingang beträgt 28ms .
Errechnen Sie den Ankoppelungskondensator, wenn der Widerstand $5,6\text{k}\Omega$ ist.
5. Ein auf 20V geladener Kondensator wird über einen Spannungsmesser mit $R_i=50\text{k}\Omega$ entladen. Nach $2,5\text{s}$ beträgt die Kondensatorspannung noch $7,4\text{V}$.
Wie gross ist die Kapazität?
6. Ein Kondensator mit $50\mu\text{F}$ wird über einen Widerstand an eine Gleichspannung von 50V gelegt. Nach 9s ist der Kondensator auf $31,5\text{V}$ geladen.
Wie gross ist der Widerstand?

1) 56ms

3) $1,8\text{k}\Omega$

5) $50\mu\text{F}$

2) $270\mu\text{s}$

4) $5\mu\text{F}$

6) $180\text{k}\Omega$

RC-Schaltungen (4.11.7)

7. Ein Kondensator von 15 nF wird über einen Widerstand von $680 \text{ k}\Omega$ an 120 V Gleichspannung gelegt. Berechnen Sie die Kondensatorspannung nach einer Ladezeit von 60 ms ! Wie gross ist dann der Ladestrom?
8. Ein Kondensator mit 470 pF , der auf 30 V geladen ist, wird über einen Widerstand mit $27 \text{ k}\Omega$ entladen. Berechnen Sie die Kondensatorspannung und Entladestrom nach einer Entladezeit von $12,69 \text{ }\mu\text{s}$!
9. Ein auf 20 V geladener Kondensator mit $5 \text{ }\mu\text{F}$ wird über einen Widerstand mit $180 \text{ k}\Omega$ entladen. Nach welcher Zeit beträgt die Kondensatorspannung noch $8,3 \text{ V}$? Wie gross ist dann der Entladestrom?
10. In einer Schaltung liegt eine Relaiswicklung mit $R = 4 \text{ k}\Omega$ ein Kondensator parallel, damit beim Abschalten der Gleichspannung eine Abfallverzögerung auftritt. Die Spannung am Relais beträgt im Abschaltmoment 60 V . Der Haltestrom des Relais beträgt 5 mA . Wie gross muss die Kapazität sein, damit der Abfall des Relais um $1,2 \text{ s}$ verzögert wird? (Induktivität des Relais nicht berücksichtigen!)

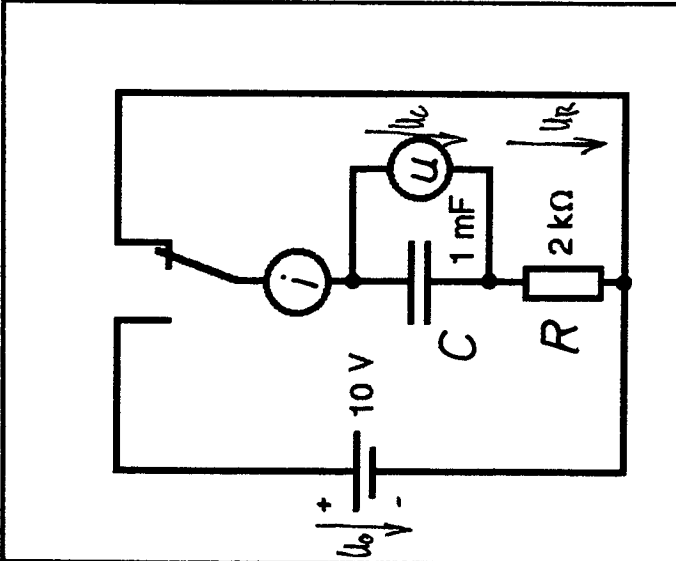
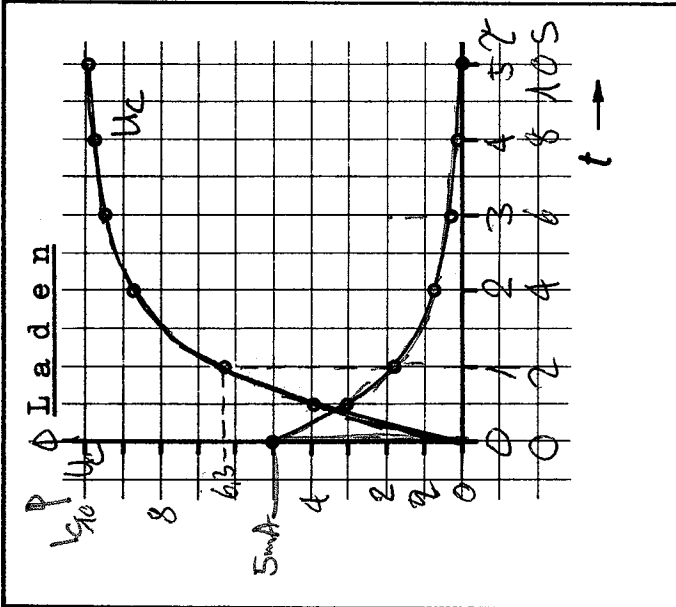
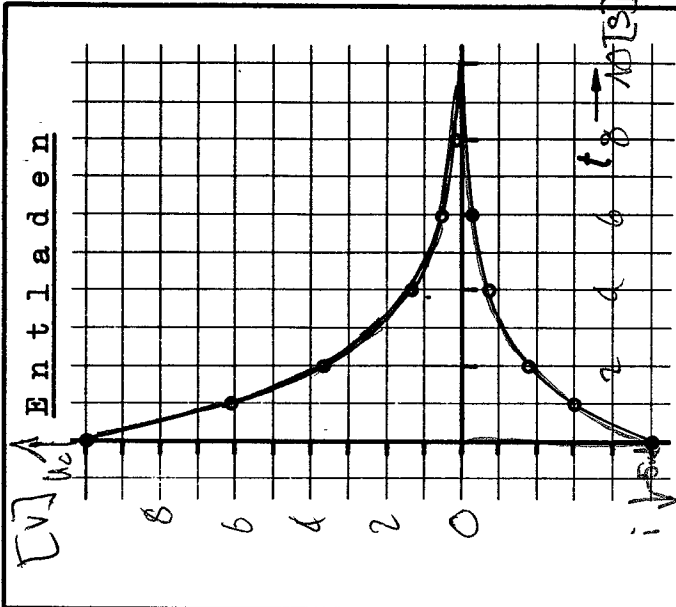
7) $\approx 120 \text{ V}$; $\approx 0 \text{ A}$

9) $791,66 \text{ }\mu\text{s}$; $-46,043 \text{ }\mu\text{A}$

8) $11,1 \text{ V}$; $-0,41 \text{ }\mu\text{A}$

10) $273 \text{ }\mu\text{F}$

Zeitkonstante



$u' = U_0$	$u' = U_0$
$i' = -5mA \left(-\frac{10V}{2k\Omega}\right)$	$i' = -5mA$
$u = 0$	$u = 0$
$i = 0$	$i = 0$
$\tau = R \cdot C = 2k\Omega \cdot 1mF = 2s$	$\tau = R \cdot C = 2k\Omega \cdot 1mF = 2s$
$t_E \approx 5 \cdot \tau = 5 \cdot 2s = 10s$	$t_E \approx 5 \cdot \tau = 5 \cdot 2s = 10s$

$u' = 0$	$u' = 0$
$i' = \frac{U_0}{R} = \frac{10V}{2k\Omega} = 5mA$	$i' = \frac{10V}{2k\Omega} = 5mA$
$u = 10V$	$u = 10V$
$i = 0$	$i = 0$
$\tau = R \cdot C = 2k\Omega \cdot 1mF = 2s$	$\tau = R \cdot C = 2k\Omega \cdot 1mF = 2s$
$t_L \approx 5 \cdot \tau = 5 \cdot 2s = 10s$	$t_L \approx 5 \cdot \tau = 5 \cdot 2s = 10s$

<p><u>Beginn:</u> Laden:</p> <p>$u_C = U_0(1 - e^{-t/\tau})$</p> <p>$u_C = 10 \cdot e^{-t/\tau}$</p>	<p><u>Ende:</u> Entladen:</p> <p>$u_C = U_0 \cdot e^{-t/\tau}$</p> <p>$i = -I_0 \cdot e^{-t/\tau}$</p>
<p><u>Zeitkonstante:</u> $\tau = R \cdot C$</p> <p>$2k\Omega \cdot 1mF = 2s$</p>	<p><u>Dauer des ganzen Vorganges:</u></p> <p>$t \approx$ _____</p>

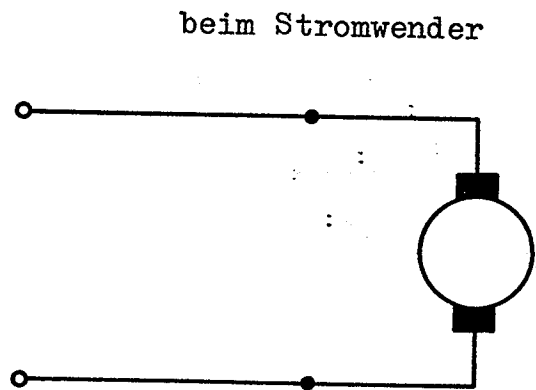
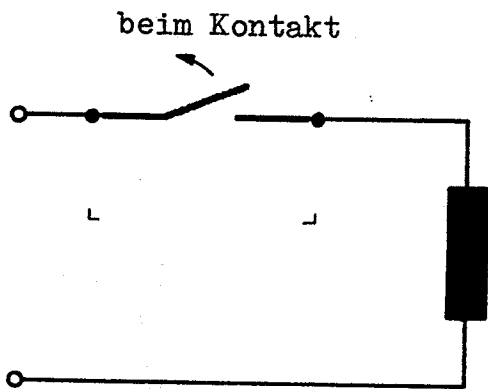
--	--	--	--

Funkenlöschchen und Entstören

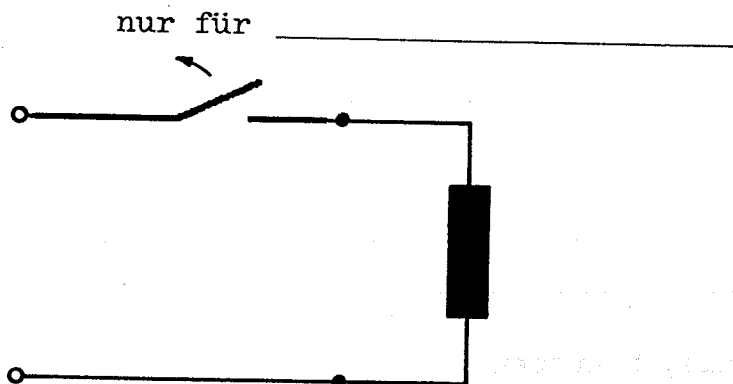
Ueberspannungen durch Selbstinduktion können durch folgende Massnahmen verhindert werden:

Beispiele:

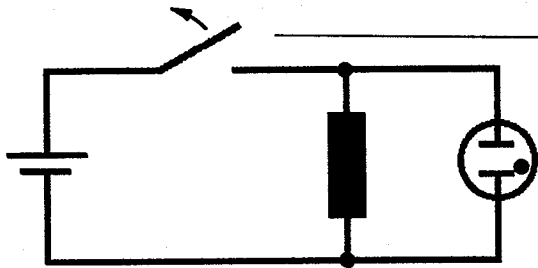
1. mit RC-Glied



2. mit Diode (in _____ zur angelegten Spannung !)

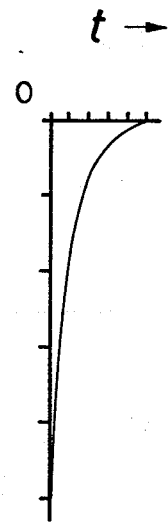
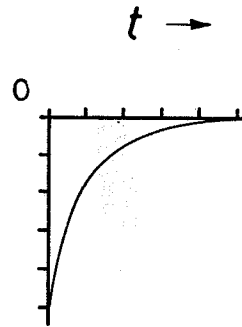
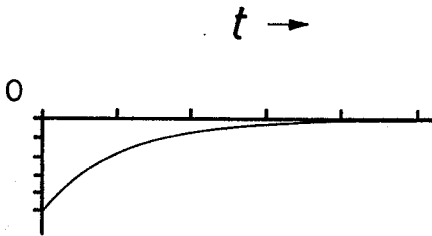


Abschaltspannung (Störspannung)



Folgerung: Beim Abschalten von Spulenstromkreisen können durch Selbstinduktion _____ auftreten.

Grösse der Abschaltspannung: Sie ist abhängig von _____ bzw. _____



	$\tau =$	—	—		

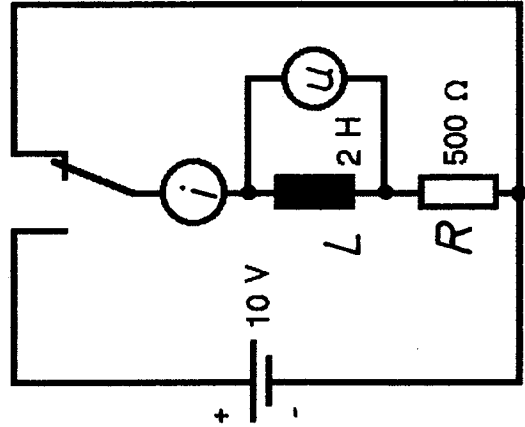
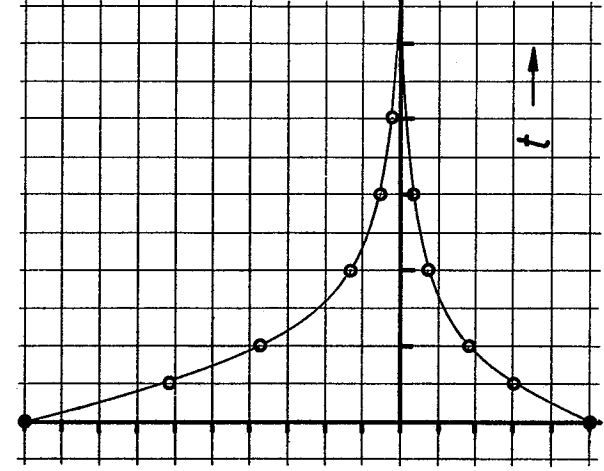
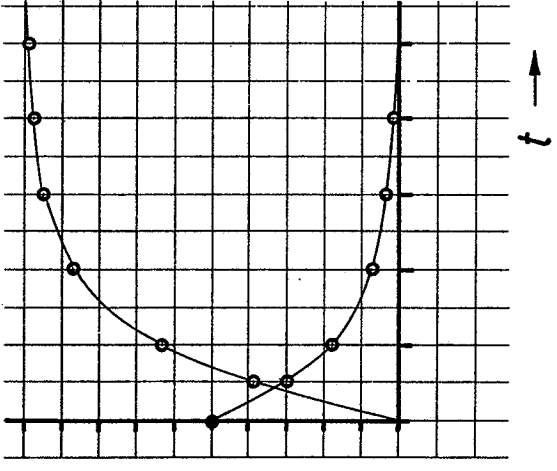


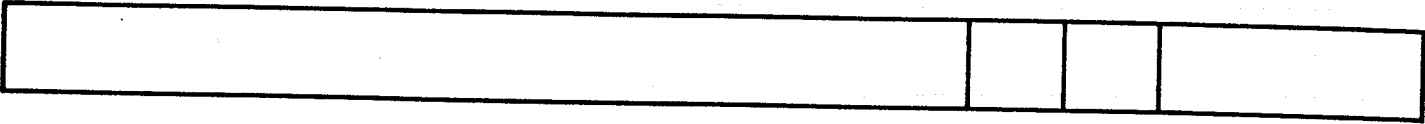
wenn R _____
dann ist τ _____

Merke: _____

Funkenlöschen bei Motoren, Relais, Schützen, Magneten, usw. heisst also:

Zeitkonstante

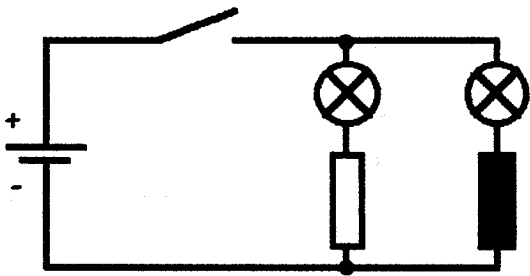
<p style="text-align: center;"><u>E I N - Schaltvorgang</u></p> 	<p style="text-align: center;"><u>A U S - Schaltvorgang</u></p> 	<table border="1" style="width: 100%; height: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="text-align: center;">$U =$</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">$i =$</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">$U =$</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">$i =$</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">$\tau_A =$</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">$t_A \approx$</td></tr> </table>	$U =$	$i =$	$U =$	$i =$	$\tau_A =$	$t_A \approx$						
$U =$														
$i =$														
$U =$														
$i =$														
$\tau_A =$														
$t_A \approx$														
<p style="text-align: center;"><u>E I N - Schaltvorgang</u></p> 	<table border="1" style="width: 100%; height: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="text-align: center;">$U =$</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">$i =$</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">$U =$</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">$i =$</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">$\tau_E =$</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">$t_E \approx$</td></tr> </table>	$U =$	$i =$	$U =$	$i =$	$\tau_E =$	$t_E \approx$	<table border="1" style="width: 100%; height: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="text-align: center;">$U =$</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">$i =$</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">$U =$</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">$i =$</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">$\tau_E =$</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">$t_E \approx$</td></tr> </table>	$U =$	$i =$	$U =$	$i =$	$\tau_E =$	$t_E \approx$
$U =$														
$i =$														
$U =$														
$i =$														
$\tau_E =$														
$t_E \approx$														
$U =$														
$i =$														
$U =$														
$i =$														
$\tau_E =$														
$t_E \approx$														
<p><u>Beginn:</u></p>	<p><u>Ende:</u></p>	<p><u>Zeitkonstante:</u> $\tau =$ _____</p>												
<p><u>Dauer des ganzen Vorganges:</u></p> <p style="text-align: right;">$t \approx$ _____</p>														



Ein- und Ausschaltvorgang eines Spulenstromkreises

Selbstinduktion

Ein- und Ausschalten eines Stromkreises ohne und mit Selbstinduktion



Feststellung:

Nach dem Einschalten leuchtet die mit der Spule in Serie geschaltete Lampe später auf.

Folgerung: Durch jede Feldänderung entsteht in der Spule eine Selbstinduktionsspannung

- Nach dem Einschalten ist U_{ind} so gerichtet, dass sie den Feldaufbau bzw. Stromanstieg verzögert.

- Nach dem Ausschalten ist U_{ind} so gerichtet, dass sie den Feldabbau bzw. das Abklingen des Stromes verzögert.

Merke: Selbstinduktion verzögert jede Stromänderung!

Induktivität (dynamisches Speichervermögen von Elektrizität)

Spulen mit vielen Windungen und geschlossenem Eisenkern haben starke Selbstinduktionswirkung (Drosselspulen). Diese Abhängigkeit der Spulenausführung wird als Induktivität L bezeichnet.

Die Induktivität wächst mit dem Quadrat der Windungszahl. Sie hängt ferner von den Eigenschaften des Eisenkerns und von den Abmessungen der Spule ab.

Einheit für L : 1 Henry (1H)

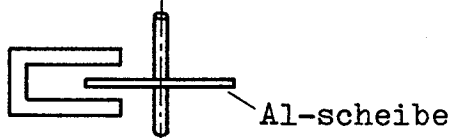
Eine Spule hat die Induktivität von 1 H, wenn bei einer gleichförmigen Stromänderung von $\frac{1\text{A}}{\text{s}}$ eine Spannung von 1V induziert wird.

$$1\text{H} = \frac{1\text{V}}{\frac{1\text{A}}{\text{s}}} = \frac{1\text{Vs}}{\text{A}} = \underline{\underline{1\text{Vs}}}$$

Für Rechnungszwecke soll die Einheit Vs verwendet werden.

Wirbelströme

Bewegtes Metall in einem Magnetfeld Generatorprinzip



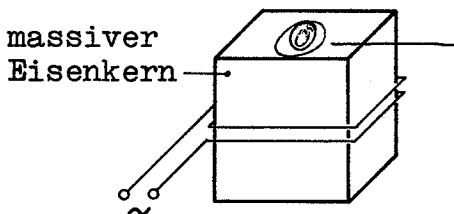
Wird Metall (bzw. leitendes Material) in einem Magnetfeld quer zu den Feldlinien bewegt, so entstehen im Metall Wirbelströme

⇒ Diese Wirbelströme bremsen die Bewegung des Metalles.

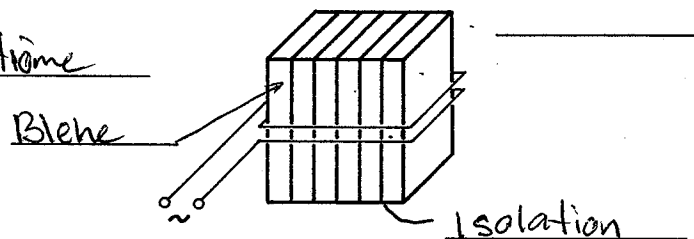
Verringerung der bremsenden Wirkung: Unterbrechen der Stromwege, Verwendung von schlechter leitendem Material

Nützliche Anwendungen: Wirbelstrombremse: bei Zählern, Messinstrumenten, LKW, Zug

Metall in einem magnetischen Wechselfeld Transformatorprinzip



Wirbelströme



"praktisch keine Erwärmung"

Durchdringt ein magnetisches Wechselfeld Metall (bzw. leitendes Material), so entstehen im Metall Wirbelströme

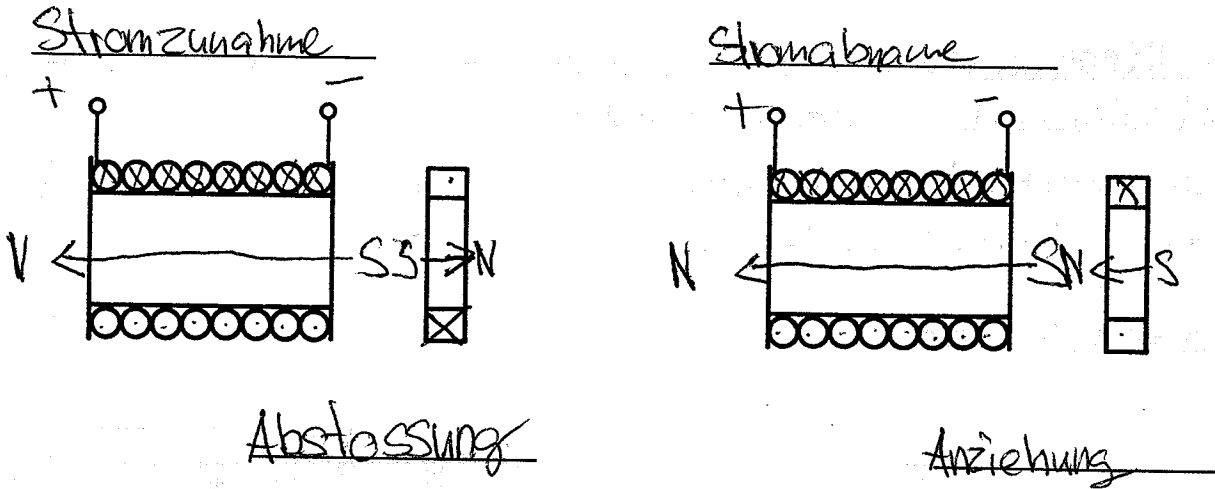
⇒ Diese Wirbelströme erwärmen das Metall; es entstehen Verluste, die sogenannten Wirbelstromverluste

Verringerung der Wirbelstromverluste: Schlecht leitendes Material, dünne, isolierende Elektrobleche verwenden

Nützliche Anwendungen: Induktionshörner

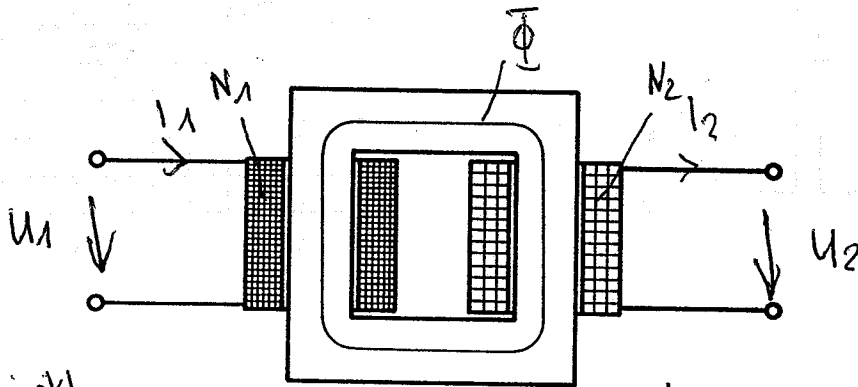


Richtung des Stromes und seine Wirkungen



Anwendungen: Wechselstrom: Transformator
Induktionsofen

Beispiel: Prinzip des Transformators



Eingangswicklung
(Primärwicklung)

Ausgangswicklung
(Sekundärwicklung)

$\frac{N_1}{N_2}$	$=$	$\frac{U_1}{U_2}$	$=$	$\frac{I_2}{I_1}$
-------------------	-----	-------------------	-----	-------------------

Lenzsche Regel

Der durch eine Induktionsspannung hervorgerufene Strom ist stets so gerichtet, dass ein Magnetfeld der Ursache der Induktion entgegen wirkt.

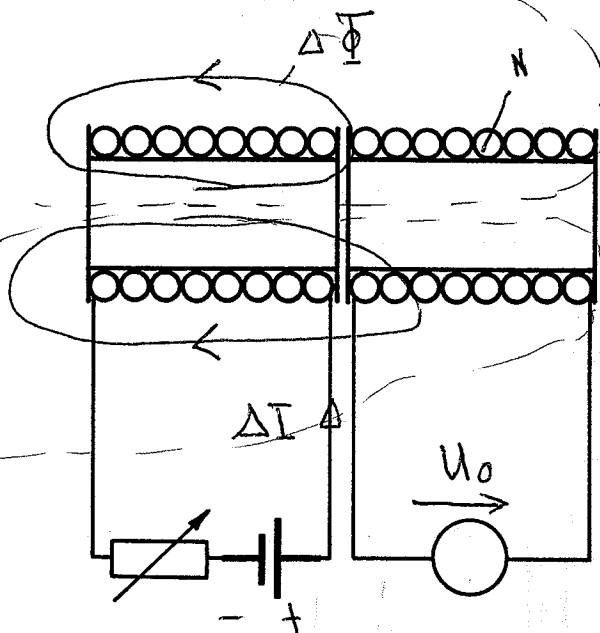
Induktion der Ruhe

Transformatorprinzip

Jede Stromänderung bewirkt in beiden Spulen eine Änderung der Feldlinienzahl (magnetischer Fluss).

⇒ Es entstehen Ladungsverschiebungen in den Spulen; d.h. es wird Spannung induziert

Induzierte Spannung

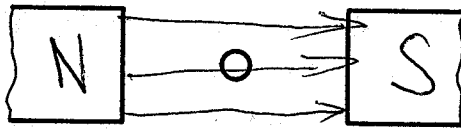


$$\begin{aligned} \Delta \Phi &= \text{Flussänderung} \\ \Delta t &= \text{Zeit während der} \\ &\quad \text{Flussänderung} \\ N &= \text{Windungszahl} \\ U_0 &= -N \cdot \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = [\text{V}] \end{aligned}$$

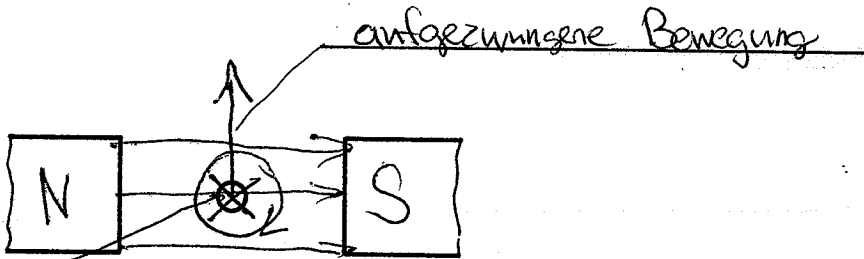
Beispiel: Die Primärwicklung eines Transformators ist zwecks Messung ihres Widerstandes über ein Potentiometer an Gleichspannung angeschlossen; dabei ergibt sich ein Fluss von 0,08 Vs. Mittels des Potentiometers wird der Strom innerhalb 2 s gleichmäßig auf den Wert Null regliert. Welche Spannung wird dabei in der Sekundärwicklung induziert, wenn deren Windungszahl 3600 beträgt?

$$U_0 = -N \cdot \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -3600 \cdot \frac{-0,08 \text{ Vs}}{2 \text{ s}} = \underline{\underline{144 \text{ V}}}$$

Richtung des Stromes und seine Wirkungen



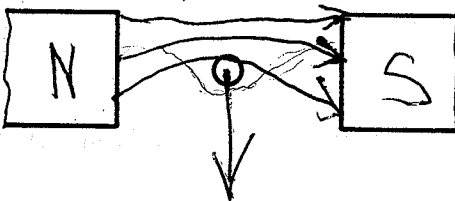
keine Induktion



aufgezwingene Bewegung

I induziert

aufgezwingene Bewegung



Bremmung des Leiters

Der durch die induzierte Spannung verursachte Strom bildet ein Magnetstrom um den Leiter. Dieses Magnetfeld bildet mit dem Polfeld ein resultierendes Magnetfeld. \Rightarrow Das Feld um den Leiter ist so gerichtet, dass sich das entstehende gemeinsame Feld vor dem Leiter verdichtet

\Rightarrow der Leiter wird gebremst

Anwendungen: Gleich- und Wechselstrom generatoren
Motoren

Spannungserzeugung durch Induktion

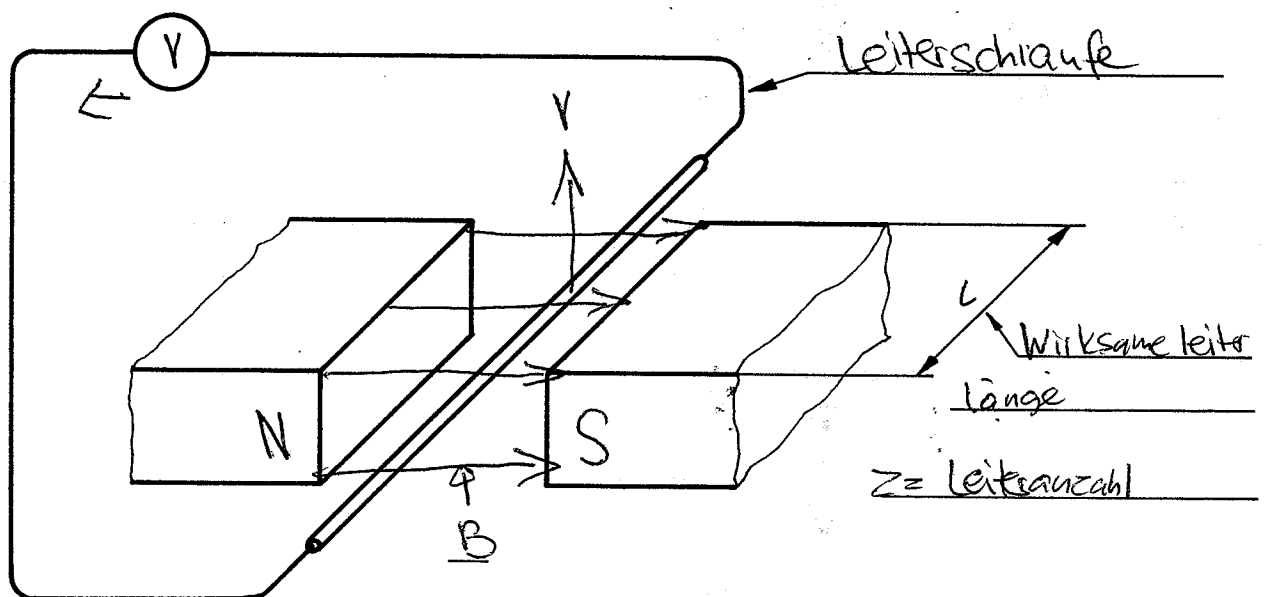
Induktion der Bewegung

Generatorprinzip

Die Bewegung einer Leiterschleife quer zu den Feldlinien (d.h. Änderung der Feldlinienzahl bzw. des magnetischen Flusses in der Leiterschleife) bewirkt in der Leiterschleife eine Ladungverschiebung

⇒ In der Leiterschleife wird eine Spannung induziert

Induzierte Spannung



$$U_0 = B \cdot v \cdot L \cdot z \text{ [V]}$$

$$\frac{\text{Vs}}{\text{m}^2} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \text{m} = \text{V}$$

Beispiel: Die Ankerleiter eines Gleichstromgenerators schneiden das Feld der Pole mit einer Geschwindigkeit von 40 m/s. Berechnen Sie die induzierte Spannung der 148 Leiter, wenn die im Feld liegende Leiterlänge 200 mm und die Luftspaltinduktion 0,8 Tesla betragen.

$$B \cdot v \cdot L \cdot z = U_0 = 0,8 \cdot 40 \cdot 0,2 \cdot 148 = \underline{\underline{950\text{V}}}$$

Kraftwirkung zwischen stromdurchflossenem Leiter (Spule) und Polfeld

Ablenkraft:

$$F = B \cdot I \cdot L \cdot Z$$

Z = Anzahl des Leiter

Beispiel: Ein Gleichstrommotor hat im Luftspalt (Feld zwischen Pol und Anker) eine magnetische Flussdichte von 0,8 Tesla. 300 Ankerdrähte, durch welche je ein Strom von 10 A fließt, befinden sich gleichzeitig unter den Polen. Die wirksame Leiterlänge beträgt 180 mm. Berechnen Sie die Kraft am Umfang des Ankers !

$$F = 0,8 \frac{\text{Vs}}{\text{m}} \cdot 10 \text{ A} \cdot 0,18 \text{ m} \cdot 300 = 432 \text{ N}$$

Anwendungen: Gleichstrommotor
Drehspulenmesswerk

Kraftwirkung zwischen stromdurchflossenen Leitern

Ablenkraft:

$$F = 2 \cdot 10^{-7} \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \frac{L}{a}$$

L = wirksame Leiterlänge

a = Abstand

Beispiel: Ein Isolator trägt ein 1,4 m langes Sammelschienenstück in 0,3 m Abstand vom parallelführenden Leiter. Welche Kraft wirkt auf den Isolator bei einem Kurzschlussstrom von 30 kA ?

$$F = 2 \cdot 10^{-7} \cdot (30 \text{ kA})^2 \cdot \frac{1,4 \text{ m}}{0,3 \text{ m}} = \underline{\underline{840 \text{ N}}}$$

Anwendungen: Kräfte zwischen Sammelschienen (Isolatorenbruch)

Elektromagnetische Kraftwirkungen

Zugkraft von Elektromagneten

Die Zugkraft von Elektromagneten berechnet sich nach der Formel:

$$F = 4 \cdot 10^5 \cdot A \cdot B^2 \Rightarrow B = \sqrt{\frac{F}{4 \cdot 10^5 \cdot A}} \quad \left[\frac{\text{V}}{\text{m}^2} \right]$$

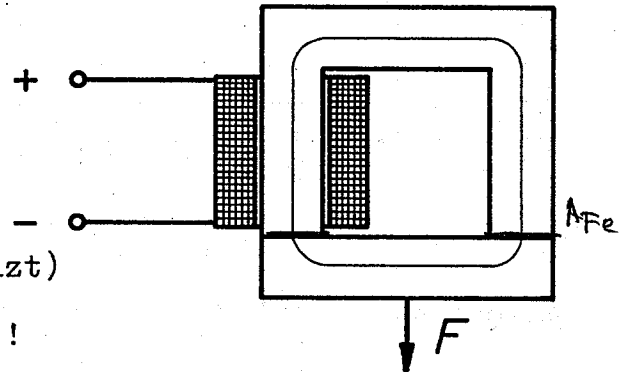
Beispiel:

Gegeben: $F = 20 \text{ N}$

$l_{\text{Fe}} = 344 \text{ mm}$

$A_{\text{Fe}} = 8,7 \text{ cm}^2$

Fe: Elektroblech II (warmgewalzt)



Gesucht: Spulenstrom bei 1200 Windungen !

Lösung:

$$B = 0,00169 \frac{\text{V}}{\text{m}^2}$$

$$I = 35,9 \text{ A}$$

Anwendungen: Lastmagnet, Bremsen, Relais, Kupplungen,

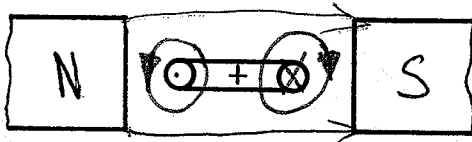
Stromdurchflossene Spule

Eine stromdurchflossene Spule kann sich in einem Polfeld drehen.
Die Drehrichtung hängt von der Stromrichtung in der Spule und
von der Pol-Richtung ab.

Bestimmung der Drehrichtung

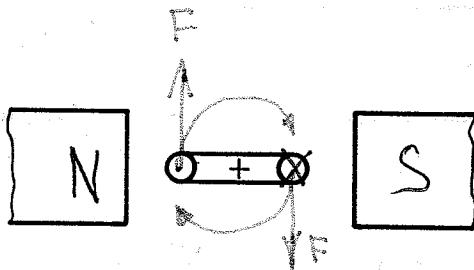
Verschwächung

Verstärkung



Verstärkung

Schwächung



stromdurchflossener
Leiter als drehbare
Spule ausgebildet

Erkenntnis: Die Spule dreht sich so weit, bis ihr Feld die gleiche Richtung wie das Polfeld hat.

- Eine dauernde Drehbewegung kann man erreichen, indem man der Spule ~~eine~~ den Strom über einen Stromwender zuführt.

Anwendungen: Drehspulenmesswerk

Gleichstrommotor

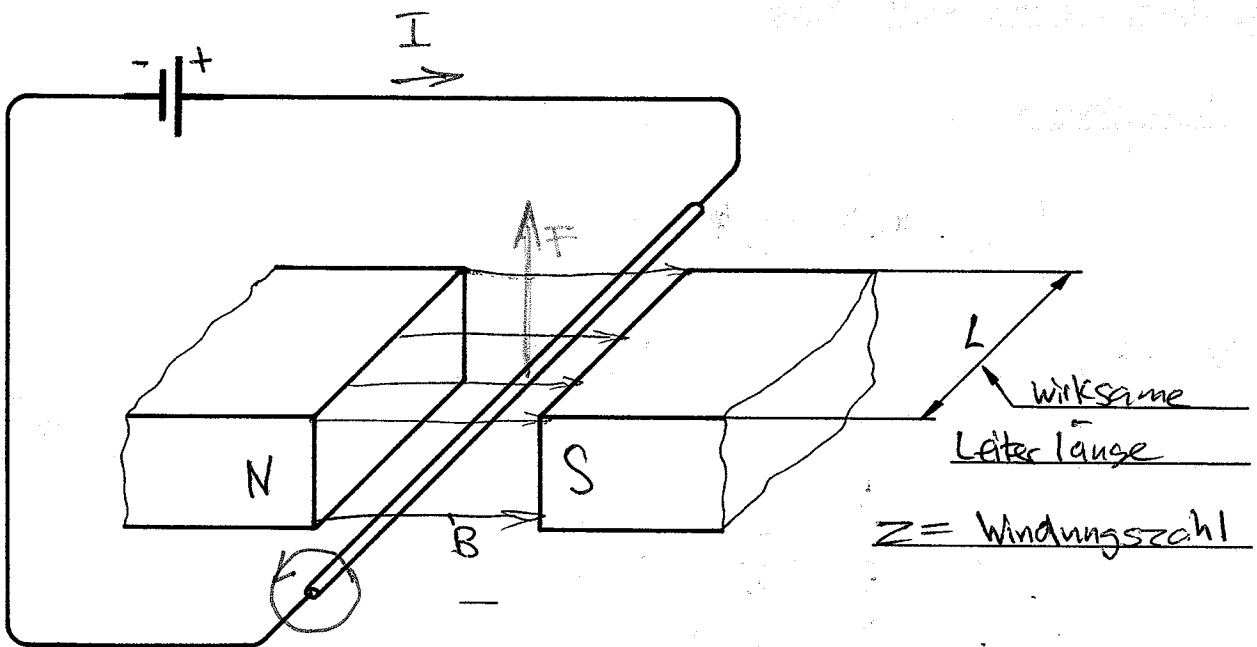
Strom im Magnetfeld

Stromdurchflossener Leiter

Motorprinzip

Ein stromdurchflossener Leiter wird in einem Polfeld abgelenkt

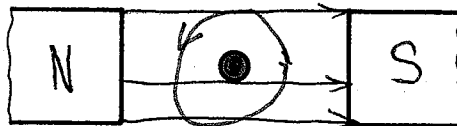
⇒ Kraftwirkung entsprechend den resultierenden Kräften des Leiter-
und Polfeldes



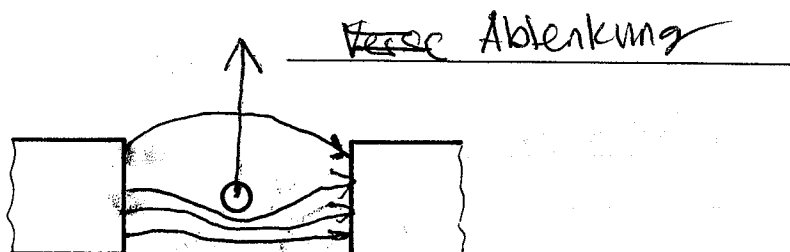
$$F = B \cdot L \cdot I \cdot Z (N)$$

$$\frac{Vs}{m^2} \cdot A : m = \frac{Ws}{m} = N$$

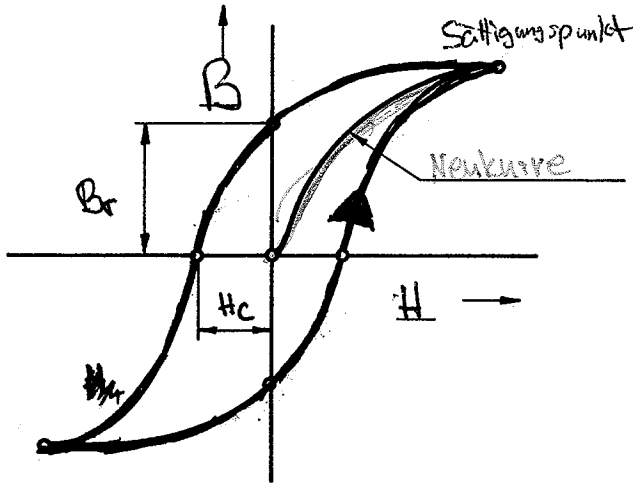
Bestimmung der Bewegungsrichtung



Verstärkung

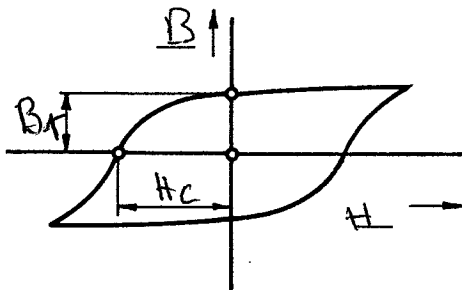


Hysteresekurven (Ummagnetisierungskurven)



B_r = Remanenzflussdichte (Restmagnetismus)
H_c = Koerzitivfeldstärke Feldstärke die notwendig ist, um Restmagnetismus zu beseitigen.

Hartmagnetische Stoffe



sollen nach einmaliger Magnetisierung ihre Remanenz behalten. Diese Remanenz darf durch den Einfluss von Fremdfeldern nicht verloren gehen. Deshalb muss H_c gross sein.

Beim Ummagnetisieren entstehen die Hystereseverluste P_H (\Rightarrow Erwärmung des Werkstoffes). Der Flächeninhalt der Hysteresekurve ist ein Mass für die Verlustarbeit W_H .

$$[W_H] = \frac{Vs}{m^2} \cdot \frac{A}{m} = \frac{W_B}{m^3} \quad [P_H] = [W_H] [f] = \frac{W_B}{m^3} \cdot \frac{1}{s} = \frac{W}{m^3}$$

Entmagnetisieren

Dies erreicht man z.B. dadurch, dass man das magnetische Werkstück langsam aus einer von Wechselstrom durchflossenen Spule herauszieht.

Magnetischer Kreis

Beispiel:

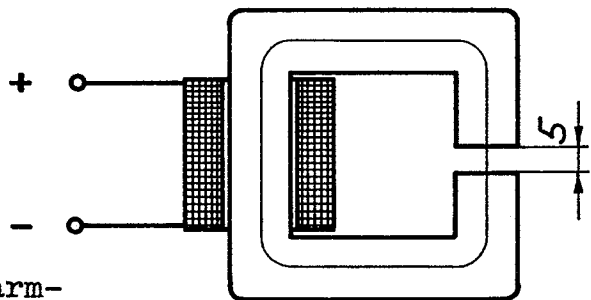
Gegeben: $\Phi = 1,1 \text{ mVs}$

$l_{\text{Luft}} = 5 \text{ mm}$

$l_{\text{Fe}} = 340 \text{ mm}$

$A_{\text{Fe}} = 8,7 \text{ cm}^2$

Fe: Elektroblech II (warmgewalzt)



- Gesucht: a) Gesamtdurchflutung !
b) Spulenstrom bei 5000 Windungen !

Lösung:

$$\textcircled{H} = \textcircled{H}_{\text{Fe}} + \textcircled{H}_{\text{L}} = 210\text{A} + 5000\text{A} = 5210\text{A}$$

a)

$$\textcircled{H}_{\text{Fe}} = \frac{\Phi}{A_{\text{Fe}}} \cdot l_{\text{Fe}} = 620\text{A} \cdot 0,34\text{m} = 210\text{A}$$

H_{Fe} aus Magnetisierungskurve, wenn B bekannt ist

$$B = \frac{\Phi}{A} = \frac{1,1 \cdot 10^{-3} \text{Vs}}{8,7 \cdot 10^{-4} \text{m}^2} = 1,264 \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2}$$

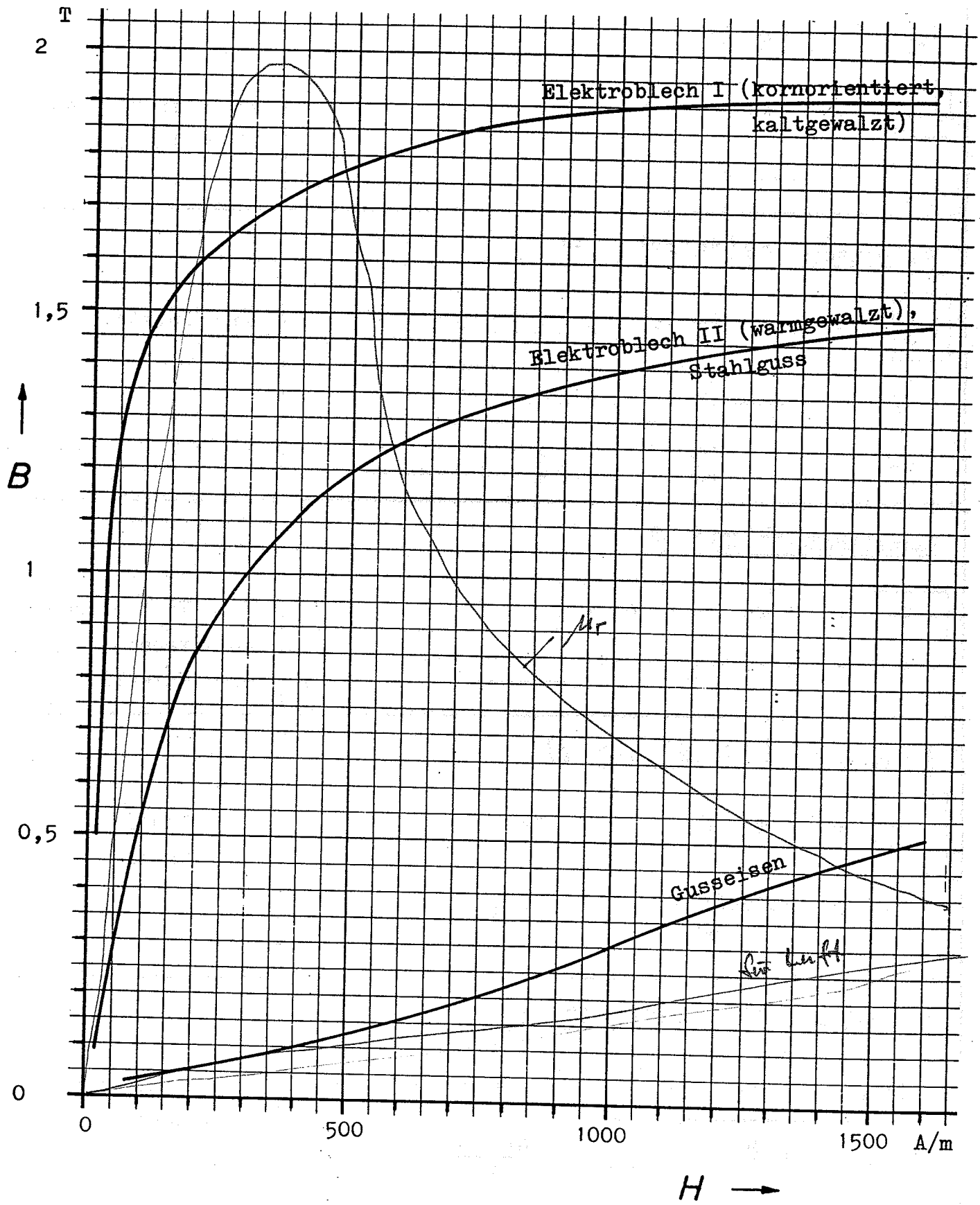
$$\Rightarrow H_{\text{Fe}} = 620\text{A}$$

$$\textcircled{H}_{\text{L}} = H_{\text{L}} \cdot l_{\text{L}} = 1000000 \frac{\text{A}}{\text{m}} \cdot 0,005\text{m} = 5000\text{A}$$

$$H_{\text{L}} = \frac{B}{\mu_0} = \frac{1,264 \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2}}{1,257 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}} = 1'000'000 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

$$b) I = \frac{\textcircled{H}}{N} = \frac{5210\text{A}}{5000} = 1,042\text{A}$$

Magnetisierungskurven (Neukurven)



Vergleich magnetischer Einheiten verschiedener Systeme

Durchflutung Θ

$$\boxed{1 \text{ A}} = 1 \text{ AW} \approx 1,257 \text{ Gb}$$

$$1 \text{ Gb} \approx \text{---} \text{ A}$$

AW = Amperewindung
Gb = Gilbert

Magnetische Feldstärke H

$$\boxed{1 \frac{\text{A}}{\text{m}}} = \text{---} \frac{\text{A}}{\text{cm}} \approx \text{---} \text{ Oe}$$

$$1 \frac{\text{A}}{\text{cm}} = \text{---} \frac{\text{A}}{\text{m}} \approx \text{---} \text{ Oe}$$

$$1 \text{ Oe} = 1 \frac{\text{Gb}}{\text{cm}} \approx \text{---} \frac{\text{A}}{\text{m}} = \text{---} \frac{\text{A}}{\text{cm}}$$

Oe = Oersted

Magnetischer Fluss Φ

$$\boxed{1 \text{ Vs}} = 1 \text{ Wb} = 10^8 \text{ Mx}$$

$$1 \text{ Mx} \hat{=} 1 \text{ Feldlinie} \hat{=} \text{---} \text{ Vs}$$

Vs = Voltsekunde
Wb = Weber
Mx = Maxwell

Magnetische Flussdichte B

$$\boxed{1 \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2}} = 1 \text{ T} = \text{---} \text{ Gs}$$

$$1 \text{ Gs} \hat{=} \frac{1 \text{ Feldlinie}}{\text{cm}^2} \hat{=} \text{---} \frac{\text{Mx}}{\text{cm}^2} = \text{---} \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2}$$

T = Tesla
Gs = Gauss

Magnetische Feldkonstante μ_0

$$\boxed{\mu_0 \approx 1,257 \cdot 10^{-6} \frac{\Omega \text{s}}{\text{m}}} \quad \text{bzw.} \quad \frac{\text{H}}{\text{m}}$$

$$\mu_0 = 1 \frac{\text{Gs}}{\text{Oe}} \approx \text{---} \frac{\text{Gs} \cdot \text{cm}}{\text{A}}$$

Ωs = Ohmsekunde
H = Henry

15. Gegeben sei eine Gleichstromspule mit $N = 260$ Windungen und einem Widerstand R von 4Ω . Berechnen Sie die Durchflutung, wenn die Spannung an den Klemmen 6 Volt betragen soll.

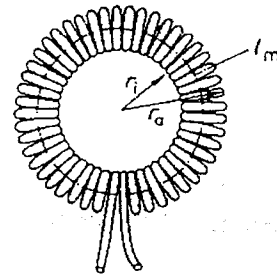
$\textcircled{H} = 390 \text{ [1A]} \checkmark$ $I = 1,5 \text{ A}$

16. In einem Luftspalt soll die magnetische Induktion $B = 0,54 \text{ Tesla}$ betragen. Berechnen Sie die zugehörige magnetische Feldstärke!

$H = \frac{B}{\mu}$ $\mu = 0,00001257 \cdot \text{Vs} = 1,257 \text{ m} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$

17. Die Gesamtpermeabilität eines Magneten beträgt $\mu = 10 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$. Berechnen Sie die Permeabilitätszahl μ_r des verwendeten magnetischen Werkstoffes $\mu_r = 795,5 \checkmark$

18. Eine Ringspule soll bei einer mittleren Feldlinienlänge $l_m = 300 \text{ mm}$ eine magnetische Feldstärke $H = 450 \text{ A/m}$ aufbauen.



Wie gross ist die zugehörige elektrische Durchflutung?

$\textcircled{H} = H \cdot l_m = 135 \text{ A} \checkmark$

Vorname und Name: Roger Britt Klasse: IN 976

Prüfung 6: Magnetismus

Bitte beantworten Sie die Fragen mit kurzen Sätzen – und/oder wo möglich, mit den entsprechenden Begriffen. Eine Formel alleine genügt nicht als Erklärung. Zeichnen Sie die geforderten Größen auf dem Aufgabenblatt ein. Die Aufgaben sind sauber und übersichtlich zu lösen. Lösungswege sind lückenlos anzugeben und müssen auf dem Lösungsblatt stehen – ungültiges ist zu streichen. Bei Resultaten ist immer die Einheit anzugeben.

Zugelassene Unterlagen: Offizielle/persönliche Formelsammlung und Rechner.

Bewertung: je Aufgabe/Fragestellung 2 Punkte

Bearbeitungszeit: 60 Minuten

27,5 Pkt / N: 4,56

- 1. a) Zeichnen Sie etwa 10 magnetische Feldlinien mit Richtung in den Magneten ein.
- b) Wie nennt man das Feld im Bereich 1 und im Bereich 2?

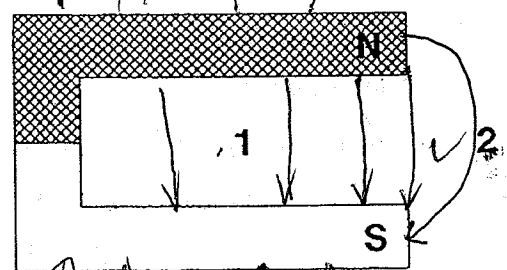
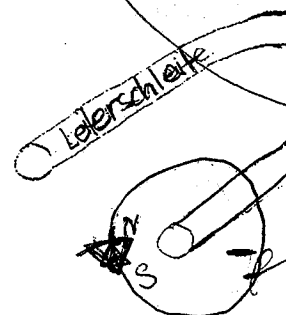
Bereich 1:

Homogenes Feld

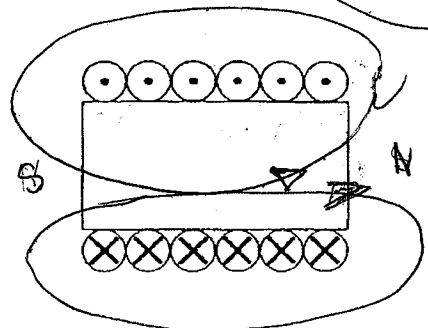
Bereich 2:

"Heterogenes" Feld

- 2. Bestimmen Sie die Position des Nord- bzw. des Südpols dieser Leiterschleife.



- 3. Skizzieren Sie die Feldlinien des vorgegebenen Spulenquerschnitts, geben Sie die Richtung der Feldlinien an, markieren Sie den Nord- bzw. Südpol. ?



Beispiele:

1. Spule ohne Eisen

$$B = \mu \cdot H = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$$

$$\mu_r = 1 \Rightarrow$$

$B = \mu_0 \cdot H$

Gegeben: $H = 1400 \text{ A/m}$

Gesucht: B

Lösung:

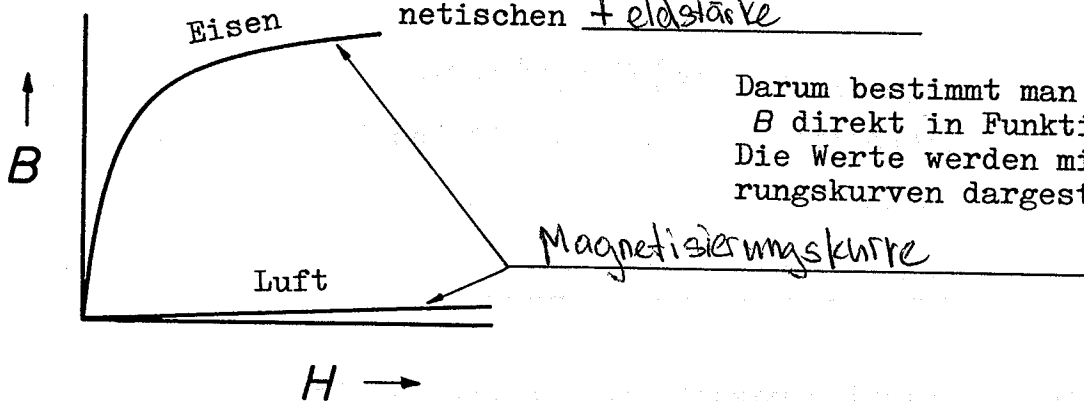
$B = 0,00176 \frac{\text{Vs}}{\text{m}}$
--

2. Spule mit Eisen

$$B = \mu \cdot H = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$$

$$\mu_0 = \text{konstant}$$

μ_r ändert je nach Material und Grösse der magnetischen Feldstärke



Gegeben: $H = 1400 \text{ A/m}$; Material: Elektroblech (kornorientiert, kaltgewalzt)

Lösung:

aus Magnetisierungskurve $B = 1,92$

--	--	--	--

Magnetische Flussdichte und Feldstärke

Bei vorhandenem magnetischem Feld kann die Feldliniendichte (z.B. im Innern einer stromdurchflossenen Spule) durch die Magnetische Leitfähigkeit des Materials (z.B. Luft, Eisen) beeinflusst werden.

Deshalb gilt folgende Beziehung:

$B = \mu \cdot H$

B = magnetische Flussdichte in $\frac{Vs}{m^2}$

H = magnetische Feldstärke in $\frac{A}{m}$

μ = magnetische Leitfähigkeit in $\Omega s/m$
(absolute Permeabilität)

$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$

μ_0 = magnetische Feldkonstante
(magnetische Leitfähigkeit des leeren Raumes)

$$\mu_0 \approx 1,257 \cdot 10^{-6} \Omega s/m$$

μ_r = relative magnetische Leitfähigkeit
Die Zahl gibt an, um wievielfach besser das ferromagnetische Material die Feldlinien leitet als Luft bzw. Vakuum.

$$\mu_r \text{ für Luft} = 1$$



Magnetischer Fluss Φ

(Induktionsfluss)

Die Summe aller Feldlinien eines Magneten (z.B. stromdurchflossene Spule) heisst

magnetischer Fluss Φ (Phi).

Einheiten: 1 Weber (Wb) = 1 Voltsekunde (Vs)

Die Einheit Vs wurde gewählt, weil der magnetische Fluss zur Spannungserzeugung (durch Induktion) gebraucht wird. Deshalb verwendet man für "magnetischer Fluss" auch die Bezeichnung Induktionsfluss

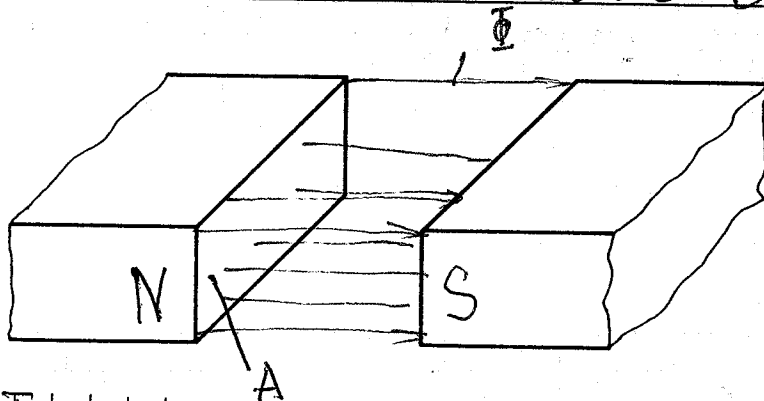
Für Rechnungszwecke soll die Einheit Vs verwendet werden !

Magnetische Flussdichte B

(magnetische Induktion)

Die Dichte der Feldlinien ist ein Mass für die Wirkung (z.B. Kraftwirkung) des magnetischen Feldes. Die Feldliniendichte bezeichnet man als

magnetische Flussdichte B



Φ in Vs

A in m²

$$B = \frac{\Phi}{A}$$

Einheiten: 1 $\frac{Vs}{m^2}$ = 1 Wb = 1 Tesla (T)

Für Rechnungszwecke soll die Einheit Vs verwendet werden !

Beispiele:

1. Spule ohne Eisen

Spule mit Eisen

$$N = 1200$$

$$I = 1,5 \text{ A}$$

Länge des magnetischen Kreises

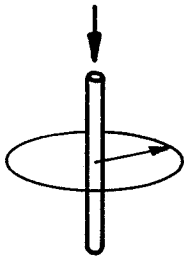
$$l \text{ geschätzt: } 300 \text{ mm} = \underline{0,3} \text{ m};$$

$$l \text{ gemessen: } 340 \text{ mm} = \underline{0,34} \text{ m}$$

$$H = \frac{I \cdot N}{l} = \underline{6000 \text{ A/m}} ;$$

$$H = \frac{I \cdot N}{l} = \underline{5300 \text{ A/m}}$$

Feldstärke in einem bestimmten Abstand eines gestreckten stromdurchflossenen Leiters:



$$L = 2\pi \cdot r$$
$$H = \frac{I}{2\pi \cdot r}$$

2. Gegeben: $I = 100\,000 \text{ A}$; $r = 1 \text{ m}$

Gesucht: H

Lösung:

$$H = \frac{I}{2\pi \cdot r} = \underline{15915 \text{ A/m}}$$

3. Gegeben: $I = 400 \text{ A}$; $H = 20 \text{ A/m}$

Gesucht: Abstand r

Lösung:

$$r = \frac{I}{H \cdot 2\pi} = \underline{\underline{3,18}}$$

Magnetische Feldstärke

Das Verhältnis von Durchflutung zur Länge des magnetischen Kreises (mittlere Feldlinienlänge) bezeichnet man als die magnetische Feldstärke

$$H = \frac{\textcircled{H}}{L} = \frac{I \cdot N}{l_m}$$

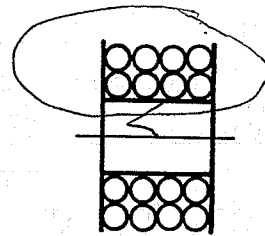
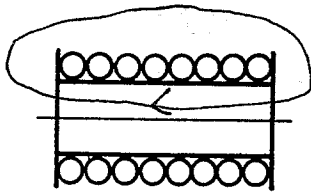
Einheit: $\frac{A}{m}$

(mittlere Feldlinien)

Spulen gleicher Durchflutung (gleicher Spulenstrom, gleiche Windungszahl)

lange Spule: lange Feldlinien

kurze Spule: kurze Feldlinien



Magnetfeld auf grossen Raum verteilt → schwaches Feld

Magnet auf kleinem Raum verteilt → starkes Feld:

Merke: Die Stärke des Magnetfeldes ist auch von der Spulenform (Länge der Feldlinien) abhängig

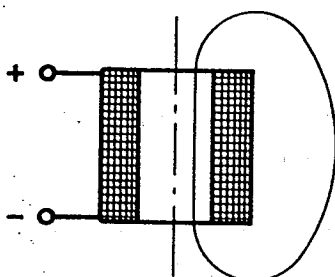
Spule ohne Eisen

Spule mit Eisen

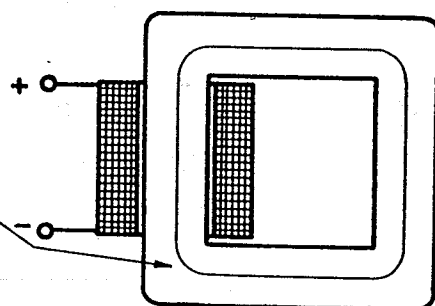
Die Länge des magnetischen Kreises ist

nicht genau bestimmbar

genau bestimmbar

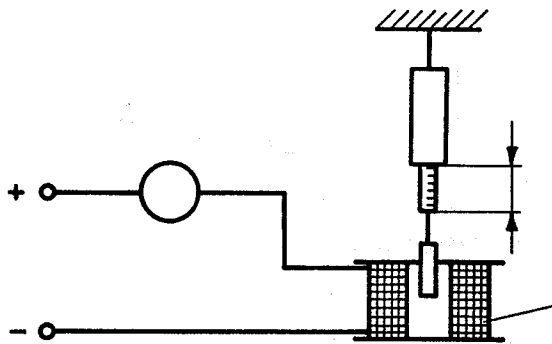


mittlerer Weg des magnetischen Kreises (mittlere Feldlinie)



Magnetische Grössen

Durchflutung Θ (Erregung, magnetische Spannung)



Kraft	F	<u>120</u>		
Strom	I	<u>4</u>	<u>2</u>	<u>1</u>
Windungszahl	N	<u>300</u>	<u>600</u>	<u>1200</u>
$I \cdot N$		<u>1200</u>	<u>1200</u>	<u>1200</u>

Das Produkt aus Strom und Windungszahl stellt die Gesamtheit des in der Spule magnetfelderzeugenden Stromes dar; man nennt es die Durchflutung Θ (Theta).

$$\Theta = I \cdot N$$

Einheit: 1 A

Da die Durchflutung die Ursache der magnetischen Wirkung ist, wird sie auch als _____ bezeichnet.

Beispiel: Spulen gleicher Durchflutung

Spannungsspule: $I = 16 \text{ mA}$, $N = 20\,000$ Windungen

$$\Theta = I \cdot N = 16 \cdot 10^{-3} \text{ A} \cdot 2 \cdot 10^4 \text{ N} = 320 \text{ A}$$

Stromspule: $I = 32 \text{ A}$, $N = 10$ Windungen

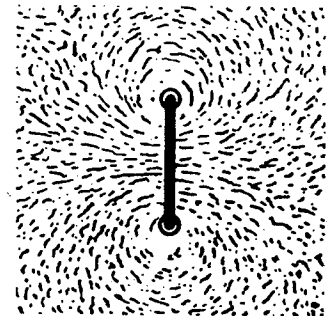
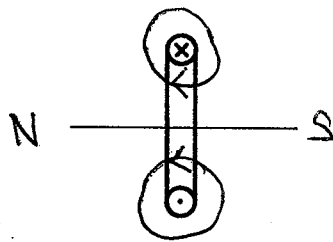
$$\Theta = I \cdot N = 32 \text{ A} \cdot 10 \text{ N} = 320 \text{ A}$$

Ergebnis:

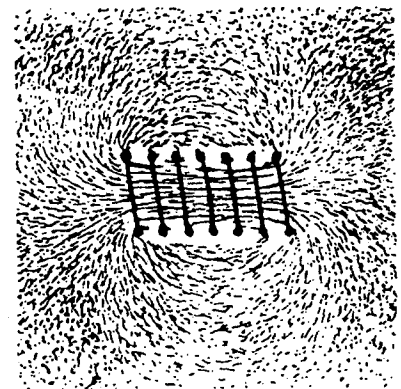
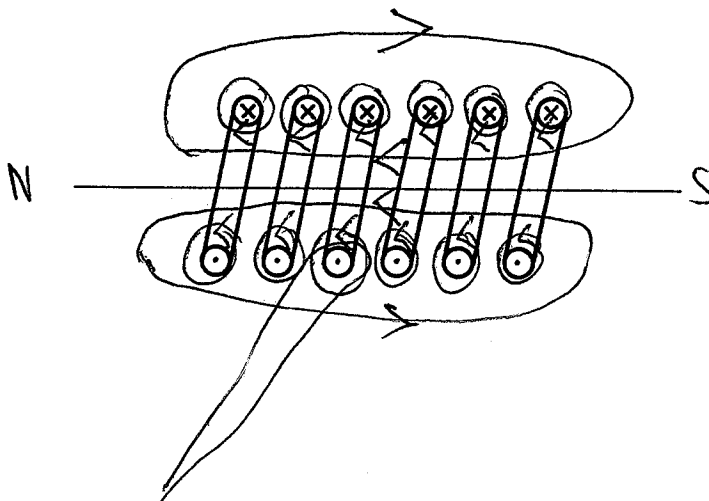
Bei ähnlichen abmessungen erzeugen beide Spulen ein magnetisch gleichwertiges Feld.

Magnetfeld einer stromdurchflossenen Spule

eine Windung



mehrere Windungen



Magnetfelder heben sich auf

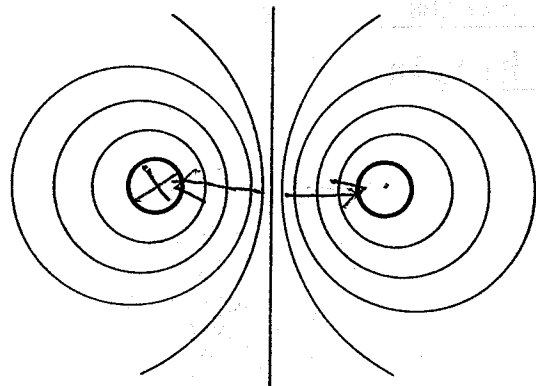
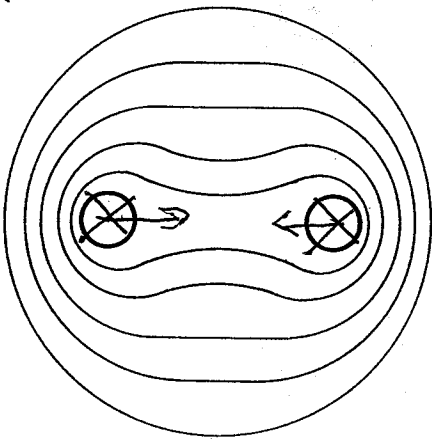
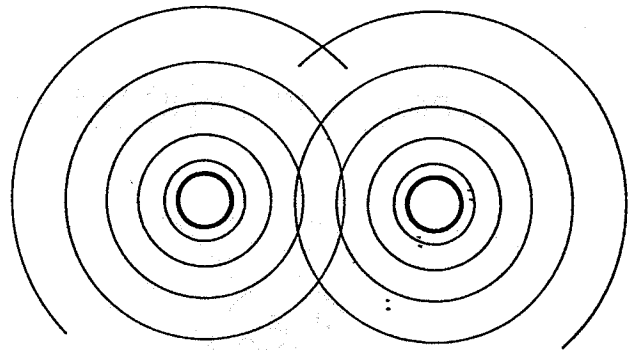
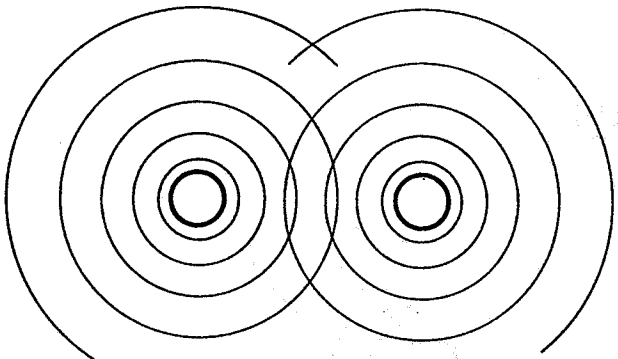
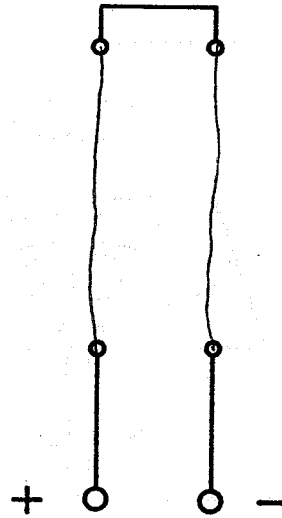
Die Schwachen Magnetfelder der einzelnen Windungen ergeben in Spulenordnung ein gemeinsames starkes Magnetfeld.

Die Feldlinien verlaufen im Innern der Spule parallel und in gleicher Dichte (homogenes Magnetfeld)

Die Richtung des Magnetfeldes ist von der Stromrichtung abhängig.



Strom und Magnetfeld in parallelen Leitern

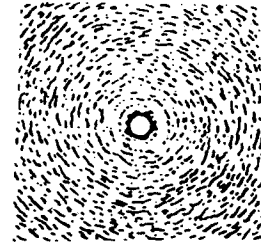
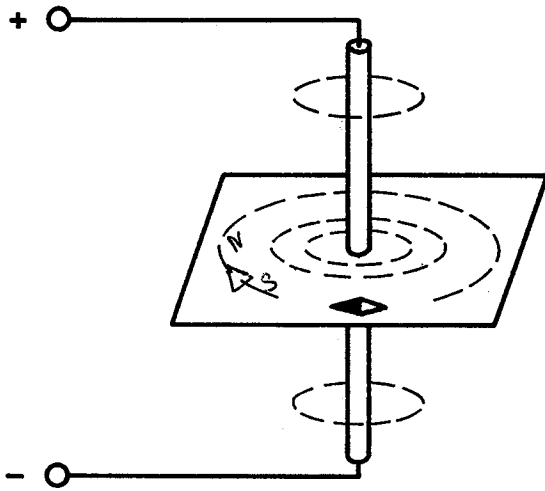


Gleiche Stromrichtung bewirkt gegenseitiges Anziehen

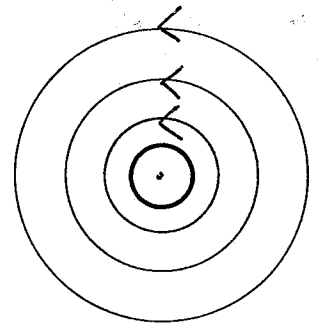
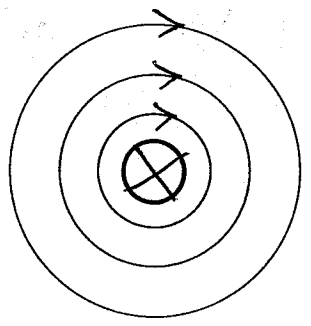
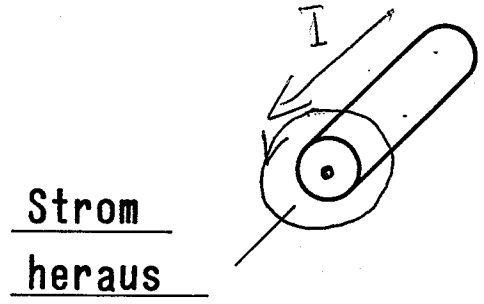
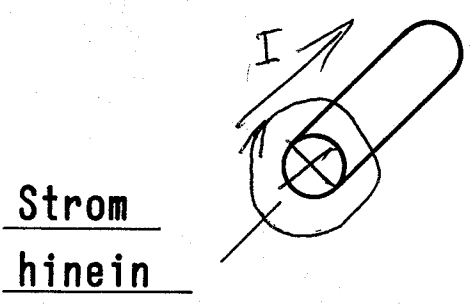
Entgegengesetzte Stromrichtung bewirkt gegenseitiges Abstößen

Elektromagnetismus

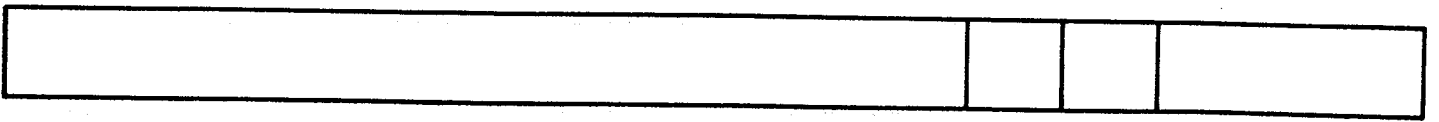
Magnetfeld um den stromdurchflossenen Leiter



Strom- und Feldlinienrichtung

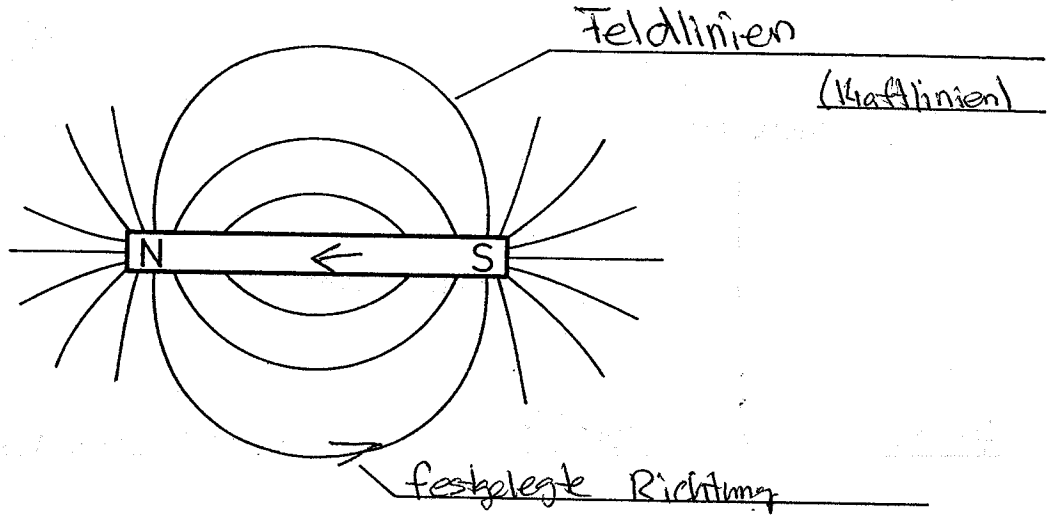


Regel: Blickt man in der Stromrichtung auf den Leiter, so
verlaufen die magn. Feldlinien im Uhrzeigersinn.



Magnetische Felder

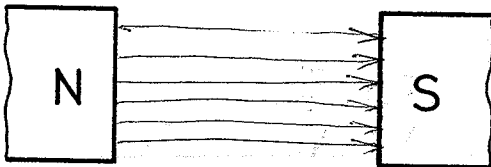
Stabmagnet



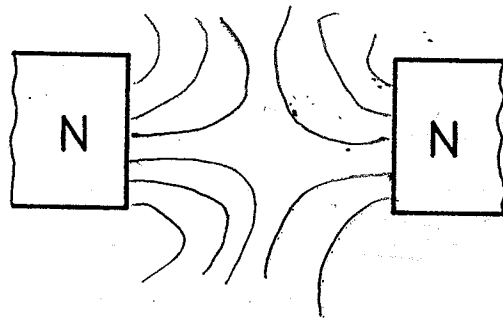
Festgelegte Richtung der Feldlinien:

Magnetische Feldlinien (Kraftlinien) treten am Nordpol aus und beim Südpol ein.

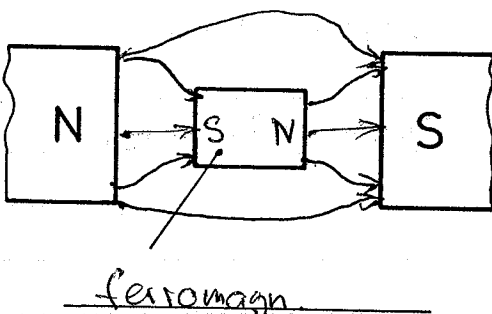
ungleiche Pole



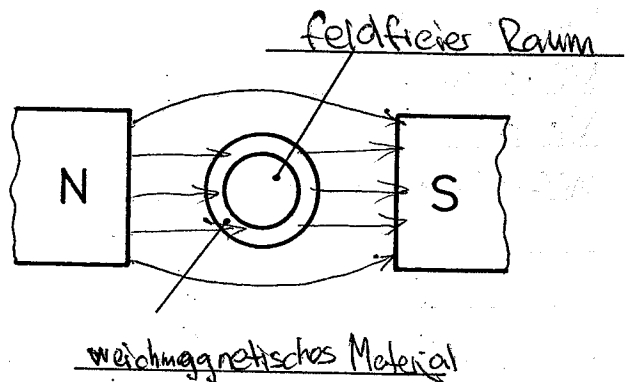
gleiche Pole



Eisen im Magnetfeld



Magnetische Abschirmung



--	--	--	--

Stoffe die magnetische Wirkungen

behalten

verlieren

nennt man:

Hartmagnetische Stoffe

Weichmagnetische Stoffe

Die zurückbleibende magnetische Wirkung wird als Remanenz bezeichnet.

Hartmagnetische Stoffe

(Dauermagnete)

Beispiele:

Al-Ni, Al-Ni-Co

Barium ferrite

Weichmagnetische Stoffe

Fe-Si

Fe-Ni

Ferrite

Anwendungen:

Lautsprecher

Mikrofon

Relais

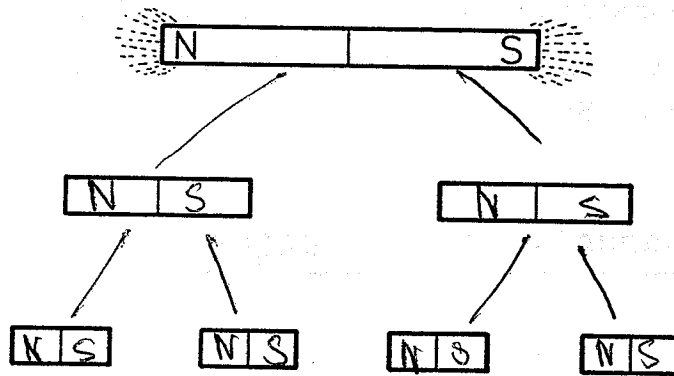
Messinstrumente

Elektromagnete

Transformatoren

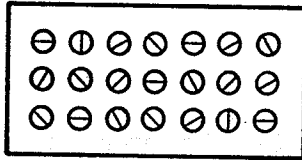
Motoren, Generatoren

Zerlegung eines Stabmagneten in Teilmagnete

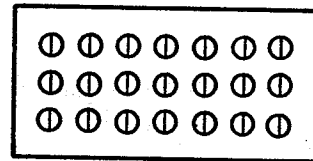


Molekularmagnete

Magnetische Stoffe sind aus Molekularmagneten aufgebaut.



unmagnetisiert
(ungerichtet)



magnetisiert
(gerichtet)

Sobald alle vorhandenen Molekularmagnete gerichtet sind, ist eine weitere Verstärkung der magnetischen Wirkung nicht mehr möglich. \Rightarrow Der Werkstoff ist magnetisch gesättigt

Magnetisieren möglich durch:

Beinflussung durch kräftige
Dauermagnet oder durch (Gleichstrom)
Elektromagnete

Entmagnetisieren möglich durch:

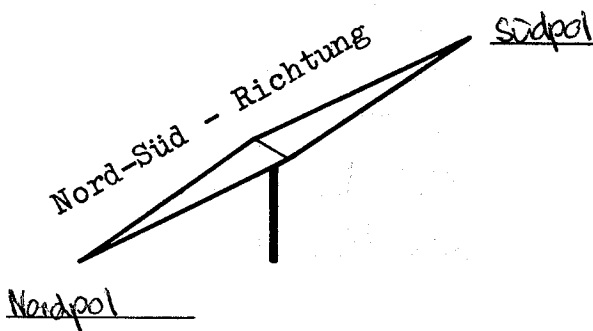
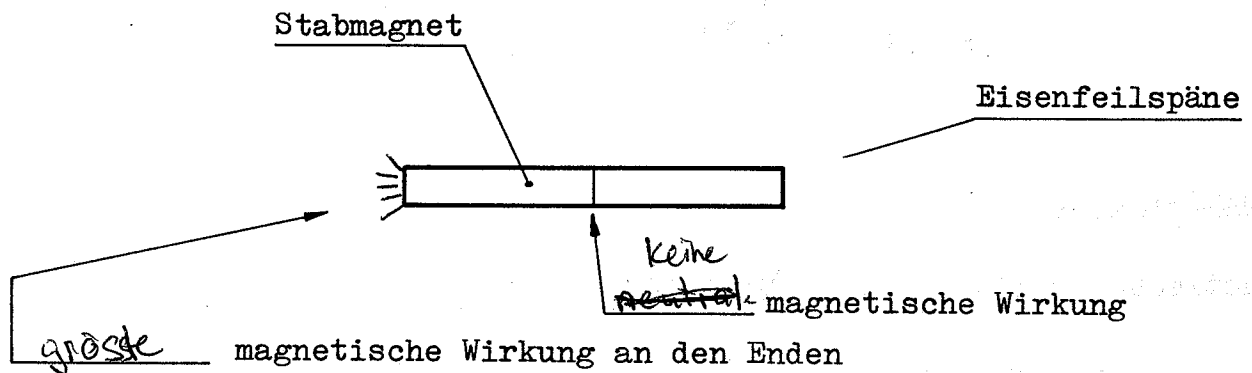
Wechselstrommagnet
Ausglänzen
Erschütterungen



Magnetismus

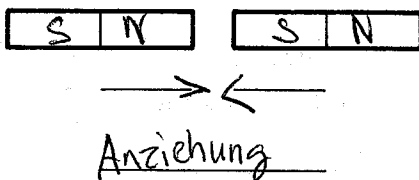
Eisen (Stahl, Gusseisen), Nickel und Kobalt werden von einem Magneten angezogen. Man bezeichnet sie als ferromagnetische (magnetisch wie Eisen) Stoffe.

Pole und magnetische Wirkungen

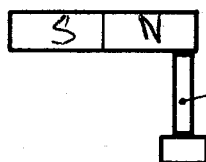
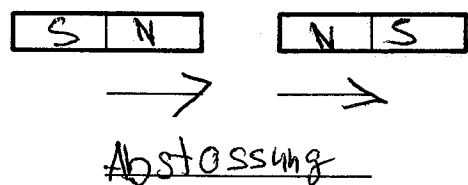


Das nach Norden (magnetischer Südpol) zeigende Ende wird als Nordpol N, das nach Süden (magnetischer Nordpol) zeigende Ende als Südpol S bezeichnet.

ungleiche Pole



gleiche Pole



Eisenstück wird selber ein Magnet

4.11 Kondensator

4.11.1 Elektrisches Feld

Um jede elektrische Ladung befindet sich ein elektrisches Feld. Zwischen ebenen Platten ist dieses fast homogen.

- E elektrische Feldstärke
- U Spannung zwischen den geladenen Körpern
- l Abstand der geladenen Körper voneinander

Bei homogenem Feld:

$$E = \frac{U}{l}$$

$$|E| = \frac{V}{m}$$

Beispiel: Zwischen zwei parallelen Metallplatten liegt eine Spannung von 800 V. Der Plattenabstand beträgt 2,5 mm. Wie groß ist die elektrische Feldstärke zwischen den Platten?

Lösung: $E = \frac{U}{l} = \frac{800 \text{ V}}{2,5 \text{ mm}} = 320 \text{ V/mm}$

Aufgaben zu 4.11.1

- Zwei parallele Metallplatten liegen an einer Spannung von 1,2 kV. Ihr Abstand beträgt 3,5 mm.
 - a) Wie groß ist die elektrische Feldstärke zwischen den Platten? b) Wie lautet die Computereingabe im BASIC-Direktmodus?
- Eine Glühlampe benötigt zum Zünden eine Spannung von 125 V. Der Abstand zwischen Anode und Katode beträgt 5 mm.
 - a) Wie groß ist beim Zünden die elektrische Feldstärke? b) Wie lautet die Computereingabe im BASIC-Direktmodus?
- In trockener Luft tritt bei einer elektrischen Feldstärke von 30 kV/cm ein Überschlag auf. Berechnen Sie die zu einem Überschlag führende Spannung bei 0,5 mm Abstand von zwei flachen Kontakten!
- An einem Dipol mit einer elektrisch wirksamen Länge von 80 cm beträgt die Empfangsfeldstärke 30 $\mu\text{V/cm}$. Wie groß ist die Spannung, die dieser Dipol aufnimmt?
- Überschreitet in einem Siliciumkristall die elektrische Feldstärke 200 kV/cm, so werden in der Sperrschicht Elektronen aus dem Gitterverband herausgerissen, d.h. der Zener-Effekt tritt auf. Wie dick muß bei einer Z-Diode die Sperrschicht sein, damit der Durchbruch bei 4,3 V eintritt?
- Das Dielektrikum eines Kondensators besteht aus Polystyrol mit einer zulässigen Feldstärke von 30 kV/mm. Wie dick muß die Polystyrolfolie sein, damit der Kondensator eine Spannungsfestigkeit von 500 V hat?

4.11.2 Ladung und Kapazität

Im Kondensator können elektrische Ladungen gespeichert werden. Die Spannung ist verhältnismäßig zur Ladung.

Q elektrische Ladung	$ Q = A \cdot s = C^*$	$Q = I \cdot t$
I Stromstärke		$Q = C \cdot U$
t Zeit		$\Delta U = I \cdot \frac{\Delta t}{C}$
C Kapazität	$ C = \frac{As}{V} = F^{**}$	
U Spannung		
ΔU Spannungänderung	$ \Delta U = \frac{A \cdot s}{F} = V$	
Δt Zeit, in der die Spannungsänderung erfolgt		

Beispiel: An einem Kondensator mit 47 nF steigt die Spannung innerhalb von 18 ms gleichmäßig um 34 V. Wie groß ist die Ladestromstärke?

Lösung: $\Delta U = \frac{I \cdot \Delta t}{C} \Rightarrow I = \frac{C \cdot \Delta U}{\Delta t} = \frac{47 \text{ nF} \cdot 34 \text{ V}}{18 \text{ ms}} = 88,78 \text{ } \mu\text{A}$

* C nach Coulomb, franz. Physik. 1786 bis 1806; ** F nach Faraday, engl. Physiker. 1791 bis 1807

Aufgaben zu 4.11.2

- Ein Kondensator mit 27 pF liegt an 70 V. Berechnen Sie die Ladung des Kondensators!
- In einem Sägezahn-generator mit einem Unijunction-Transistor (Bild 1) wird der Kondensator mit 100 nF auf die Höcherspannung $U_p = 6 \text{ V}$ aufgeladen und anschließend über den UJT auf die Talspannung $U_v = 1 \text{ V}$ entladen. Ermitteln Sie
 - a) Ladung, die erstmalig in den Kondensator fließt, b) Ladung, die wieder abfließt!
- Ein Kondensator nimmt an 15 V Gleichspannung eine Ladung von 4,05 nC auf.
 - a) Wie groß ist die Kapazität? b) Wie lautet in einem BASIC-Rechenprogramm die Zeile, mit der dem Computer der Rechenauftrag erteilt wird?
- Wenn man einen Kondensator an eine Spannung von 24 mV legt, so fließen 43,2 pAs in den Kondensator.
 - a) Wie groß ist die Kapazität? b) Wie lautet die Zeile in einem BASIC-Rechenprogramm, mit der die Bildschirmausgabe C = ... F erfolgt?
- Ein Kondensator mit 10 nF wird über einen Transistor geladen. Es fließt 2 ms lang ein Ladestrom von 4 mA. Auf welche Spannung wird der Kondensator geladen?

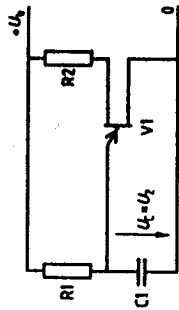


Bild 1

6. Von einem Kondensator mit 5 μF fließt 3,2 ms lang ein konstanter Entladestrom von 1,6 mA. Die Kondensatorspannung ist danach 0 V. Auf welche Spannung war der Kondensator geladen?
7. Wie groß ist die Spannungsabnahme an einem Kondensator mit 100 μF , wenn die Entladestromstärke während 3 s gleichmäßig 20 mA beträgt?
8. Wie groß muß an einem Kondensator mit 12 nF die Ladestromstärke sein, damit die Spannungsanstiegsgeschwindigkeit 5 V/ μs beträgt?

4.11.3 Kraftwirkung und Energie des elektrischen Feldes

Auf einen elektrisch geladenen Körper wird im elektrischen Feld eine Kraft ausgeübt.

F Kraft auf einen geladenen Körper	$ F = \frac{V}{m} \cdot C = \frac{Ws}{m}$	$F = E \cdot Q$
E elektrische Feldstärke		$W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$
Q elektrische Ladung des Körpers		
W elektrische Energie	$ W = F \cdot l^2 = Ws = J$	
C Kapazität		
U Spannung		

Beispiel: In einem elektrischen Feld wirkt auf einen Körper mit der Ladung $Q = 10 \text{ mC}$ eine Kraft von 2,6 N. Wie groß ist die elektrische Feldstärke?

Lösung: $F = E \cdot Q \Rightarrow E = \frac{F}{Q} = \frac{2,6 \text{ N}}{10 \text{ mC}} = 260 \text{ V/m}$

Aufgaben zu 4.11.3

1. a) Welche Kraft wirkt auf ein Elektron mit der Elementarladung $Q = 0,1602 \text{ aC}$ in einem elektrischen Feld mit der Feldstärke von 30 kV/mm?
 - b) Wie lautet die Zeile in einem BASIC-Rechenprogramm, mit der die Bildschirmausgabe KRAFT = ... N erfolgt?
2. In einem Oszilloskop liegt an den Ablenkplatten eine Spannung $U = 3,6 \text{ kV}$. Der Plattenabstand beträgt 8 mm.
 - a) Mit welcher Kraft wird ein Elektron mit der Elementarladung $Q = 0,1602 \text{ aC}$ abgelenkt? b) Wie lautet in einem BASIC-Rechenprogramm die Zeile, mit der dem Computer dieser Rechenauftrag erteilt wird?

- Welche elektrische Feldstärke wird benötigt, damit auf einen Körper mit der Ladung $Q = 6,4 \text{ mC}$ eine Kraft von 1 N ausgeübt wird?
- Welche Ladung muß ein Styroporkügelchen mit der Masse von 32 mg haben, damit es in einem elektrischen Feld mit der Feldstärke $E = 2 \text{ kV/mm}$ schwebt ($1 \text{ kg} \approx 10 \text{ N}$)?
- Zum Aufbau des elektrischen Feldes an einem Kondensator wird eine Ladung von $0,75 \text{ C}$ zuge-

4.11.4 Elektrische Flußdichte

Jeder elektrisch geladene Körper erzeugt einen elektrischen Fluß, welcher der Ladung des Körpers gleich ist. Die elektrische Flußdichte ist der elektrische Fluß je geladener Fläche.

$\varphi = Q$
 $[D] = \frac{As}{m^2} = \frac{C}{m^2}$
 $[D] = \frac{C}{Vm} \cdot \frac{V}{m} = \frac{C}{m^2}$
 $\epsilon_0 = 8,85 \text{ pC/(Vm)}$

Beispiel: In einem homogenen elektrischen Feld befindet sich auf einer Fläche von 120 cm^2 eine elektrische Ladung von 16 mC . Wie groß ist die elektrische Flußdichte?

Lösung: $D = \frac{Q}{A} = \frac{16 \text{ mC}}{120 \text{ cm}^2} = 1,33 \text{ C/m}^2$

Aufgaben zu 4.11.4

- Auf einer Fläche von 63 cm^2 befindet sich eine elektrische Ladung von $7 \mu\text{C}$. a) Wie groß ist die elektrische Flußdichte? b) Das bestehende Computerprogramm in BASIC rechnet mit SI-Einheiten ohne Vorsätze. Wie geben Sie den Zahlenwert der elektrischen Ladung Q ein?
- Die elektrische Flußdichte in einem homogenen elektrischen Feld beträgt 73 nC/m^2 . a) Wie groß sind elektrischer Fluß und elektrische Ladung, wenn die geladenen Flächen 17 cm^2 groß sind? b) Wie lautet die Computereingabe im BASIC-Direktmodus?
- Zwischen zwei geladenen Flächen mit der Fläche $A = 100 \text{ cm}^2$ beträgt die elektrische Feldstärke 18 kV/cm . Berechnen Sie a) elektrische Flußdichte im Vakuum, b) elektrische Flußdichte und elektrische Ladung, wenn als Dielektrikum Glimmer mit $\epsilon_r = 7$ verwendet wird!
- An einem Plattenkondensator mit $A = 2 \text{ cm}^2$ und $l = 5 \text{ mm}$ liegt eine Spannung $U = 1,2 \text{ kV}$. Berechnen Sie a) elektrische Feldstärke, b) elektrische Flußdichte, wenn das Dielektrikum $\epsilon_r = 12$ besitzt, c) elektrische Ladung!
- Bei einem Plattenkondensator verdreifacht sich die elektrische Flußdichte und beträgt dann $0,1 \text{ mC/m}^2$, wenn als Dielektrikum statt Luft Polystyrol verwendet wird. Ermitteln Sie a) Permittivitätszahl von Polystyrol, b) Permittivität, c) elektrische Feldstärke, d) elektrische Ladung, wenn $A = 7 \text{ cm}^2$ beträgt!
- Zwischen zwei geladenen Flächen mit der Fläche $A = 4,3 \text{ cm}^2$ beträgt die elektrische Flußdichte $45 \mu\text{C/m}^2$, wenn das Dielektrikum $\epsilon_r = 3$ hat. Berechnen Sie für ein Dielektrikum mit $\epsilon_r = 8$ a) Flußdichte, b) elektrischer Fluß, c) elektrische Feldstärke, d) Spannung zwischen den Flächen, wenn $l = 3,5 \text{ mm}$ beträgt!

* φ gesch. Großbuchstabe μJ ; ** ϵ griech. Kleinbuchstabe epsilon

4.11.5 Kapazität

Die Kapazität eines Kondensators hängt von seinem Aufbau ab.

$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{l}$
 $C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{l}$
 $\epsilon_0 = 8,85 \cdot \text{pC/(Vm)}$

Beispiel: Ein Plattenkondensator besteht aus zwei Platten mit je 80 cm^2 Fläche. Der Plattenabstand beträgt $0,5 \text{ mm}$. Wie groß ist die Kapazität, wenn das Dielektrikum aus Glimmer ($\epsilon_r = 8$) besteht?

Lösung: $C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{l} = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \text{ As} \cdot 8 \cdot 80 \text{ cm}^2}{0,5 \text{ mm}} = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \text{ As} \cdot 8 \cdot 80 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2}{0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}} = 1,13 \text{ nF}$

Aufgaben zu 4.11.5

- Ein Keramik-kondensator ($\epsilon_r = 45$) hat eine wirksame Oberfläche von $2,21 \text{ cm}^2$. Die Keramikschicht ist $0,4 \text{ mm}$ dick. a) Wie groß ist die Kapazität? b) Wie lautet die Computereingabe im BASIC-Direktmodus?
- Ein Keramikrohr ist $19,25 \text{ mm}$ lang, hat einen mittleren Durchmesser von $2,3 \text{ mm}$ und eine Wanddicke von $0,15 \text{ mm}$. Das Dielektrikum besteht aus Bariumtitanat ($\epsilon_r = 20000$). a) Berechnen Sie die Kapazität des Röhrenkondensators! b) Wie lautet die Computereingabe im BASIC-Direktmodus?
- Ein Wickelkondensator mit 150 nF hat eine wirksame Oberfläche von 3000 cm^2 . Zwischen den Metallfolien befindet sich eine zweilagige Papierschicht ($\epsilon_r = 4$). Wie dick ist diese zweilagige Papierschicht?
- Ein Tantalkondensator ($\epsilon_r = 26$) mit $6,8 \mu\text{F}$ hat eine wirksame Oberfläche von $800 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$. Wie dick ist die Tantalexoxidschicht?

4.11.6 Schaltungen von Kondensatoren

Kondensatoren können parallel (Bild 1, folgende Seite) oder in Reihe (Bild 2, folgende Seite) geschaltet werden. Bei einem Drehkondensator mit n Platten sind ($n - 1$) Teilkondensatoren parallelgeschaltet.

Bei Parallelschaltung:
 $C = C_1 + C_2 + \dots$
 $C = C_1 + C_2 + \dots$

Bei Reihenschaltung: $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots$

Bei nur zwei Kondensatoren in Reihe: $\frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$

Bei nur zwei Kondensatoren in Reihe: $\frac{C_1}{C_2} = \frac{U_2}{U_1}$

Beispiel: In einer Parallelschaltung von zwei Kondensatoren betragen $C_1 = 120 \text{ pF}$ und $C_2 = 2,2 \text{ nF}$. Wie groß ist die Ersatzkapazität?

Lösung: $C = C_1 + C_2 = 120 \text{ pF} + 2,2 \text{ nF} = 2,32 \text{ nF}$

Aufgaben zu 4.11.6

- Zwei Kondensatoren sind nach Bild 1 geschaltet. Wie groß ist die Ersatzkapazität?
- Ein Kondensator von 470 pF soll mit einem zweiten parallelgeschaltet werden, so daß die Ersatzkapazität $1,15 \text{ nF}$ beträgt. Wie groß muß die zweite Kapazität sein?
- Wie groß ist die Ersatzkapazität, wenn zwei Kondensatoren nach Bild 2 geschaltet sind?
- Drei Kondensatoren mit 150 pF , 820 pF und $1,2 \text{ nF}$ sind in Reihe geschaltet. Wie groß ist die Ersatzkapazität?
- Welche Kapazität muß einem Kondensator von 560 pF vorgeschaltet werden, damit die Ersatzkapazität 208 pF beträgt?
- Ein Drehkondensator ist auf 360 pF eingestellt. Welche Kapazität muß man in Reihe schalten, damit auf eine Ersatzkapazität von 158 pF „verkürzt“ wird?

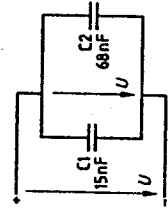


Bild 1: Parallelschaltung von Kondensatoren

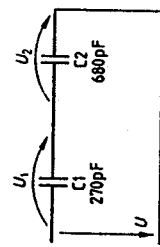


Bild 2: Reihenschaltung von Kondensatoren

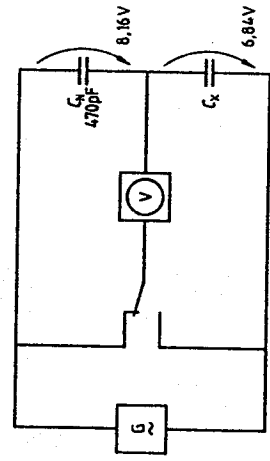


Bild 3

- Kapazitäten kann man dadurch messen, daß man einen Spannungsvergleich durchführt (Bild 3). Wie groß ist die unbekannt Kapazität C_x ?
- Welche Ersatzkapazitäten lassen sich mit den 400-V -Kondensatoren $C_1 = 1,5 \text{ nF}$, $C_2 = 3,9 \text{ nF}$ und $C_3 = 6,8 \text{ nF}$ an 700 V Gleichspannung verwirklichen?
- In einer Schaltung wird eine Kapazität mit 45 pF an 800 V benötigt. Vorhanden sind folgende Kondensatoren: C_1 mit 90 pF 400 V ; C_2 mit 70 pF 600 V ; C_3 mit 22 pF 500 V ; C_4 mit 23 pF 500 V ; C_5 mit 90 pF 300 V und C_6 mit 126 pF 300 V . Mit welcher Schaltung läßt sich das Problem lösen?

4.11.7 RC-Schaltung an Gleichspannung und Rechteckspannung

Das Produkt Widerstand mal Kapazität nennt man Zeitkonstante τ .

Zeitkonstante $\tau = R \cdot C$

Widerstand $R = \frac{\tau}{C}$

Kapazität $C = \frac{\tau}{R}$

Beim Laden und Entladen eines Kondensators an Gleichspannung verlaufen Strom und Spannung nach Exponentialfunktionen (Bild 1). Die Spannung ist dann nach 1τ beim Laden auf 63% der Endspannung gestiegen, beim Entladen auf 37% der Anfangsspannung gesunken. Der Strom sinkt beim Laden oder beim Entladen nach 1τ auf 37% seines Anfangswertes. Jeweils nach 5τ ist die Ladung oder die Entladung fast beendet.

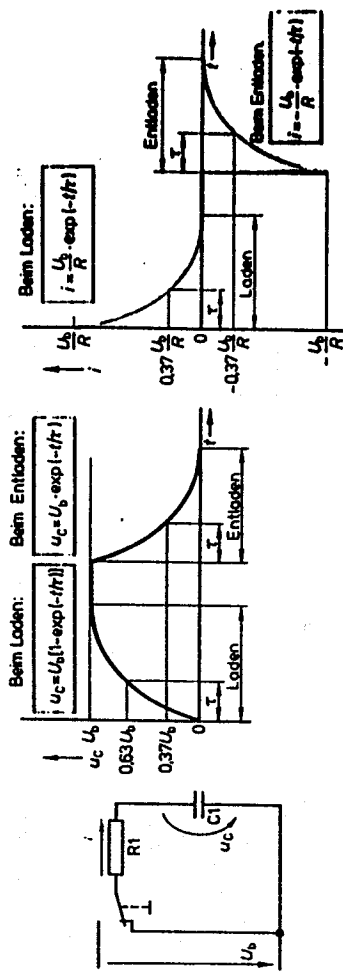


Bild 1: Laden und Entladen eines Kondensators an Gleichspannung über einen Widerstand

Beispiel: Die Zeitkonstante des RC-Glieds beträgt $0,2 \mu\text{s}$. Wie groß ist die Kapazität, wenn der Widerstand $2,2 \text{ k}\Omega$ hat?

Lösung: $\tau = R \cdot C \Rightarrow C = \frac{\tau}{R} = \frac{0,2 \mu\text{s}}{2,2 \text{ k}\Omega} = 90,91 \text{ pF}$

Aufgaben zu 4.11.7

- Berechnen Sie die Zeitkonstante eines RC-Gliedes mit $R = 560 \text{ k}\Omega$ und $C = 0,1 \mu\text{F}$
- Wie groß ist die Zeitkonstante bei $R = 18 \text{ k}\Omega$ und $C = 15 \text{ nF}$?
- Die Zeitkonstante des RC-Gliedes in der Emitter-schaltung eines Transistorverstärkers beträgt 360 ms . a) Wie groß ist der Widerstand, wenn die Kapazität $200 \mu\text{F}$ ist? b) Wie lautet die Rechenanweisung in BASIC?
- Die Zeitkonstante des RC-Gliedes am Verstärker-eingang beträgt 28 ms . a) Errechnen Sie den Ankopplkondensator, wenn der Widerstand $5,6 \text{ k}\Omega$ ist! b) Das Computerprogramm in BASIC rechnet mit SI-Einheiten ohne Vorsätze. Wie geben Sie die Zahlenwerte von R und τ ein?

* τ gleich Kleinbuchstabe tau

4.11.7 RC-Schaltung an Gleichspannung und Rechteckspannung

- Ein Kondensator mit 470 pF, der auf 30 V geladen ist, wird über einen Widerstand mit 27 kΩ entladen. Berechnen Sie Kondensatorspannung und Entladestrom nach einer Entladezeit von 12,68 μs!
- Ein Kondensator mit 2 μF liegt in Reihe mit einem Widerstand mit 27 kΩ an einer Gleichspannung von 24 V. Wie groß sind nach 54 ms Kondensatorspannung und Ladestrom?

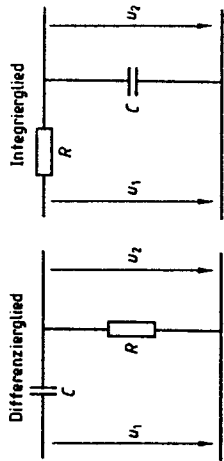


Bild 1

muß die Kapazität sein, damit der Abfall des Relais um 1,2 s verzögert wird? (Die Induktivität der Relaispule bleibt unberücksichtigt.)

- Mit einem Differenzglied (Bild 1) sollen aus einer Rechteckspannung mit $f = 5 \text{ kHz}$ und $g = 0,5$ Nadelimpulse erzeugt werden. Wie groß muß R sein, wenn $C = 15 \text{ nF}$ und die Zeitkonstante τ ein Fünftel der Impulsdauer t_i betragen soll?

- Mit einem Integrierglied (Bild 1) soll aus einer Rechteckmischspannung mit $f = 50 \text{ Hz}$ und $g = 0,5$ eine Gleichspannung erzeugt werden. Wie groß muß C sein, wenn $R = 100 \text{ k}\Omega$ und $\tau = 10 t_i$ betragen soll?

- Die mit einem Differenzglied erzeugten Nadelimpulse sollen die maximale Impulsbreite von $15 \mu\text{s}$ haben. a) Wie groß ist C , wenn $R = 18 \text{ k}\Omega$ beträgt? b) Wie groß muß die Frequenz der Rechteckspannung ($g = 0,5$) sein, damit das Verhältnis $t_i/\tau = 12$ erfüllt ist?

- An einem Differenzglied in der Impulstrennstufe eines Fernsehempfängers mit $C = 27 \text{ pF}$ und $R = 100 \text{ k}\Omega$ sollen aus den Zeilen-Synchronisierimpulsen mit $f = 15 \text{ 625 Hz}$ und $g = 0,1$ Nadelimpulse erzeugt werden. a) Welche maximale Impulsbreite haben die Nadelimpulse? b) Wie groß ist das Verhältnis t_i/τ ?

- Ein Integrierglied soll aus einer Rechteckmischspannung mit $f = 10 \text{ kHz}$ und $g = 0,5$ eine Gleichspannung erzeugen, deren noch überlagerte Wechselspannung einen Spitze-Tal-Wert von 2% des Gleichspannungswertes besitzt. Wie groß muß C sein, wenn $R = 12 \text{ k}\Omega$ beträgt?

- Ein Integrierglied mit $R = 220 \text{ k}\Omega$ und $C = 1,5 \mu\text{F}$ macht aus einer Rechteckmischspannung mit $f = 7,5 \text{ kHz}$ und $g = 0,5$ eine Gleichspannung. Wie groß ist bei der Rechteckwechselspannung am Widerstand R der Dachabfall in %?

4.11.8 Kapazitiver Blindwiderstand

- Der Kondensator eines Integrierglieds ist bereits auf 2 V geladen. Wie groß ist die Kondensatorspannung, wenn 1 ms lang an den Eingang des Integrierglieds eine Gleichspannung von 10 V angelegt wird? Die Zeitkonstante beträgt 4,6 ms.
- An den Eingang eines Integrierglieds wird die Spannung Bild 1 angelegt. Berechnen Sie die Ausgangsspannung nach 2 ms, 4 ms, 7 ms, 8 ms und 9 ms, wenn $\tau = 5 \text{ ms}$ beträgt und zur Zeit $t = 0$ der Kondensator völlig ungeladen war!

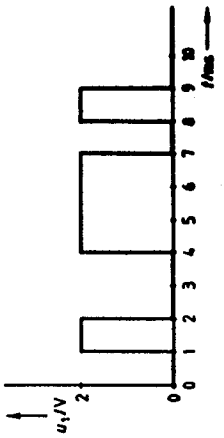


Bild 1

4.11.8 Kapazitiver Blindwiderstand

Der Kondensator wirkt im Wechselstromkreis als Blindwiderstand.

$X_C = 1 / (\omega \cdot C)$
 $\omega = 2\pi \cdot f$
 $C = \frac{1}{\omega \cdot X_C}$

Den Kehrwert des kapazitiven Blindwiderstandes nennt man kapazitiven Blindleitwert B_C .

Beispiel: Bei welcher Frequenz hat ein Kondensator mit $C = 2,2 \text{ nF}$ den kapazitiven Blindwiderstand von 3,62 kΩ?

Lösung: $X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} = f = \frac{1}{2\pi \cdot C \cdot X_C} = \frac{1}{2\pi \cdot 2,2 \text{ nF} \cdot 3,62 \text{ k}\Omega} = 20 \text{ kHz}$

Aufgaben zu 4.11.8

- Wie groß ist bei 50 Hz der kapazitive Blindwiderstand eines Kondensators mit 1 μF?
- Berechnen Sie für $f = 800 \text{ kHz}$ und $C = 18 \text{ nF}$ a) Blindwiderstand, b) Blindleitwert!
- Ein Kondensator mit 680 pF liegt an 1,6 MHz 12 V. Wie groß ist der Strom?
- Wie groß ist der Spannungsabfall, wenn in einen Kondensator von 47 nF ein Strom von 5 mA 460 kHz fließt?

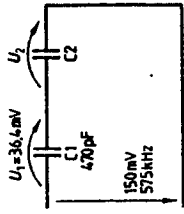


Bild 2

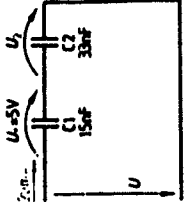


Bild 3

- In einen Kondensator, der an einer Wechselspannung von 120 kHz 6 V liegt, fließt ein Strom von 1,22 mA. a) Wie groß ist die Kapazität? b) Wie lautet zur Berechnung von C die Computereingabe im BASIC-Direktmodus?
- Ein Emitterkondensator soll bei 30 Hz einen Widerstand von 56 Ω haben. a) Wie groß ist die Kapazität? b) Wie lautet zur Berechnung von C die Computereingabe im BASIC-Direktmodus?
- Bei welcher Frequenz hat ein Kondensator von 680 pF einen Blindleitwert von 1 mS?

- Ein Kondensator mit 50 nF liegt an einer Wechselspannung von 120 mV. Der Strom beträgt 3 mA. Welche Frequenz hat die Spannung?
- Berechnen Sie aus Schaltung Bild 2 a) Blindwiderstand, b) Spannung an C2, c) Kapazität von C2!
- Berechnen Sie aus Schaltung Bild 3 a) Blindwiderstand von C1, b) Frequenz der angelegten Spannung, c) Blindwiderstand von C2, d) Spannung an C2, e) Gesamtspannung!