

# Fachpraktikum

## Hochdynamische Antriebssysteme

### Theoretische Grundlagen

Christof Zwysig

Franz Zürcher

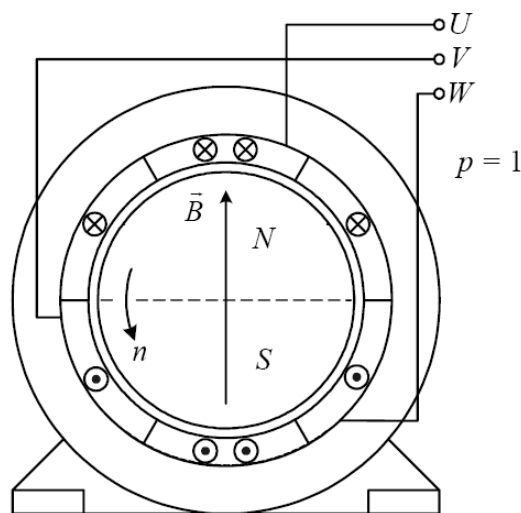
Philipp Karutz

### Permanentmagneterregte Synchronmaschine

Die hier aufgeführten theoretischen Betrachtungen dienen dem Grundverständnis für die Versuchsumgebung des Praktikumsversuches. Sie sollen nur einen Überblick über die physikalischen Vorgänge geben und das bereits Gelernte noch einmal auffrischen. Auf eine vollständige Herleitung der Gleichungen wird daher verzichtet.

Die zuvor vorgestellte Gleichstrommaschine zeichnet sich besonders durch die einfache Drehzahl- und Positionsregelung aus. Allerdings beschränkt die Konstruktion die Regeldynamik durch die relativ hohe Massenträgheit des Rotors (Rotorwicklungen). Weiterhin erhöht der Verschleiss des mechanischen Kommutators den Wartungsaufwand, was in industriellen Anwendungen mit erhöhten Betriebskosten verbunden ist.

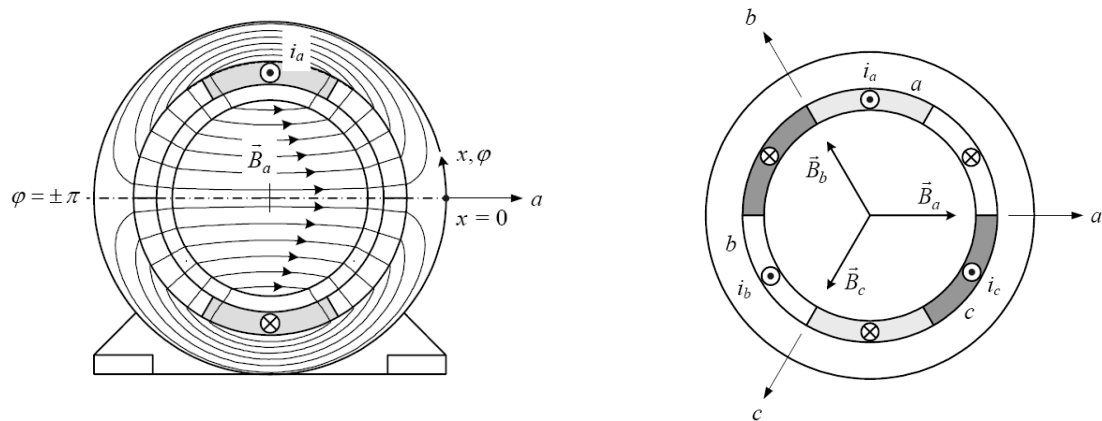
Man kann nun auf die Wicklungen am Rotor und den Kommutator verzichten, wenn man die Permanentmagnete auf den Rotor verlagert. Nun muss am Stator ein Drehfeld erzeugt werden, man was man zweckmässig mit Hilfe einer dreiphasigen Drehfeldwicklung erreicht (siehe Abb. 1).



**Abb. 1: Prinzipdarstellung einer zweipoligen permanentenerregten Synchronmaschine.**

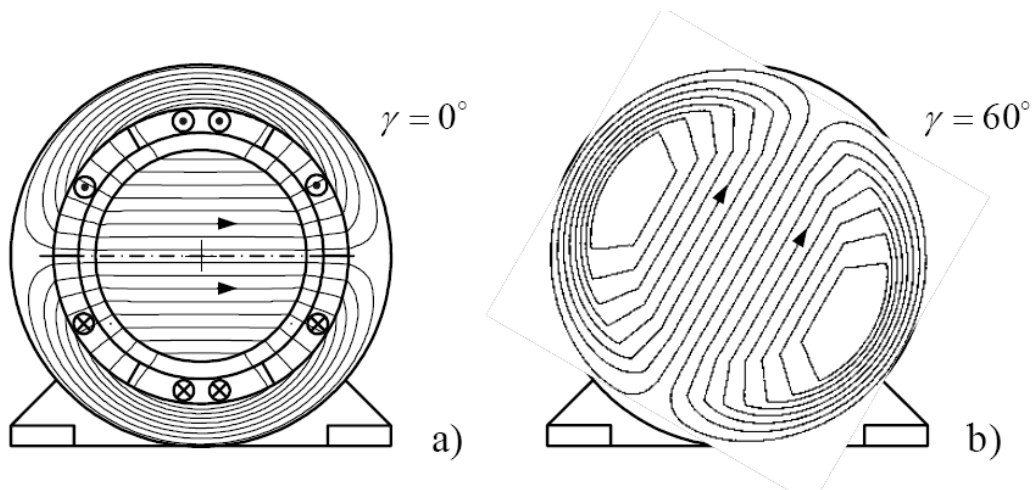
Um ein gleichförmiges Moment zu erzeugen ist es nun notwendig, dass das Statorfeld mit dem Rotorfeld synchronisiert wird. Aufgrund dieses Funktionsprinzips wird diese Maschine daher als Synchronmaschine bezeichnet. Anmerkung: Es ist auch möglich das Rotorfeld über eine dreiphasige Rotorwicklung mit Schleifringläufern zu erzeugen, allerdings verliert diese Maschine die vorher erwähnten Vorteile gegenüber der Gleichstrommaschine.

Wenn nun ausschließlich eine Motorphase bestromt wird, so bildet sich im Rotor ein magnetisches Feld aus, dessen Richtung quer zur Phasenachse steht (siehe Abb. 2 links). Die daraus resultierende Definition der Bezugsrichtungen ist in Abb. 2 rechts dargestellt.



**Abb. 2:** Feldbild bei ausschliesslicher Bestromung von Phase a (links) und resultierende Bezugsrichtung der durch einen Strangstrom hervorgerufenen magnetischen Induktion (rechts).

Ordnet man die Dreiphasenwicklung nun mit räumlich symmetrisch verteilten Strangwicklungen gleicher Windungszahl an und speist diese mit zeitlich symmetrisch phasenverschobenen sinusförmigen Wechselströmen gleicher Amplitude, so bildet sich ein Drehfeld mit konstanter Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  und konstanter Amplitude der magnetischen Induktion  $B$  aus. Dieser Sachverhalt ist schematisch in Abb. 3 dargestellt und kann im Internet mit Hilfe einer Java-Applikation nachvollzogen werden (<http://tinyurl.com/bemg6t>). Es ist zu beachten, dass jede Abweichung von den Symmetriebedingungen eine Verzerrung des Feldes zur Folge hat.



**Abb. 3:** Feldbild für verschiedene Zeitpunkte einer Netzperiode bei Speisung der Statorwicklung mit einem symmetrischen Drehstromsystem.

Neben dem durch die bestromten Statorwicklungen hervorgerufenen Fluss, wird auch durch die Permanentmagnete auf dem Rotor ein Fluss  $\psi_{PM}$  hervorgerufen. Dieser Fluss ändert sich zeitlich durch die Drehung des Rotors und durchflutet für eine volle Umdrehung des Rotors alle Antriebsspulen. Die zeitliche Änderung des Flusses führt daher nach dem Induktionsgesetz zu einer induzierten Spannung  $U_{ind}$  in den Antriebsspulen.

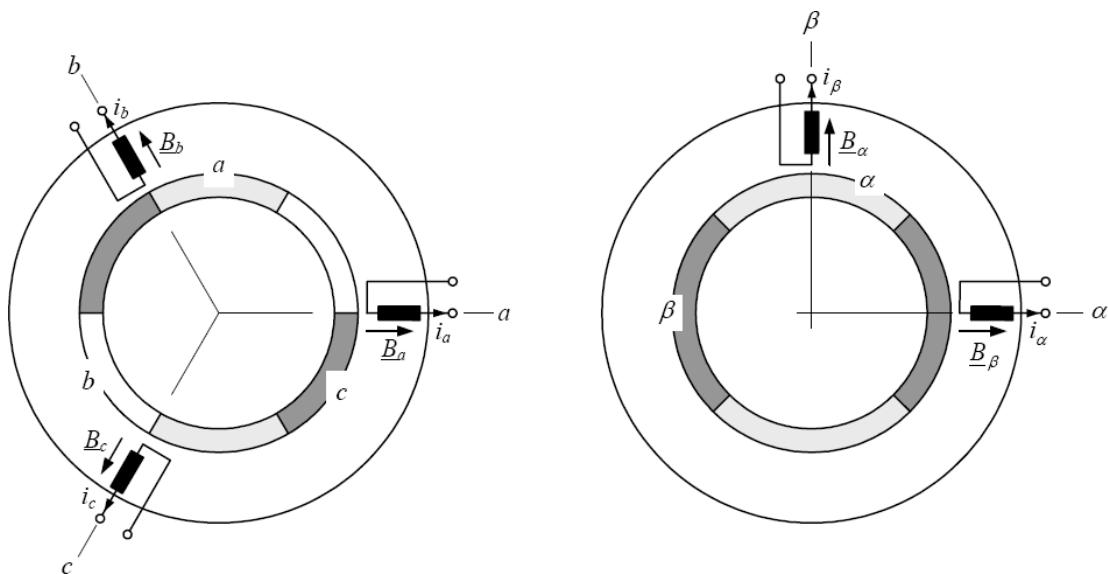
$$U_{ind} = \frac{d\psi_{PM}}{dt} = \omega \cdot \psi_{PM}$$

Durch die Ableitung des Flusses  $\psi_{PM}$  ergibt sich eine Phasenverschiebung von  $90^\circ$  zur induzierten Spannung. Da sich die Leistung des Antriebes aus dem Produkt von induzierter Spannung  $U_{ind}$  und dem jeweiligen Phasenstrom ergibt, ist es zweckmässig den Phasenstrom so einzustellen, dass er in Phase mit der induzierten Spannung ist. Dies wird im Allgemeinen durch die feldorientierte Regelung erreicht.

In industriellen Anwendungen ist es meistens notwendig die Drehzahl bzw. Position des Rotors direkt zu regeln. Dazu muss die Drehgeschwindigkeit  $\omega$  des Drehfeldes beeinflusst werden, was mit Hilfe von modernen Umrichtern realisiert wird. Um die Regelung solcher Umrichter mit linearen Reglern zu ermöglichen, werden im Folgenden noch einige Punkte zur Vereinfachung der Regelung erläutert.

Reale Maschinen haben im Allgemeinen um den Umfang verteilte Wicklungen, die zu einer sinusförmigen Verteilung der Flussdichte im Rotor führen. Um die Modellbildung zur Vereinfachen wird im Weiteren aber davon ausgegangen, dass alle Wicklungen in einem Punkt konzentriert sind. Dies ist dann legitim, wenn man beachtet, dass die daraus resultierende höhere Induktion mit der sogenannten effektiven Windungszahl (vermindert das durch die konzentrierten Wicklungen berechnete Moment wieder auf den tatsächlichen Wert der verteilten Wicklungen) verknüpft ist.

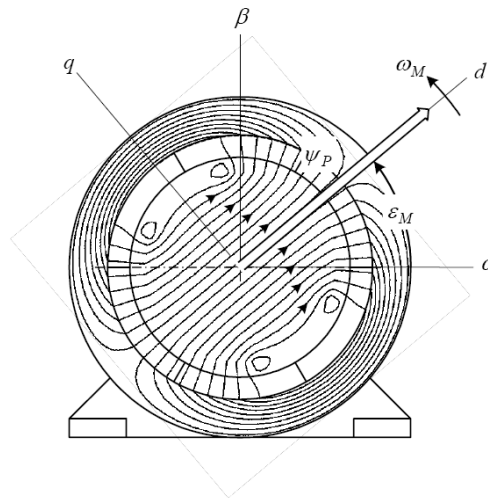
Ausgehend von den konzentrierten Wicklungen müssen für eine Drehzahlregelung die sinusförmigen Ströme in den drei Antriebsphasen geregelt werden. Die Auslegung und Implementierung eines solchen nicht-linearen Reglers (Sinusgrössen) ist aufwendig und speicherintensiv. Ein Weg um das System zu Vereinfachen ist, dass dreiphasige System durch ein zweiphasiges System darzustellen. Dieser mathematische Vorgang wird in der Literatur oft als  $abc \rightarrow \alpha\beta$  Transformation bezeichnet und ist in Abb. 4 dargestellt.



**Abb. 4:** Abbildung der Dreiphasigen Statorwicklung (links) auf eine zweiphasige Statorwicklung mit der Darstellung der Stränge der Statorwicklungen als konzentrierte Induktivitäten.

Mit diesem als ruhendes Koordinatensystem bezeichneten Modell wurde die Anzahl der zu regelnden Ströme auf zwei reduziert. Allerdings müssten die Ströme immer noch als sinusförmige Grössen betrachtet werden. Eine weitere Vereinfachung aus Sicht des Reglers kann nun erreicht werden, wenn man das  $\alpha\beta$ -Koordinatensystem auf den Rotor bezieht und mit dessen Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  mitdreht. Um Verwechselungen zwischen den Koordinatensystemen zu

Vermeiden werden die Achsen nun als d und q bezeichnet. Dabei wird die d-Achse (direct axis) immer in Richtung der Magnetisierung liegen und die q-Achse immer senkrecht dazu (siehe Abb. 5).



**Abb. 5: Definition des rotorfesten Koordinatensystems mit der d-Achse in Richtung der Magnetisierung des Polrades und der q-Achse senkrecht zur d-Achse. Das ruhende Koordinatensystem wird durch die α- und β-Achse definiert.**

Das dq-Koordinatensystem dreht sich nun mit der Winkelgeschwindigkeit des Rotors, was zu einer Gleichrichtung der Größen führt. Die mathematische Beschreibung der direkten Transformation vom abc System ins dq System (Park-Transformation) ist durch folgende Formeln gegeben:

$$V_d = \frac{2}{3} \left( V_a \sin(\omega t) + V_b \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + V_c \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \right)$$

$$V_q = \frac{2}{3} \left( V_a \cos(\omega t) + V_b \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + V_c \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \right)$$

Für die Transformation ist also nur der aktuelle Drehwinkel des Rotors notwendig, welcher durch einen Inkrementalgeber der an die Welle der Synchronmaschine geflanscht wird ermittelt wird. Im Rotorfestenkoordinatensystem kann der Einfluss von d- und q-Strom anschaulich verdeutlicht werden. Wird in die Windungen am Stator ein d-Strom eingeprägt, so sind die Flusslinien des erzeugten magnetischen Feldes parallel zu denen des Permanentmagneten. Dies bedeutet, dass der d-Strom keinerlei Moment hervorruft, sondern nur das Rotorfeld verstärkt oder abschwächt. Im Sinne minimaler Verluste ist diese Komponente in der Regelung daher auf Null zu halten (alternativ wird diese Komponente auch für den Feldschwächbetrieb eingesetzt, der hier aber nicht weiter betrachtet werden soll). Daraus folgt, dass die Momenten- und Drehzahlregelung der Synchronmaschine allein durch die q-Komponente des Stromes bestimmt wird, wobei das Drehmoment mit

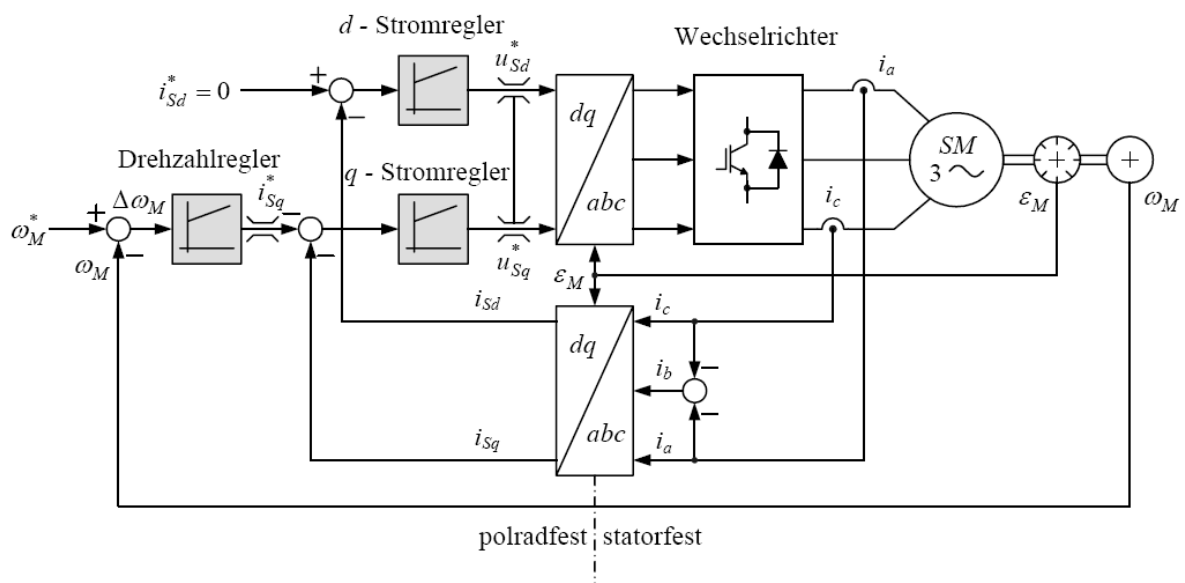
$$M = \frac{3}{2} \cdot i_q \cdot \psi_{PM}$$

definiert ist. Die mechanische Gleichung zur Beschreibung der PMSM ist mit

$$J \frac{d\omega}{dt} = M - M_L$$

gegeben, wobei hier die Änderung der Drehzahl  $\omega$  bei einem gegebenen Trägheitsmoment  $J$  des Rotors der Differenz von erzeugtem Antriebsmoment  $M$  und wirkendem Lastmoment  $M_L$  ist. Die Trägheitskonstante ist allgemein so gross, dass sich Änderungen in der Bestromung durch  $i_q$  nur langsam auf die Änderung der Drehzahl auswirken. Daher ist es aus regelungstechnischer Sicht möglich einen kaskadierten Regler aufzubauen, bei dem der Strom in einer schnellen inneren Schleife geregelt wird und die Drehzahl in einer langsameren äusseren Schleife.

Das regelungstechnische Blockschaltbild für die Drehzahlregelung der Synchronmaschine ist in Abb. 6 gezeigt. Der Sollwert für den d-Strom ist auf Null gesetzt und der Sollwert für den q-Strom wird durch den überlagerten Drehzahlregler vorgegeben. Den zwei Transformationen, von dq nach abc und zurück, wird der aktuellen Lagewert des Rotors  $\epsilon_M$  durch den Inkrementalgeber zugeführt. Durch die „Gleichrichtung“ der Momentanstromwerte wird eine Regulationsstruktur erreicht, die im Prinzip genau der Gleichstrommaschine entspricht.



**Abb. 6: Blockschaltbild der Drehzahlregelung der PMSM mit unterlagelter Stromregelung in polradfesten Koordinaten.**

Fragen:

1) In der Tabelle sind die Amplitudenwerte eines symmetrischen Dreiphasensystems mit  $f=60\text{Hz}$  für verschiedene Zeitpunkte aufgetragen. Ermitteln Sie mit Hilfe der Formeln für die abc→dq Transformation aus dem Theorieteil die Momentanwerte für  $V_d$  und  $V_q$ .

t [s]	$V_a$ [V]	$V_b$ [V]	$V_c$ [V]	$V_d$ [V]	$V_q$ [V]
0	0	-0.87	0.87	1	0
0.0067	0.59	0.41	-0.99	1	0
0.0158	-0.31	-0.67	0.98	1	0