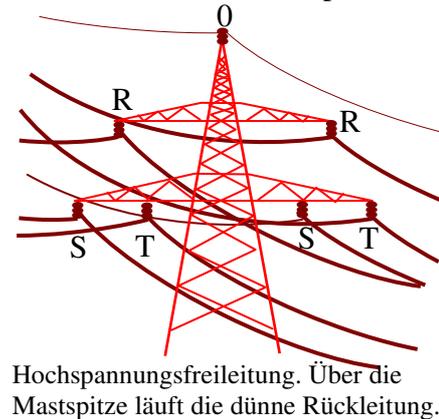
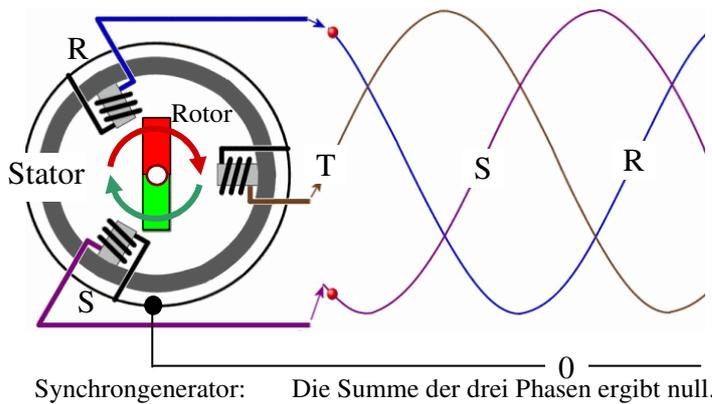


### A) Weitere Anwendungen der Induktion

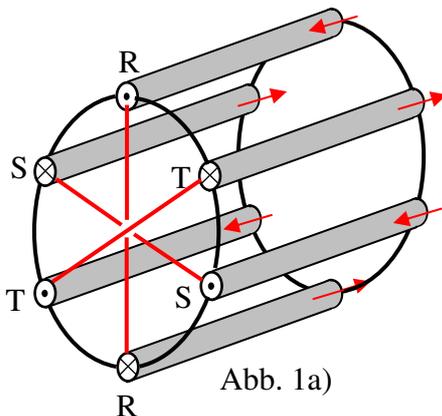
#### Asynchronmotor

Die Asynchron-Elektromaschine wurde 1889 in der Firma AEG erfunden und erbrachte dieser Firma Weltgeltung. Die Maschine ist denkbar einfach im Aufbau, nahezu verschleißfrei, universell einsetzbar, sie arbeitet mit hohem Wirkungsgrad. Die Maschine kann als Motor und als Generator betrieben werden und auch zwischen diesen Betriebsarten umgeschaltet werden. Der Betrieb erfolgt immer mit Drehstrom. Im Elektroauto ermöglicht die Umschaltung auf Generatorbetrieb die Rekuperation, also die Rückgewinnung der Energie beim Bremsen.

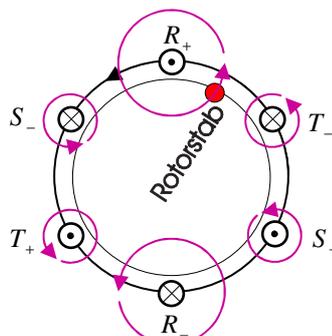
Zunächst betrachten wir die Drei-Phasen-Drehstrom-Erzeugung mit einer sog. Synchronmaschine. In der Synchronmaschine sind drei Spulen jeweils um  $120^\circ$  versetzt auf dem Stator angeordnet. Im einfachsten Fall besteht der Rotor aus einem Stabmagnet. Bei seiner Drehbewegung werden dann um  $120^\circ$  versetzte Sinusspannungen in den drei Spulen induziert. Von jeder Spule wird dann eine Hin- und Rückleitung nach außen auf ein Schaltbrett geführt. Eigentlich müssten jetzt sechs Kabel per Fernleitung zum Verbraucher geführt werden. Es gibt aber zwei mögliche Tricks, die sechs Leitungen auf drei zu reduzieren, nämlich die „Dreiecksschaltung“ und die „Sternschaltung“. Die Abbildung zeigt die Sternschaltung, in welcher drei Anschlüsse zu *einer* Null-Rückleitung verbunden werden. Weil die Summe von drei um  $120^\circ$  versetzten Sinusfunktionen genau null ergibt, braucht man nur drei Hin-Leitungen, während man für den Rückleitung (theoretisch) überhaupt keine Leitung benötigt. Das spart enorm Kabel bei den Hochspannungsfernleitungen. Weil das nicht in jeder Verbrauchssituation ganz genau stimmt, wird dennoch eine (anstatt von drei) sehr dünne Rückleitung installiert. In der Abbildung ist eine Hochspannungsfreileitung dargestellt, bei welcher für die drei Hinleitungen R, S und T jeweils zwei dicke Kabel installiert sind, während für die gemeinsame Rückleitung nur ein recht dünnes Kabel über die Mastspitze läuft.



Mit dem Drehstrom kann man nun wieder entweder einen Synchronmotor betreiben, welcher die Umkehrung des Synchrongenerators ist. Alternativ kann man für den Motorbetrieb eine Asynchron-Maschine verwenden. Weil dieser Motortyp das Rückrat der neuen Elektromobilität ist, soll dieser hier erklärt werden.



Stator mit drei Leiterpaaren in Schrägansicht



Stator mit drei Leiterpaaren in Aufsicht. Ein Rotorstab ist rot gezeichnet.



Abb. 2)

Rotor Käfig. Einer der vielen Metallstäbe ist rot gezeichnet

Jede Maschine besteht aus einem feststehenden Stator und einem rotierenden Rotor bzw. Läufer. Das besondere an den Asynchronmaschinen ist, dass der Rotor einfach mit dem Drehfeld des Stators mitläuft und dafür keine Stromzuführung über Schleifringe benötigt. Wie wissen von der S- und U-Bahn, welche heftige Blitze an den schleifenden Stromabnehmern entstehen können. Wo immer es möglich ist, versucht man Schleifkontakte zu vermeiden.



Rotor und Stator eines Asynchronmotors

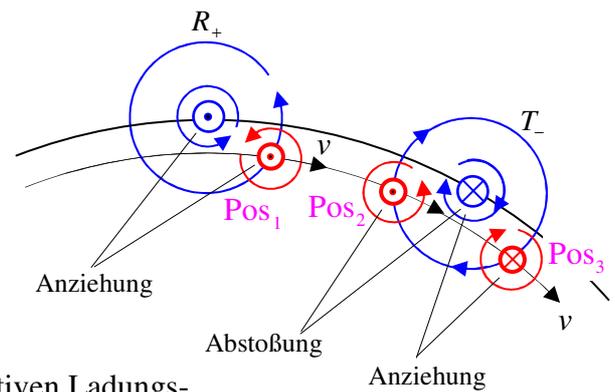
Beim Asynchronmotor ist dies möglich. Wie funktioniert er?

Wir erklären die Funktion an einem Aufbau, bei welchem der Stator aus sechs feststehenden, jeweils um  $60^\circ$  versetzten Leiterstäben besteht. Je zwei einander gegenüberstehende Stäbe sind verbunden und im Kreis herum an eine der drei Phasen R, S und T des Drehstromes angeschlossen. Von jedem Paar wird daher ein Stab in Hin- und der andere in Rückrichtung von Wechselstrom durchflossen.

Die Ströme (techn. Stromrichtung) R, S und T durch die Stäbe fließen einmal auf den Betrachter zu und jeweils im gegenüberliegenden Stab wieder vom Betrachter weg. In der Abb. 1a) bzw. 1b) ist der Stromfluss zum Anfangszeitpunkt  $t = 0$  dargestellt. In diesem Augenblick hat der Strom im Stab  $R_+$  sein Maximum. Nach der Korkenzieher-Regel ergeben sich dann die magenta-farbig eingezeichneten Magnetfelder um die Stäbe. Der Anschluss der Stäbe an das Drei-Phasen-Netz bewirkt, dass uns nach einer *sechstel* Periode das Strommaximum in dem Stab  $T_-$  entgegen fließt. Nach einer weiteren *sechstel* Periode ist das Strommaximum auf den Stab  $S_+$  gewandert. Ohne dass irgendetwas bewegt wird, läuft also, allein auf Grund des Drei-Phasen-Drehstromes in dem stillstehenden Stator, ein Magnetfeld in Kreis herum. Wechselstrom läuft allg. mit  $50\text{ Hz}$ , sodass eine Periode  $T = 1/50\text{ Hz} = 0,02\text{ s}$  dauert. Nach  $0,02\text{ s} / 6 = 0,003\text{ s} = 3,3$  Millisekunden sind die Stromrichtungen also um einen Stab weitergewandert.

Der Rotor besteht aus einem Käfig von vielen Metallstäben. Man benötigt keinerlei Kabelanschlüsse nach außen. Das magnetische Drehfeld des Stators nimmt die Stäbe des Käfigs einfach mit. Das funktioniert, weil die Stäbe an ihren Enden jeweils durch einen leitenden Ring verbunden sind. Dadurch lässt die induzierte Spannung Ströme fließen, die ihrer Ursache entgegen wirken.

Wie funktioniert das genau? Wir verstehen das Prinzip leichter, wenn wir gedanklich die Magnetfelder stehen lassen und die Stäbe des Rotors in *Gegenrichtung* drehen. Dann haben wir für die Stäbe des Rotors stets die Situation der Abb.1b). Wir betrachten einen einzigen Rotorstab (rot markiert), der gerade in  $\text{Pos}_1$  eine Magnetfeldlinie des Statorstabes  $R_+$  rechtwinklig schneidet.



Also: Daumen nach rechts in Bewegungsrichtung des Rotorstabes, Zeigefinger nach oben in.

Magnetfeldrichtung. Die Lorentzkraft auf die positiven Ladungsträger (techn. Stromrichtg) gibt dann der Mittelfinger an, er zeigt nach vorn.

Weil die Stäbe über den Ring geschlossen sind, fließt der induzierte Strom also nach vorn. Damit sind der Statorstrom  $R_+$  und der in  $\text{Pos}_1$  induzierte Strom des Läuferstabes *gleichläufig*.

Aus dem Heft „M4“ Seite 2, wissen wir aber, dass sich gleichläufige Ströme magnetisch *anziehen*. D.h.: Der Läuferstab wird in seiner Rechtsdrehung zurück gezogen und somit gebremst.

Dreht man den Läuferstab weiter in  $\text{Pos}_2$ , so sind die drei Finger der rechten Hand genauso zu halten, wie in  $\text{Pos}_1$ . Also fließt im Läuferstab wieder ein Strom nach vorne.

Der Statorstrom  $T_-$  fließt aber nach hinten. Da sich *gegenläufige* Ströme magnetisch *abstoßen*, wird der nach rechts gedrehte Rotorstab zurück gestoßen und so erneut gebremst.

Wie man leicht überlegt, wird der Läuferstab in  $\text{Pos}_3$  wiederum zurückgezogen und gebremst.

Insgesamt wird die Drehung des Läuferstabes also in jeder Position zu den Statorströmen hingezogen. Im **Ergebnis** bestätigt sich wieder die *Lenzsche Regel*:

Die Induktion wirkt ihrer Ursache, hier die Rückwärtsdrehung der Rotorstäbe, entgegen.

Im **Umkehrschluss** sehen wir, dass die rotierenden Magnetfelder den Rotorkäfig bei ihrer Drehung mit sich ziehen. Da die Ströme in den Rotorstäben nur dann induziert werden, wenn diese *gegenüber* den Magnetfeldern eine Geschwindigkeit  $v$  haben, hinkt der Rotor stets etwas hinter dem Drehfeld des Stators her. Dieser notwendige „Schlupf“ gibt der Maschine ihren Namen: Drehfeld des Stators und Drehung des Läufers sind nicht synchron.

Die Drehfrequenz des Rotors ist im Wesentlichen die Frequenz des Drehstromes, es muss jedoch der Schlupf subtrahiert werden. Um die Drehzahl zu steuern, muss daher die Frequenz verändert werden (Frequenzumrichtung). Das erfolgt heute durch eine Leistungselektronik.

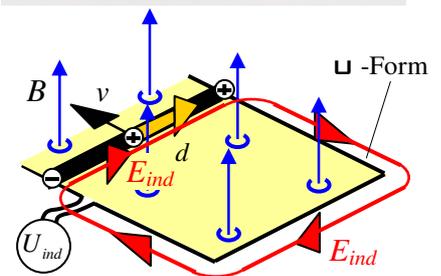
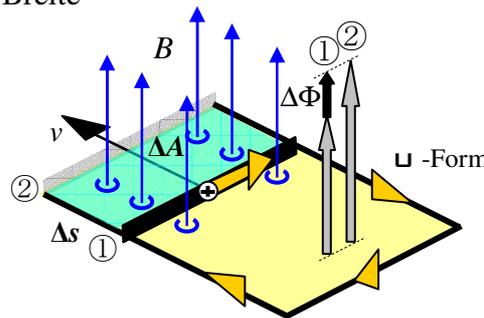
### B) Aufgaben zur Induktion

1) Senkrecht zu den Feldlinien eines Magnetfeldes mit  $B = 0,5T$  befindet sich eine Leiterschleife mit  $r = 4\text{ cm}$  und  $R = 3\Omega$ . Die Feldstärke sinkt in  $\Delta t = 5\text{ ms}$  linear auf null ab. Wie groß ist der Strom?

2) Das  $8\text{ m}$  lange Rotorblatt (Metall) dreht sich mit 10 Umdrehungen pro Sekunde senkrecht durch ein homogenes Magnetfeld der Stärke  $B = 2\text{ mT}$ . Wie groß ist die Spannung zwischen Achse und Spitze? Kann das gefährlich werden?



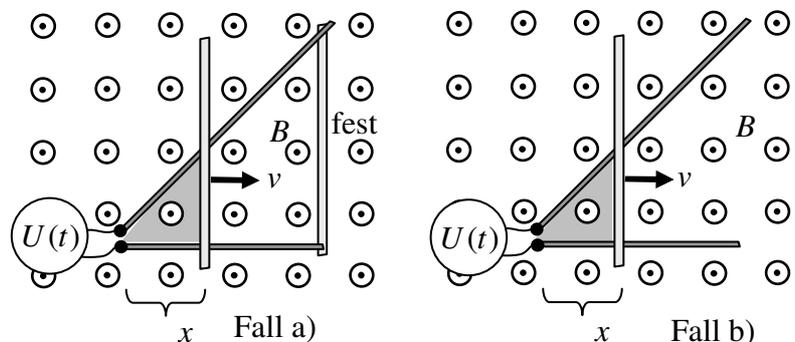
3) Eine  $\sqcup$ -Form aus Metall der Breite  $b = 8\text{ cm}$  wird von unten von einem Magnetfeld der Flussdichte  $B = 0,2T$  durchsetzt. Auf der  $\sqcup$ -Form liegt ein Metallstab, der mit der Geschwindigkeit  $v = 5\text{ cm/s}$  nach links gezogen wird. Dadurch vergrößert sich die magnetfelddurchsetzte



Fläche. Das induzierte elektrische Ringfeld und der induzierte Ringstrom sind dann negativ orientiert. Nun wird die  $\sqcup$ -Form an einer Stelle aufgeschlitzt, so dass die Induktionsspannung gemessen werden kann.

Aufgabe: Stelle die Funktionsgleichung des Spannungsverlaufes auf und zeichne den Graphen.

4) Ein rechtwinklig-gleichschenkliges Metalldreieck, dessen eine  $45^\circ$ -Ecke aufgeschnitten ist, wird senkrecht von einem Magnetfeld mit  $B = 2T$  durchdrungen. Von der offenen Ecke her läuft rechtwinklig zur unteren Kathete ein Metallstab mit  $v = 10\text{ cm/s}$ . Berechne den Spannungsverlauf für die beiden abgebildeten Fälle.



5) Durch eine lange Luftspule fällt ein kurzer Stabmagnet mit dem Nordpol nach oben.

Was geschieht a) wenn die Spulenanschlüsse unverbunden sind. b) wenn sie verbunden sind?

6) Vergleiche die beiden Fallversuche (Ring und Rohr) von Arbeitsblatt EM2.

7) Erkläre den Asynchronmotor.

## C Lösungen

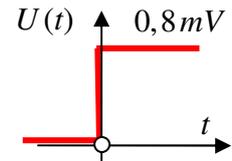
1) Der anfängliche Fluss beträgt  $\Phi_0 = A \cdot B = \pi r^2 B = 2,51 \cdot 10^{-3} \text{Vs}$ . Er sinkt auf  $\Phi_1 = 0 \text{Vs}$ , sodass  $\Delta\Phi = \Phi_1 - \Phi_0 = -2,51 \cdot 10^{-3} \text{Vs}$  gilt. Damit folgt für die induzierte Spannung  $U_{ind} = -\Delta\Phi / \Delta t = -\dot{\Phi} = +2,51 \cdot 10^{-3} \text{Vs} / 5 \cdot 10^{-3} \text{s} = 0,503 \text{V}$  und nach dem Ohmschen Gesetz  $I = U / R = 0,168 \text{A}$

2) Der Rotor überstreicht während der Zeit  $\Delta t = 0,1 \text{s}$  einmal die Kreisfläche  $A = \pi r^2 = 201,06 \text{m}^2$  und damit den Fluss  $\Phi = A \cdot B = 0,402 \text{Vs}$ . Um diesen Wert ändert sich dann  $\Phi$  auch.  $U_{ind}$  beträgt dann je nach Drehrichtung  $U_{ind} = -\Delta\Phi / \Delta t = \pm 4,02 \text{V}$ . Das bedeutet keine Gefahr.

3) Die Änderung der Rechtecklänge  $l$  ist gleich der Geschwindigkeit mit welcher der Stab bewegt wird. Daher gilt für die zeitliche Änderung von A

$$\dot{A} = \frac{\Delta A}{\Delta t} = b \cdot \frac{\Delta l}{\Delta t} = b \cdot v = 8 \text{cm} \cdot 5 \text{cm/s} = 40 \text{cm}^2 / \text{s}. \text{ Die Flussdichte } B = 0,2 \text{T}$$

$$= 0,2 \text{Vs/m}^2 \text{ ist konstant. Also } U(t) = U_{ind} = -\dot{\Phi} = -\dot{A} \cdot B = 40 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \cdot 0,2 \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} = \underline{\underline{8 \cdot 10^{-4} \text{V}}}$$



4) Im Fall a) wächst die graue eingeschlossene Fläche im gleichen Maße, wie die weiße eingeschlossene Fläche abnimmt. Daher ist die Flächenänderung insgesamt gleich null und die induzierte Spannung ist ebenfalls gleich null. Man kann auch argumentieren, dass die durch die graue eingeschlossene Fläche induzierte Spannung durch den Stab rechts kurzgeschlossen wird und das Voltmeter deshalb konstant den Spannungswert null anzeigt.

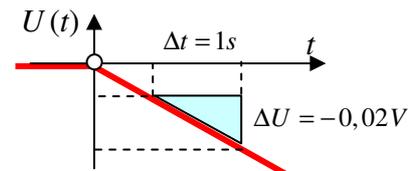
Im Fall b) müssen wir den Flächeninhalt des grauen Dreieckes ermitteln. Da das Dreieck gleichschenkelig-rechtwinklig ist, gilt  $A = \frac{1}{2} \cdot x^2$ . Die Strecke  $x$  vergrößert sich aber linear mit der Zeit,  $x(t) = v \cdot t$ . Also ist die Zeitfunktion des Flächeninhaltes  $A(t) = \frac{1}{2} \cdot (v \cdot t)^2 = 0,5 \cdot v^2 \cdot t^2$ . Wegen der kontinuierlichen Flächenänderung, ist die Änderungsrate des Flächeninhaltes gleich der ersten Ableitung. Weil  $v$  und damit auch  $v^2$  konstant sind, bezieht sich die Ableitung nur auf die Zeit  $t$ . So wie die Abl. von  $x^2$  das Ergebnis  $2x$  hat, so gilt hier  $\dot{A}(t) = 0,5 \cdot v^2 \cdot 2t = v^2 \cdot t$ . Das ist eine lineare Funktion bzgl. der Zeit  $t$ . Wie in Aufgabe 3) gilt wieder  $U(t) = U_{ind} = -\dot{\Phi}(t) = -\dot{A}(t) \cdot B$  bzw.

$$U(t) = -\dot{A}(t) \cdot B. \text{ Also } U(t) = -v^2 \cdot t \cdot B.$$

Nebenrechnung:  $v^2 \cdot B = \left(0,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 \cdot 2 \cdot \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} = 0,02 \cdot \frac{\text{V}}{\text{s}}$

$$\text{Damit lautet die Zeitfunktion } U_{ind}(t) = -0,02 \cdot \frac{\text{V}}{\text{s}} \cdot t.$$

Weil die Zeit  $t$  in Sekunden eingesetzt wird, ergibt sich für  $U_{ind}$  die Maßeinheit Volt. ✓



5) Betrachte die Spule als Reihenschaltung ihrer Windungen.

Beim Fall werden, wie in EM2, 5), ober- und unterhalb des fallenden Magneten Ringfelder induziert. Diese führen zu umgekehrt orientierten Spannungen in den jeweiligen Windungen. Diese Spannungen addieren sich durch die Reihenschaltung, welche die Spule darstellt. Nur beim Ein- und Austritt heben sich die Spannungen daher nicht auf. a) Sind die Ende unverbunden, zeigt das Voltmeter obigen Verlauf, aber der Magnet fällt frei durch, weil bei „unverbunden“ kein Strom fließen kann, welcher seiner Ursache entgegen wirken könnte. b) Sind die Spulenden verbunden, so fließt ein entsprechender Strom durch die gesamte Spule. Aber nur unten und oben gibt es Abbremsung, warum?



6) Arbeite Übereinstimmungen und Unterschiede heraus.

7) Siehe Manuskript. Recherchiere weitere Quellen.