




# Physik für Infotronik (19)

**Gerald Kupris**

**16.12.2015**

## Vorlesungen Physik WS2015/16

25.11.2015	Vorlesung 13	Das elektrische Feld
25.11.2015	Vorlesung 14	Ladungsverteilung und elektrisches Potenzial
02.12.2015	Vorlesung 15	Die Kapazität
02.12.2015	Vorlesung 16	Das Magnetfeld
09.12.2015	Vorlesung 17	Quellen des Magnetfelds
09.12.2015	Vorlesung 18	Die magnetische Induktion
 16.12.2015	Vorlesung 19	Magnetische Induktion und Transformatoren
16.12.2015	Vorlesung 20	Elektromagnetische Wellen
<b>23.12.2015</b>	<b>vorlesungsfrei</b>	
13.01.2016	Vorlesung 21	Aufbau von Festkörpern
13.01.2016	Vorlesung 22	Leiter und Halbleiter
20.01.2016	Vorlesung 23	Wiederholung und Prüfungsvorbereitung
20.01.2016	Vorlesung 24	Wiederholung und Prüfungsvorbereitung

## Wiederholung: der magnetische Fluss

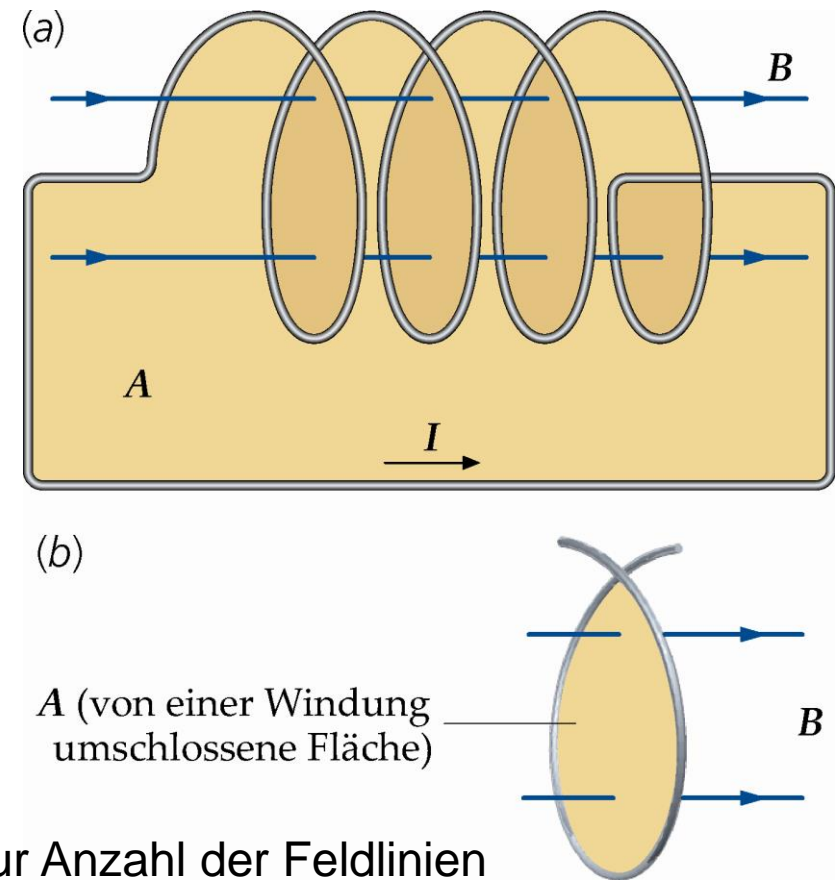
Den Fluss eines Vektorfeldes durch eine Fläche können wir analog zum elektrischen Fluss berechnen. Der magnetische Fluss durch A ist:

$$\Phi_{mag} = \int_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = \int_A B_n \cdot dA$$

Die Einheit des Magnetischen Flusses ist Weber:

$$1\text{Wb} = 1\text{T} \cdot \text{m}^2$$

Die Stärke des Magnetfeldes  $B$  ist proportional zur Anzahl der Feldlinien pro Flächeneinheit, daher ist der magnetische Fluss durch ein Flächenelement proportional zur Anzahl der Feldlinien, die dieses durchsetzen.



## Wiederholung: der magnetische Fluss

Handelt es sich um eine ebene Fläche mit dem Flächeninhalt  $A$  und ist das Magnetfeld  $B$  über die gesamte Fläche homogen (sind Betrag und Richtung konstant), so ist der magnetische Fluss durch die Fläche gleich:

$$\Phi_{mag} = B \cdot A = |B| \cdot |A| \cdot \cos \Theta = B_n \cdot A$$

Dabei ist der Winkel  $\Theta$  zwischen der Richtung von  $B$  und der Richtung des Flächenvektors.

Häufig betrachten wir den magnetischen Fluss durch eine Fläche, die von einer Spule mit  $n$  Windungen umschlossen ist:

$$\Phi_{mag} = n \cdot |B| \cdot |A| \cdot \cos \Theta$$

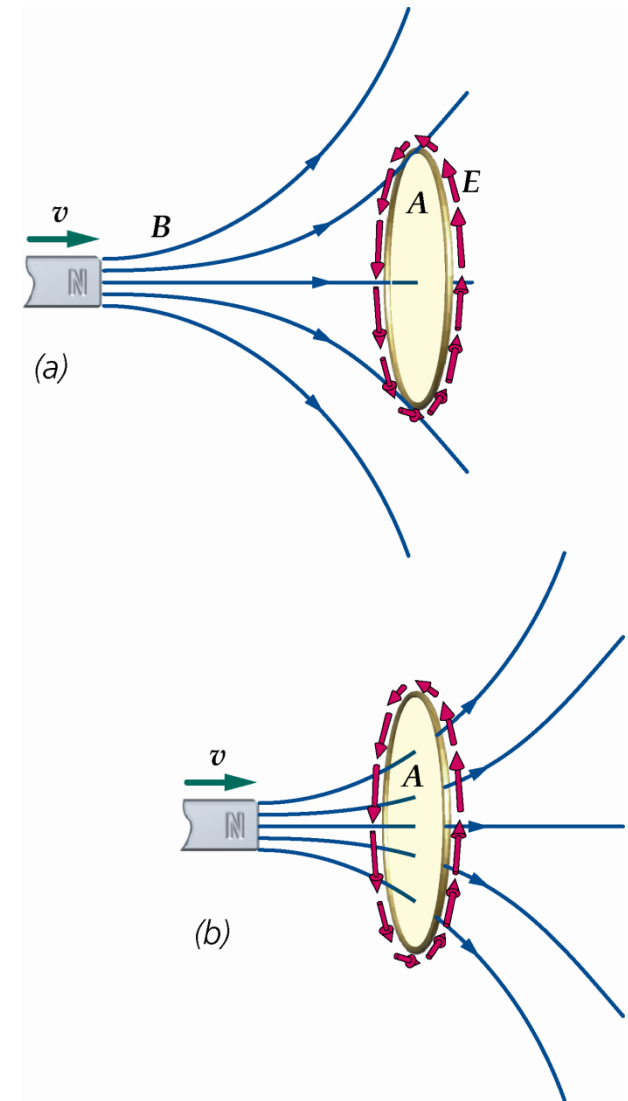
## Wiederholung: Induktionsspannung

Experimente von Faraday, Henry und anderen zeigten, dass jede Änderung des magnetischen Flusses durch die von einem elektrischen Leiter (einem Draht) umschlossene Fläche eine Spannung in dem Leiter induziert, deren Stärke proportional zur Änderungsrate des Flusses ist.

$$U_{ind} = - \frac{d\Phi_{mag}}{dt}$$

$$U_{ind} = - \frac{d}{dt} \cdot \int_S B \cdot dA$$

Diese Beziehung heißt **Faradaysches Gesetz**.

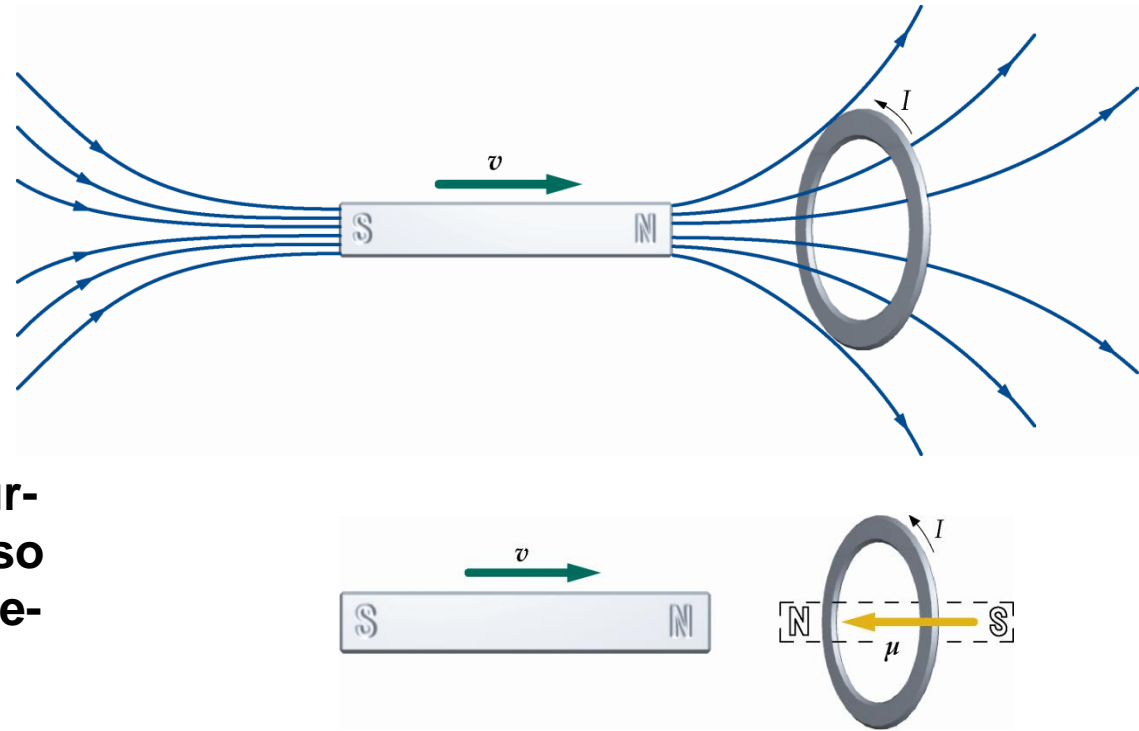


## Wiederholung: die Lenzsche Regel

Das negative Vorzeichen im Faraday'schen Gesetz ergibt sich aus der Richtung der Induktionsspannung. Diese folgt aus einem allgemeinen physikalischen Prinzip, der Lenzschen Regel:

**Die von einer Zustandsänderung verursachte Induktionsspannung ist stets so gerichtet, dass sie ihrer Ursache entgegenzuwirken sucht.**

Bewegt sich ein Stabmagnet nach rechts auf den leitenden Ring zu, so wird im Ring eine Spannung induziert und in der angegebenen Richtung fließt ein Strom. Dieser Strom erzeugt seinerseits ein Magnetfeld, das auf den Stabmagneten eine Kraft ausübt, die der Annäherung entgegenwirkt.



## Wiederholung: Wechselstromgenerator

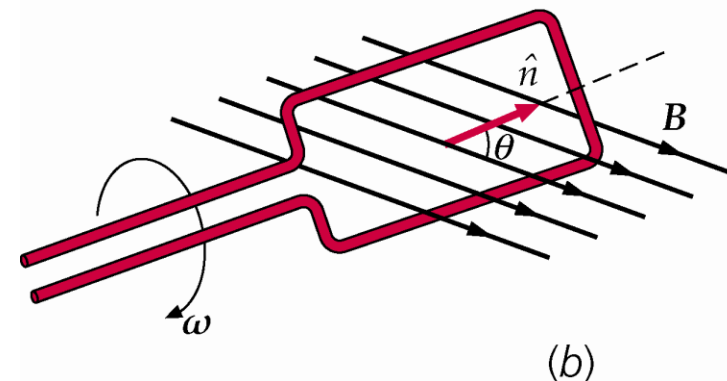
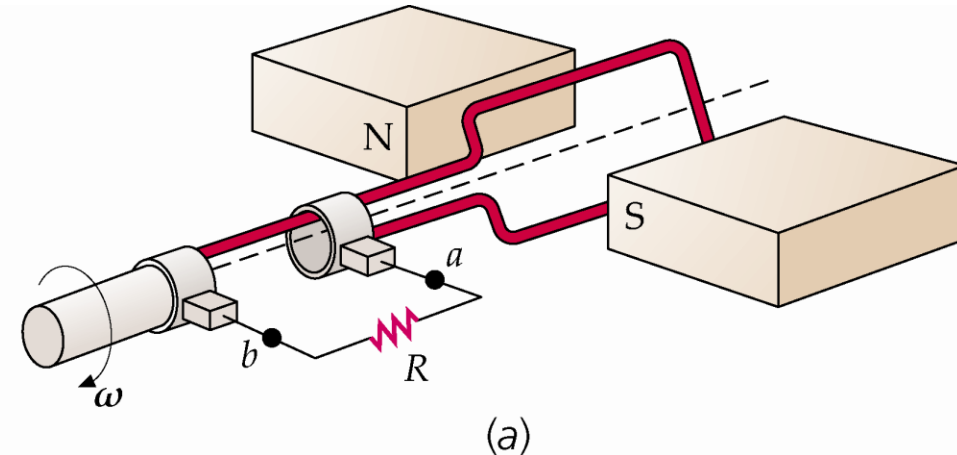
Rotiert die Spule mit konstanter Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  in einem statischen äußeren Magnetfeld  $B$ , so wird eine sinusförmige Spannung induziert.

Zum Antrieb der Spule wird mechanische Energie (z.B. von einem Wasserfall oder einer Dampfturbine) geliefert, der Generator wandelt sie in elektrische Energie um.

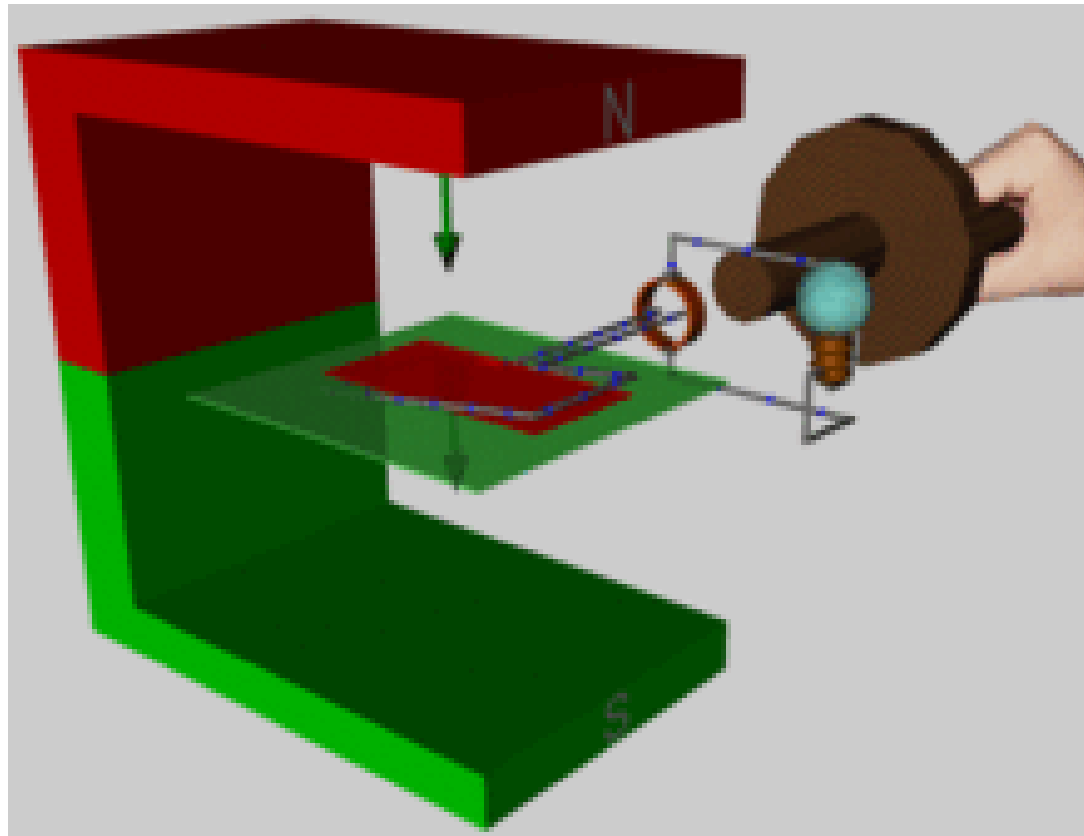
Über Schleifringe wird die Energie an Bürsten und damit an einen äußeren Stromkreis abgegeben.

Die Normale der Spulenfläche bildet mit der Richtung des Magnetfelds einen Winkel  $\theta$ , der magnetische Fluss durch die von einer Windung umschlossene Fläche ist dann gleich  $|\mathbf{B}| \cdot |\mathbf{A}| \cdot \cos\theta$ .

Die maximale induzierte Spannung beträgt:  $U_{ind,max} = n \cdot B \cdot A \cdot \omega$



# Drehgenerator



Siehe auch Applet: Generator

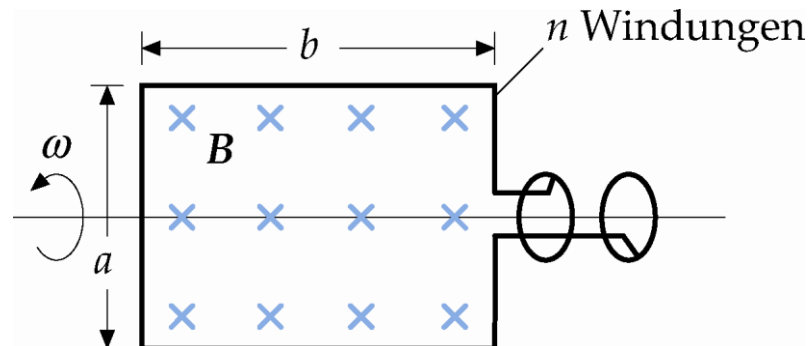


## Aufgaben

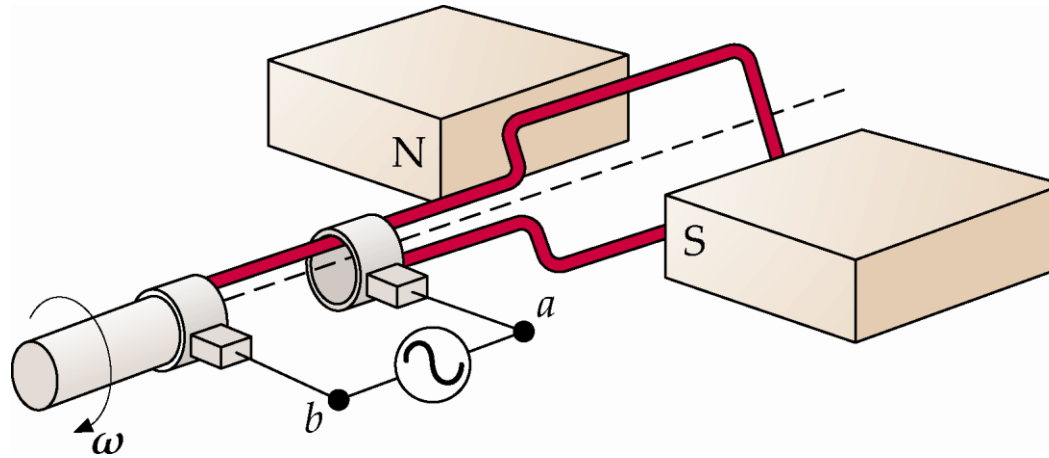
1. Eine Spule mit rechteckigem Querschnitt (Seitenlängen: 2,00 cm und 1,50 cm) und 300 Windungen rotiert in einem Magnetfeld von 0,4 Tesla.
  - a) Geben Sie den Maximalwert der induzierten Spannung an, wenn sich die Spule mit einer Frequenz von 60 Hz dreht.
  - b) Wie groß muss die Rotationsfrequenz sein, damit eine Spannung von 110 V (Maximalwert) induziert wird?
  
2. Gegeben ist eine Spule mit 100 Windungen, einem Radius von 4,00 cm und einem Widerstand von 25,0  $\Omega$ .
  - a) Die Spule befindet sich in einem homogenen Magnetfeld, dessen Richtung senkrecht auf der Spulenebene steht. Mit welcher Rate muss sich die Feldstärke ändern, damit in der Spule ein Strom von 4,0 A induziert wird.
  - b) Wie lautet die Antwort auf Frage a, wenn die Feldrichtung einen Winkel von 20° mit der Normalen der Spulenebene einschließt?

## Aufgaben

3. In der Abbildung sehen Sie einen Wechselstromgenerator, bestehend aus einer rechteckigen, mit Schleifringen verbundenen Leiterschleife mit den Seitenlängen  $a$  und  $b$  sowie  $n$  Windungen. Die Schleife dreht sich, von außen angetrieben, mit der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  in einem homogenen Magnetfeld  $B$ .
- a) Zeigen Sie, dass die Potenzialdifferenz zwischen den Schleifringen gegeben ist durch  **$U = n \cdot B \cdot a \cdot b \cdot \omega \cdot \sin(\omega t)$**
- b) Es sei  $a = 2,0 \text{ cm}$ ,  $b = 4,0 \text{ cm}$ ,  $n = 250$  und  $B = 0,2 \text{ T}$ . Mit welcher Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  muss die Schleife rotieren, damit eine Spannung mit einem Maximalwert von  $100 \text{ V}$  induziert wird?



## Wechselstrommotor

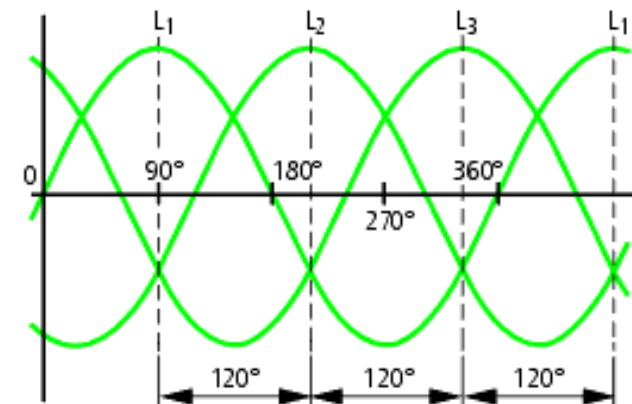
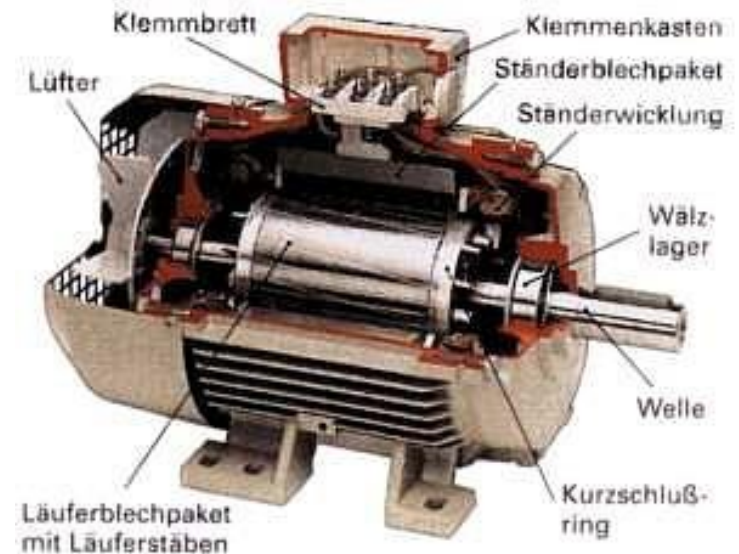


Wird der Spule eine Wechselspannung zugeführt, so arbeitet sie als Motor. Durch die Drehung der Spule wird eine Spannung induziert, die dem Strom entgegen wirkt.

## Drehstrom-Asynchronmotor (1)

Der Asynchronmotor ist heute der am meisten verwendete Elektromotor. Drehstrom-Asynchronmaschinen werden mit Leistungen bis zu mehreren Megawatt hergestellt. Der einzigartige Vorteil gegenüber anderen Elektromotoren ist das Fehlen von Kommutator und Bürsten. Bürsten verschleissen und erzeugen Funken, wodurch das Leitungsnetz mit hochfrequenten Schwingungen gestört wird.

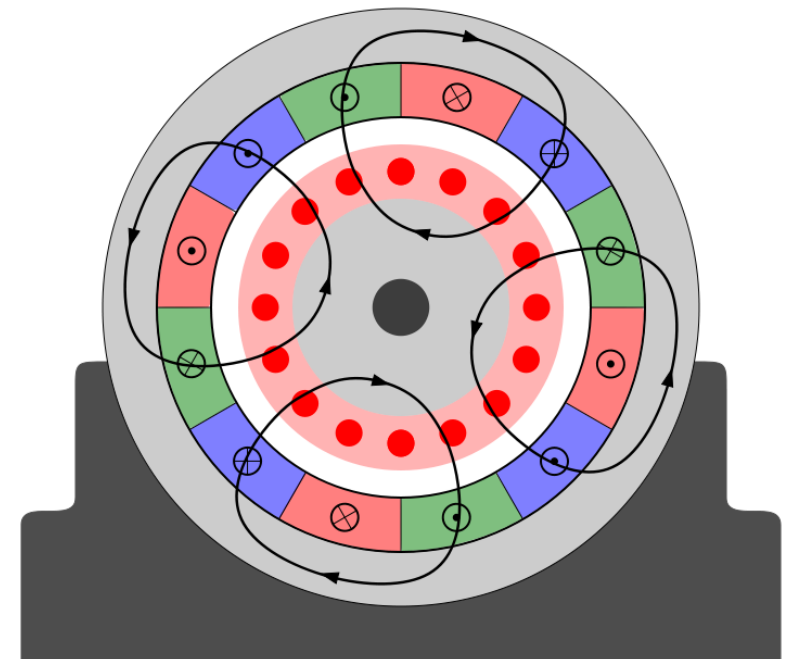
Beim Drehstrommotor-Asynchronmotor sind drei Wicklungsstränge, um je  $120^\circ/p$  ( $p$  = Polpaarzahl) gegeneinander versetzt, angeordnet. Durch Aufschalten einer drei-phasigen, um je  $120^\circ$  zeitlich verschobenen, Wechselspannung wird im Motor ein Drehfeld erzeugt.



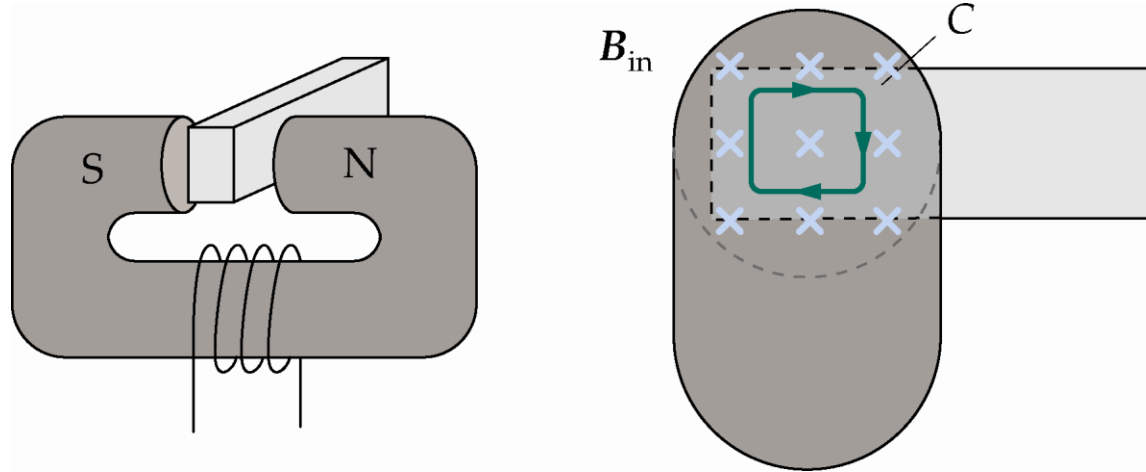
## Drehstrom-Asynchronmotor (2)

Durch Induktionswirkung werden in der Läuferwicklung Drehfeld und Drehmoment erzeugt. Die Drehzahl des Motors ist dabei abhängig von der Polpaarzahl und der Frequenz der speisenden Spannung. Die Drehrichtung kann durch den Wechsel zweier Anschlussphasen umgekehrt werden.

Ein Kurzschlussläufer hat eine Wicklung aus massiven, gut leitfähigen Leiterstäben (Käfigläufer), die immer kurzgeschlossen sind. Im Betrieb fließen durch die Leiterstäbe vergleichsweise hohe Ströme und erzeugen so zusammen mit den Eisenblechen starke Magnetfelder.



## Wirbelstrombremse



Ändert sich das Magnetfeld, in dem sich ein Metallstab befindet, so wird entlang jedes geschlossenen Wegs innerhalb des Stabs (Beispielsweise C) eine Spannung induziert und es fließen die so genannten Wirbelströme.

In der Regel sind Wirbelströme unerwünscht. Sie führen zu Leistungsverlusten in Form von Wärme, die an die Umgebung abgeführt werden muss.

In manchen Fällen macht man sich Wirbelströme jedoch auch zunutze, beispielsweise zur Dämpfung nicht erwünschter Oszillationen oder zum Bremsen.

## Wiederholung: Induktiv gekoppelte Stromkreise

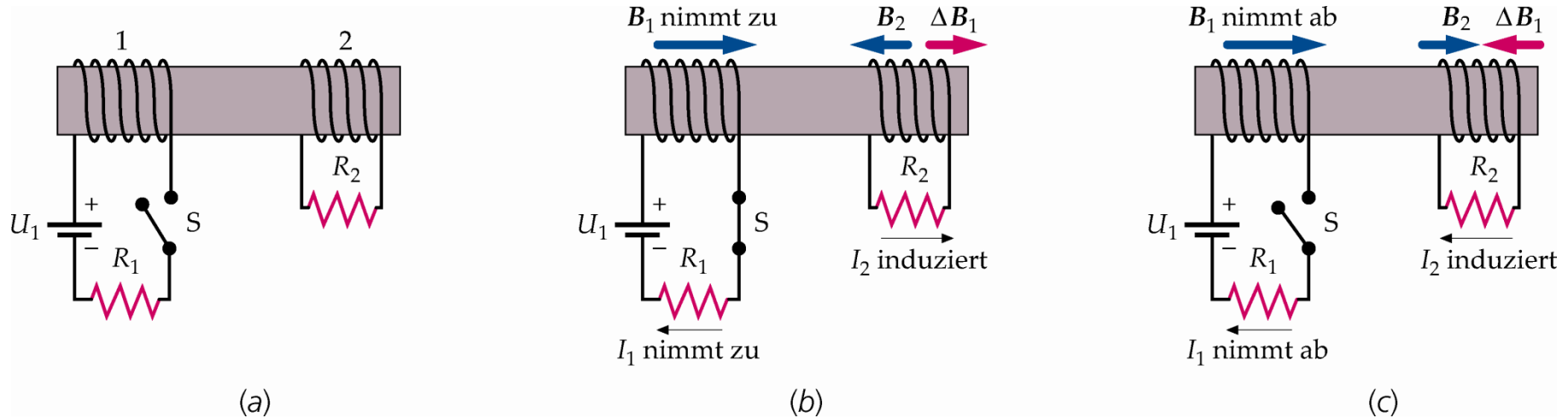


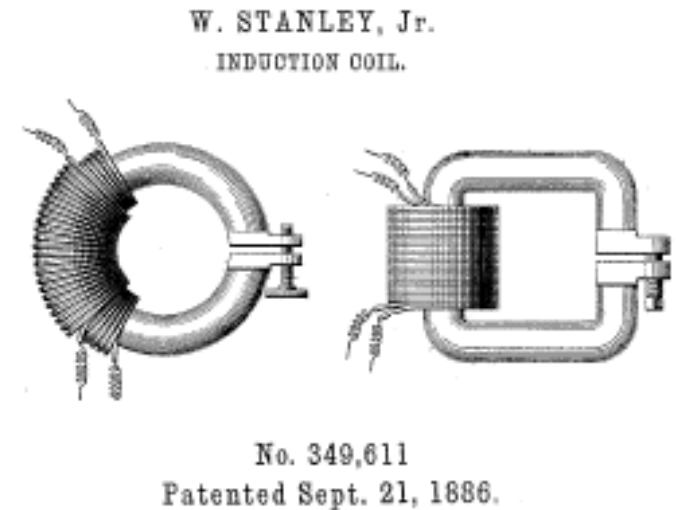
Abb. (b): Wird der Schalter geschlossen, so nimmt  $I_1$  in der gezeigten Richtung zu. Der veränderliche magnetische Fluss durch die Spule von Kreis 2 induziert dort einen Strom  $I_2$ . Dieser Strom erzeugt ein Magnetfeld, dass dem induzierten Fluss von  $I_1$  entgegenwirkt.

Abb. (c): Wird der Schalter geöffnet, so fällt  $I_1$  ab und wieder ändert sich der Fluss durch Kreis 2. Der induzierte Strom  $I_2$  versucht, dem entgegenzuwirken, also den Fluss durch Kreis 2 aufrechtzuerhalten.

## Der Transformator

Mit einem Transformator kann man eine gegebene Eingangsspannung ohne wesentlichen Leistungsverlust in eine gewünschte Ausgangsspannung umsetzen. Hauptanwendungsgebiet von Transformatoren ist daher die Erhöhung beziehungsweise die Reduktion von Wechselspannungen. Für die Stromversorgung sind sie unverzichtbar, da elektrische Energie nur mittels Hochspannungsleitungen über weite Entfernungen wirtschaftlich sinnvoll transportiert werden kann, der Betrieb von Elektrogeräten aber nur mit Niederspannung praktikabel ist.

Dem Ungarn Károly Zipernowsky, Miksa Déri und Ottó Titusz Bláthy wurde 1885 ein Patent auf den Transformator erteilt. Wesentlichen Anteil an der Verbreitung des Wechselstromsystems und mit ihm des Transformators hatte der Amerikaner George Westinghouse. Er erkannte die Nachteile der damals von Thomas A. Edison betriebenen und favorisierten Gleichstrom-Energieverteilung und setzte vorrangig auf Wechselstrom



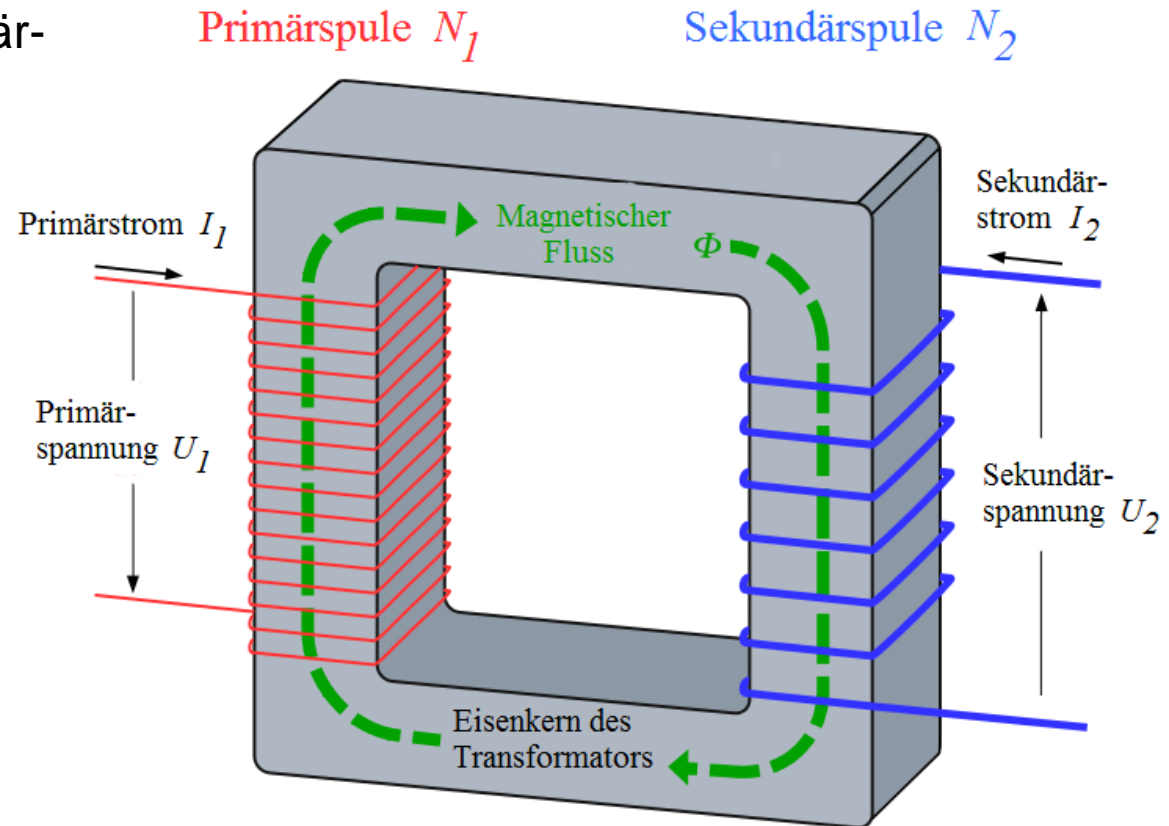


## Aufbau eines Transformators

Eine Wechselspannung auf der Primärseite des Transformators erzeugt aufgrund der elektromagnetischen Induktion einen wechselnden magnetischen Fluss im Kern.

Der magnetische Fluss wiederum induziert auf der Sekundärseite des Transformators eine Spannung (Spannungstransformation).

Ein Wechselstrom in der Sekundärwicklung bewirkt dem Ampereschen Gesetz entsprechend einen Wechselstrom in der Primärwicklung (Stromtransformation).



## Der ideale Transformator

Der ideale Transformator hat einen Wirkungsgrad von 100%.

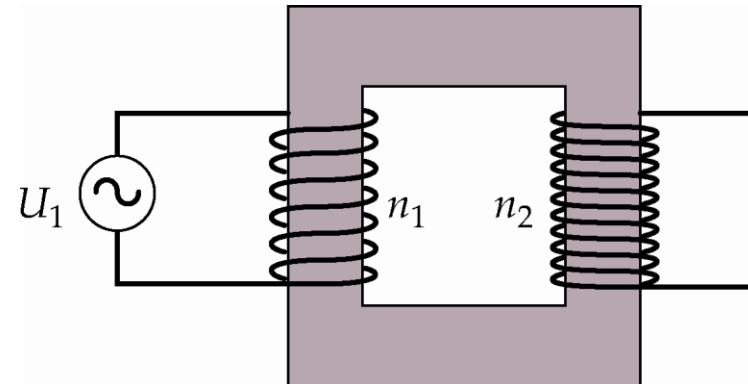
$$U_1 = -n_1 \frac{d\Phi_{mag}}{dt}$$

$$U_2 = -n_2 \frac{d\Phi_{mag}}{dt}$$

$$U_2 = \frac{n_2}{n_1} U_1$$

$$n_1 I_1 = -n_2 I_2$$

$$U_{1,eff} \cdot I_{1,eff} = U_{2,eff} \cdot I_{2,eff}$$



## Der reale Transformator

Ideale Transformatoren sind praktisch nicht realisierbar. Ein realer Transformator unterscheidet sich folgendermaßen vom idealen Transformator:

- die Wicklungen haben Widerstände und eine Kapazität;
- im Eisenkern treten Wirbelstromverluste auf;
- die Ummagnetisierung des Kerns verbraucht Energie;
- nicht der gesamte magnetische Fluss  $\Phi$ , der die Primärwicklungen durchströmt, führt auch durch die Sekundärwicklungen, es treten vielmehr Streuflüsse auf;
- die Permeabilität des Kerns hängt von der Frequenz und der Stärke des Magnetflusses ab;
- die Sättigungseffekte des Kerns führen dazu, dass die Induktivität der Primärwicklungen nicht konstant ist, sondern vom Primärstrom abhängt;
- der Kern ändert aufgrund der Magnetostriktion in geringem Maß seine Form, wenn sich das Magnetfeld ändert.

Dementsprechend hat ein realer Transformator einen Wirkungsgrad von  $< 100\%$ .

## Transport elektrischer Energie

Ein wichtiger Anwendungsbereich für Transformatoren ist der Transport elektrischer Energie. Die Leitungsverluste in Form von Joulscher Wärme ( $R \cdot I^2$ ) lassen sich minimieren, wenn die Spannung möglichst hoch und die Stromstärke möglichst gering ist.

Die in der Energieübertragung üblichen und beispielhaften Nennspannungen sind:

- Mittelspannung von 3 kV, 6 kV, 10 kV, 15 kV, 20 kV, 30 kV  
Anwendungsbereiche liegen bei Großabnehmern wie Industriebetrieben und der Versorgung von einzelnen Stadtteilen oder mehreren Ortschaften.
- Hochspannung von 60 kV, 110 kV  
Anwendungsbereiche sind die Versorgung kleinerer Städte und die Überlandversorgung. Auch der Anschluss kleinerer Kraftwerke erfolgt in dieser Spannungsebene.
- Höchstspannung von 220 kV, 380 kV, 500 kV, 700 kV, 1150 kV dienen der Großraumversorgung, Verbundnetzen zum überregionalen Energieaustausch, Anschluss von Großkraftwerken

## Die Netzspannung

Die Spannung 230 V wurde in der internationalen Norm IEC 60038:1983 als Standardnetzspannung festgelegt. Bis 1987 betrug die Netzspannung in Deutschland 220 V mit einer Toleranz von  $\pm 10\%$ . Danach erfolgte zunächst eine Umstellung in mehreren Abstufungen auf 230 V  $+6\%$  und  $-10\%$ . Von 2009 an darf die Netzspannung von 230 V um  $\pm 10\%$  abweichen. Daher sind 207 Volt bis 253 Volt in der Toleranz möglich.

Die Erhöhung der Spannung um etwa 5 % führt zu einer Erhöhung des Energieverbrauches bei vielen Geräten. Bei Geräten, deren Funktion auf dem Ohmschen Widerstand beruht, steigt der Verbrauch quadratisch im Verhältnis zum Spannungsanstieg, also um etwa 10 %. Bei Glühlampen ist diese Erhöhung auf Grund der üblichen Kaltleiter-Charakteristik der Glühfäden etwas geringer.

In den USA und weiten Teilen des amerikanischen Kontinents beträgt der Nennwert der Netzwechselspannung zwischen 110 und 120 Volt. Für größere Verbraucher wie Klimaanlage sind auch 240 V gebräuchlich. Die Nennfrequenz beträgt dort und auch in Südamerika 60 Hz mit Ausnahme von Argentinien und Chile. Die häufig angegebenen 120 Volt sind ein gerundeter Wert.

## Der Stromkrieg

Der Stromkrieg (engl.: war of currents) war ein Streit zwischen Thomas Alva Edison und George Westinghouse um 1890, ob die von Edison favorisierte Gleichspannung oder Wechselspannung die geeignetere Technik für die großflächige Versorgung der Vereinigten Staaten von Amerika mit elektrischer Energie ist.

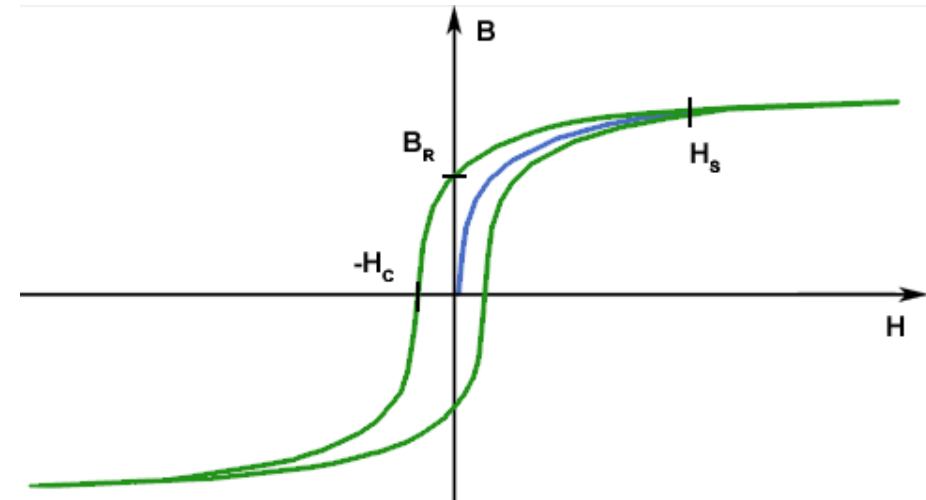
Edisons Vorschlag beruhte auf Gleichspannung mit 110 V. Diese ließ sich jedoch nicht weit transportieren und deshalb hätte in jedem Stadtviertel ein kleines Kraftwerk stehen müssen. Edison beabsichtigte, das komplette Land auf diese Weise mit Elektrizität zu versorgen. Als George Westinghouse auf diese Pläne aufmerksam wurde, erkannte er bald die Probleme, die sich aus der Verwendung der Gleichspannung ergaben. Bei seiner Forschung fand er heraus, dass sich Wechselspannung besser für die Energieversorgung eignet.

Die Unternehmen von Westinghouse bekamen 1892 den prestigeträchtigen Auftrag der Lieferung ihres Wechselspannungssystems und einer großen Anzahl einer von ihnen neu entwickelten Glühlampe für die Weltausstellung in Chicago 1893, die auch die 400-Jahr-Feier der Entdeckung Amerikas durch Columbus war. Damit war Edison in dem Streit unterlegen, der Markt hatte sich für die technischen Vorteile des Wechselspannungssystems entschieden.

## Sättigungsmagnetisierung

Unter Sättigungsmagnetisierung versteht man jene Magnetisierung, bei der in einem meist ferromagnetischen Stoff eine Erhöhung der äußeren magnetischen Feldstärke  $H$  keine Erhöhung der Magnetisierung des Stoffes mehr bewirkt. Dieser hat einen konstanten, material-spezifischen „Sättigungswert“ erreicht.

Eine besonders gute Leitfähigkeit für den magnetischen Fluss  $\Phi$  ist die wesentliche Eigenschaft vor allem ferromagnetischer Werkstoffe wie beispielsweise Weicheisen, Dynamoblech oder bestimmter Ferrite. Dies begründet den Einsatz dieser Werkstoffe, wo es auf die räumliche Führung von magnetischen Flüssen ankommt, beispielsweise in Eisenkernen von Transformatoren. Durch eine Steigerung der magnetischen Flussdichte in diesen Materialien wird der Bereich der Sättigungsmagnetisierung erreicht, wo es zu einem starken Abfall der magnetischen Leitfähigkeit kommt. Die magnetische Sättigung ist bei diesen technischen Anwendungen daher meist unerwünscht.



## Transformatorhauptgleichung für sinusförmige Spannung

$$U = \frac{2\pi \cdot f \cdot N \cdot A \cdot B}{\sqrt{2}} \approx 4,44 \cdot B \cdot A \cdot f \cdot N$$

***U*** ist die effektive Spannung, ***B*** die magnetische Flussdichte im Kern, ***A*** die Querschnittsfläche des Kerns, ***f*** die Frequenz und ***N*** die Windungszahl.

Die Transformatorhauptgleichung kann beispielsweise verwendet werden, um bei einem bestimmten Transformator mit bekannter Sättigungsmagnetisierung und gegebener Betriebsfrequenz die maximale Primärspannung zu ermitteln, bei der das Kernmaterial gerade noch nicht in Sättigung geht. Soll der Transformator mit einer höheren Spannung betrieben werden, lässt sich aus der Gleichung ablesen, welche Windungszahl und welcher Kernquerschnitt erforderlich sind. Da die Kupferverluste gering gehalten werden müssen, kann die Windungszahl nicht beliebig erhöht werden. Transformatoren sind daher um so größer, je höher die Eingangsspannung ist. Andererseits können Größe und damit Gewicht eingespart werden, wenn mit höherer Betriebsfrequenz gearbeitet wird. Dies ist der Grund für die geringe Größe von Schaltnetzteilen.



## Schaltnetzteil

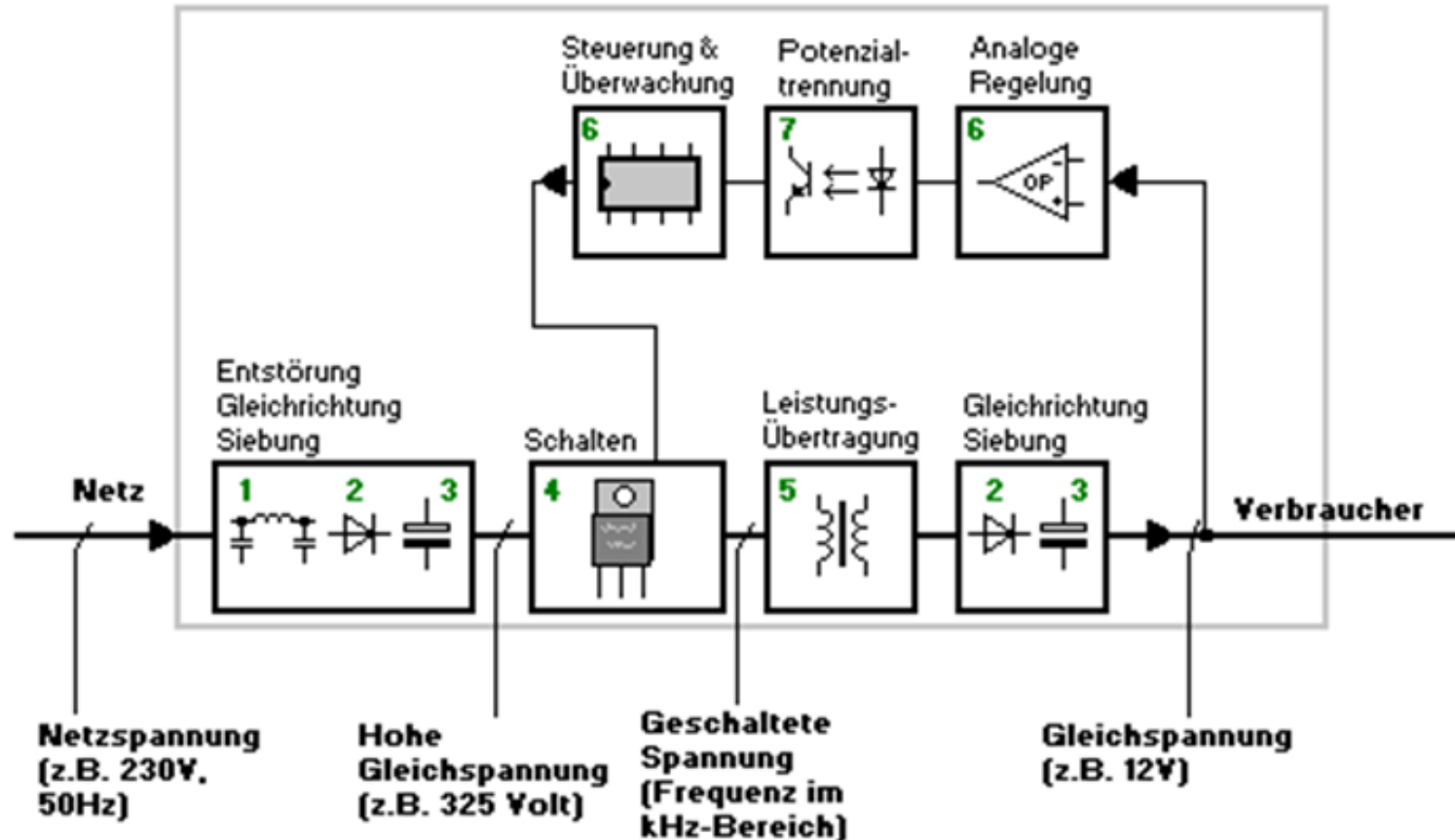
Bei Schaltnetzteilen wird die Netzspannung zunächst gleichgerichtet, anschließend (um sie zu transformieren) wieder in eine Wechselspannung wesentlich höherer Frequenz umgewandelt und schließlich wieder gleichgerichtet. Die Verwendung von Hochfrequenz anstelle der üblichen Netzfrequenz ermöglicht bei gleicher Leistung einen wesentlich kleineren und damit leichteren Transformator und kleinere Siebglieder zur Glättung der vom entsprechenden Gerät benötigten Gleichspannung.

Die Transformatorkerne von Schaltnetzteilen werden zur Verringerung der Hysterese- und Wirbelstromverluste meist aus Ferrit (ferromagnetische Keramik) oder aus Eisenpulver gefertigt. Auch die Wicklungen werden bei höheren Frequenzen wegen des Skineffektes häufig als flaches Kupferband oder mittels Hochfrequenzlitze (parallelgeschaltete gegeneinander isolierte dünne Drähte) ausgeführt.

Ein zur Übertragung von 4000 Watt geeigneter Transformator wiegt beispielsweise:

- bei 50 Hz etwa 25 kg
- bei 125 kHz dagegen nur 0,47 kg.

# Schaltnetzteil



## Legende:

- |  |                      |
|--|----------------------|
| 1 = Netzfilter (z.B. Drosselspule, X- und Y-Kondensatoren)         | 6 = Steuerelektronik |
| 2 = Gleichrichter (z.B. Brückengleichrichter oder einzelne Dioden) | 7 = Optokoppler      |
| 3 = Glättungskondensator   |                      |
| 4 = Leistungstransistor (z.B. "starker" MOSFET)                    |                      |
| 5 = Übertrager ("Trafo")   |                      |

## Steckernetzteile im Größenvergleich



Links Schaltnetzteil mit 20 Watt, rechts konventionell mit 3,6 Watt Ausgangsleistung

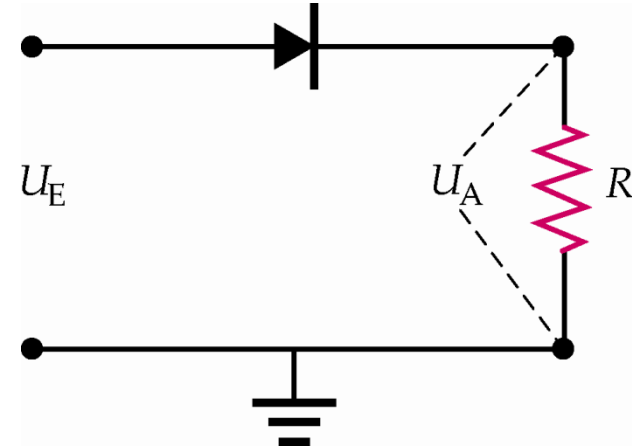
## Aufgaben

1. Eine Türklingel, mit einer effektiven Wechselspannung von 6,0 V betrieben, benötigt eine effektive Stromstärke von 4,00 A. Sie ist mit einem Transformator verbunden, dessen Primärspulen (mit 2000 Windungen) an das Haushaltsstromnetz (230 V Wechselspannung) angeschlossen ist.
  - a) Wie viele Windungen sollte die Sekundärspule haben?
  - b) Geben Sie die Stromstärke der Primärspule an.
  
2. Eine Überlandleitung habe einen Ohmschen Widerstand von 0,02  $\Omega$ /km. Welcher Leitungsverlust tritt auf, wenn 200 kW elektrischer Leistung aus einem 10 km entfernten Kraftwerk mit einer Spannung (Effektivwerte) von
  - a) 230 V und
  - b) 4,4 kV zum Verbraucher transportiert werden?Die Leistung kann nicht verschwinden. Was passiert mit den Leitungsverlusten?

## Aufgaben

3. Die Abbildung zeigt einen Gleichrichter, der eine Wechselspannung in eine pulsierende Gleichspannung umwandelt. Die Diode können Sie sich wie ein „Einwegventil“ für den Strom vorstellen: Es fließt nur dann ein Strom in Pfeilrichtung; wenn gilt  $U_E - U_A \geq +0,6 \text{ V}$ , andernfalls geht der Widerstand der Diode gegen unendlich.

Zeichnen Sie die Zeitlichen Verläufe von  $U_E$  und  $U_A$  gemeinsam in ein Koordinatensystem (jeweils zwei Perioden) für ein Eingangssignal  $U_E = U_{\max} \cdot \cos \omega t$ .

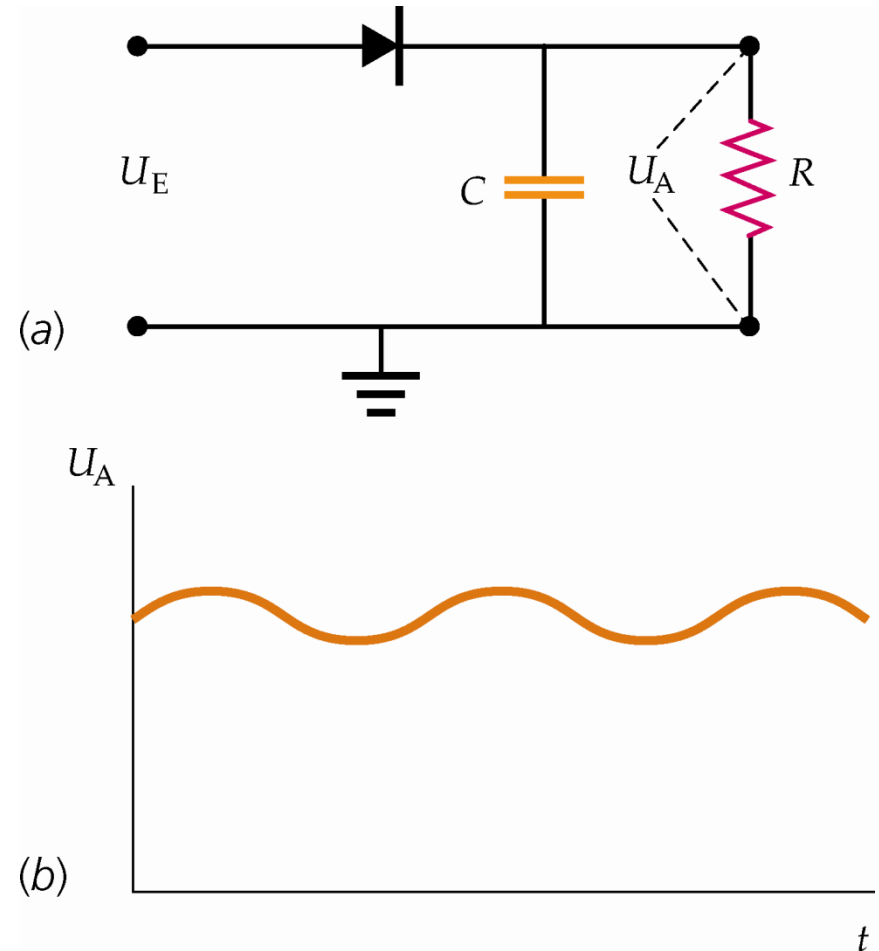


## Aufgaben

4. Das Ausgangssignal des besprochenen Gleichrichters kann man durch Nachschaltung eines Tiefpassfilters glätten. So erhält man eine Gleichspannung mit nur noch geringfügigen zeitlichen Schwankungen (Abbildung b).

a) Gegeben ist die Frequenz  $\nu = 60 \text{ Hz}$  des Eingangssignals sowie  $R_L = 1 \text{ k}\Omega$ . Wie groß muss  $C$  sein, damit das Ausgangssignal im Laufe einer Periode um weniger als 5% seines Mittelwerts schwankt?

b) Angenommen, es würde sich um die Glättung der Spannung eines Schaltnetzteils mit der Frequenz von  $120 \text{ kHz}$  handeln. Wie groß muss  $C$  dann sein, damit die Spannung um weniger als 5% schwankt?



## Blitze

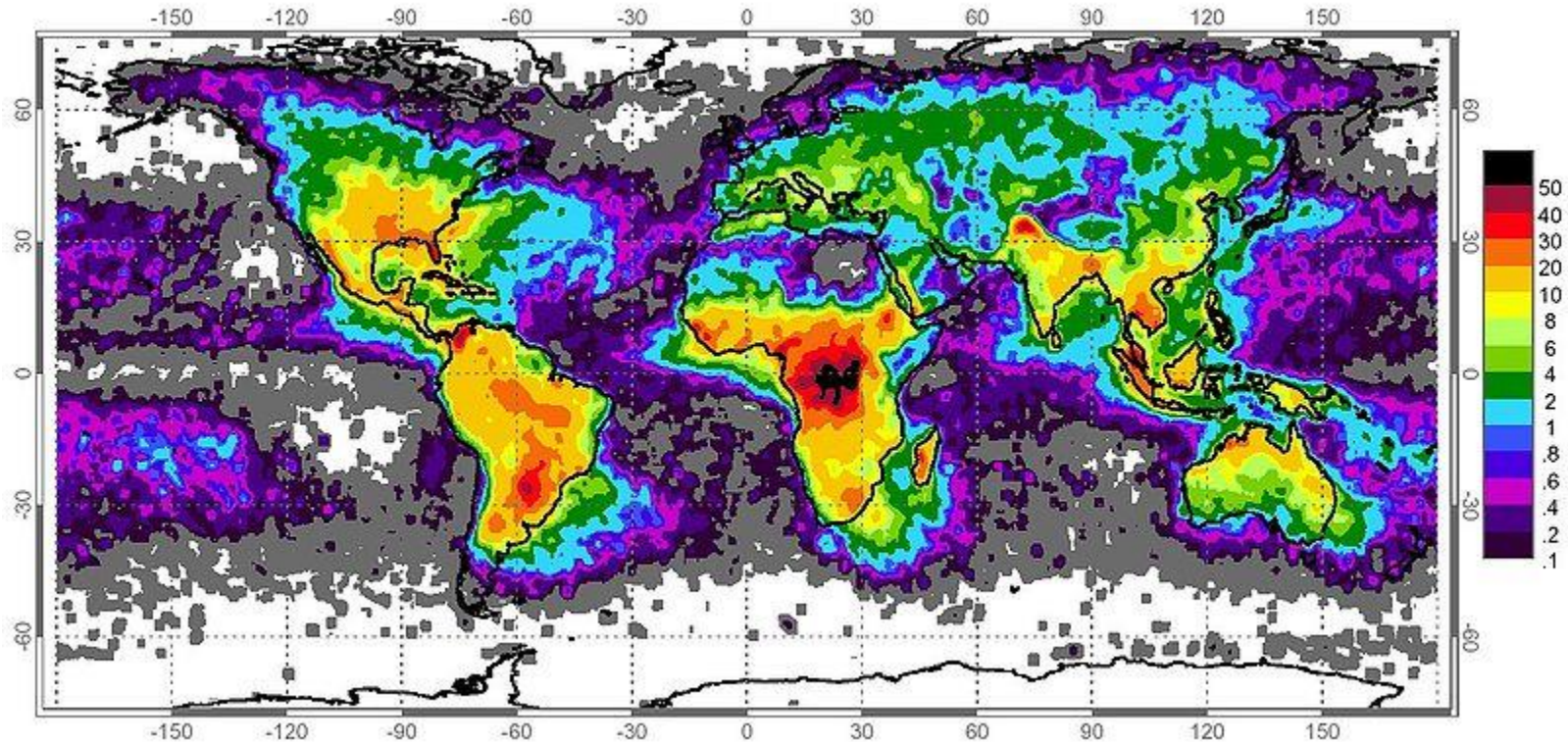
Ein Blitz ist in der Natur eine Funkenentladung bzw. ein kurzzeitiger Lichtbogen zwischen Wolken oder zwischen Wolken und der Erde, in aller Regel während eines Gewitters in Folge einer elektrostatischen Aufladung der wolkenbildenden Wassertröpfchen bzw. der Regentropfen.

Obwohl Gewitterblitze zu den am längsten studierten Naturphänomenen gehören, sind die der natürlichen Blitzentstehung zugrundeliegenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten bis heute noch nicht zweifelsfrei erforscht. Eine Blitzentladung ist dabei deutlich komplizierter als eine reine Funkenentladung.





## Blitzhäufigkeit



Weltweit gibt es zu jedem beliebigen Zeitpunkt 2000 bis 3000 Gewitter, was auf der gesamten Erde täglich 10 bis 30 Millionen Blitze ergibt (andere Schätzungen gehen nur von 4 Millionen aus). Das sind über 100 Blitze in jeder Sekunde. Doch nur 10 % aller Blitze schlagen in den Boden ein.



## Entstehung von Blitzen

Grundvoraussetzung für die Entstehung von elektrischer Ladung sind kräftige Aufwinde innerhalb einer nach oben wachsenden Cumuluswolke, die bis zu 150 km/h erreichen können. In der Wolke kondensiert zunächst Wasserdampf zu kleinen aber ständig wachsenden Wassertröpfchen.

Ist die Cumuluswolke hoch genug, und reicht sie damit in kältere Luftschichten deutlich unterhalb der Nullgradgrenze, gefrieren die Niederschlagspartikel zu Eiskristallen. Durch Resublimation wachsen diese weiter an. Mit der Zeit werden die Graupelteilchen schwer genug, dass sie entgegen der Richtung der Aufwinde zum Erdboden fallen.

In diesem Stadium kollidieren kleinere, noch leichte Eiskristalle mit dem Graupelteilchen und geben dabei Elektronen an die Graupelteilchen ab. Diese nehmen eine negative Ladung an und sinken so geladen weiter in den unteren Teil der Wolke. Die leichten, jetzt positiv geladenen Eiskristalle werden von den Aufwinden weiter nach oben getragen. Dadurch kommt es zu einer Ladungstrennung und es entstehen beachtliche Raumladungen.

## Feldstärke

Ein Blitz ist ein Potenzialausgleich innerhalb der Wolke (**Wolkenblitz**) oder zwischen dem Erdboden und dem unteren Teil der Wolke (**Erdblitz**). Für Blitze zwischen der Wolke und der Erde muss der Potentialunterschied (die Spannung) **einige 10 Millionen Volt** betragen.

In Luft kommt es erst zu einer elektrischen Funkenentladung bei einer elektrischen Feldstärke von ca. 3 Millionen Volt pro Meter (der so genannten Durchbruchfeldstärke); dieser Wert sinkt jedoch stark mit zunehmender Luftfeuchtigkeit.

Allerdings wurden solche Feldstärken in einer Gewitterwolke noch nie gemessen. Messungen ergeben nur extrem selten Feldstärken von über **200.000 V/m**, was deutlich unter dem Wert für den Durchbruch liegt.

Daher wird heute davon ausgegangen, dass die Luft zuerst durch Ionisation leitfähig gemacht werden muss, damit es zu einer Blitzentladung kommen kann.

## Stromstärke und Länge

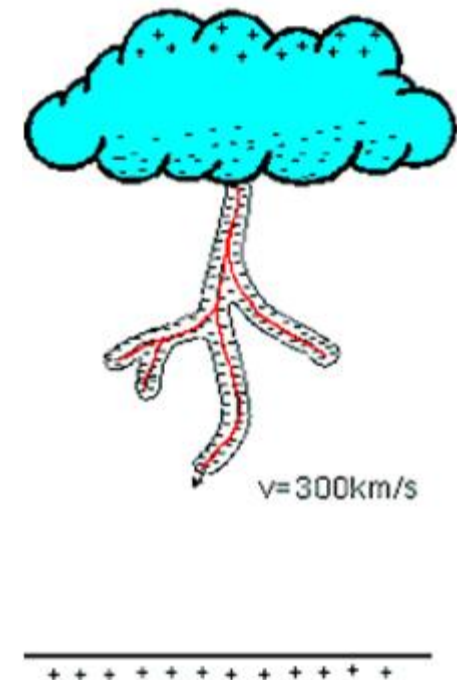
Die Stromstärke einer Hauptentladung beträgt im Durchschnitt etwa **20.000 Ampere**. Dabei fließt die negative Ladung von der Wolkenunterseite zum Boden. Man spricht vom **Negativblitz**. Es fließt im Durchschnitt eine Ladung von **20 - 35 C**.

In seltenen Fällen wird positive Ladung der Erdoberfläche zugeführt. Man spricht dann von einem Positivblitz. Meistens handelt es sich hierbei um eine besonders intensive Entladung, deren Hauptentladung auch deutlich länger anhält als beim Negativblitz. Der Positivblitz besteht in aller Regel auch nur aus einer Hauptentladung. Die Stromstärke einer Hauptentladung bei Positivblitzen wird mit bis zu **300.000 Ampere** angegeben. Sie sind daher weitaus gefährlicher als Negativblitze, machen allerdings nur etwa 5 % aller Erdblitz aus.

Die durchschnittliche Länge eines Erdblitzes (Negativblitz) beträgt in mittleren Breiten **1 bis 2 km**, in den Tropen aufgrund der höheren Luftfeuchtigkeit 2 bis 3 km. Positivblitze reichen nicht selten von den oberen Regionen der Gewitterwolke bis zum Erdboden und kommen daher auf Längen von deutlich über 10 km. Ein Wolkenblitz ist ca. 5 bis 7 Kilometer lang.

## Blitz - Stadium 1: Vorentladung

Einer Blitzentladung geht eine Serie von Vorentladungen voraus, die gegen die Erdoberfläche gerichtet sind. Dabei wird ein Blitzkanal (Leitblitz) geschaffen, d. h. ein elektrisch leitender Kanal wird durch Stoßionisation der Luftmoleküle durch die Runaway-Elektronen gebildet. Der ionisierte Blitzkanal baut sich stufenweise auf (daher engl. stepped leader), bis er zwischen Erdoberfläche und Wolke hergestellt ist. Die Vorentladungen sind zwar zum Erdboden hin gerichtet, variieren aber innerhalb weniger Meter leicht ihre Richtung und können sich stellenweise aufspalten. Dadurch kommen die Zick-Zack-Form und die Verästelungen des Blitzes zustande. Der Leitblitz emittiert – wie neue Forschungen zeigen – auch Röntgenstrahlung mit einer Energie von 250.000 Elektronenvolt



## Blitz - Stadium 2: Fangentladung

Kurz bevor die Vorentladungen den Erdboden erreichen, gehen vom Boden eine oder mehrere Fangentladungen aus, welche bläulich und sehr dunkel sind. Eine Fangentladung tritt meistens bei spitzen Gegenständen (wie Bäumen, Masten oder Kirchtürmen) aus, welche sich in ihrer Höhe von der Umgebung abheben.

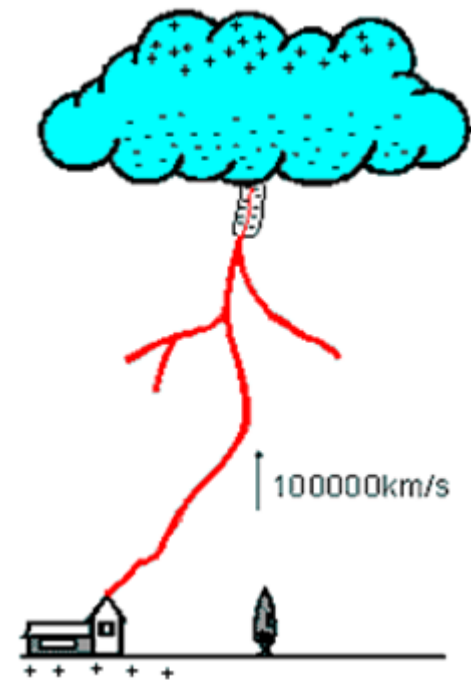
Meist – aber nicht immer – trifft eine der Fangentladungen mit den Vorentladungen zusammen und bildet einen geschlossenen Blitzkanal zwischen Wolke und Erdboden.



## Blitz - Stadium 3: Hauptentladung

Der Blitzkanal weist maximal **12 mm** im Durchmesser auf. Durch diesen Kanal erfolgt dann die Hauptentladung, welche sehr hell ist und als eigentlicher Blitz wahrgenommen wird. Das Leuchten des Blitzes wird durch die Bildung von Plasma verursacht.

Im Durchschnitt bilden vier bis fünf Hauptentladungen einen Blitz. Die Vorentladungen benötigen zusammen genommen etwa 0,01 Sekunden, die Hauptentladung dauert nur **0,004 s**. Nach einer Erholungspause zwischen 0,03 s und 0,05 s erfolgt eine neue Entladung. Dadurch kommt das Flackern eines Blitzes zustande.



## Spannungskegel

An der Stelle, wo der Blitz in den Boden geht (oder aus ihm heraus) bildet sich ein starkes Spannungsfeld (hohes Potential), das von der Stelle des Einschlags nach außen hin kreisförmig abnimmt und sich in das Erdreich kegelförmig spitz fortsetzt, daher der Name. Fläche, Tiefe und Potential des Kegels sind z. B. abhängig von der Stärke des Blitzes, der Bodenbeschaffenheit und Feuchtigkeit.

Mit „Blitzschlag“ ist nicht nur der direkte Treffer gemeint, sondern auch Schädigungen durch den Spannungskegel. Steht z. B. ein Blitzopfer mit beiden Beinen auf dem Boden, befindet sich jedes Bein auf einem etwas anderen Potential. Die Potentialdifferenz im Körper, die sogenannte Schrittspannung, führt zu Schäden an Organen. Diese sind nicht tödlich, falls die Differenz gering ist, z. B. wenn das Opfer im Moment des Einschlags beide Füße dicht nebeneinander hat und die Spannungsdifferenz minimiert ist. Bei jemandem, der mit Kopf bzw. Füßen in Richtung Einschlagstelle liegt, ist die Spannungsdifferenz u.U. aber sehr groß. Dann kann auch ein Einschlag, der weiter entfernt ist, zu schweren Schäden führen. Aus diesem Grund sind vierbeinige Tiere (Kühe auf der Weide) besonders gefährdet.

Stärke und Form des Spannungskegels sind in der Regel nicht vorhersehbar.

## Abschätzung des Spannungskegels

An der Stelle, wo der Blitz in den Boden geht (oder aus ihm heraus) bildet sich ein starkes Spannungsfeld (hohes Potential), das von der Stelle des Einschlags nach außen hin kreisförmig abnimmt und sich in das Erdreich kegelförmig spitz fortsetzt, daher der Name. Fläche, Tiefe und Potential des Kegels sind z. B. abhängig von der Stärke des Blitzes, der Bodenbeschaffenheit und Feuchtigkeit.

Für Blitze zwischen der Wolke und der Erde muss der Potentialunterschied einige 10 Millionen Volt betragen.

Angenommen, das Potential an der Stelle des Einschlags des Blitzes beträgt 100.000 V und der Durchmesser des Spannungskegels beträgt 100 m.

Dann beträgt die Schrittspannung 1000 V/m.



## Magnetfeld des Blitzes

Die Anstiegsgeschwindigkeit eines Blitzstroms beträgt durchschnittlich 7000 Ampere pro Mikrosekunde. Demzufolge steigt auch die Stärke des dazugehörigen Magnetfelds entsprechend an. Dadurch ist ein Blitz in der Lage, selbst in mehreren km Entfernung durch Induktion erhebliche elektrische Spannungen zu induzieren.

### Beispiel:

Stromanstieg: 7000 A/μs

Entfernung: 100 m

Berechnung der induzierten Spannung  
für eine Leiterschleife 10 cm × 10 cm.

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$$

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{2I}{r_s}$$

$$U_{ind} = - \frac{d\Phi_{mag}}{dt}$$

$$U_{ind} = - \frac{d}{dt} \cdot \int_S B \cdot dA$$

## Donner

Im Blitzkanal wird die Luft schlagartig auf bis zu 30.000 °C erhitzt. Das den Blitzkanal schlauchförmig umhüllende Magnetfeld verhindert dabei die Ausdehnung der ionisierten und damit magnetisch beeinflussbaren Luftmoleküle. Die Folge ist ein extrem hoher Druck.

Mit dem Ende des Leitblitzes und damit des Stroms bricht auch das Magnetfeld zusammen und die heiße Luft dehnt sich mit einer Geschwindigkeit oberhalb der Schallgeschwindigkeit aus und durchbricht die Schallmauer. So wird eine Druckwelle aus verdichteten Luftmolekülen erzeugt, die sich mit Schallgeschwindigkeit ausbreitet und als lauter Knall wahrnehmbar ist.

Da der Schall im Gegensatz zum Licht (ca. 300.000 km/s) nur eine Geschwindigkeit von 332 m/s (bei 0 °C) aufweist, kann man aus der Zeit zwischen dem Blitz und dem Donner die Entfernung des Blitzes berechnen (drei Sekunden entsprechen fast genau einem Kilometer). Das Grollen des Donners kommt durch Echo-Effekte, durch unterschiedliche Distanzen zum Blitzkanal und durch Dispersion (Abhängigkeit der Schallausbreitung von der Wellenlänge) zustande.

## Verhalten bei Gewittern

Um nicht vom Blitz getroffen oder durch einen nahen Einschlag verletzt zu werden, müssen Sicherheitsvorkehrungen getroffen werden:

**Schutz in Gebäuden oder Fahrzeugen suchen.** Fahrzeuge mit geschlossener Metallkarosserie und Gebäude mit einem Blitzschutzsystem oder aus Stahlbeton wirken wie ein Faradayscher Käfig. Der metallische Käfig muss allerdings entsprechend dimensioniert sein, um die hohen Impulsströme ohne mechanische Verformungen aufnehmen zu können. Einen guten Schutzraum stellen die Bereiche am Boden unter Hochspannungsleitungen dar welche über metallische Masten verfügen und deren Masten über Erdseile verbunden sind. Durch das Erdseil wird der Blitzstrom auf mehrere geerdete Masten verteilt und damit die Schrittspannung im Bereich des Erdungspunktes reduziert

Wenn kein Schutz in Gebäuden oder Fahrzeugen gefunden werden kann, gelten folgende Regeln:

- Offenes Gelände, Hügel und Höhenzüge meiden.
- Aufenthalt auf oder in Gewässern und Pools vermeiden.
- Wegen der Schrittspannung Füße zusammenstellen, in die Hocke gehen, Arme am Körper halten, den Kopf einziehen, eine Vertiefung aufsuchen. Nicht auf den Boden legen, sondern den Kontaktbereich zum Boden minimieren.

# Literatur und Quellen

Paul A. Tipler, Gene Mosca: Physik für Wissenschaftler und Ingenieure, Spektrum Akademischer Verlag, August 2009

<http://de.wikipedia.org/>



Technische Hochschule Deggendorf – Edlmaistr. 6 und 8 – 94469 Deggendorf