



## **Antriebstechnik-Inbetriebnahme Motorbaukasten**

Entwicklungsprojekt Marco Hellebrandt

Matrikelnummer: 009226850

Abgabedatum: 19.02.2016

Prüfer: Prof. Dr.-Ing Arno Bergmann

## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	I
Abbildungsverzeichnis .....	II
1. Einleitung .....	- 1 -
1.1. Abstract/Zusammenfassung .....	- 1 -
1.2. Aufgabenstellung und Zielformulierung .....	- 1 -
2. Grundlagen .....	- 2 -
2.1. Maxwell Gleichungen .....	- 2 -
2.2. Lorentzkraft .....	- 3 -
2.3. Elektromagnetisches Induktionsgesetz .....	- 6 -
3. Elektrische Maschinen .....	- 11 -
3.1. Gleichstrommaschine .....	- 11 -
3.1.1. Aufbau und Funktionsweise .....	- 11 -
3.1.2. Diskussion des Ersatzschaltbildes .....	- 16 -
3.1.3. Praktikumsversuch und Lernziele .....	- 17 -
3.2. Induktionsmaschine .....	- 21 -
3.2.1. Aufbau und Funktionsweise .....	- 21 -
3.2.2. Diskussion des Ersatzschaltbildes .....	- 25 -
3.2.3. Praktikumsversuch und Lernziele .....	- 28 -
3.3. Synchronmaschine .....	- 31 -
3.3.1. Aufbau und Funktionsweise .....	- 31 -
3.3.2. Diskussion des Ersatzschaltbildes .....	- 34 -
3.3.3. Praktikumsversuch und Lernziele .....	- 36 -
4. Sicherheitsbewertung .....	- 41 -
5. Fazit .....	- 41 -
Literaturverzeichnis .....	III

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Linke Hand Regel .....	4 -
Abbildung 2: bewegter Leiter in einem homogenen Magnetfeld .....	6 -
Abbildung 3: Vereinheitlichung des Elektromagnetismus .....	7 -
Abbildung 4: Kreisfläche zur Veranschaulichung der elektromagnetischen Induktion .....	8 -
Abbildung 5: Kreisfläche durchsetzt von einem magnetischen Fluss und der infolge der induzierten Spannung fließende Strom im Rand .....	9 -
Abbildung 6: Flussänderung bezogen auf eine Kreisfläche und ihre elektromagnetischen Auswirkungen .....	10 -
Abbildung 7: prinzipieller Aufbau einer Gleichstrommaschine .....	12 -
Abbildung 8: Kommutationsvorgang .....	14 -
Abbildung 9: Ersatzschaltbild einer fremderregten Gleichstrommaschine .....	16 -
Abbildung 10: Aufbau Gleichstrommaschine mit Motorbaukasten .....	18 -
Abbildung 11: $n=f(I_e)$ -Gleichstrommaschine .....	20 -
Abbildung 12: $n=f(U_a)$ -Gleichstrommaschine .....	21 -
Abbildung 13: Kennwerte des Schlupf bei unterschiedlichen Betriebspunkten .....	23 -
Abbildung 14: Moment der Induktionsmaschine als Funktion der Drehzahl .....	24 -
Abbildung 15: vereinfachtes einphasiges Ersatzschaltbild der Induktionsmaschine .....	25 -
Abbildung 16: magnetischer Fluss zwischen Rotor und Stator mit Streuflussanteilen .....	26 -
Abbildung 17: Aufbau Induktionsmaschine mit Motorbaukasten .....	28 -
Abbildung 18: Analogie H-Atom <--> magnetischer Dipol .....	32 -
Abbildung 19: Oberflächenstrombelag in einem Permanentmagneten .....	33 -
Abbildung 20: Moment der Synchronmaschine als Funktion des Polradwinkels .....	33 -
Abbildung 21: vereinfachtes ESB Synchronmaschine .....	34 -
Abbildung 22: Synchrongenerator Aufbau mit Motorbaukasten .....	36 -
Abbildung 23: Ankerstrom des Gleichstrommotors zum Erregerstrom des Synchrongenerators .....	39 -
Abbildung 24: Drehzahl als Funktion zum Erregerstrom .....	40 -

## **1. Einleitung**

### **1.1. Abstract/Zusammenfassung**

Dieses empirische Projekt hat die Inbetriebnahme eines Motorbaukastens und die Entwicklung von dazugehörigen Praktikumsaufgaben zum Ziel.

Die Inbetriebnahme und das dafür notwendige Verständnis führen zu den beiden fundamentalen Naturgesetzen, die sich die elektrischen Maschinen zu Nutze machen, der Lorentzkraft und der elektromagnetischen Induktion.

Diese beiden Gesetze dienen während des gesamten Entwicklungsprozess als fundamentale Basis um Motor- und Generatoranwendungen der unterschiedlichen Maschinen zu erklären und werden dementsprechend im Grundlagenkapitel vertiefend ausgeführt.

Der Motorbaukasten weist erhebliche Mängel beim Aufbau der Maschinen auf. Sei es die, infolge der baulichen Asymmetrie, unterschiedliche Luftspaltbreite zwischen Rotor und Stator, die Unwucht in den Rotorwellen oder die mangelhafte elektrische Isolierung. Dennoch zeigt das offene System des Baukastens, das zusätzlich selbst aufgebaut und elektrisch angeschlossen werden muss, sehr einfach die grundlegenden physikalischen Effekte, auf denen alle elektrische Maschinen basieren. Es ist daher für die Entwicklung des physikalischen Verständnisses der Antriebstechnik hervorragend geeignet. Dieser Sachverhalt führte, innerhalb dieses Projekts, zu der Prämisse mit Hilfe des Baukastens physikalische Effekte anschaulich zu machen, die beim Betrieb hocheffizienter moderner Maschinen nicht zugänglich sind. Beispielhaft dafür ist die Messung des induzierten Rotorstroms bei der Induktionsmaschine und seinen zeitlichen Verlauf in Abhängigkeit zur Drehzahl (Kapitel 3.2.3.).

Die entwickelten Ergebnisse wurden teils niedergeschrieben oder in Kennlinien dargestellt. Des Weiteren bietet der Baukasten die Möglichkeit weitere physikalische Phänomene zu untersuchen und für die Lehre sichtbar zu machen. Diese Arbeit kann dabei als Hilfsmittel Verwendung finden.

### **1.2. Aufgabenstellung und Zielformulierung**

Ziel dieses Projektes ist die Inbetriebnahme eines bestehenden Motorbaukastens im Labor „Elektrische Antriebe“ für die Verwendung im Praktikum der Lehrveranstaltung „Aktorik 2“ für Mechatroniker und „Antriebstechnik“ für Elektrotechniker

Um dieses Ziel zu erreichen solle folgende Aufgaben durchgeführt werden:

- Inbetriebnahme folgender Motortypen mit bestehenden Teilen:
  - Gleichstrommaschine
  - Asynchronmaschine
  - Synchronmaschine

Gegebenenfalls ist der Ersatz fehlender oder beschädigter Teile mit Herrn Putz abzustimmen.

- Erarbeitung von Praktikumsversuchen für jede Maschine

## 2. Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Maxwell Gleichungen, die Lorentzkraft und das elektromagnetische Induktionsgesetz thematisiert. Das Verständnis über die grundlegenden physikalischen Phänomene und ihrer mathematischen Beschreibung ist unverzichtbar für das Gesamtverständnis der Funktionsweise elektrischer Maschinen und wird daher vertiefend ausgeführt.

### 2.1. Maxwell Gleichungen

Die vier Maxwell Gleichungen beschreiben die physikalischen Prinzipien des Elektromagnetismus und sind daher auch die Basis aller elektrischen Maschinen. [ELE]

- $\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$  (1) -Gauß'sches Gesetz

**Elektrische Ladungen sind Quellen elektrischer Felder.**

- $\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$  (2) -keine magnetischen Monopole

**Es existieren keine magnetischen Ladungen. Alle Magnetfelder sind daher Wirbelfelder.**

- $\vec{\nabla} \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0$  (3) -Faraday'sches Gesetz

**Ein sich zeitlich änderndes Magnetfeld erzeugt elektrische Wirbelfelder.**

- $\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$  (4) -Amperes Gesetz und Maxwellscher Verschiebungsstrom

**Ein sich zeitlich änderndes elektrisches Feld erzeugt ein magnetisches Wirbelfeld.**

Für ein vertiefendes Verständnis der Maxwellgleichungen wird auf die weiterführende Literatur verwiesen [ELE].

## 2.2. Lorentzkraft

Zusammen mit den Maxwellgleichungen und den Zustandsgleichungen (Gleichungen 5 und 6) über die Verknüpfung der elektromagnetischen Felder mit ihren jeweiligen Erregungen, beschreibt die Lorentzkraft die Elektrodynamik vollständig.

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (5)$$

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \vec{B} \quad (6)$$

[TPH] [TPE]

Sie ist nach dem niederländischen Physiker Hendrik Antoon Lorentz<sup>1</sup> benannt und beschreibt eine mechanische Kraft auf die Bewegung geladener Punktteilchen, welche durch äußere elektromagnetische Felder wirksam wird.

Die mechanische Kraftauswirkung bedingt durch elektromagnetische Felder ist eine Verbindung zwischen den physikalischen Teilgebieten der klassischen Mechanik und der Elektrodynamik. Die Lorentzkraft ist von elementarer Bedeutung für die elektromechanischen Energiewandler (elektrische Maschinen).

$$\vec{F} = q \left( \vec{E}(\vec{r}) + \vec{v} \times \vec{B}(\vec{r}) \right) \quad (7)$$

$\vec{F}$ - Kraft auf die Ladung

q - elektrische Ladung

$\vec{E}(\vec{r})$ - elektrisches Feld

$\vec{v}$  - Geschwindigkeit

$\vec{B}(\vec{r})$ - magnetische Flussdichte

Wie in Gleichung (7) dargestellt besitzt die Lorentzkraft eine magnetische und eine elektrische Komponente. Der elektrische Anteil der Kraft lenkt positive Teilchen in Richtung des elektrischen Feldes hin zum negativen Potential ab und negative Ladungen entgegen der Wirkrichtung des Feldes (zum positiven Potential). [TPH] [EAG]

Gleichung 7 zeigt, dass der magnetische Anteil der Lorentzkraft durch das Vektorprodukt der Geschwindigkeit der bewegten Ladung und der magnetischen Flussdichte bestimmt wird. Ruhende Ladungen hingegen erfahren keine Kraftwirkung. Die Geschwindigkeit, sowohl als auch die magnetische Flussdichte, sind Vektoren und somit richtungsabhängig. Das Vektorprodukt dieser beiden Komponenten ist größer Null, sofern sie nicht dieselbe

---

<sup>1</sup> Hendrik Antoon Lorentz (\*18. Juli 1853 in Arnheim; † 4. Februar 1928 in Haarlem) niederländischer Mathematiker und Physiker

Richtung aufweisen. Maximal wird das Produkt bei einem  $90^\circ$ - Winkel zwischen Magnetwirkung und Geschwindigkeit.

Das Ergebnis des Kreuzproduktes bildet zusammen mit den Anfangsvektoren ein Rechtssystem und kann in Bezug auf die Lorentzkraft mit Hilfe der linken oder rechten Hand Regel dargestellt werden (siehe Abbildung 1). Der Unterschied zwischen diesen beiden sehr plastischen Regeln besteht in der Definition der Stromrichtung. Die linke Hand findet Verwendung, sofern der Daumen in Richtung der Elektronen, oder der physikalischen Stromrichtung zeigt und die rechte Hand bei Verwendung der technischen Stromrichtung mit imaginären positiven Ladungsträgern. Identisch bleibt bei diesen beiden Varianten der Regel die Richtung des Zeigefingers, der in Richtung der magnetischen Flussdichte zeigt und die Krafrichtung, die durch den Mittelfinger dargestellt wird.

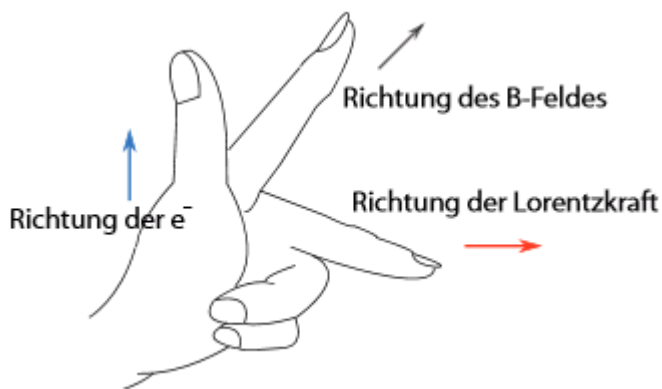


Abbildung 1: Linke Hand Regel [\[Link1\]](#)

Damit eine Kraftwirkung entsteht ist es nicht zwingend erforderlich, dass die bewegten Ladungsträger und die magnetische Flussdichte senkrecht aufeinander stehen. Allerdings ist der Betrag des Ergebnisses proportional zur Sinusfunktion des Winkels zwischen den beiden Vektoren und somit maximal im senkrechten Fall. Das Ergebnis des Kreuzprodukts steht per Definition immer orthogonal auf der von den beiden anderen Vektoren aufgespannten Ebene.

Die Momentbildung, während des Betriebs elektrischer Maschinen, ist einzig auf die Lorentzkraft zurückzuführen.

Ferner kann über die Lorentzkraft auch die elektromagnetische Induktion durch die Bewegung elektrischer Ladungsträger hergeleitet werden. Allerdings führt sie zu keiner mathematischen Formulierung für die elektromagnetische Induktion infolge einer magnetischen Flussänderung.

Die elektrische Komponente der Kraft kann mit negativem Vorzeichen gleich der magnetischen gesetzt werden was zu folgender Darstellung führt:

$$\vec{F}_{el} = q\vec{E}(\vec{r}) = -q(\vec{v} \times \vec{B}(\vec{r})) \quad (8)$$

$$\text{mit: } U_{ind} = \vec{l} * \vec{E} \quad (9) \text{ folgt}$$

$$U_{ind} = -\vec{l}(\vec{v} \times \vec{B}(\vec{r})) \quad (10)$$

Sofern alle Vektoren senkrecht zueinander stehen ergibt sich für die induzierte Spannung

$$U_{ind} = -|\vec{l}||\vec{v}||\vec{B}| \quad (11)$$

Die induzierte Spannung ist folglich abhängig von der Länge  $l$  eines Leiters, seiner Geschwindigkeit  $v$  und der Stärke eines Magnetfeldes.

Bewegt sich eine Leiterschleife mit der konstanten Geschwindigkeit  $\vec{v}$  durch ein homogenes Magnetfeld (Feldrichtung in das Bild hinein), so wirkt die Lorentzkraft auf die Ladungsträger innerhalb des eigentlich neutralen Leiters (Abbildung 2). Frei bewegliche Elektronen bewegen sich mit dem Leiter mit und erfahren folglich eine Lorentzkraft resultierend aus der Wechselwirkung mit dem Magnetfeld. Diese Kraft sorgt für eine Verschiebung der Ladungsträger innerhalb des Kupferdrahtes, woraufhin sich Regionen mit Elektronenüberschuss und Elektronenmangel ausbilden. Diese Potentialdifferenz kann mit einem Spannungsmessgerät in Form der induzierten Spannung nachgewiesen werden. Allerdings hebt sich diese Potentialdifferenz auf, sobald sich die gesamte Schleife im Magnetfeld gleichförmig bewegt. Eine Induktionsspannung tritt nur auf, wenn sich die Fläche des von einer Spule umschlossenen Magnetfelds mit der Zeit ändert.

$$U_{ind} = -|\vec{l}||\vec{v}||\vec{B}| \quad (11)$$

$$\text{mit } \frac{\Delta x}{\Delta t} = \vec{v} \quad \& \quad l * \Delta x = \Delta A \quad (12)$$

$$\text{folgt: } U_{ind} = -N\vec{B} \frac{\Delta A}{\Delta t} \quad (13)$$

$N$  ist dabei die Windungszahl einer Spule (hier  $N=1$ ). Die Flächenänderung kann aber genauso als Änderung der durchsetzenden Flussdichte interpretiert werden, was zur Gleichung (14) führt.

$$U_{ind} = -N\vec{A} \frac{\Delta B}{\Delta t} \quad (14)$$



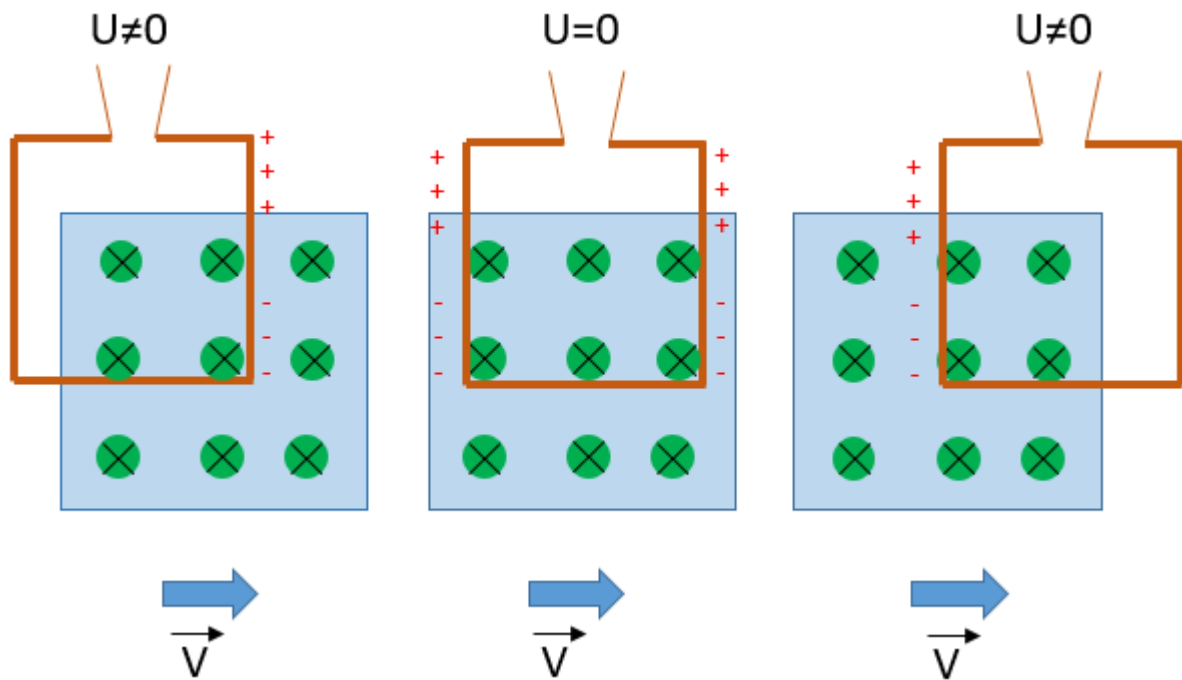


Abbildung 2: bewegter Leiter in einem homogenen Magnetfeld

Die Gleichungen (13) und (14) können durch die Einführung der physikalischen Größe des magnetischen Flusses  $\Phi = \vec{B} \vec{A}$  vereinheitlicht werden und ergeben Gleichung (15)

$$U_{\text{ind}} = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (15)$$

Bei der Betrachtung der Änderung des magnetischen Flusses für infinitesimal kleine Zeitabschnitte ergibt sich ein Ausdruck für das Induktionsgesetz in Integraler Form, das im folgenden Kapitel näher beschrieben wird. [ELE] [EAG] [EMTP] [TEM] [EMA] [HSBO]

### 2.3. Elektromagnetisches Induktionsgesetz

Das Faraday'sche Induktionsgesetz (Kapitel 2.1. Gleichung(3)) verknüpft die Entstehung elektrischer Felder mit der zeitlichen Änderung magnetischer. Zusammen mit dem Ampereschen Durchflutungsgesetz (Kapitel 2.1. Gleichung(4)), das die Entstehung magnetischer Felder durch elektrischen Strom beschreibt, vereinheitlicht es elektrische und magnetische Phänomene miteinander. Seit der Entdeckung dieser mathematischen Gleichungssysteme und ihrer Bedeutung werden sie als unterschiedliche Perspektiven einer einzigen Energieform interpretiert, dem Elektromagnetismus. Im Bereich der elektrischen Maschinen spielen induzierte Spannungen und Ströme eine herausragende Rolle bei ihrer Berechnung und Auslegung, sowie für das Verständnis ihrer Funktionsweise. Aufgrund dieser Tatsache wird nachfolgend zum einen die mathematische Beschreibung dieses physikalischen Gesetzes betrachtet, sowie eine bildliche Erklärung des Phänomens dargestellt. [IGET]

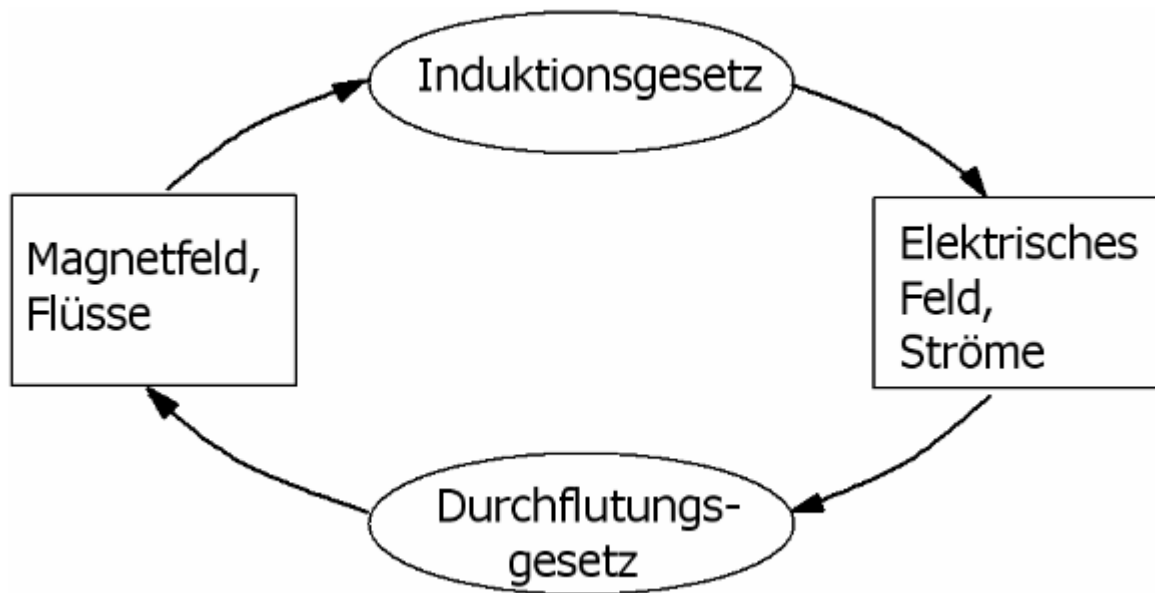


Abbildung 3: Vereinheitlichung zum Elektromagnetismus [IGET]

Abbildung 3 zeigt die Wechselwirkung elektrischer und magnetischer Phänomene anhand des Induktions- und Durchflutungsgesetz.

Die von einem sich zeitlich ändernden Magnetfeld erzeugten elektrischen Feldlinien ergeben geschlossene Kreise und werden als „Wirbelfeld“ bezeichnet. Elektrische Ladungen hingegen erzeugen ein elektrisches Feld mit definierten Quellen und Senken, das daher gerichtet im Raum dargestellt werden kann.

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \quad (16)$$

Gleichung 16 zeigt das Induktionsgesetz in differentieller Form. Der Nabla-Operator  $\vec{\nabla}$  stellt eine Abkürzung für die jeweiligen partiellen Ableitungen im Raum dar  $(\frac{\partial}{\partial x} ; \frac{\partial}{\partial y} ; \frac{\partial}{\partial z})$ .

Das Kreuzprodukt des Nabla-Operators mit dem Vektor des elektrischen Feldes wird auch als „Rotation“ bezeichnet ( $\vec{\nabla} \times \vec{E} = \text{rot} \vec{E}$ ) und ergibt ein Vektorfeld das die inneren Wirbeltendenzen des E-Feldes kennzeichnet, die proportional zur zeitlichen Änderung des Magnetfelds sind. [ELE]

Mit Hilfe des Satz von Stokes<sup>2</sup> lässt sich die differentielle Form des Induktionsgesetzes in eine Integralform überführen (Gleichung (17)), die nachfolgend in die Teilgleichungen 17.1 und 17.2 separiert und anschließend analysiert wird (Auf die Herleitung wurde im Rahmen

<sup>2</sup> Sir George Gabriel Stokes (\*13. August 1819 in Skreen, County Sligo; † 1. Februar 1903 in Cambridge) war ein irischer Physiker und Mathematiker

dieses Entwicklungsprojektes verzichtet – es wird daher auf die weiterführende Literatur verwiesen [TPE]).

$$U_{\text{ind}} = \oint_s \vec{E} d\vec{s} = - \frac{d}{dt} \int_A \vec{B} d\vec{A} = - \frac{d\psi}{dt} \quad (17)$$

$$U_{\text{ind}} = \oint_s \vec{E} d\vec{s} \quad (17.1)$$

$$\int_A \vec{B} d\vec{A} = \psi \quad (17.2)$$

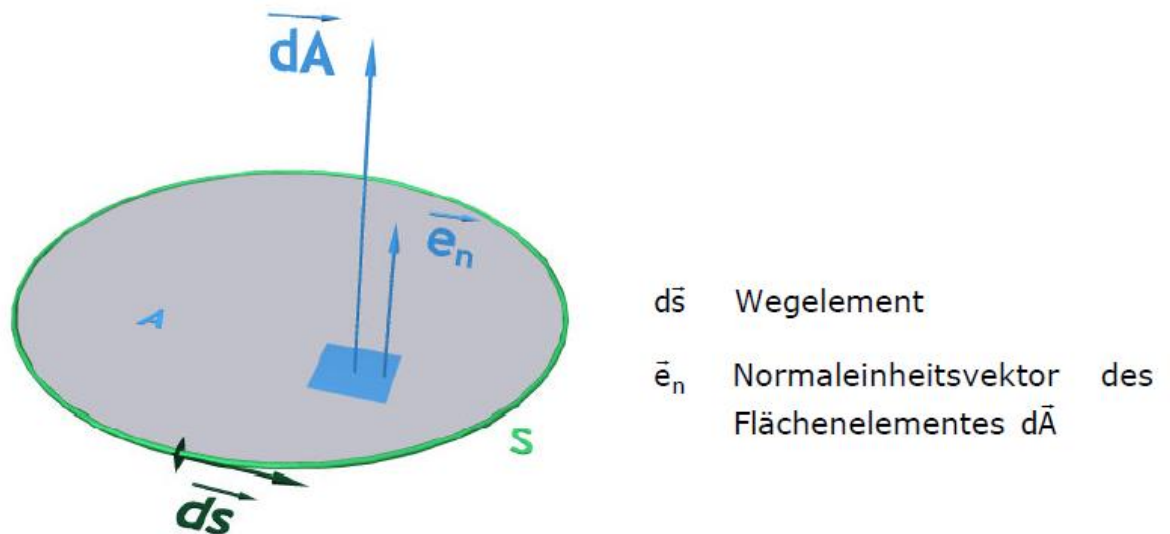


Abbildung 4: Kreisfläche zur Veranschaulichung der elektromagnetischen Induktion [IGET]

Die Teilgleichung (17.1) beschreibt die induzierte Spannung in Folge der induzierten elektrischen Feldstärke entlang des Randes  $s$  einer Fläche  $A$  (siehe Abbildung 4).

Zur Induktion eines elektrischen Wirbelfeldes muss diese Fläche von einem sich zeitlich ändernden magnetischen Fluss durchsetzt sein.

Teilgleichung (17.2) zeigt den Zusammenhang zwischen der magnetischen Flussdichte  $B$  und dem verketteten magnetischen Fluss  $\psi$ . Das Integral von  $B$  über die von der Schleife  $s$  aufgespannte Fläche ergibt den verketteten magnetischen Fluss  $\psi$ .

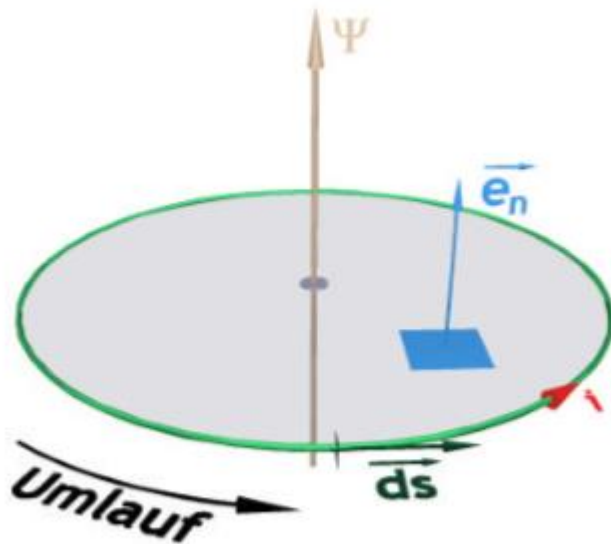


Abbildung 5: Kreisfläche durchsetzt von einem magnetischen Fluss und der infolge der induzierten Spannung fließende Strom im Rand [IGET]

Der verkettete magnetische Fluss ist aus physikalischer Sicht lediglich eine Erweiterung des magnetischen Flusses  $\Phi$  (bekannt aus Kapitel 2.2.). Der magnetische Fluss beschreibt die magnetische Flussdichte bezogen auf eine Fläche. Der verkettete Fluss ergibt sich aus der Integration der magnetischen Flussdichte mit der gesamten von ihm durchsetzenden Fläche. Bei der Verwendung einer konzentrischen Spule mit  $N$  Windungen ergibt sich der verkettete Fluss aus der Integration aller magnetischen Flüsse bezogen auf die Kreisflächen aller Windungen, sodass näherungsweise die Gleichung

$$\psi = N\Phi \quad (18) \text{ erfüllt ist.}$$

Die in der praktischen Berechnung zu berücksichtigende Windungszahl führte letztendlich zur Etablierung eines eigenen Formelbuchstabens für diese physikalische Größe.

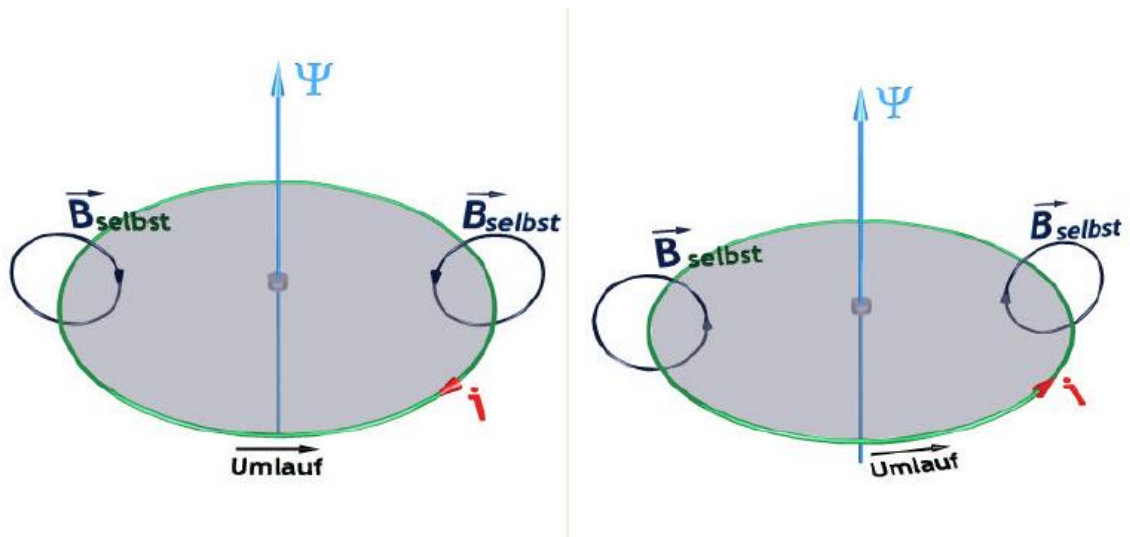


Abbildung 6: Flussänderung bezogen auf eine Kreisfläche und ihre elektromagnetischen Auswirkungen [IGET]

Abbildung 6 zeigt die beiden möglichen zeitlichen Änderungen des magnetischen Flusses und ihre, durch das Induktionsgesetz, definierten elektromagnetischen Auswirkungen.

Das linke Bild zeigt eine **Flusszunahme** wodurch eine Spannung innerhalb der grünen geschlossenen Leiterschleife erzeugt wird, die wiederum den Induktionsstrom  $I$  (rot) zur Folge hat. Aus dem Ampereschen Durchflutungsgesetz ist bekannt, dass jeder Strom ein Magnetfeld erzeugt. Die durch den Induktionsstrom erzeugte magnetische Flussdichte ( $B_{selbst}$ ) ist so ausgerichtet, dass es der ursächlichen Flussänderung entgegenwirkt. Dieser Vorgang ist als **Lenzsche Regel** bekannt und erfüllt den Energieerhaltungssatz der Physik. Ferner ist auch das durch den Strom erzeugte Magnetfeld ( $B_{selbst}$ ) mit der Fläche  $A$  verknüpft und führt aufgrund seiner, in Bezug auf den eigentlichen magnetischen Fluss  $\Psi$  gegensätzlichen, zeitlichen Änderung ebenfalls zu einer Induktionsspannung, die der ersten entgegengerichtet ist. Dieser Vorgang wird als Selbstinduktion bezeichnet und ist bspw. für die Phasenverschiebung des Stroms bei der Verwendung von induktiven Impedanzen verantwortlich.

Das rechte Schaubild zeigt eine **Flussabnahme**, welche eine gegenteilige Wirkkette nach sich zieht und schließlich ebenfalls die Lenzsche Regel erfüllt.

$$\Psi > 0 \ \& \ \frac{d\Psi}{dt} < 0 \ \rightarrow \ U_{ind} > 0 \ \rightarrow \ I > 0 \ \rightarrow \ \frac{dB_{selbst}}{dt} > 0$$

Zusammenfassend kann formuliert werden, dass jedes sich zeitlich ändernde Magnetfeld ein elektrisches Wirbelfeld um sich herum induziert. Befindet sich eine geschlossene Leiterschleife der Länge  $s$  (Integrationsweg) innerhalb dieses Magnetfelds, so induziert der

gesamte magnetische Fluss (verketteter Fluss  $\Psi$ ) innerhalb der Leiterschleife (in der von der Leiterschleife aufgespannten Fläche A) eine Spannung in diese.

[ELE] [EAG] [EMTP] [TEM] [EMA] [HSBO]

### **3. Elektrische Maschinen**

Elektrische Maschinen sind elektromechanische Energiewandler. Im Motorbetrieb wandeln sie elektromagnetische Energie in mechanische um und im Generatorbetrieb verläuft dieser Prozess umgekehrt. Abstrahierend kann formuliert werden, dass im Generatorbetrieb die Erzeugung elektrischer Energie im Fokus steht, während im Motorenbetrieb die Momentbildung maßgeblich ist. Alle elektrischen Maschinen verwenden dabei dieselben Grundprinzipien.

Die in Kapitel 2.2. beschriebene Lorentzkraft ist unmittelbar für die Momenterzeugung verantwortlich. Daher liegt ein Schwerpunkt, innerhalb der Beschreibung der Funktionsweise, in der prinzipiellen Ausprägung dieser Kraft.

Das zweite wichtige Grundprinzip der Elektromaschinen ist das Induktionsgesetz (Kapitel 2.3.). Die Wechselwirkung zwischen elektrischer und magnetischer Energie ist für die mathematische Erklärung und Auslegung der einzelnen Maschinen extrem wichtig. Ferner ist sie aber auch der Grund für die Erzeugung elektrischer Energie, vermittels der kinetischen Bewegung einzelner Maschinenelemente und somit verantwortlich für die Generatoranwendungen.

Ziel dieses Entwicklungsprojektes ist unter anderem der Aufbau und die Inbetriebnahme einer Gleichstrom-, Asynchron- und Synchronmaschine. In diesem Kapitel werden daher alle drei Maschinentypen nach charakteristischen Kriterien definiert und ihre Funktionsweise dargestellt.

#### **3.1. Gleichstrommaschine**

##### **3.1.1. Aufbau und Funktionsweise**

Gleichstrommaschinen werden ihrem Namen nach mit Gleichstrom betrieben. Im Gegensatz zu den Drehfeldmaschinen besitzen sie den enormen Vorteil einer leicht variierbaren Drehzahl, da diese direkt von der angelegten Spannung abhängig ist.

Die Maschine wird in einen Stator- und einen Rotorkreis unterteilt und ihre Funktionalität erläutert.

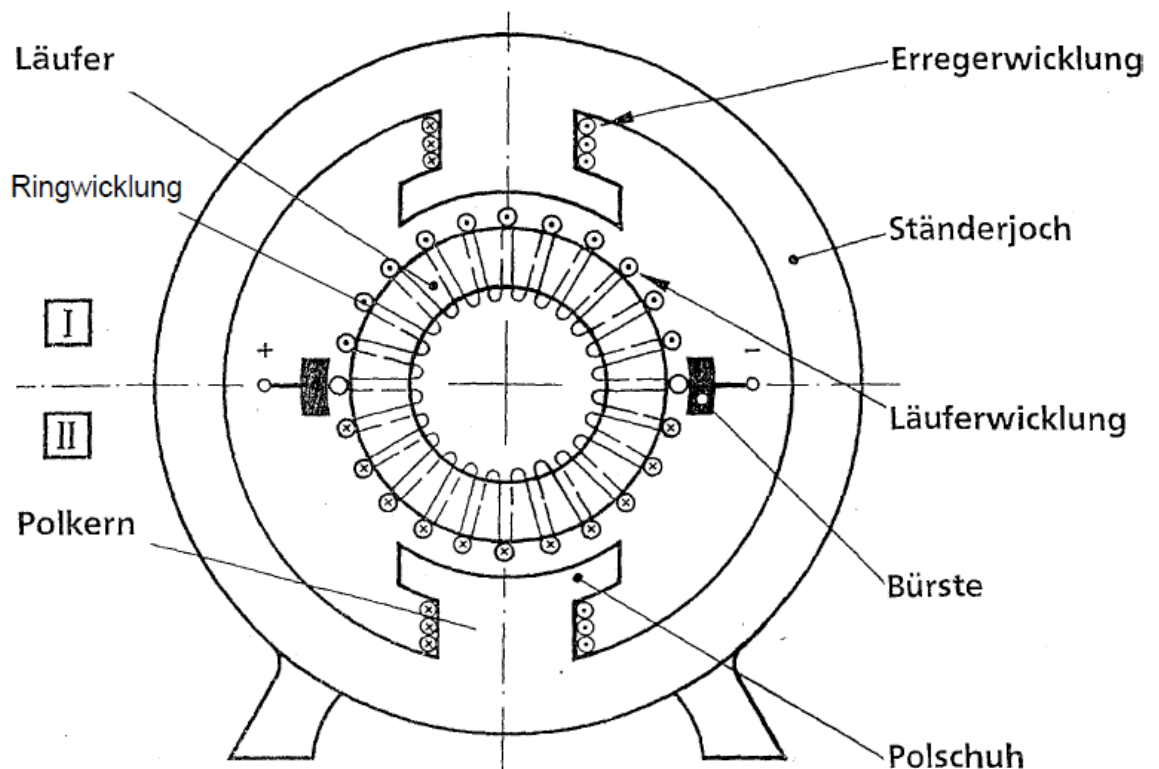


Abbildung 7:prizieller Aufbau einer Gleichstrommaschine [ILEA-1]

Der Stator ist der feststehende Teil der Maschine und besteht aus Erregerwicklungen, die an einem massiven Eisenring angebracht sind. Die Erregerwicklungen sind derart angeschlossen und räumlich verteilt, dass sie ein magnetisches Gleichfeld erzeugen. Ferner wird dieses Hauptfeld gerichtet in den Rotor geleitet, der somit von einem annähernd homogenen Magnetfeld durchsetzt ist. Damit das Hauptfeld konzentriert und gleichmäßig den Rotor durchsetzen kann, besitzen die Erregerwicklungen Polkerne und Polschuhe aus Eisen. Dieses magnetisch gut leitfähige Material leitet die Magnetfeldlinien gerichtet und mit einem kleinen magnetischen Widerstand in den Rotor. An den Polschuhen bildet sich entweder ein magnetischer Nord- oder Südpol aus, wobei die Kombination von gegenüberliegendem Nord- und Südpol als Polpaar bezeichnet wird. Die Polpaarzahl ist die aufsummierte Anzahl magnetischer Dipole und ist eine charakteristische Kennzahl einer jeden elektrischen Maschine. [ILEA-1]

Im Motorenbetrieb dient der Stator Kreis der Magnetfelderzeugung, dessen Stärke durch die Erregerspannung und den Erregerstrom definiert werden.

Der Rotor trägt, ebenso wie der Stator, Leiterwicklungen und ist über eine Welle drehbar gelagert angebracht. Die Wicklungen des Rotors werden an eine Gleichspannungsquelle angeschlossen und folglich fließt ein elektrischer Gleichstrom durch sie hindurch. In Folge dieser Anordnung befindet sich ein stromdurchflossener Leiter in einem Magnetfeld,

weshalb nach Kapitel 2.2. eine Lorentzkraft auf den Leiter einwirkt. Diese Kraft ist direkt vom Erreger- und Ankerstrom abhängig und wirkt tangential auf den Rotor, was eine Beschleunigung mit sich bringt. Aufgrund der Einprägung eines Gleichstroms entstehen auf eine Leiterwicklung zwei sich gegenseitig aufhebende Lorentzkräfte. Befindet sich der stromdurchflossene Leiter unterhalb des magnetischen Nordpols wirkt die Lorentzkraft entgegengesetzt zu dem Betriebspunkt, in dem die Leiterschleife nah am Südpol liegt. Dies führt zu einer Aufhebung der einzelnen Kraftkomponenten und überführt die Maschine in einen ruhenden Gleichgewichtszustand. Damit die Maschine eine stetige Rotationsbewegung ausführen kann ist eine Stromwendung des Ankerstroms im Bereich der magnetisch neutralen Zone notwendig. Die neutrale Zone des Magnetfelds ist der Bereich in der Mitte eines magnetischen Dipols. Der Einflussbereich beider entgegengesetzter Pole ist identisch und hebt sich in seiner Kraftwirkung auf den stromdurchflossenen Leiter auf.

Die Stromwendung wird von einem sogenannten Kommutator ausgeführt, der im Wesentlichen aus einzelnen mit den Ankerwicklungen verbundenen und gegeneinander isolierten Lamellen besteht, die über Schleifkontakte von außen mit einer Gleichspannungsquelle verbunden sind.



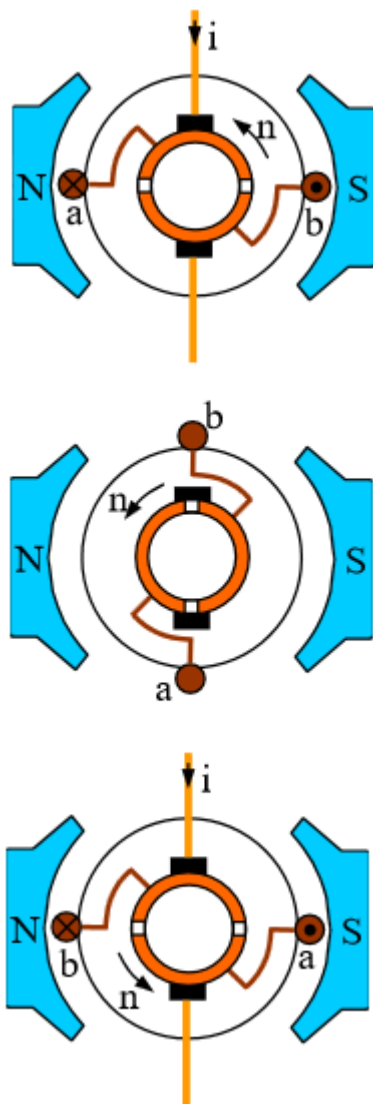


Abbildung 8: Kommutationsvorgang [EAA]

Abbildung 8 zeigt schematisch den Stromwendevorgang anhand einer Leiterschleife für drei signifikante Betriebspunkte. Der Kommutator besteht aus zwei Kohlebürsten, über die der Strom  $i$  eingespeist wird und aus zwei gegeneinander galvanisch getrennten Lamellen. Die Lamellen sind jeweils mit einem Ende der Leiterwicklung verbunden. Das obere Bild zeigt wie der Strom über eine Kohlebürste in die Leiterschleife fließt, am anderen Ende wieder heraus und letztlich über die zweite Lamelle und der schleifenden Kohlebürste aus dem Bild hinaus.

Das mittlere Bild zeigt den Kurzschluss beider Lamellen über die Kohlebürsten. Dieser Zustand tritt auf, sofern sich die Leiterenden in der neutralen Zone des äußeren Hauptfeldes befinden. Die einzelnen Leiterwicklungen besitzen eine Induktivität, wodurch zum einen ein kontinuierlicher Stromfluss stattfindet und zum anderen ein Öffnen der Kontaktierung eine große Induktionsspannung mit sich bringen würde. Der Kurzschluss

hingegen führt zu einem stetigen Abbau des Leiterstroms, bis schließlich die jeweilige Kohlebürste die Lamelle komplett gewechselt und den Stromfluss damit kommutiert (umgepolt) hat.

Das untere Bild zeigt den abgeschlossenen Stromwendevorgang und ist identisch mit dem Ersten. Der Kommutator gewährleistet somit, dass unter einem bestimmten Magnetpol immer ein Strom in dieselbe Richtung fließt und damit die Krafrichtung der Lorentzkraft immer gleich bleibt und den Motor antreibt.

Demzufolge entsteht bei einer Umdrehung eine Wechselfspannung in der Leiterschleife. Die Kommutierung bewirkt pro Leiterschleife ein wirkendes Moment, das zwischen Null und einem Maximalwert pendelt. Erst durch die Verwendung mehrerer räumlich versetzter Leiterschleifen kann ein annähernd konstantes Drehmoment erzeugt werden.

Rotieren die Ankerwicklungen, erfahren sie zudem ein sich zeitlich änderndes Magnetfeld und nach den Grundlagen aus Kapitel 2.3. wird eine Spannung in sie induziert. Diese induzierte Spannung (auch Gegen-EMK für elektromagnetische Kraft) wirkt nach der Lenzschen Regel ihrer Ursache entgegen (Hauptfeld) und reduziert den Rotorstrom.

Diese Spannung ist nach dem Induktionsgesetz linear abhängig von der Amplitude des Hauptfeldes und der Drehzahl der Maschine. Aus diesem Grund beschränkt sie auch die maximale Drehzahl eines Gleichstrommotors. Je schneller die Drehzahl, desto größer die induzierte Spannung. Da der Rotorstrom von der Spannungsdifferenz der Ankerspannung und dieser induzierten Spannung definiert wird, verkleinert sie so mit zunehmender Drehzahl dessen Strombetrag und folglich auch die antreibende Lorentzkraft. Ist die induzierte Spannung größer als die angelegte Ankerspannung, wird die Leistung zurück ins Netz gespeist und die Maschine als Generator betrieben.

Ein weiterer wichtiger Betriebspunkt, in Bezug auf die Gegen-EMK, stellt der Anlauf der Maschine dar. Da die Maschine in diesem Punkt still steht, ist die induzierte Spannung und damit die Ankerstrombegrenzende physikalische Größe gleich Null. Demzufolge besitzen Gleichstrommaschinen sehr hohe Anlaufströme, die über dem Bemessungswert der einzelnen Bauteile liegen können und daher vielfach durch schaltbare Anlaufwiderstände reduziert werden.

Ein weiteres Merkmal der Gleichstrommaschinen ist die sogenannte Ankerrückwirkung. Die stromdurchflossenen Ankerwicklungen besitzen ebenfalls ein magnetisches Wirbelfeld, das auf der einen Seite den Hauptfluss verstärkt und auf der gegenüberliegenden Seite abschwächt. Dies führt zu einer Verschiebung des Gesamtfeldes und auch der neutralen Zone. Das überlagerte magnetische Feld wird je

nach Maschinenbetrieb (Generator oder Motor) in verschiedene Richtungen verzerrt, weshalb sich der integrierte Kommutator nur schwerlich innerhalb der neutralen Zone befinden kann. Die Stromwendung findet demnach statt, obwohl die Wicklungen noch eine Induktionsspannung aufweisen und es kommt am Kommutator zur Funkenbildung. Große Maschinen besitzen meist Wendepol- und Kompensationswicklungen, die der Ankerrückwirkung entgegenwirken und das magnetische Hauptfeld idealisieren.

[ELE] [EAG] [EMTP] [TEM] [EMA] [HSBO]

### 3.1.2. Diskussion des Ersatzschaltbildes

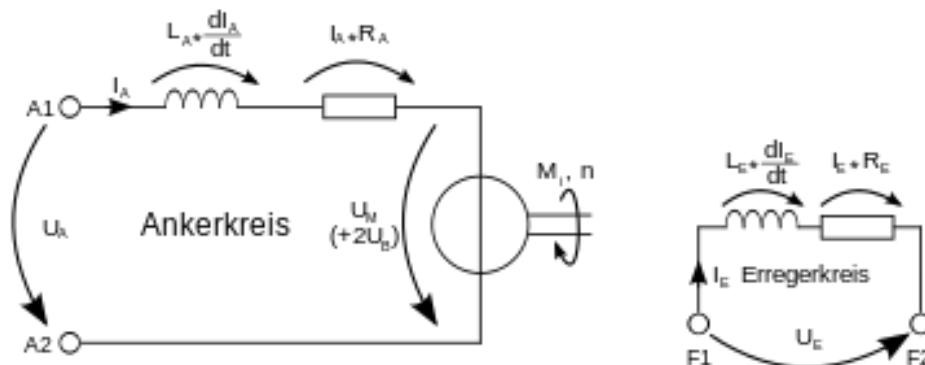


Abbildung 9: Ersatzschaltbild einer fremderregten Gleichstrommaschine [Link2]

Abbildung 9 zeigt das Ersatzschaltbild einer fremderregten Gleichstrommaschine.

Die Maschine besitzt zwei galvanisch voneinander getrennte Schaltkreise, die jeweils eine Induktivität und einen ohmschen Widerstand aufweisen ( $L_A, R_A, L_E$  &  $R_E$ ). Im Ankerkreis befindet sich noch eine zusätzliche Spannungsquelle, die die induzierte Ankerspannung modelliert (Kapitel 3.1.1. – Gegen EMK) und der angelegten Ankerspannung entgegengerichtet ist.

Neben der fremderregten Ausführung sind vor allem noch die Reihen- und Nebenschlussmaschinen zu erwähnen, die die Erregerelemente als Reihen- oder Parallelschaltung im Ankerkreis integriert aufweisen. Allerdings bleibt das physikalische Grundprinzip bei allen Maschinentypen gleich, weshalb lediglich das Ersatzschaltbild der fremderregten Maschine diskutiert wird.

Der Schaltplan zeigt die Separierung von Anker und Erregerkreis. Der Erregerkreis besteht aus der Spannungsversorgung  $U_E$ , sowie aus der Wicklungsinduktivität und ihrem ohmschen Widerstand. Der Ankerkreis ist fast identisch aufgebaut, einzig die induzierte Ankerspannung  $U_i$  muss noch innerhalb dieses Stromkreises bedacht werden. Im

stationären Zustand können die Induktivitäten vernachlässigt werden, was die Berechnung der elektrischen Größen vereinfacht.

#### Mathematische Beschreibung (fremderregte Gleichstrommaschine- stationärer Zustand)

$$U_e = R_e * I_e \quad (19) \text{ (Erregerkreis)}$$

$$U_a = R_a * I_a + U_i \quad (20) \text{ (Ankerkreis)}$$

$$U_i = C_e * n * I_e \quad (21) \text{ (induzierte Spannung)}$$

$$M = C_m * I_a * I_e \quad (22) \text{ (Drehmoment)}$$

$$P_{\text{mech}} = M * \omega = U_i * I_a \quad (23) \text{ (mechanische Leistung)}$$

$$P_{\text{el}} = U_a * I_a + U_e * I_e \quad (24) \text{ (elektrische Leistung)}$$

Dabei sind  $C_m$  und  $C_e$  Maschinenkonstanten, die abhängig von der Konstruktion sind.

Auf die Herleitung der mathematischen Gleichungen der Gleichstrommaschine wird im Rahmen dieses Entwicklungsprojekts verzichtet. Es sei hier auf die weiterführende Literatur [ELE] verwiesen.

#### **3.1.3. Praktikumsversuch und Lernziele**

Bereits in der Einführung wird darauf verwiesen, dass die zu entwickelnden Praktikumsversuche stark auf die physikalische Funktionsweise und den Aufbau der Maschine fokussiert sein werden. Für alle drei Aufbauten (Gleichstrommaschine, Asynchronmaschine und Synchronmaschine) werden Praktikumsvorschläge erarbeitet, die schrittweise von der Identifikation der Maschine über die elektrische Verschaltung bis zur selbstständigen Inbetriebnahme führen. Anschließend werden zusätzliche Messungen erläutert, die das physikalische Verständnis vertiefen sollen.

Abbildung 10 zeigt dazu den Aufbau der Gleichstrommaschine mit Hilfe des Motorbaukastens.

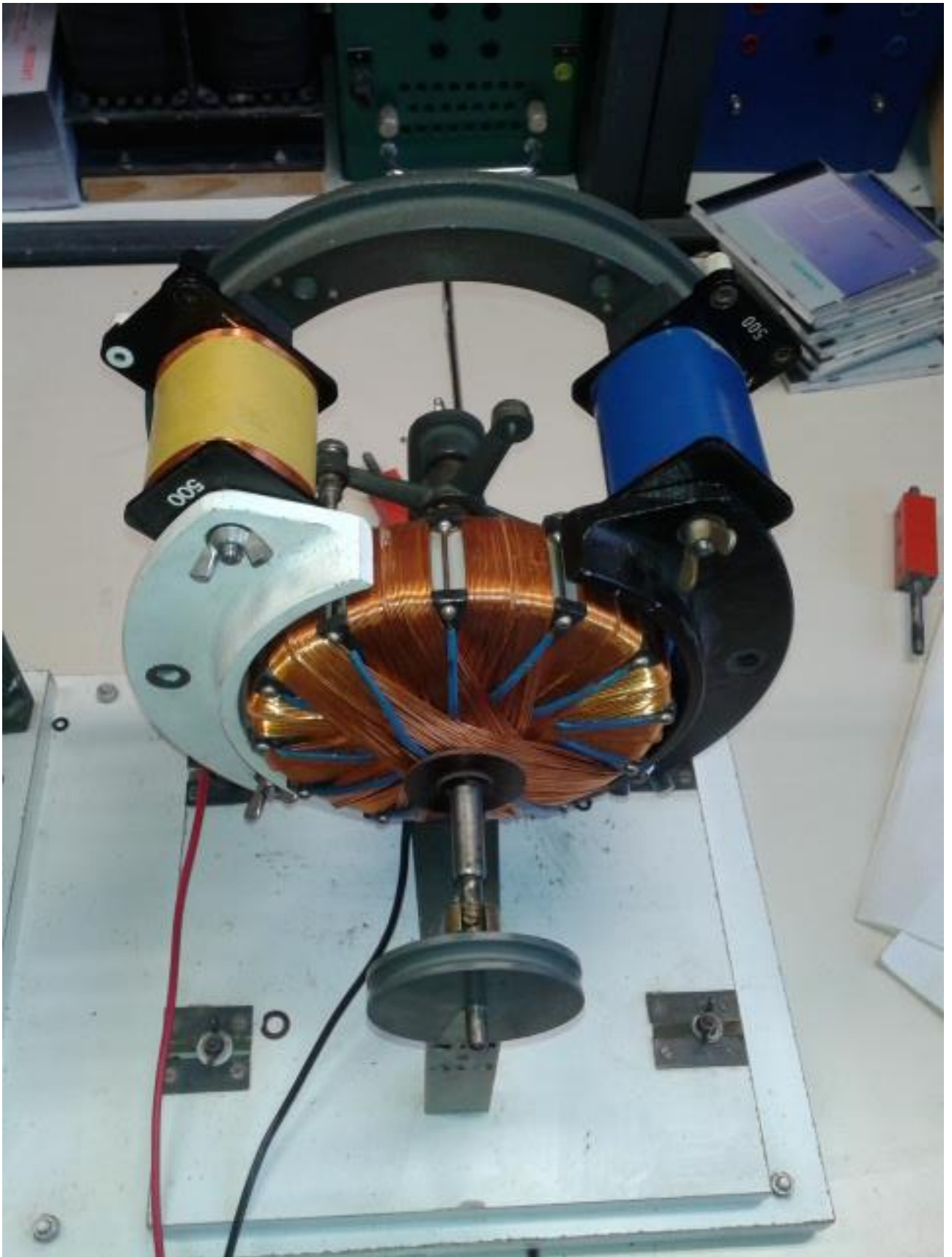


Abbildung 10:Aufbau Gleichstrommaschine mit Motorbaukasten

### Identifikation der Maschine durch den Studenten.

Die Gleichstrommaschine besitzt, im Gegensatz zu den beiden Drehfeldmaschinen, ein Stator Gleichfeld. Die beiden einzigen Polschuhe am Stator kennzeichnen dieses Gleichfeld durch die Ausprägung eines definierten magnetischen Nord- und Südpols.

Ein zweites charakteristisches Merkmal der Maschine ist der Kommutator. Der Kommutator ist anhand der Rotorlamellen und der Kohlebürsten eindeutig zu identifizieren.

### Elektrische Verschaltung

Zunächst sind die Erregerwicklungen der Maschine so anzuschließen, dass sich ein homogenes Gleichfeld bildet. Anschließend soll die Maschine an die Gleichspannungsquelle angeschlossen werden. Dazu ist ein genauer Schaltplan zu zeichnen. Die Maschine kann frei wählbar als Reihenschlussmaschine, Nebenschlussmaschine oder als fremderregte Gleichstrommaschine ausgelegt bzw. verschaltet werden.

### Physikalische Funktionsweise

Im Motorenbetrieb führt eine Lorentzkraft zur angestrebten Momentbildung. Der Student soll erklären können, warum sich diese Kraft ausbildet.

Die stromdurchflossenen Erregerwicklungen erzeugen ein homogenes Magnetfeld, in dem sich die ebenfalls stromdurchflossenen Ankerwicklungen befinden. Mit der rechten oder linken Hand Regel kann die Rotationsrichtung vorab erläutert werden. Zudem kann durch Umpolung von Anker- oder Erregerkreis diese Drehrichtung geändert werden.

Im Generatorbetrieb wird durch die zeitliche magnetische Flussänderung eine Spannung induziert. Die Maschine wandelt mechanische Energie in elektrische um. Der Student erklärt die generelle Funktionsweise eines Gleichstromgenerators anhand des Aufbaus. Wo und wie wird die elektrische Gleichspannung erzeugt?

Die Bewegung eines neutralen Leiterstabs innerhalb eines Magnetfeldes induziert eine Spannung in den Leiterstab. Bei der Gleichstrommaschine darf der Ankerkreis dabei nicht bestromt sein, allerdings muss der Erregerkreis elektrisch angeschlossen werden damit ein Magnetfeld ausgeprägt wird (Kapitel 2.2. & Kapitel 2.3.)

Rotor händisch drehen und die induzierte Spannung aus dem Ankerkreis messen!  
(Generator)

Aufgrund der Ankerrückwirkung verschiebt sich das magnetische Hauptfeld zu einer Seite hin (Kapitel 3.1.1.). Das dadurch entstehende Bürstenfeuer am Kommutator kann anhand des Aufbaus sichtbar gemacht werden.

Was geschieht wenn die Erregung im Betrieb(fremderregt) schlagartig abgeschaltet wird? (Antwort bei der Diskussion der Motorkennlinien).

### Motorkennlinien

Der Student verschaltet die Maschine als fremderregte Gleichstrommaschine und führt zwei unterschiedliche Messreihen durch. Zunächst wird die Abhängigkeit der Drehzahl von der Ankerspannung bei konstanter Erregung untersucht und anschließend die Abhängigkeit der Drehzahl von der Erregung für eine konstante Ankerspannung. Zudem sollen die aufgenommenen Messkurven anhand der Maschinengleichungen diskutiert werden.

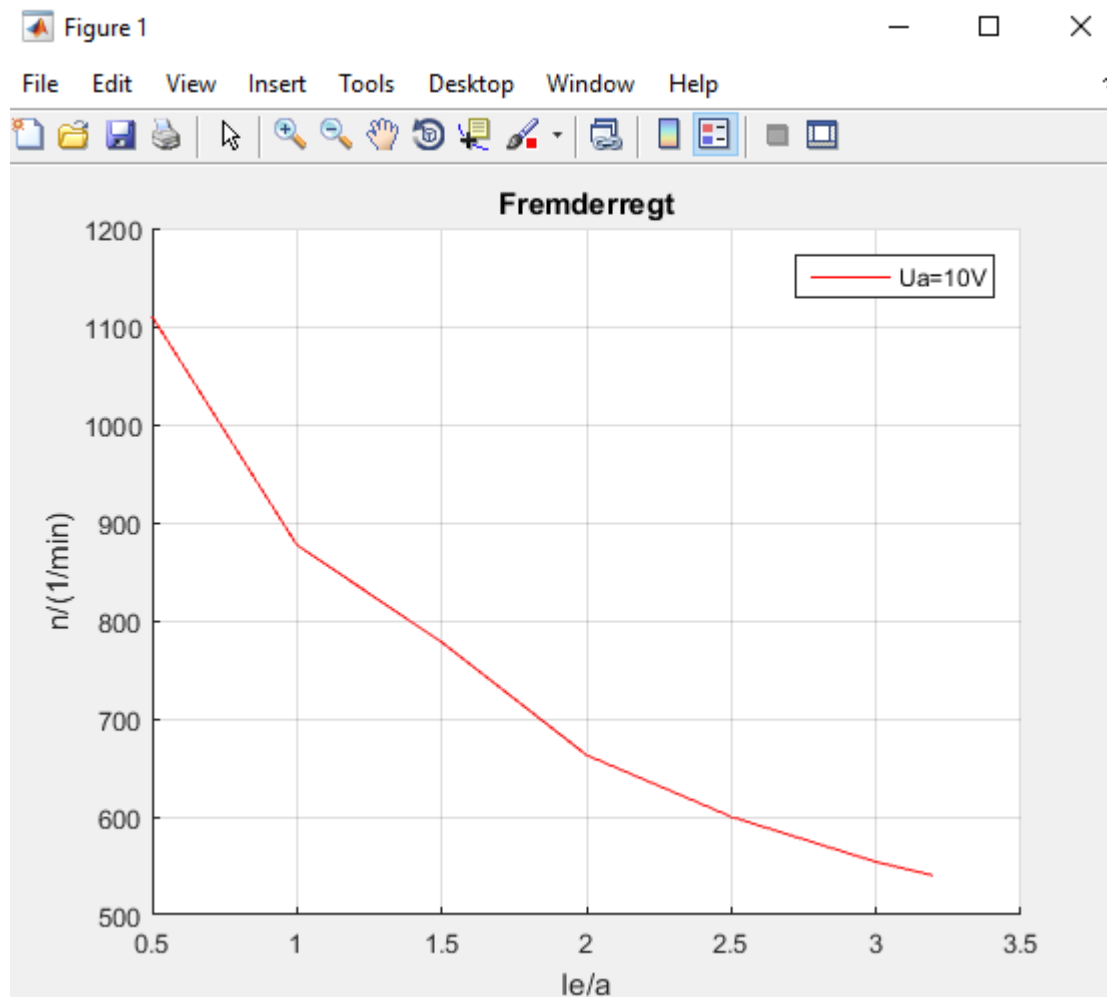


Abbildung 11:  $n=f(I_e)$ -Gleichstrommaschine

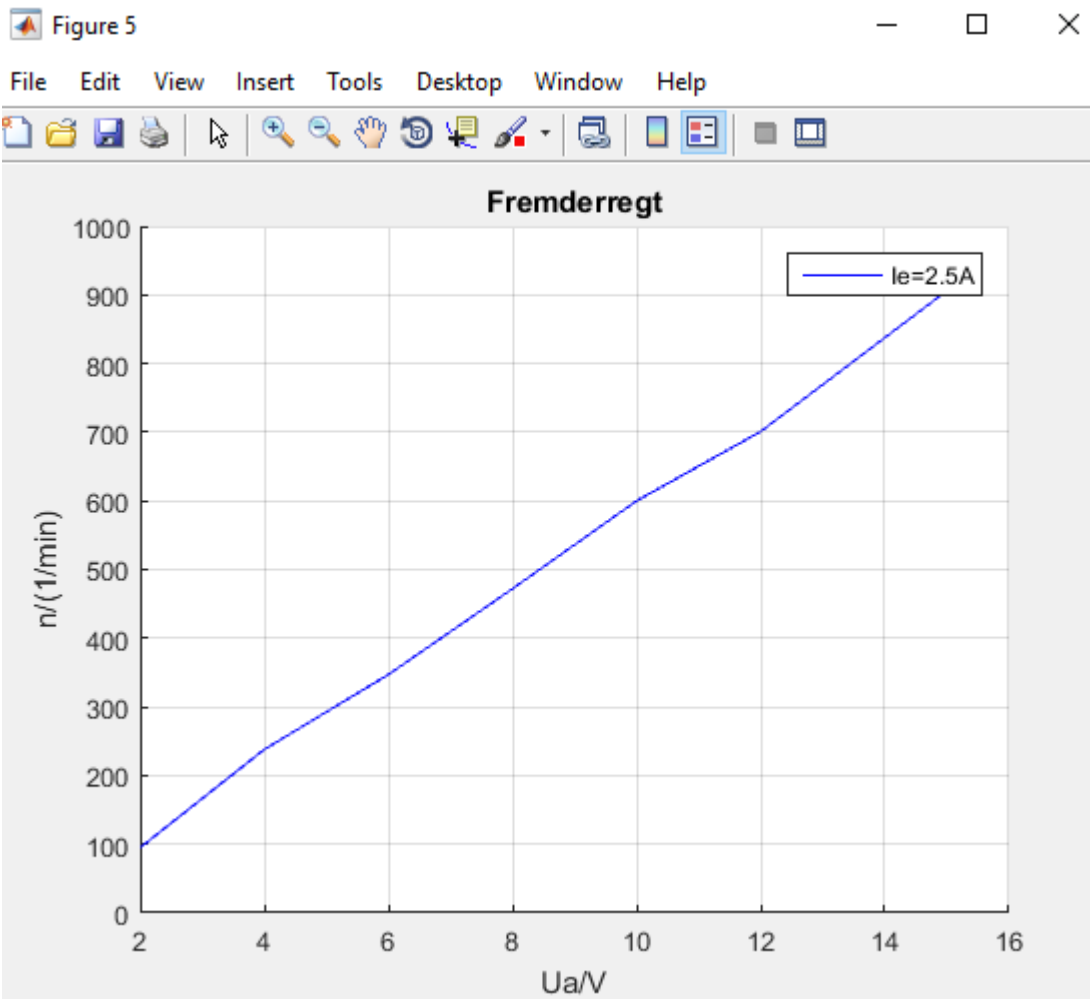


Abbildung 12:  $n=f(U_a)$ -Gleichstrommaschine

Aus:  $U_a = R_a \cdot I_a + U_i$  (20)

&  $U_i = C_e \cdot n \cdot I_e$  (21)

wird  $n = \frac{U_a - R_a \cdot I_a}{C_e \cdot I_e}$  (25)

Damit ergeben sich die jeweiligen Kennlinien aus der Proportionalität der Drehzahl in Bezug auf die Abszisse.

Gleichung 25 beschreibt zudem das „Durchgehen“ der Maschine, sofern im Betrieb die Erregung schlagartig abgeschaltet wird. Dadurch wird der Erregerstrom zu Null und die Drehzahl tendiert gegen Unendlich.

## 3.2. Induktionsmaschine

### 3.2.1. Aufbau und Funktionsweise

Die Induktions- oder Asynchronmaschine ist eine Drehfeldmaschine, die im Motorenbetrieb mit einer um  $120^\circ$  phasenversetzten sinusförmigen Wechselspannung im Dreileitersystem (Drehstromsystem) ein rotierendes Magnetfeld im Stator erzeugt. Dieses Drehfeld durchsetzt die Rotorwicklungen und induziert in diese nach dem



Elektromagnetischen Induktionsgesetz (Kapitel 2.3.) eine Spannung, welche bei kurzgeschlossenen Leiterwicklungen einen elektrischen Strom verursacht. Die induzierten Ströme innerhalb des Magnetfeldes erfahren nach Kapitel 2.2. eine Lorentzkraft, die in einer Drehbewegung und einem Moment resultieren. [ILEA-2]

Zur Erzeugung eines gleichmäßigen Drehfelds werden die Stator Wicklungen räumlich um  $120^\circ$  versetzt angebracht und an die um  $120^\circ$  phasenversetzten Sinusspannungen angeschlossen. Auf diese Weise ergibt sich ein magnetisches Drehfeld, das mit der Netzfrequenz rotiert. In Analogie zur Gleichstrommaschine wird auch bei den Drehfeldmaschinen der Begriff der Polpaarzahl eingeführt. Da zur Erzeugung eines Drehfeldes mit Netzfrequenz mindestens ein Spulentripel erforderlich ist, wird dieses als Polpaarzahl = 1 definiert. (Aufgrund der Verwendung konzentrierter Spulen beim Motorbaukasten, entspricht dieser Sachverhalt nicht der Realität im Praktikum)

Die Umdrehungsgeschwindigkeit des Ständermagnetfeldes kann mit Hilfe der Formel  $n = f_{\text{netz}}/p$  (26) berechnet werden.

Der Rotor der Asynchronmaschine wird hauptsächlich in zwei verschiedenen Ausführungen aufgebaut. Der Schleifringläufer führt über Schleifringe die Anschlüsse der Rotorwicklungen nach draußen und der Kurzschlussläufer liefert keine direkte Verbindung zu diesen Wicklungen, da sie in dieser Bauart intern kurzgeschlossen sind (sogenannter Käfig bzw. Käfigläufermotor). Aufgrund der induzierten Spannungen und Ströme innerhalb des Rotors und der dadurch wirkenden Lorentzkraft werden eine Rotation und ein Moment ausgebildet. In Folge der Beschleunigung der Maschine, verringert sich die Änderungsgeschwindigkeit des Stator Magnetfeldes in Bezug auf den Rotor und damit die Frequenz, sowie die Amplitude des induzierten Stromes. Die Abhängigkeit der induzierten Größen von der Relativbewegung zwischen Hauptmagnetfeld und Rotordrehzahl ist eine wichtige Kenngröße für die Betriebszustände der Induktionsmaschine.

$$f_r = \frac{f_{\text{netz}}}{p} - f_{\text{mech}} \quad (27)$$

$f_r$  = Frequenz der induzierten Größen im Rotor

$f_{\text{mech}}$  = mechanische Umdrehungsfrequenz

$$\frac{f_{\text{netz}}}{p} = f_s = \text{Umdrehungsfrequenz des magnetischen Feldes}$$

Die Maschine beschleunigt theoretisch bis zur sogenannten Leerlaufdrehzahl/Synchrondrehzahl, bei der sich Hauptmagnetfeld und Rotor mit gleicher Frequenz drehen. In diesem Betriebspunkt ergeben sich aufgrund der nicht mehr

existenten Änderungsgeschwindigkeit des Magnetfeldes aus Rotorsicht keine induzierten Größen mehr und auch das resultierende Moment wird zu Null. In der Realität allerdings kann die Maschine diesen Punkt, in Folge von elektrischen und mechanischen Verlusten, nicht aus eigener Kraft erreichen. Somit dreht sich der Rotor stets asynchron in Bezug auf das durchsetzende Stator Magnetfeld. Diese Drehzahldifferenz spielt in der mathematischen Berechnung der Maschine eine bedeutende Rolle und wird als sogenannter „Schlupf“  $s$  dargestellt.

$$s = \frac{f_r}{f_s} = \frac{f_s - f_{\text{mech}}}{f_s} \quad (28)$$

$f_r = f_s \rightarrow f_{\text{mech}} = 0$	$s=1$	Rotor steht
$f_r = 0 \rightarrow f_s = f_{\text{mech}}$	$s=0$	Synchronlauf
$f_r = 2f_s \rightarrow f_{\text{mech}} = -f_s$	$s=2$	Rotor dreht entgegengesetzt zum Statorfeld
$f_r < 0 \rightarrow f_s < f_{\text{mech}}$	$s < 0$	Rotor dreht schneller als Statorfeld → Generatorbetrieb

Abbildung 13: Kennwerte des Schlupf bei unterschiedlichen Betriebspunkten

Wie bereits oben erwähnt, sind die induzierten Größen von der Amplitude des Magnetfeldes und seiner zeitlichen Änderungsgeschwindigkeit abhängig. Betrachtet man den Induktionsmotor im Betrieb am starren Drehstrom-Netz, so sind die Amplitude und die Frequenz des Drehfelds fest definiert.

Diese beiden Größen hängen lediglich von der Frequenz und der Amplitude der Netzspannung ab. Das letztlich wirkende Drehfeld wird nur noch von den Maschinenparametern definiert, die charakteristisch für einzelne Maschinentypen sind und nachfolgend als unveränderlich angenommen werden.

Die einzig verbleibende Variable in Bezug auf die induzierten Rotorgrößen bildet somit die Relativgeschwindigkeit zwischen Hauptfeld und Rotor. Im Anlaufpunkt sind Relativgeschwindigkeit und die induzierte Rotorspannung maximal. Beide Größen nehmen mit steigender Rotordrehzahl stetig ab. Dreht sich der Rotor mit synchroner Drehzahl ist die Relativgeschwindigkeit zwischen Drehfeld und Rotor gleich Null und folglich wird keine Spannung in den Rotor induziert.

Wie aus Kapitel 2.2. bekannt ist, hängt die wirkende Lorentzkraft direkt vom Magnetfeld und dem Strom innerhalb dieses Magnetfeldes ab. Da sich die Amplitude und Frequenz des äußeren Magnetfelds nicht ändert und der Strom im Anlaufpunkt maximal ist, müsste erwartungsgemäß auch die wirkende Lorentzkraft und folglich das Moment der Maschine im Anlaufpunkt maximal sein.

Wie Abbildung 14 zeigt, verläuft die Moment-Drehzahl Kurve einer Induktionsmaschine nicht nach dieser Erwartung.

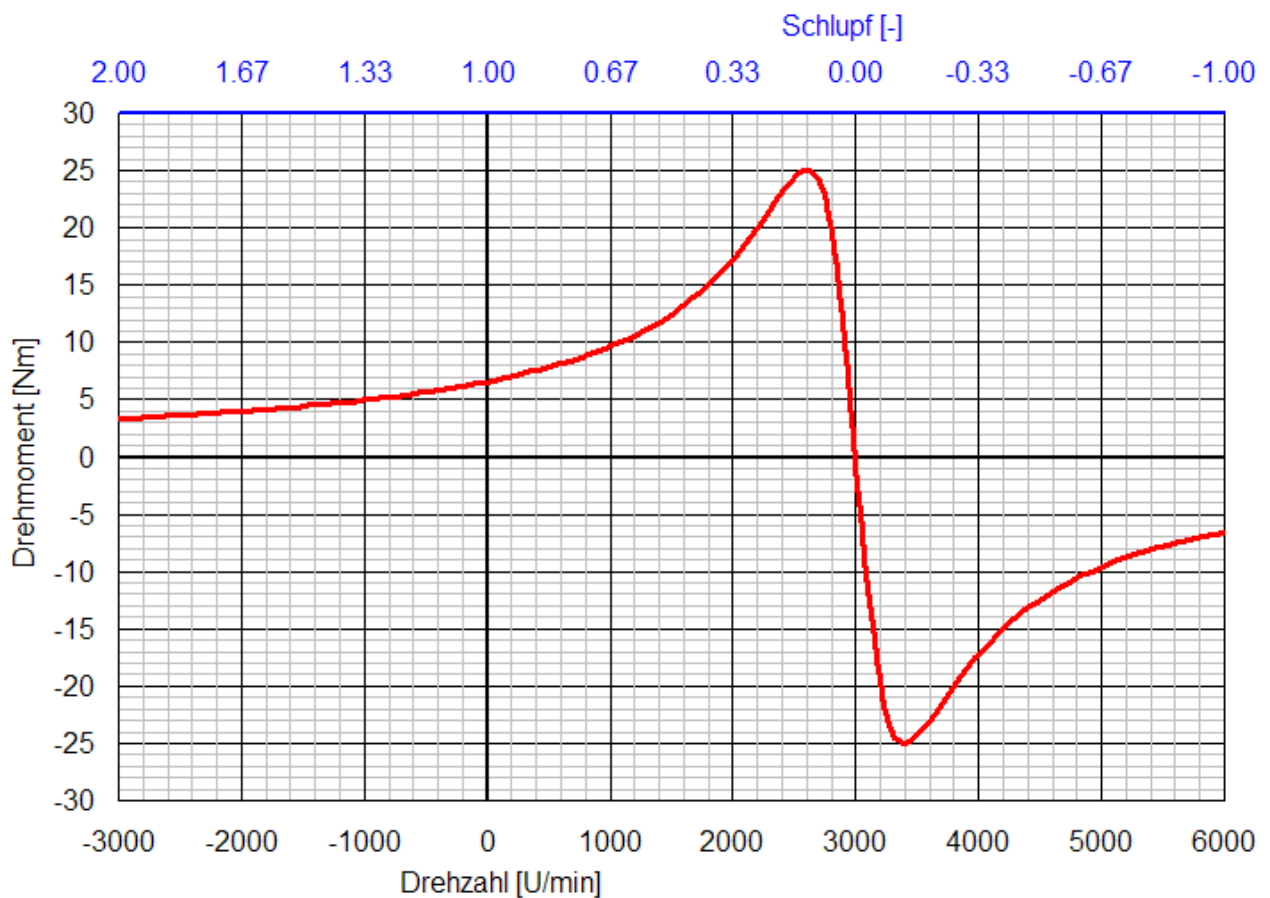


Abbildung 14: Moment der Induktionsmaschine als Funktion der Drehzahl [\[Link3\]](#)

Kapitel 2.2. sagt aus, dass der Betrag der Lorentzkraft und das Moment der Maschine, von der Sinusfunktion des Winkels zwischen dem Magnetfeld und der Bewegung der elektrischen Ladungsträger (hier: der elektrische Strom als Folge der induzierten Spannung) abhängig sind. Der Grund für den nicht intuitiven Momentverlauf liegt folglich im Versatz des induzierten Stroms im Anlaufpunkt. Die Frequenz des Rotorstroms kann über  $f_r = \frac{f_{\text{netz}}}{p} - f_{\text{mech}}$  (29) berechnet werden und ist im Augenblick des Anlaufvorgangs maximal. Die Rotorwicklung kann schaltungstechnisch durch eine Reihenschaltung von ohmschen Widerstand und einer Induktivität dargestellt werden. Die Frequenzabhängigkeit der Induktivität verursacht im Anlaufpunkt den größtmöglichen Phasenversatz zwischen dem äußeren Magnetfeld (induzierte Spannung) und dem induzierten Strom, was ausschlaggebend für den Betrag der Lorentzkraft und des Maschinenmoments ist.

[ELE] [EAG] [EMTP] [TEM] [EMA] [HSBO]

### 3.2.2. Diskussion des Ersatzschaltbildes

Die elektrotechnische Modellierung in Form eines Ersatzschaltbildes kann komplex oder vereinfacht dargestellt werden. Oftmals bieten Vereinfachungen hinreichend genaue Rechenergebnisse bei weitaus geringerem Rechenaufwand, weswegen nachfolgend ein solch vereinfachtes Ersatzschaltbild der Asynchronmaschine beschrieben wird.

Auf eine detaillierte Herleitung dieses Schaltplans wird im Rahmen dieses Entwicklungsprojektes verzichtet. Es wird dafür auf die vertiefende Literatur hingewiesen.

[TFC/AK]

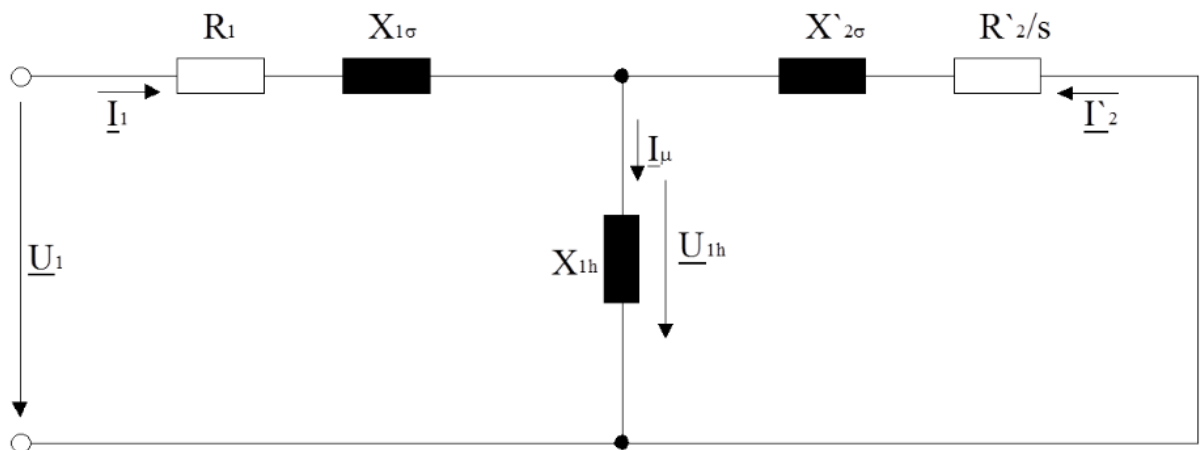


Abbildung 15: vereinfachtes einphasiges Ersatzschaltbild der Induktionsmaschine [TFC/AK]

Abbildung 15 zeigt ein vereinfachtes einphasiges Ersatzschaltbild der Induktionsmaschine. Links befinden sich die Stator Elemente und rechts die Rotor Elemente, während die Induktivität in der Mitte des Schaltplans die magnetische Kopplung dieser separaten und galvanisch getrennten Maschinenteile modelliert. Das vorliegende Ersatzschaltbild existiert in zwei unterschiedlichen Ausführungen. Je nach Modellierung eines Kurzschluss- oder Schleifringläufers ist die Rotorseite entweder kurzgeschlossen (hier), oder mit einer Rotorspannung gekennzeichnet.

$U_1$  ist die Stator Spannung und über die Verschaltungsart (z.B. Stern- und Dreieckschaltung) von der Netzspannung abhängig. Im Stator Kreis befinden sich weiterhin der ohmsche Leitungswiderstand  $R_1$ , sowie die Stator Streuinduktivität. Diese Induktivität stellt den nicht gekoppelten magnetischen Anteil des Stators dar. Er trägt nicht zur elektromagnetischen Induktion in den Rotor bei und kann als eine Art Verlustinduktivität verstanden werden. Auf der Rotorseite befindet sich ebenfalls eine Streuinduktivität, die mit der gleichen Begründung definiert werden kann.

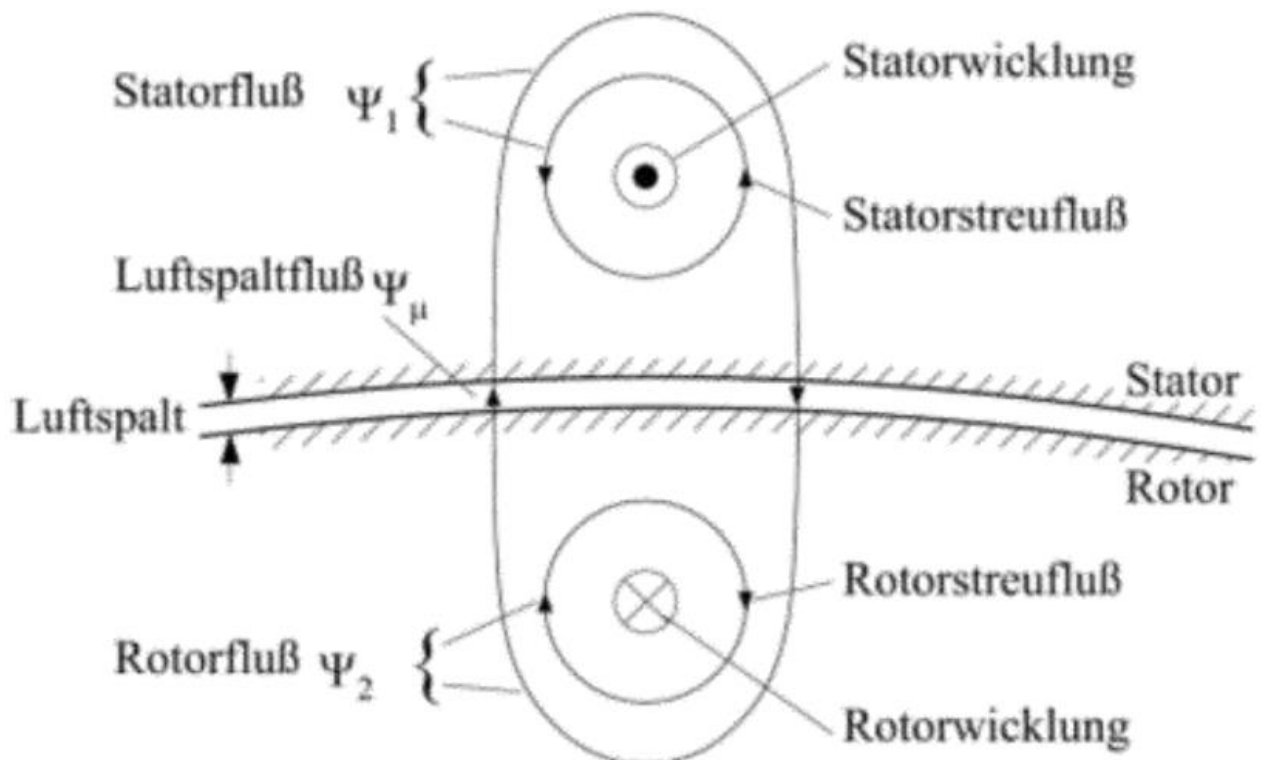


Abbildung 16: magnetischer Fluss zwischen Rotor und Stator mit Streuflussanteilen [EAR]

Abbildung 16 zeigt die Entstehung dieser Streuinduktivität anhand des verketteten Flusses, die aber proportional zueinander sind  $L = \frac{\Psi}{I} = \frac{N \cdot \Phi}{I}$  (30).

Die Hauptinduktivität und der Magnetisierungsstrom ( $X_h$  und  $I_\mu$ ) repräsentieren die magnetische Kopplung zwischen Stator und Rotor. Die induzierten Rotorströme besitzen, wie jeder stromdurchflossene Leiter, ein magnetisches Wirbelfeld. Dieses Magnetfeld wechselwirkt innerhalb der Induktionsmaschine mit dem Stator Drehfeld und überlagert sich mit diesem zum Hauptfeld der Maschine. Der Magnetisierungsstrom  $I_\mu$  modelliert die vektorielle Summe aus Stator Strom ( $I_1$ ) und transformiertem (auf die Ständerseite umgerechneten) Läuferstrom ( $I_2'$ ). Multipliziert mit der Hauptinduktivität ergibt er die induzierte Spannung  $U_i$ .

Das Ersatzschaltbild der Asynchronmaschine wird als Analogie zum Transformator beschrieben und kann darauf aufbauend hergeleitet werden. Unterschiede zwischen Induktionsmaschine und Transformator treten erst bei der Rotation des Läufers auf, da die Frequenz der induzierten Größen in Abhängigkeit zur Drehzahl variiert.

$$f_r = \frac{f_{\text{netz}}}{p} - f_{\text{mech}} \quad (29)$$

Mit Hilfe der bereits eingeführten Größe des Schlupf, lässt sich eine Transformation der Rotorgrößen auf den Ständerkreis durchführen. Durch die Substitution der Rotorfrequenz mit der Multiplikation aus Stator Frequenz und Schlupf

$$f_{\text{rotor}} = s * f_{\text{stator}} \quad (31)$$

und einer anschließenden Division durch den Schlupf  $s$  wird die Frequenz der Stator- und Rotorseite mathematisch gleichgesetzt. Des Weiteren muss, analog zum Transformator, noch das Windungszahlverhältnis mit einbezogen werden.

### Mathematische Beschreibung (Asynchronmaschine- stationärer Zustand)

$$\underline{U}_1 = R_1 * \underline{I}_1 + jX_{1\sigma}\underline{I}_1 + jX_{1h}\underline{I}_\mu \quad (32) \text{ (Maschengleichung-Stator)}$$

$$0 = \frac{R'_2}{s} * \underline{I}'_2 + jX'_{2\sigma}\underline{I}'_2 + jX_{1h}\underline{I}_\mu \quad (33) \text{ (Maschengleichung-Rotor)}$$

$$\underline{I}_\mu = (\underline{I}_s + \underline{I}'_r) \quad (34) \text{ (Magnetisierungsstrom)}$$

$$s = \frac{f_{\text{stator}} - f_{\text{mech}}}{f_{\text{stator}}} \quad (35) \text{ (Schlupf)}$$

$$\frac{M}{M_k} = \frac{2}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}} \quad (36) \text{ (Kloßsche Formel)}$$

$$P_{\text{mech}} = M * \omega_{\text{mech}} \quad (37) \text{ (mechanische Leistung)}$$

$$P_{\text{el}} = 3 * U_1 * I_1 * \cos(\varphi) \quad (38) \text{ (elektrische Wirkleistung)}$$

Auf die Herleitung der mathematischen Gleichungen der Asynchronmaschine wird im Rahmen dieses Entwicklungsprojekts verzichtet. Es sei hier auf die weiterführende Literatur [ELE] verwiesen.

### 3.2.3. Praktikumsversuch und Lernziele



Abbildung 17:Aufbau Induktionsmaschine mit Motorbaukasten

### Identifikation der Maschine durch den Studenten.

Die Induktionsmaschine und die Synchronmaschine besitzen einen identischen Stator Aufbau. Lediglich ihre Rotorelemente sind unterschiedlich, weshalb sie einzig anhand dessen identifiziert werden können.

Besonders markant ist der Kurzschlussläufer mit seinen Kurzschlussringen. Dazu ist er der einzige Rotor ohne elektrische Verbindung nach Außen, was ihn eindeutig der Induktionsmaschine zuordnet. Abbildung 17 zeigt allerdings den Aufbau der Induktionsmaschine mittels eines Rotors mit Schleifringen, der anhand seiner drei Anschlussklemmen als Bauteil der Induktionsmaschine identifiziert werden kann, da Stator und Rotor je mindestens drei Spulen aufweisen müssen.

### Elektrische Verschaltung

Zunächst steht die Erzeugung eines magnetischen Drehfeldes im Vordergrund. Es soll zu jedem Zeitpunkt möglichst gleichmäßig den Rotor durchsetzen. Der Motorbaukasten beinhaltet konzentrierte Wicklungen was zur Verwendung von mindestens zwei Spulen pro Phase führt, damit ein gleichmäßiges Magnetfeld erzeugt werden kann. Zwar entsteht auch mit drei Wicklungen ein Drehfeld, aber magnetischer Nord- und Südpol stehen sich dabei nicht genau gegenüber. Folglich sind pro Phase zwei Wicklungen in Reihe angeschlossen, die wiederum jeweils andersrum gepolt werden und räumlich um  $180^\circ$  versetzt am Stator angebracht sind. Auf diese Weise stehen sich die ausgeprägten magnetischen Pole jederzeit gegenüber.

Anhand von Skizzen soll sich der Student dieses Drehfeld verständlich machen oder lediglich drei Spulen verschalten und den energetischen Unterschied beim Betrieb der Maschine sichtbar machen.

Anschließend kann der Stator über einen Trenntransformator mit dem Drehstromnetz verbunden werden. Der Student muss dazu ein Schaltbild zeichnen, indem es ihm freigestellt wird die Spulen in Dreieck- oder Sternschaltung anzubinden. Eine Diskussion über das Stern-Dreieck Anlaufverhalten der Maschine ist an dieser Stelle sinnvoll. Zur Strombegrenzung im Anlaufpunkt wird oftmals eine Sternschaltung verwendet, da sie die Spannung pro Wicklung um den Faktor  $\sqrt{3}$  reduziert und somit auch den Strom in den Windungen begrenzt. Nach dem Hochlaufen der Maschine werden die Spulen bei dieser Strombegrenzungsvariante in die Dreieckschaltung umgeschaltet.



### Physikalische Funktionsweise

Im Motorenbetrieb führt eine Lorentzkraft zur angestrebten Momentbildung.

Der Student soll erklären können, warum sich diese Kraft ausbildet.

Das Stator Drehfeld induziert eine Spannung in die Rotorwicklungen die einen Strom hervorruft. Dadurch ergibt sich eine Anordnung mit stromdurchflossenen Leitern in einem Magnetfeld, was eine Lorentzkraft und damit auch ein Moment ausbildet.

Ferner soll der Student erklären können, weshalb die Induktionsmaschine niemals aus eigener Kraft die Synchrondrehzahl erreichen kann.

Wird die Asynchronmaschine in Rotation gebracht beschleunigt sie aufgrund des induzierten Stromes und der dadurch entstehenden Lorentzkraft. In Folge der elektrischen und mechanischen Verluste kann sie allerdings niemals den Synchronpunkt erreichen.

Ein weiterer elementarer Zusammenhang liegt in der Relativbewegung zwischen Stator Drehfeld und mechanischer Rotordrehzahl begründet. Der Student soll erklären können, dass die Asynchronmaschine nur bei asynchronen Umdrehungsgeschwindigkeiten dieser beiden Größen ein Moment erzeugt. Hierzu ist die Verbindung mit dem Faraday'schen Induktionsgesetz (Kapitel 2.3.) und der Lorentzkraft (Kapitel 2.2.) essentiell.

### Motormessung

Mit Hilfe des abgebildeten Aufbaus soll der Student den induzierten Rotorstrom sichtbar machen. Dazu soll eine Aussage über den Verlauf des induzierten Stroms in Abhängigkeit zur Maschinendrehzahl entwickelt werden, bevor dieser gemessen wird. Wie ändern sich Amplitude und Frequenz des Rotorstroms und warum?

Die induzierte Spannung im Rotor ist proportional zur zeitlichen Änderung des durchsetzenden Magnetfeldes. In Folge der immer größer werdenden Drehzahl werden die zeitliche Änderung des Feldes und damit die induzierten Größen immer kleiner.

Die Frequenz des Rotorstroms ist gleich der Differenz aus Hauptfelddrehzahl und mechanischer Drehzahl und sinkt mit zunehmender Maschinendrehzahl.

### **3.3. Synchronmaschine**

#### **3.3.1. Aufbau und Funktionsweise**

Die Synchronmaschine ist, ebenso wie die Induktionsmaschine, an ein Drehfeld gebunden und somit auch an das Drehstromsystem. Der Aufbau des Stators, zur Erzeugung dieses Drehfeldes, ist identisch zu dem der Induktionsmaschine und wird daher nicht weiter betrachtet. [IEW]

Lediglich die jeweiligen Rotoren der beiden Drehfeldmaschinen und vor allem ihre Funktion unterscheiden sich voneinander. Bei der Synchronmaschine wird im Rotor ein magnetisches Gleichfeld erzeugt, das mit dem äußeren Drehfeld wechselwirkt. Dreht sich das äußere Magnetfeld mit der durch die Netzfrequenz und Polpaarzahl bestimmten Geschwindigkeit über das Rotorelement, so ziehen sich die jeweils gegensätzlichen Pole an und bewirken so die synchrone Umlaufgeschwindigkeit, die dieser Maschine ihren Namen verleiht.

Das Rotorgleichfeld kann zum einen durch einen Elektromagneten ausgeprägt werden, der über Schleifringe von außen kontaktierbar ist, oder mit Hilfe von Permanentmagneten, die in den Aufbau der Maschine integriert werden. Permanentmagnetmaschinen gewinnen aufgrund ihres gleichmäßigen Erregerfeldes und des Wegfalls der Erregerleistung vor allem bei kleinen bis mittleren Maschinen immer mehr an Bedeutung.

Der Anlauf der Synchronmaschinen gestaltet sich allerdings problematisch, da das Massenträgheitsmoment des Rotors der hohen Drehfelddrehzahl entgegenwirkt (Bsp. 50Hz bei Polpaarzahl 1). Aus diesem Grund besitzen Synchronmaschinen verschiedenste Anlaufmethoden. Beispielsweise kann der Aufbau durch einen Käfigläuferrotor ergänzt werden. Dadurch verhält sich die Maschine beim Hochlaufen wie ein Asynchronmotor, bis das Rotorgleichfeld dem Drehfeld folgen kann und „in Tritt“ kommt. Bei synchroner Umlaufgeschwindigkeit werden, wie in Kapitel 3.2 erläutert, keine Spannungen in den Käfig induziert und er bleibt folglich passiv. Weitere Anlaufvariationen können die Frequenzänderung der Drehfeldfrequenz (langsames Hochlaufen), oder die von außen aufgeprägte Rotation (bspw. durch eine Gleichstrommaschine) sein.

Die Läufer der Synchronmaschinen besitzen oftmals baulich ausgeprägte Magnetpole, die als Polrad bezeichnet werden. Aus Sicht des Stators erzeugt das rotierende (sich zeitlich ändernde) Gleichfeld des Rotors eine Induktionsspannung in den Stator Kreis, die als Polradspannung bezeichnet wird. Aufgrund der um  $120^\circ$  räumlich versetzten Spulenanordnung im Stator ist die Polradspannung eine Drehspannung und bildet die Basis für den Generatorbetrieb dieses Maschinentyps.

Damit ein Synchronmotor ein Moment erzeugt, bedarf es einer Lorentzkraft. Wie in Kapitel 2.2. beschrieben, ist es für die Ausbildung einer Lorentzkraft erforderlich, dass sich bewegte Ladungsträger (elektrischer Stromfluss) in einem Magnetfeld befinden. Insbesondere die Verwendung permanentmagnetischer Rotorelemente scheint, der bei elektrischen Maschinen üblichen, Momentbildung durch Lorentzkraft zu widersprechen. Allerdings besitzt jeder Permanentmagnet einen sogenannten Oberflächenstrombelag, der sich in Folge der gleichmäßigen Ausrichtung der Atome im Magneten bildet. Ein jedes Atom besitzt einen positiven Kern, bestehend aus Protonen (positiver Ladungsträger) und Neutronen (keine elektrische Ladung), und negativen Elektronen, die in diskreten Energiezuständen um den Kern ‚kreisen‘. Am Beispiel des Wasserstoffatoms, mit einem Elektron, lässt sich der Effekt des Oberflächenstrombelags in einem Permanentmagnet am einfachsten beschreiben.

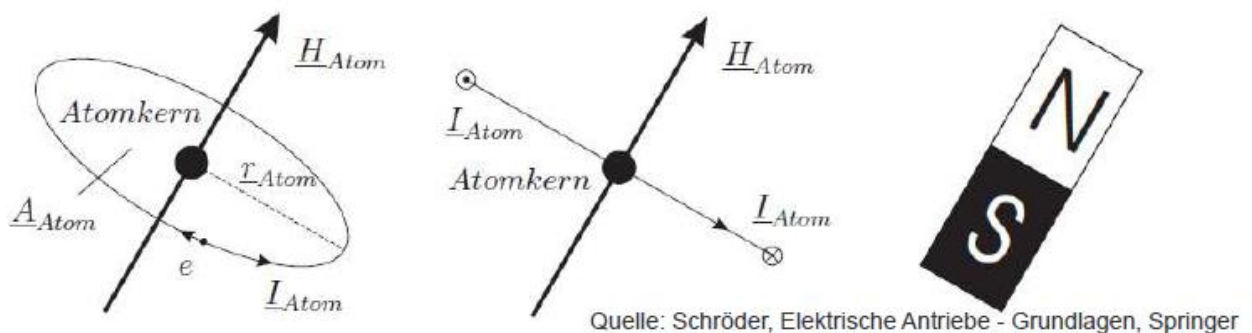


Abbildung 18: Analogie H-Atom <--> magnetischer Dipol [EAG]

Abbildung 18 zeigt das magnetische Feld eines H-Atoms, das aus der Bewegung seines Elektrons resultiert. Ein Permanentmagnet besteht aus vielen magnetisch gleichgerichteten Atomen (Abbildung 19). Während sich der Strom, in Folge der symmetrischen Elektronenbewegung, im inneren des Magneten kompensiert, bleibt am Rand ein Reststrom bestehen, der Oberflächenstrombelag.

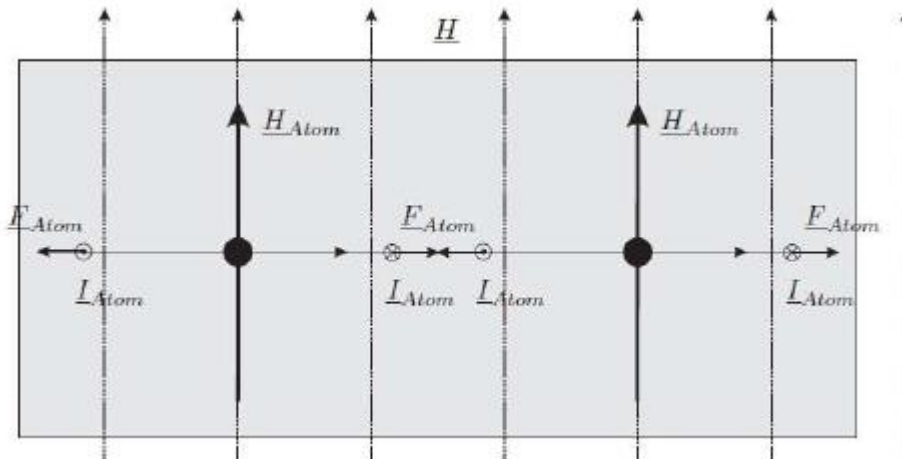


Abbildung 19: Oberflächenstrombelag in einem Permanentmagneten [EAG]

Dieser Effekt alleine, zusammen mit dem äußeren Drehfeld, würde bei der Synchronmaschine jedoch keine effektive Lorentzkraft verursachen. In Folge der gleichmäßigen Verteilung der Oberflächenstrombeläge, ist der Betrag der Lorentzkraft in beide Rotationsrichtungen gleich und hebt sich aufgrund der Superposition auf. Erst sobald das Polrad dem Drehfeld um einen gewissen Winkel naheht, entsteht eine unsymmetrische Verteilung des Oberflächenstroms in Bezug auf das wirkende äußere Magnetfeld und somit eine effektive Lorentzkraft, die in eine Rotationsrichtung größer als in die andere ist. Der Polradwinkel führt so zu einer dominierenden Kraftkomponente, die bei  $90^\circ$  ihr Maximum erreicht.

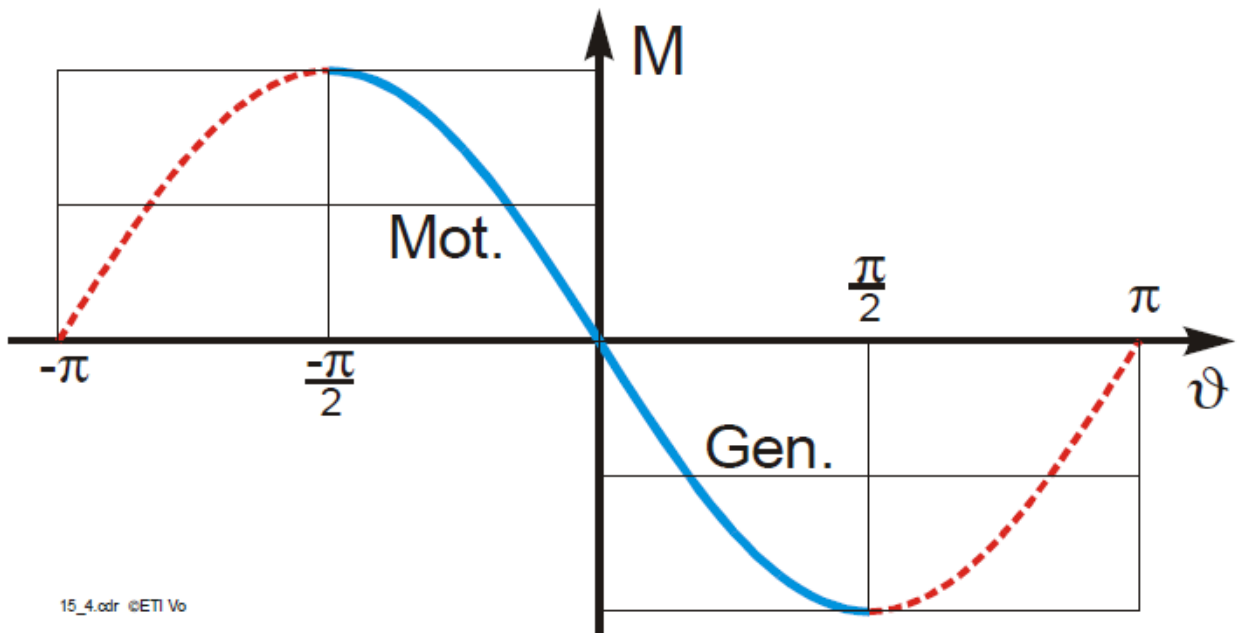


Abbildung 20: Moment der Synchronmaschine als Funktion des Polradwinkels [Hska]

Abbildung 20 zeigt qualitativ den Momenten Verlauf einer Synchronmaschine. Anders als bei der Induktionsmaschine, ist das Moment nicht von der Drehzahl (Synchronmaschine läuft immer mit Synchrodrehzahl im stationären Betrieb) abhängig, sondern vom Polradwinkel. Bei einem positiven Winkel befindet sich die Maschine im Generatorbetrieb und ein negativer Polradwinkel bewirkt einen Motorenbetrieb.

Im Praktikumsversuch wird eine weitere Momentbildende Kraft im Zusammenhang mit der Synchronmaschine untersucht. Dabei handelt es sich um die sogenannte Reluktanzkraft oder auch „Maxwell Kraft“ genannt. Sie wirkt in die Richtung des geringsten magnetischen Widerstand (Reluktanz) und wird näher in Kapitel 3.3.3. beschrieben.

[ELE] [EAG] [EMTP] [TEM] [EMA] [HSBO]

### 3.3.2. Diskussion des Ersatzschaltbildes

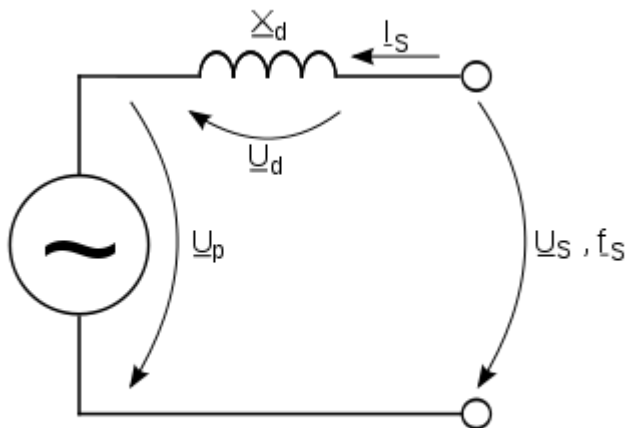


Abbildung 21: vereinfachtes ESB Synchronmaschine [Link4]

Das Ersatzschaltbild der Synchronmaschine ist wesentlich übersichtlicher als das der Induktionsmaschine und kann aus diesem hergeleitet werden. Auffällig ist, dass lediglich die Stator-Seite betrachtet wird. Die Erregung des Rotorgleichfelds wird einzig durch die Polradspannung  $U_p$  dargestellt, da die Rotorseite im stationären Betrieb nicht vom Stator beeinflusst wird. Über die synchrone Reaktanz  $X_d$ , die sich aus der Zusammenführung der Streu- und Hauptreaktanz bildet, ist sie mit der Stator Spannung verbunden, weshalb sich folgender Zusammenhang ergibt:

$$\underline{I}_S = \frac{U_S - U_p}{jX_d} \quad (39)$$

### Mathematische Beschreibung (Vollpol-Synchronmaschine- stationärer Zustand)

$$\underline{U}_s = j\omega L_d \underline{I}_s + \underline{U}_p \quad (40) \text{ (Maschengleichung)}$$

$$\underline{U}_p = j\omega L_d I'_e \quad (41) \text{ (Polradspannung)}$$

$$M = \frac{3 \cdot p \cdot U_1 \cdot U_p}{\omega^2 \cdot L_d} \cdot \sin(\nu) \quad (42) \text{ (Drehmoment)}$$

$$P_{\text{mech}} = M \cdot \omega \quad (43) \text{ (mechanische Leistung)}$$

$$P_{\text{el}} = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos(\varphi) \quad (44) \text{ (elektrische Wirkleistung)}$$

Auf die Herleitung der mathematischen Gleichungen der Synchronmaschine wird im Rahmen dieses Entwicklungsprojekts verzichtet. Es sei hier auf die weiterführende Literatur [ELE] verwiesen.

### 3.3.3. Praktikumsversuch und Lernziele



Abbildung 22: Synchrongenerator Aufbau mit Motorbaukasten

### Identifikation der Maschine durch den Studenten.

Die Induktionsmaschine und die Synchronmaschine besitzen einen identischen Stator Aufbau. Lediglich ihre Rotorelemente sind unterschiedlich, weshalb sie einzig anhand dessen identifiziert werden können.

Der Rotor einer Synchronmaschine ist durch sein magnetisches Gleichfeld zu charakterisieren. Dieses kann unter Verwendung eines Elektromagneten oder wie in Abbildung 22 durch einen Permanentmagneten erzeugt werden. Oftmals sind die signifikanten Pole des Rotors baulich sehr ausgeprägt, sie werden dann als Polrad bezeichnet.

### Elektrische Verschaltung

Für die elektrische Schaltung kann auf den Praktikumsversuch der Induktionsmaschine verwiesen werden.

### Physikalische Funktionsweise

Innerhalb des Praktikums wird die Synchronmaschine nur als Generator und nicht als Motor verwendet, da ihr Anlaufen sehr schwierig zu realisieren ist. Mit Hilfe eines Keilriemens zwischen Gleichstrommotor und Synchrongenerator wird der Rotor des Generators in Bewegung gebracht. An den konzentrierten Spulen kann mit einem Oszilloskop die induzierte Spannung gemessen werden. Aus dem Grundlagenkapitel zur Lorentzkraft (2.2.) und zum Faraday'schen Induktionsgesetz (2.3.) ist der Zusammenhang zwischen einem Leiter und einem sich zeitlich ändernden Magnetfeld bekannt. An dieser Stelle kann der Student empirisch, mit Hilfe des Gleichstrommotors, die Drehzahl variieren und direkt die Auswirkungen des Induktionsgesetzes am Oszilloskop messen und verstehen.

Ein weiterer auftretender Effekt ist die Ausbildung einer Reluktanzkraft, die der Rotation entgegenwirkt. Das Magnetfeld des Rotors magnetisiert die Polschuhe der Stator Wicklungen. Diese bestehen aus dem ferromagnetischen Werkstoff Eisen und sind daher magnetisch gut leitfähig. Die Reluktanzkraft entsteht aufgrund magnetischer Wechselwirkungen und kann in Analogie zu elektrischen Phänomenen verstanden werden. Befindet sich ein ausgeprägter Magnetpol unter einem ferromagnetischen Polschuh, richtet das Magnetfeld die Atome (Weißschen Bezirke) im Ferromagneten derart aus, dass der Ferromagnet selbst zum Magneten wird. Dabei entsteht eine anziehende Magnetkraft zwischen den beiden.



Bewegt sich das Polrad in Folge der Rotation nun weiter vom Polschuh weg, versucht die Magnetkraft dieser Bewegung entgegenzuwirken und die Maschine muss ein größeres Moment überwinden. In Analogie zum elektrischen Strom versucht auch der magnetische Fluss den Weg des geringsten magnetischen Widerstandes (Reluktanz) zu forcieren.

Die Reluktanzkraft wirkt immer in Richtung des geringsten magnetischen Widerstandes. Abschließend kann mit Hilfe des Stabmagneten als Rotorelement die Anlaufproblematik des Synchronmotors einfach sichtbar gemacht werden. Schließt man die Stator Elemente analog zur Induktionsmaschine an und bewirkt dadurch ein Drehfeld, so ist der Stabmagnet nicht in der Lage diesem Magnetfeld zu folgen. Auch bei händischer Rotation kommt der Stabmagnet nicht „in Tritt“. Allerdings rotiert er eine längere Zeit mit, wird aber zunehmend langsamer.

### Kennlinie

Der Student verbindet den Gleichstrommotor mit dem Synchrongenerator und führt zwei unterschiedliche Messreihen durch. Zunächst wird die Abhängigkeit des Ankerstroms der Gleichstrommaschine zum Rotorstrom (Erregerstrom) des Generators untersucht. Anschließend die Abhängigkeit der Drehzahl der gekoppelten Maschinen zum Erregerstrom (Abbildungen 23 und 24 zeigen den jeweiligen Verlauf der Messkurven).

Der Gleichstrommotor erzeugt das notwendige Moment um den Synchrongenerator in Rotation zu bringen. Aus den Gleichungen der Gleichstrommaschine (Kapitel 3.1.2.) ist bekannt, dass das Moment proportional zum Anker- und Erregerstrom der Maschine ist. Hinzu kommt noch eine Maschinenkonstante  $C_m$ .

$$M = C_m * I_a * I_e \quad (22)$$

Die Messreihen werden mit konstanter Anker- und Erregerspannung für den Gleichstrommotor gefahren und auch der Erregerstrom ändert seinen Wert während der Messreihe nicht. Lediglich der Erregerstrom des Synchrongenerators wird schrittweise erhöht, was auch den Ankerstrom des Gleichstrommotors vergrößert. Es wird ein größeres Moment aufgebracht. Dieses vergrößerte Moment lässt sich einzig auf die steigende magnetische Kraft innerhalb des Synchrongenerators zurückführen.

Steigt der Ankerstrom der Gleichstrommaschine an, so steigt auch das von ihr erzeugte Moment. Aus der Maschengleichung für den Ankerkreis ist weiterhin bekannt, dass bei konstanter Ankerspannung und steigendem Ankerstrom, die induzierte Spannung im Anker geringer wird. Die mechanische Leistung der Gleichstrommaschine kann mit folgender Gleichung beschrieben werden:

$$P_{mech} = M * \omega = U_i * I_a \quad (45)$$

Aufgrund der Variabilität von Moment, induzierter Spannung und Ankerstrom muss sich auch die Winkelgeschwindigkeit gemäß der mathematischen Formel anpassen, sie verringert sich (Abbildung 24).

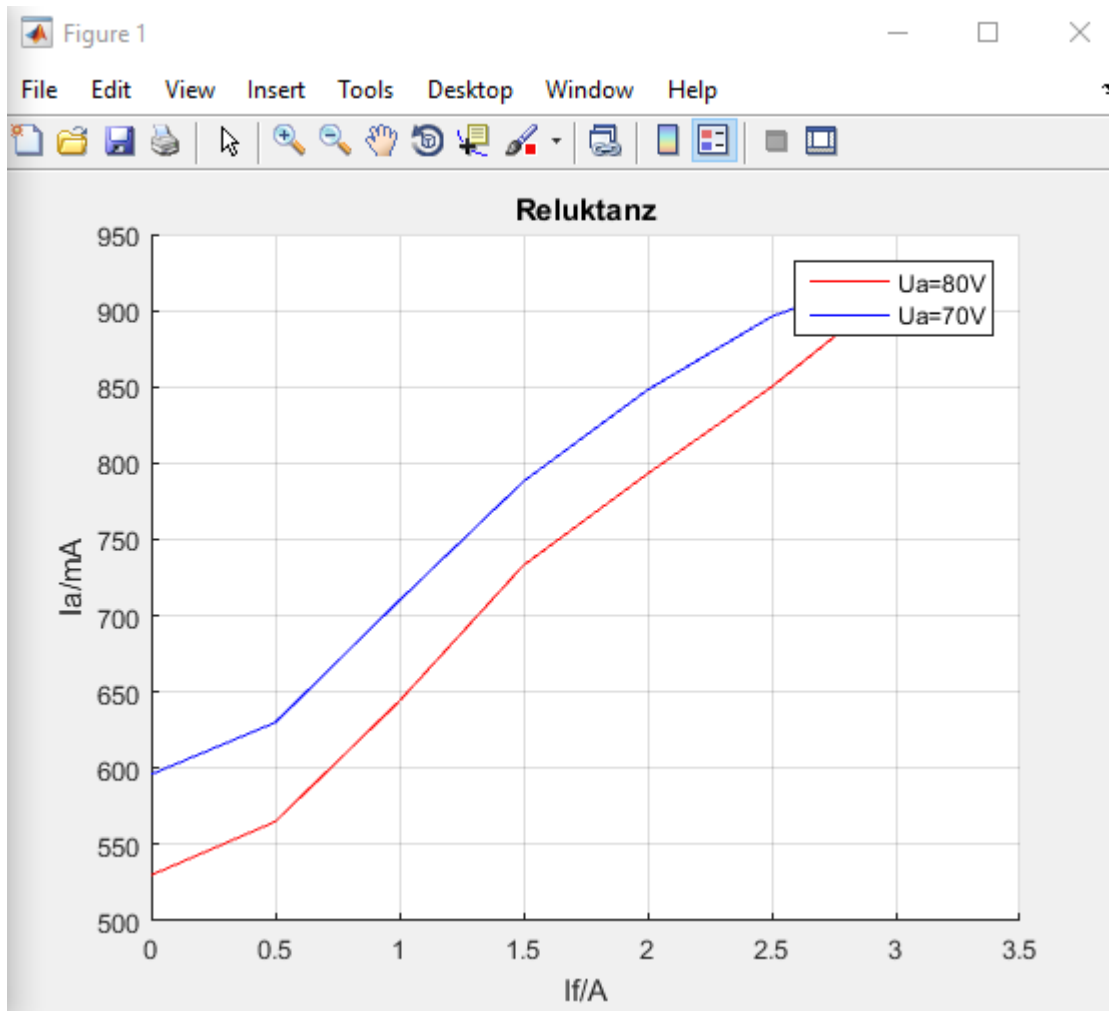


Abbildung 23: Ankerstrom des Gleichstrommotors zum Erregerstrom des Synchrongenerators

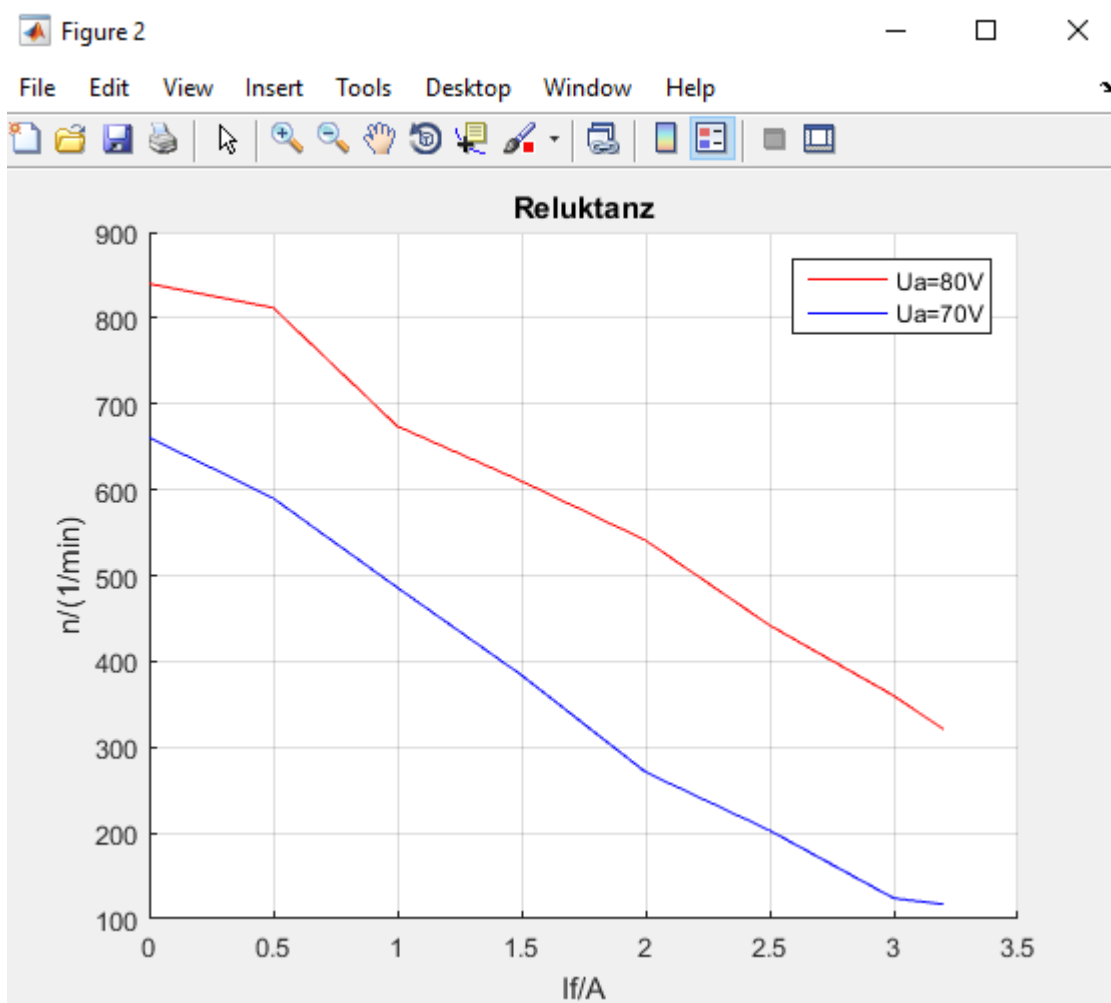


Abbildung 24: Drehzahl als Funktion zum Erregerstrom

Die wirkende Reluktanzkraft kann bei eingeschaltetem Rotorstrom am Synchrongenerator und händischer Rotation des Rotors auch anhand des auftretenden Widerstandes gefühlt werden.

Eine weitere Idee für den Aufbau des Synchrongenerators ist die Beobachtung des Polradwinkels. Aus Abbildung 20 (Kapitel 3.3.1.) ist bekannt, dass sie das Moment der Maschine als Funktion des Polradwinkels beschreiben lässt. Wird die Maschine als Motor betrieben und mit einem konstanten Moment belastet, so eilt das Polrad um einen konstanten Winkel nach. Wird ein Stroboskop mit der Netzspannung synchronisiert zeigt es den Rotor für das menschliche Auge immer zum gleichen Zeitpunkt. Wird nun das belastende Moment variiert, stellt sich ein Versatz des Polradwinkels ein. Dieser kann anschließend mit den bekannten mathematischen Formeln (Kapitel 3.3.2.) der Maschine verifiziert werden. Mit Hilfe dieses Versuchs wird bildlich die Abhängigkeit des Moments vom Polradwinkel dargestellt und so ein tiefgehendes Verständnis über die Funktion der

Synchronmaschine erreicht. Leider ist es mit dem derzeitigen Aufbau nicht möglich diesen Winkel sichtbar zu machen, da aufgrund der mechanischen Mängel (Unwucht der Wellen) und der hohen elektrischen Verluste kein konstantes Moment und keine konstante Drehzahl erreicht werden konnten.

#### **4. Sicherheitsbewertung**

Der Motorbaukasten weist erhebliche Sicherheitsmängel während des Betriebes auf und sollte daher nicht ohne Sicherheitseinweisung betrieben werden.

Die Drehzahl einiger Maschinen kann bis zu 3000 Umdrehungen pro Minute betragen. Bei derartigen Betriebspunkten entwickeln die schweren Rotorelemente sehr hohe kinetische Energien und sind dennoch jederzeit mit bloßer Hand berührbar. Wird zufällig ein Kleidungsstück oder gar ein Finger in die sich rotierende Maschine eingeklemmt, ist mit schweren Verletzungen zu rechnen. Daher wird dazu geraten die Maschinen mit einer (Plexi-)Glas Barriere abzusichern, die ein direktes Berühren verhindert und gleichzeitig die physikalischen Vorgänge innerhalb der Maschinen sichtbar bleiben lässt.

Des Weiteren könnte diese Barriere auch die Fingersicherheit in Bezug auf die elektrische Kontaktierung erhöhen. Die Kontaktierungen an den Bauteilen des Baukastens sind nicht isoliert und können während des Betriebs problemlos berührt werden. Dabei arbeiten die Maschinen mit Berührungsspannungen oberhalb des lebensgefährlichen Bereichs nach DIN VDE 0100. [ETA] Nach dieser DIN Norm sind Gleichspannungen größer 120V und Wechselspannungen größer 50V als lebensbedrohlich definiert.

Ein weiterer sicherheitskritischer Aspekt ist die starke Vibration infolge der hohen Drehzahlen. Durch die Vibration können sich elektrische Kontaktierungen lösen. Diese stehen dann aber immer noch unter Spannung und stellen somit eine weitere potentielle Gefahrenquelle dar.

#### **5. Fazit**

Die Zielformulierung dieses Entwicklungsprojekts beinhaltet den Aufbau und die Inbetriebnahme einer Gleichstrommaschine, einer Asynchronmaschine und einer Synchronmaschine. Dazu sollten zu allen Aufbauten Praktikumsaufgaben entwickelt werden, die auch für die Lehre Anwendung finden können.

Im Verlauf dieses Projekts sind alle drei Maschinentypen in Betrieb genommen und ihre jeweilige Funktionsweise anhand der elektromagnetischen Induktion und der Lorentzkraft erklärt und dokumentiert worden. Die enge Verbindung zwischen der physikalischen

Theorie und der empirischen Arbeit mit den Maschinen, führte letztlich zu Praktikumsversuchen, die vor allem die elektromagnetischen Phänomene in den Vordergrund stellen. Es wurde darauf verzichtet das Betriebsverhalten der Maschinen hinsichtlich ihrer effizientesten Betriebspunkte zu ermitteln. Vielmehr stellt dieses Projekt, auch bedingt durch seine ineffizienten Bauteile und Aufbauten, die physikalische Funktion in den Mittelpunkt.

Anhand der Grundlagen wird die Momentbildung und die Wandlung von mechanischer in elektrische Energie für alle drei Maschinentypen erklärt. Durch diesen gewählten Ansatz soll das physikalische Verständnis der elektrischen Maschinen vertieft werden.

Die Praktikumsversuche sind je nach vier Gesichtspunkten aufgebaut:

- Identifikation durch den Studenten

Dieser Punkt soll das Wissen der Studenten testen und sie ggf. in die richtige Richtung weisen und berichtigen, wenn die charakteristischen Elemente einer jeden Maschine nicht erkannt wurden. Außerdem dient dieser Punkt als Kontrolle, damit niemand an den gefährlichen Motoren arbeitet, ohne ein gewisses Basiswissen nachzuweisen.

- Elektrische Verschaltung

Oftmals sind elektrische Maschinen in ein Gehäuse eingebettet, bei dem nur noch beschriftete Anschlussklemmen nach Außen geführt sind. Die Stärke des Motorbaukastens liegt auch darin, dass eigenständig die Wechselwirkung zwischen elektrischem Strom, wirkenden Magnetfeldern und mechanischer Rotation hergeleitet werden muss und ausprobiert werden kann. Auf diese Weise werden die Ausrichtung der Magnetfelder und alle weiteren wechselwirkenden Effekte der Maschinen selbstständig vom Studenten in Erfahrung gebracht. Dies führt zu der gewollten Fokussierung auf die physikalische Funktionsweise.

- Physikalische Funktionsweise

Mit Hilfe des Motorbaukastens lässt sich eine Vielzahl elektromagnetischer Phänomene anhand der Maschinen demonstrieren. In den entwickelten Praktikumsvorschlägen wird vor allem auf die Grundlagen aus Kapitel 2.2. (Lorentzkraft) und 2.3. (Faraday'sches Induktionsgesetz) Bezug genommen. Anhand dieser beiden Effekte lassen sich Motor- und Generatoranwendung der

Maschinen und somit ihre fundamentalen Eigenschaften als elektromechanische Energiewandler erklären.

Auf diese Weise soll das Wissen der prinzipiellen Funktionsweise einer jeden Maschine von ihrem Aufbau über den elektrischen Anschluss bis hin zur Moment- oder Spannungsbildung weitergegeben und erlernt werden.

- Motorkennlinien

Die Motorkennlinien beschreiben als Abschluss das Betriebsverhalten der Maschinen. Sie fokussieren den Zusammenhang zwischen den physikalischen und mathematischen Beschreibungen in Bezug auf die unterschiedlichen Aufbauten.

Der Motorbaukasten besteht aus vielen einzelnen Elementen, die unterschiedlich zusammengefügt werden können. Wird an dieser Eigeninitiativen Philosophie festgehalten, kann jeder Benutzer vom Aufbau über die Verschaltung bis hin zur Erklärung der physikalischen Funktionsweise ein Maximum an Wissen aus ihnen mitnehmen.

## Literaturverzeichnis

- [ELE] Siegmund Brandt, Hans Dieter Dahmen. Elektrodynamik-Eine Einführung in Experiment und Theorie. 4.Auflage, 2005, Springer Verlag
- [EAG] Dierk Schröder. Elektrische Antriebe-Grundlagen. 5.Auflage, 2013, Springer Verlag
- [EAR] Dierk Schröder. Elektrische Antriebe-Regelung von Antriebssystemen. 4.Auflage, 2015, Springer Verlag
- [ETA] Gerhard Brechmann, Dr. Michael Dzieia, Ernst Hörnemann, Heinrich Hübscher, Dieter Jagla, Jürgen Klaue, Harald Wickert, Elektronik Tabellen, Betriebs- und Automatisierungstechnik, 2009, Westermann Verlag
- [EMTP] Ali Farschtschi. Elektromaschinen in Theorie und Praxis-Aufbau, Wirkungsweisen, Anwendungen, Auswahl- und Auslegungskriterien. 2001, VDE Verlag
- [EM] Prof. Dr. Wilfried Hofmann- Elektrische Maschinen Lehr- und Übungsbuch, 2013, Pearson Verlag
- [TEM] Gernar Müller und Bernd Ponick. Theorie elektrischer Maschinen. 6.Auflage, 2009, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.KGaA
- [EMA] Rolf Fischer. Elektrische Maschinen. 16.Auflage, 2013, Carl Hanser Verlag
- [TPH] Peter E. Blöchl. Theoretische Physik II-Elektrodynamik. 2000-September 15, 2013, Institut für Theoretische Physik, Technische Universität Clausthal  
<http://orion.pt.tu-clausthal.de/atp/phix.html>
- [HSBO] Prof. Dr. Arno Bergmann- Aktorik2-Elektrische Antriebe-September 2015, Institut für Antriebstechnik, Hochschule Bochum

- [HSKA] Dr.-Ing. H. Vogelmann- Elektrotechnik und Elektronik für Maschinenbauingenieur-Synchronmaschine, Duale Hochschule Baden-Württemberg Karlsruhe
- [TPE] Dirk H. Rischke. Theoretische Physik III-Elektrodynamik. Wintersemester 2010/2011, Goethe Universität Frankfurt am Main  
[http://th.physik.uni-frankfurt.de/~drischke/Skript\\_Elektrodynamik.pdf](http://th.physik.uni-frankfurt.de/~drischke/Skript_Elektrodynamik.pdf)
- [IGET] IGET-Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Elektromagnetische Verträglichkeit-Lernprogramm Induktionsvorgänge, Version 07.12.2003, Universität Magdeburg  
<http://www.ovgu.de/iget/multimedia/downloads/induction.pdf>
- [ILEA-1] ILEA-Institut für Leistungselektronik und Elektrische Antriebe- Grundlagenpraktikum Versuch 002 „Die Gleichstrommaschine“, Prof. Dr.-Ing. N. Parspour, April 2008, Universität Stuttgart
- [ILEA-2] ILEA-Institut für Leistungselektronik und Elektrische Antriebe- Grundlagenpraktikum Versuch 007 „Drehstrom-Asynchronmaschine“, Prof. Dr.-Ing. N. Parspour, April 2008, Universität Stuttgart
- [IEW] IEW-Institut für elektrische Energiewandlung-Praktikum Erneuerbare Energien Versuch 3 „Synchronmaschine“, April 2008, Universität Stuttgart
- [EAA] EAA-Elektrische Antriebstechnik und Aktorik- Vorlesung „Elektrische Maschinen und Antriebe“, Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling, Universität der Bundeswehr München
- [TFCAK] Institut für Leistungselektronik-Grundlagenpraktikum Versuch-Nr.:E403 „Asynchronmotor“, Prof. Dr. Marco Liserre, 25.09.2014, Technische Fakultät der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel  
<http://www.tf.uni-kiel.de/servicezentrum/neutral/praktika/anleitungen/e403.pdf>



Internetartikel & Bilder:

[Link1]

[https://www.schullv.de/resources/06\\_physiklv/01\\_basiswissen/lorentzkraft\\_skript.pdf](https://www.schullv.de/resources/06_physiklv/01_basiswissen/lorentzkraft_skript.pdf)

Abruf: 20.01.2016

[Link2]

[https://de.wikipedia.org/wiki/Gleichstrommaschine#/media/File:Ersatzschaltbild\\_Gleichstrommaschine.svg](https://de.wikipedia.org/wiki/Gleichstrommaschine#/media/File:Ersatzschaltbild_Gleichstrommaschine.svg)

Abruf:23.01.2016

[Link3]

[http://www.energie.ch/assets/images/article/Bilder/Diagramme/asynchronmaschine\\_mn\\_ursprung.gif](http://www.energie.ch/assets/images/article/Bilder/Diagramme/asynchronmaschine_mn_ursprung.gif)

Abruf 17.02.2016

[Link4]

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/ab/Vereinfachtes\\_Ersatzschaltbild\\_Synchronmaschine\\_am\\_Netz.svg/220px-](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/ab/Vereinfachtes_Ersatzschaltbild_Synchronmaschine_am_Netz.svg/220px-Vereinfachtes_Ersatzschaltbild_Synchronmaschine_am_Netz.svg)

[Vereinfachtes\\_Ersatzschaltbild\\_Synchronmaschine\\_am\\_Netz.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/ab/Vereinfachtes_Ersatzschaltbild_Synchronmaschine_am_Netz.svg/220px-Vereinfachtes_Ersatzschaltbild_Synchronmaschine_am_Netz.svg.png)

Abruf 04.02.2016