



Gesetzmäßigkeiten elektrischer Maschinen (2)

In dieser Beitragsfolge werden die Merkmale elektrischer Maschinen herausgearbeitet. Schwerpunkte bilden das Induktionsgesetz sowie das elektromagnetische Kraftwirkungsgesetz. Die Vorgänge beim Einsatz von elektrischen Maschinen werden durch die Begriffe Wirkungsweise, Arbeitsweise und Betriebsverhalten charakterisiert.

Induktionsgesetz

Der im ersten Teil des Beitrags beschriebene Vorgang des Entstehens einer magnetischen Erscheinung durch einen elektrischen Vorgang ist umkehrbar. Bei der so genannten elektromagnetischen Induktion entsteht eine elektrische Spannung dann, wenn ein Magnetfluss geändert wird.

Induktionsgesetz der Ruhe

Jede zeitliche Änderung eines magnetischen Flusses erzeugt in einem mit ihm verketteten Leiter eine Induktionsspannung.

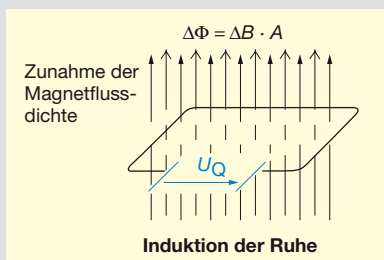
Neben der Ursache „Änderung des magnetischen Flusses“ muss die zusätzliche Bedingung „Verkettung eines Leiters mit

dem magnetischen Fluss“ erfüllt sein, damit als Wirkung „eine elektrische Spannung“ entsteht. Verkettung eines Leiters bedeutet konstruktiv, dass eine Leiterschleife magnetische Feldlinien umfassen muss, die sich in Zahl oder Richtung ändern. Das magnetische Feld und die Leiterschleife verändern dabei ihre räumliche Lage zueinander nicht (Ruheinduktion). Die Ladungsträger in der Leiterschleife werden so verschoben, dass ein Elektronenüberschuss sowie ein Elektronenmangel an der Unterbrechungsstelle entstehen. Über ihr ist die Induktionsspannung nachweisbar (Bild 7).

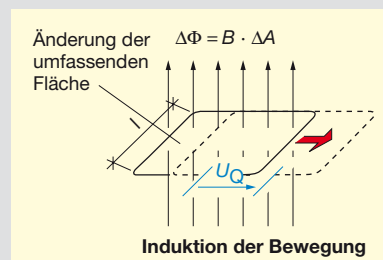
Der Betrag der induzierten Spannung U_{ind} wird von der Größe der Magnetflussänderung $\Delta\Phi$ und im umgekehrten Verhältnis von der Zeitdauer Δt dieser Änderung bestimmt. Werden die Feldlinien nicht von einer sondern von mehreren in Reihe geschalteten Leiterschleifen, das heißt von einer Spule umfasst, dann geht ihre Windungszahl N in die Berechnungsgleichung der induzierten Spannung ein. Induktionsgesetz der Ruhe

$$U_{ind} = N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (2)$$

In der Funktionsgleichung (2) ist die Induktionsspannung U_{ind} die abhängige Veränderliche, die Änderungsgeschwindigkeit des Magnetflusses $\Delta\Phi/\Delta t$ die unabhängige Veränderliche und die Windungszahl N die Konstruktionskonstante. Die Gleichung gilt für lineare Änderungen des



7 Induktion durch Flussänderung



8 Induktion durch Lageänderung

INHALT

Grundwissen
Lernfelder 1-5

Elektrische Maschinen
Gesetzmäßigkeiten elektrischer Maschinen (2)1
Fachbegriffe
Was versteht man unter4

Fachwissen
Lernfelder 6-13

Software
LogiFlash – logische Schaltungen simulieren6
WISO
Wirtschafts-, Sozial- und Gemeinschaftskunde8
Elektrotechnik
Technische Entwicklungen in der Elektrotechnik (3)9
Arbeitssicherheit
Arbeitsstättenverordnung (1)11
Fremdsprache
Technisches Englisch13

Prüfung
Lernfelder 1-13

Fachtest
Lernfeld 214
Lernfeld 615
Lösungen16

Magnetflusses bzw. bei einem nichtlinearen Verlauf des Magnetflusses für solche kleinen Zeitabschnitte, denen eine hinreichend linearisierte Änderung zugeordnet werden kann. Mit der Gleichung (2) ist die Einheit der magnetischen Größe *Magnetfluss* ableitbar: $[\Phi] = 1 \text{ Vs} = 1 \text{ Wb}$ (Weber).

Impressum

ep – LERNEN und KÖNNEN
Magazin für die Aus- und Weiterbildung
HUSS-MEDIEN GmbH

Am Friedrichshain 22; 10407 Berlin
Tel. 030 42151-378, Fax 030 42151-251

Redaktion:

Rüdiger Tuzinski (Redaktionsleiter),
Hein Elster, Heino Hackbarth (Redakteure),
Sabine Funke (Layout), Petra Richter (Zeichnungen)

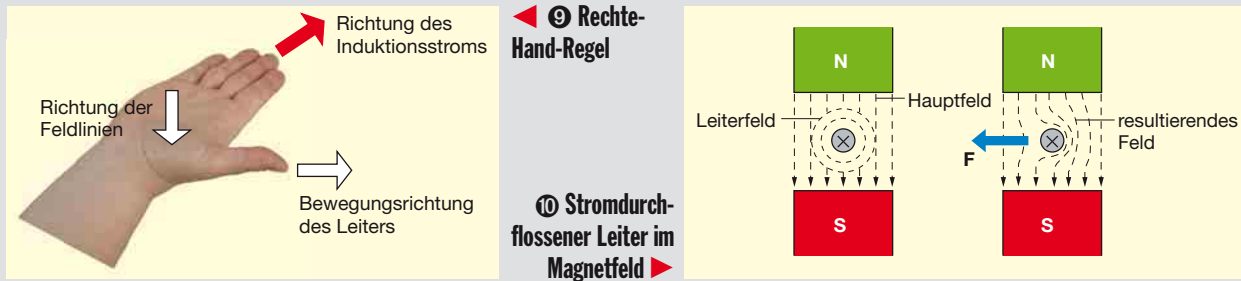
Schülerservice

Abo-Verwaltung und Vertrieb:

Directa Buldt Fachverlag
Lübecker Str. 8; 23611 Bad Schwartau
Tel. 0451 49999-0, Fax 0451 49999-40

Erscheinungsweise:

Monatlich als Beilage der Zeitschrift Elektropraktiker



Tafel 3 Kopplung magnetischer Kreis – elektrischer Kreis

Ruheinduktion	Ursache	Wirkung/Ursache	Wirkung
magnetische Größe	$\Delta\Phi$	$\rightarrow U_{ind}$	$\rightarrow I_{ind}$ elektrische Größe
Bedingung	Verkettung Leiterschleife Magnetfeld	geschlossener Stromweg	
Bewegungsinduktion	Ursache	Wirkung/Ursache	Wirkung
Lageänderung Leiter – Magnetfeld	v	$\rightarrow U_{ind}$	$\rightarrow I_{ind}$ elektrische Größe
Bedingung	Magnetflussdichte B	geschlossener Stromweg	



Linke-Hand-Regel

Eine zweite Form der Induktion ergibt sich, wenn sich die räumliche Lage zwischen dem Magnetfeld und der Leiterschleife ändert.

Induktionsgesetz der Bewegung

In einem Leiter wird eine Spannung induziert, wenn er durch eine relative Bewegung die Feldlinien eines magnetischen Feldes durchläuft.

Es ist belanglos, ob sich der Leiter oder das Magnetfeld bewegt. Entscheidend ist, dass durch die Relativbewegung zwischen beiden Feldlinien „geschnitten“ werden. Der Betrag der dabei induzierten Spannung kann aus der Gleichung (2) abgeleitet werden (Bild 3). Bei einem zeitlich konstanten Magnetfeld mit der magnetischen Flussdichte B ist die Magnetflussänderung $\Delta\Phi = B \cdot \Delta A$. Durch die Bewegung der Leiterschleife ändert sich die die Feldlinien umfassende Fläche durch das Produkt aus wirksamer Leiterlänge l und dem Weg, der durch die Lageänderung zurückgelegt wird: $\Delta A = l \cdot \Delta s$. Bei $N = 1$ entsteht aus

$$U_{ind} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \rightarrow U_{ind} = B \cdot l \cdot \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

mit $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$

die Berechnungsgleichung der durch Bewegungsinduktion entstehenden Spannung:

$$U_{ind} = B \cdot l \cdot v \quad (3)$$

Die konstante magnetische Flussdichte B , die wirksame Leiterlänge l und die Relativgeschwindigkeit v zwischen Leiter und Magnetfeld bestimmen den Betrag der induzierten Spannung U_{ind} . Die Gleichung (3) gilt nur, wenn Feldlinienrichtung und Bewegungsrichtung (Richtung der Geschwindigkeit) senkrecht zueinander stehen.

Die Richtungen der Induktionsspannungen ändern sich, wenn

- bei der Ruheinduktion anstelle einer Magnetflusszunahme der Magnetfluss sich verringert und
- bei der Bewegungsinduktion die Richtung der magnetischen Feldlinien oder die der Bewegung geändert wird.

Grundlage der Richtungsbestimmung der Induktionsspannungen ist der Energieerhaltungssatz, der bei den Induktionsercheinungen in der Form des Lenz'schen Gesetzes¹⁾ gültig ist.

Lenz'sches Gesetz

Der von einer Induktionsspannung angetriebene Strom ist stets so gerichtet, dass er seiner Entstehungsursache entgegenwirkt.

Bei der Ruheinduktion versucht der Induktionsstrom die Magnetflusszunahme oder -abnahme zu verhindern, bei der Bewegungsinduktion die Lageänderung zwischen Leiter und Magnetfeld. Zur Vereinfachung wird bei der Bewegungsinduktion folgende Merkregel angewendet:

Rechte-Hand-Regel

Hält man die rechte Hand so in ein ortsfestes Magnetfeld, dass die Feldlinien in den offenen Handteller eintreten und der abgespreizte Daumen in die Bewegungsrichtung des Leiters weist, dann zeigen die ausgestreckten Finger in Richtung des Induktionsstromes (Bild 9).

In den Bildern 7 und 8 muss bei der Beurteilung der Spannungsrichtungen beachtet werden, dass die Leiterschleifen Stromquellen sind, in denen der Strom vom Minus- zum Pluspol fließt.

Die Kausalität der bei der Kopplung magnetischer Kreis – elektrischer Kreis beteiligten Größen ist in Tafel 3 dargestellt.

Elektromagnetisches Kraftwirkungsgesetz

Die im Induktionsgesetz der Bewegung beschriebene Energiewandlung ist umkehrbar. Wenn elektrische in mechanische Energie umgewandelt werden soll, muss sich in einem ortsfesten Magnetfeld ein vom Strom durchflossener Leiter befinden. Das Magnetfeld des Leiters überlagert sich mit dem vorgegebenen Magnetfeld zu einem resultierenden

¹⁾ Lenz, Heinrich Friedrich Emil: russischer Physiker, 1804 – 1865.

Tafel 4 Zusammenspiel der Grundgesetzmäßigkeiten – Ursache für Richtung und Höhe der Energieumwandlungen

Ruheinduktion	Ursache	Wirkung/Ursache	Wirkung
elektrische Größe	I	$\rightarrow F$	$\rightarrow v$
Bedingung	Magnetflussdichte B	Beweglichkeit eines elektrischen Kreises	Lageänderung des Leiters

Tafel 5 Arbeitsweise elektrischer Maschinen

Transformator	Bedingung	Arbeitsweise
Anschluss von U_1 an	N_{US}	Hochtransformieren: $U_2 > U_1$
	N_{OS}	Herabtransformieren: $U_2 < U_1$
Rotierende Maschine	Bedingung	Arbeitsweise
Läuferdrehzahl	$n \leq n_0$	$U_{ind} < U$ — Motorbetrieb
	$n > n_0$	$U_{ind} > U$ — Generatorbetrieb

Feld. Wie das Bild 10 zeigt, ist bei der gegebenen Stromrichtung rechts vom Leiter eine größere magnetische Flussdichte als links. Durch das Verkürzungsbestreben der magnetischen Feldlinien wirkt quer zum Leiter eine Kraft F , die versucht, ihn in den Bereich der kleineren Feldliniendichte zu drücken.

Elektromagnetisches Kraftwirkungsgesetz

Auf jeden Strom durchflossenen Leiter wirkt im Magnetfeld eine Kraft ein.

Experimentell kann nachgewiesen werden, dass der Betrag der Kraft F von der magnetischen Flussdichte B , von der Stromstärke I im Leiter und von seiner im Magnetfeld wirksamen Länge l abhängig ist.

Berechnungsgleichung der Kraft

$$F = I \cdot B \cdot l \quad (4)$$

Aus der Gleichung (4) ist zu erkennen, dass die Richtung der Kraft sowohl durch die Stromrichtung als auch durch die Richtung der magnetischen Flussdichte, die mit der Feldlinienrichtung identisch ist, bestimmt wird. Für die Richtungsbestimmung der Kraftwirkung gilt die folgende Merkregel:

Linke-Hand-Regel

Hält man die linke Hand so in ein ortsfestes Magnetfeld, dass die Feldlinien in den offenen Handteller eintreten und die ausgestreckten vier Finger in die Richtung des Leiterstromes weisen, dann zeigt der abgespreizte Daumen in Richtung der auf den Leiter wirkenden Kraft (Bild 11).

Nach dem elektromagnetischen Kraftwirkungsgesetz entsteht die Wirkungsgröße *Kraft*, wenn neben der Ursachengröße *Stromstärke* auch die Bedingungsgröße *Magnetflussdichte* vorhanden ist. Die Kraft kann dann zu einer translatorischen oder rotierenden Bewegung führen, wenn Leiter oder Leiterschleife beweglich gelagert sind. Erst dann wird elektrische Energie in mechanische umgewandelt.

Die Kausalität der elektrischen und mechanischen Größen, die bei der beweglichen Anordnung der beiden elektrischen Kreise wirksam sind, kann wie in Tafel 4 dargestellt werden.

Wirkungsweise

Die Wirkungsweise beschreibt unter welchen Voraussetzungen und Bedingungen

- in der Sekundärwicklung eines Transformators eine Spannung induziert wird,
- in der Arbeitswicklung eines Generators (bei den Gleichstromgeneratoren ist es stets die Läuferwicklung, bei den Drehstromgeneratoren überwiegend die Ständerwicklung) eine Spannung induziert wird und
- bei den Motoren die Drehung des Läufers entsteht.

Die vorstehend beschriebenen Grundgesetzmäßigkeiten bilden die Grundlage für die Wirkungsweise aller elektrischen Maschinen. Zu beachten ist, dass bei den rotierenden elektrischen Maschinen die Leiterbewegung durch die technisch wesentlich günstigere Dreh-

bewegung von Leiterschleifen bzw. Spulen erfolgt.

Arbeitsweise

Die Arbeitsweise beschreibt unter welchen Voraussetzungen und Bedingungen

- ein Transformator herauf- oder herabtransformiert und
- die rotierenden elektrischen Maschinen als Generator oder Motor arbeiten.

Transformator. Das Herauf- oder Herabtransformieren eines Transformators wird dadurch bestimmt, ob die gegebene Spannung, die Primärspannung U_1 an die Wicklung mit der kleineren Windungszahl (Unterspannungswicklung mit N_{US}) oder an die mit der größeren Windungszahl (Oberspannungswicklung mit N_{OS}) angelegt wird (Tafel 5).

Rotierende Maschine. Bei Anschluss der Netzspannung U an eine rotierende elektrische Maschine wird durch den fließenden Strom nach dem Durchflutungsgesetz ein Magnetfeld aufgebaut. Nach dem elektromagnetischen Kraftwirkungsgesetz bewirkt das an der Läuferwicklung angreifende Drehmoment eine Drehung des Läufers mit der Drehzahl n , im Leerlauf ohne abbremsende Last mit der Leerlaufdrehzahl n_0 . Da gleichzeitig die Voraussetzungen und Bedingungen des Induktionsgesetzes der Bewegung erfüllt sind, wird in der Läuferwicklung eine Spannung U_{ind} induziert. Wirkt am Läufer ein zusätzlich antreibendes Moment, steigt die Läuferdrehzahl über die Leerlaufdrehzahl. Die induzierte Spannung wird dadurch größer als die Netzspannung U . Die Maschine geht ohne konstruktive Änderungen, auch ohne Änderung der Anschlüsse in den Generatorbetrieb über. Gekennzeichnet durch die Umkehr der Stromrichtung wird in das angeschlossene Netz elektrische Energie eingespeist (Tafel 5).

H. Spanneberg

Fortsetzung  LERNEN & KÖNNEN

Betriebsverhalten
elektrischer Maschinen