

Vorwort

Liebe Studentin! Lieber Student!

Das vorliegende Skript umfasst den Stoffumfang des Vorlesungsteils "Elektrische Energiewandler" der Vorlesung "Energietechnik". Da die Prüfung schriftlich ist, existiert neben den in den Übungen vorgerechneten Beispielen zusätzliche eine **Aufgabensammlung** mit ausgearbeiteten Beispielen. Dort finden Sie auch **Kontrollfragen** zur Selbstkontrolle, ob Sie den Lehrinhalt verstanden haben. Der Stoff der Vorlesung ist so gegliedert, dass an die bereits in den Vorlesungen "Grundlagen der Elektrotechnik" gebrachten Inhalte angeknüpft werden kann. Im Text wird auf dieses Grundlagenwissen aus den Büchern

Clausert, H.; Wiesemann, G.; Stenzel, J.; Hinrichsen, V.: Grundgebiete der Elektrotechnik, Bände 1 und 2, Oldenbourg-Verlag, 11. Aufl., 2011

zurückgegriffen. Deshalb sind diese Grundlagenkenntnisse für das Verstehen des Vorlesungsinhalts **unbedingt** erforderlich. Zur Ihrem Service finden Sie im Anhang (Kap. 5) wesentliche Teile des für diese Vorlesung erforderlichen Grundlagenwissens zusammengefasst.

Nicht prüfungsrelevant:

- Mathematische Ableitungen (Die für die schriftliche Prüfung benötigten Formeln werden als Formelsammlung zur Prüfung zur Verfügung gestellt).
- Kapitel 4.6

Das Stoffgebiet ist so dargestellt, dass für alle Studentinnen und Studenten der Bachelor-Studiengänge "Elektrotechnik und Informationstechnik", „Mechatronik“ und „WI-ET Vertiefung Energietechnik“ ein Überblick über gängige Prinzipien und Technologien der elektrischen Energiewandlung geboten wird. Zur weiteren Vertiefung wird in diesen Bachelor-Studiengängen die Vorlesung "Elektrische Maschinen und Antriebe" angeboten. In den entsprechenden Master-Studiengängen finden Sie dann die Lehrveranstaltungen „Energy Converters – CAD and System Dynamics“, "Motorenentwicklung für die Antriebstechnik", "Großgeneratoren und Hochleistungsantriebe", "Kleinmotoren", "Neue Technologien bei elektrischen Energiewandlern“, „Praxisorientierte Projektierung elektrischer Antriebe (E-Auto)“ (Projektseminar), ein Seminar zur numerischen Feldberechnung in elektrischen Maschinen sowie begleitende Praktika.

Sollten Sie Fragen, Wünsche oder Anregungen haben, wenden Sie sich bitte an meine Assistenten oder direkt an mich. Ich wünsche weiterhin guten Erfolg bei Ihrem Studium und gutes Gelingen bei der Prüfung zur Vorlesung "Energietechnik".

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Andreas Binder

Darmstadt, im Februar 2015

Inhaltsverzeichnis zu „Energietechnik“ - Teil: Elektrische Energiewandler

	Seite
1. Elektrische Energiewandlung - Einführung	1.1
1.1 Grundsätzliche Einteilung elektrischer Energiewandler	1.1
1.2 Elektrische und magnetische Energiewandlung	1.2
1.3 Beispiel eines einfachen elektromechanischen Energiewandlers	1.4
1.4 Zählpeilsysteme	1.5
2. Transformatoren	2.1
2.1 Funktionsprinzip des Einphasentransformators	2.2
2.2 Der Einphasentransformator bei Sinusspannungen	2.5
2.3 Bauformen von Einphasen-Transformatoren	2.10
2.4 Drehstromtransformatoren	2.11
2.5 Schaltungsvarianten von Drehstromtransformatoren	2.14
2.6 Leistungsschildangaben bei Drehstromtransformatoren	2.16
3. Gleichstrommaschinen	3.1
3.1 Funktionsweise der Gleichstrommaschine	3.1
3.2 Ankerwicklung	3.7
3.3 Ankerstrom und elektromagnetisches Drehmoment	3.9
3.4 Elektromechanische Energiewandlung in der Gleichstrommaschine	3.11
3.5 Der fremderregte Gleichstrommotor und der Nebenschluss-Motor	3.12
3.6 Wechselstrom-Kommutatormaschinen	3.17
4. Drehfeldmaschinen	4.1
4.1 Prinzipielle Erzeugung eines magnetischen Drehfelds	4.1
4.2 Technische Erzeugung eines magnetischen Drehfelds	4.2
4.3 Drehfrequenz des Drehfelds	4.7
4.4 Asynchronmaschinen	4.8
4.4.1 Aufbau von Asynchronmaschinen	4.9
4.4.2 Funktionsweise von Asynchronmaschinen	4.10
4.4.3 Ersatzschaltbild der Asynchronmaschine	4.11
4.4.4 Stromaufnahme der Asynchronmaschine	4.13
4.4.5 Leistungsbilanz und Drehmoment der Asynchronmaschine	4.14
4.4.6 Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie der Asynchronmaschine	4.15
4.5 Synchronmaschinen	4.17
4.5.1 Aufbau und Funktionsweise von Synchronmaschinen	4.17
4.5.2 Ersatzschaltbild und Zeigerdiagramm der Synchronmaschine	4.21
4.5.3 Generator- und Motorbetrieb -Bedeutung des Polradwinkels	4.23
4.5.4 Drehmoment, Wirk- und Blindleistung der Synchronmaschine	4.24
4.6 Turbinen als Synchrongeneratorantriebe (Übersicht) (kein Prüfungstoff!)	4.26
5. Anhang: Repetitorium: Grundgesetze der Mechanik, Elektromagnetik und Drehstromtechnik	5.1

Grundlegende und weiterführende Literatur

- [1] Fischer, R.: Elektrische Maschinen, 12. Auflage, Hanser Verlag, München, 2004
- [2] Bödefeld, Th.; Sequenz, H.: Elektrische Maschinen. Eine Einführung in die Grundlagen, Springer-Verlag, Wien, 1971
- [3] Prechtel, A.: Vorlesungen über die Grundlagen der Elektrotechnik, Springer-Verlag, Wien, Band 1: 1994, Band 2: 1995,
- [4] Clausert, H.; Wiesemann, G.; Stenzel, J.; Hinrichsen, V.: Grundgebiete der Elektrotechnik, Bände 1 und 2, Oldenbourg-Verlag, 11. Aufl., 2011
- [5] Albach, M.: Grundlagen der Elektrotechnik 1 + 2, Pearson Studium, München, 2004
- [6] Bohn, T.: Elektrische Energietechnik, Handbuchreihe Energie, 4. Bd., Verlag TÜV Rheinland, 1987
- [7] Brosch, P.: Moderne Stromrichterantriebe – Leistungselektronik und Maschinen, Vogel-Verlag, 3. Auflage 1998
- [8] Falk, K.: Der Drehstrommotor – Ein Lexikon für die Praxis, VDE-Verlag GmbH, Berlin-Offenbach, 1997
- [9] Hindmarsh, J.; Renfrew, A.: Electrical Machines and Drive Systems, Newnes, Oxford, 3rd ed., 2002
- [10] Fitzgerald, A.E.; Kingsley, Ch.; Umans, S.D.: Electrical Machinery, McCraw-Hill, New York, 6th ed., 2003
- [11] Justus, O.: Dynamisches Verhalten elektrischer Maschinen – Eine Einführung in die numerische Modellierung mit PSPICE, Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden, 1993
- [12] Spring, E.: Elektrische Maschinen – eine Einführung, Springer, Berlin 1998
- [13] Hofmann, W.: Elektrische Maschinen, Pearson, München 2013

Das griechische Alphabet

$A \alpha$	Alpha	$B \beta$	Beta	$\Gamma \gamma$	Gamma	$\Delta \delta$	Delta
$E \varepsilon$	Epsilon	$Z \zeta$	Zeta	$H \eta$	Eta	$\Theta \vartheta$	Theta
$I \iota$	Jota	$K \kappa$	Kappa	$\Lambda \lambda$	Lambda	$M \mu$	My (mue)
$N \nu$	Ny (nue)	$\Xi \xi$	Xi	$O \omicron$	Omikron	$\Pi \pi$	Pi
$P \rho$	Rho	$\Sigma \sigma$	Sigma	$T \tau$	Tau	$Y \upsilon$	Ypsilon
$\Phi \phi$	Phi	$X \chi$	Chi	$\Psi \psi$	Psi	$\Omega \omega$	Omega

Verwendete wichtige Formelzeichen

a	-	Anzahl paralleler Wicklungszweige bei Drehfeldmaschinen, aber: HALBE Anzahl paralleler Wicklungszweige bei Gleichstrommaschinen
A	m^2	Fläche
B	T	magnetische Induktion (Flussdichte) (1 T = 1 Tesla = 1Vs/m ²)
d_{si}	m	Bohrungsdurchmesser
E	V/m	elektrische Feldstärke
f	Hz	elektrische Frequenz (1 Hz = 1 Hertz = 1/s)
F	N	Kraft
H	A/m	magnetische Feldstärke
I	A	elektrische Stromstärke
j	-	imaginäre Einheit $\sqrt{-1}$
J	kgm ²	Trägheitsmoment
J	T	magnetische Polarisation

k	-	Maschinenkonstante
K	-	Anzahl der Kommutatorsegmente
l	m	(axiale) Länge
L	H	Selbstinduktivität (1 H = 1 Henry = 1 Vs/A)
m	kg	Masse
m	-	Strangzahl
M	H	Gegeninduktivität
M	Nm	Drehmoment
M_b	Nm	asynchrones Kippmoment
M_{p0}	Nm	synchrones statisches Kippmoment
M_l	Nm	asynchrones Anfahrmoment
n	1/s	Drehzahl
N	-	Windungszahl je Strang
N_c	-	Spulenwindungszahl
p	-	Polpaarzahl
r	m	Radius
P	W	Leistung (1 W = 1 Watt = 1 V·A)
q	-	Lochzahl (Nuten pro Pol und Strang)
Q	VAR	Blindleistung (1 VAR = 1 VA reaktiv)
Q	-	Nutzzahl
R	Ω	elektrischer Widerstand (1 Ω = 1 Ohm = 1V/A)
s	-	Schlupf
s	m	Weglänge
S	VA	Scheinleistung
t	s	Zeit
T	s	Schwingungsperiodendauer
u	-	Spulenseiten je Nut und Schicht
U	V	elektrische Spannung
U_p	V	Polradspannung
\ddot{u}	-	Übersetzungsverhältnis
v	m/s	Geschwindigkeit
W	J	Energie
x	m	Umfangskoordinate
X, X_d	Ω	Reaktanz, synchrone Reaktanz
z	-	gesamte Leiterzahl
α	rad	Zündwinkel
α_e	-	äquivalente Polbedeckung
γ	rad	Drehwinkel
γ	kg/m ³	Massendichte
δ	m	Luftspalt
ε	As/(Vm)	Dielektrizitätskonstante
φ	rad	Phasenwinkel
Φ	Wb	magnetischer Fluss (1 Wb = 1 Weber = 1 Vs)
Ψ	Vs	magnetische Flussverkettung
Λ	Vs/A	magnetischer Leitwert
μ	Vs/(Am)	magnetische Permeabilität
μ_0	Vs/(Am)	magnetische Permeabilität des Vakuums ($4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/(Am))
η	-	Wirkungsgrad
ϑ	rad	Polradwinkel (elektrische Gradezählung)
Θ	A	elektrische Durchflutung

κ	S/m	elektrische Leitfähigkeit (1 S = 1 „Siemens“ = 1 A/V)
σ	-	Streuziffer
τ_p, τ_Q	m	Polteilung, Nutteilung
ω	1/s	elektrische Kreisfrequenz
Ω_m	1/s	mechanische Winkelgeschwindigkeit

Indizes

a	Anker
av	Mittelwert
b	Bürste, Blindkomponente
B	Beschleunigung
c	Spule
Cu	Kupfer
d	direct (längs), dc (Gleichgröße), Verluste (dissipation)
e	elektrisch bzw. äquivalent
f	Feld
Fe	Eisen
Ft	Wirbelstrom (<i>Foucault</i>)
G	Gate
h	Haupt-
hys	Hysterese
i	induziert bzw. innere
in	zugeführt
k	Kurzschluss-
m	Magnetisierungs-, magnetisch bzw. mechanisch bzw. maximal
max	maximal
N	Nenn-
out	abgegeben
p	Pol bzw. Polrad
r	Rotor
s	Stator, shaft (Welle)
syn	Synchron
T	Temperatur
U, V, W	Bezeichnung der Wicklungsstränge im Dreiphasen-System
verk	verkettet
w	Wirkkomponente
δ	Luftspalt
σ	Streu-
0	Leerlauf
1	Anfahrpunkt (Schlupf $s = 1$ bei Asynchronmaschine)
1, 2	primär, sekundär (beim Transformator)

Notationen

i	Kleinbuchstabe: z. B.: elektrische Stromstärke, Augenblickswert
I	Großbuchstabe: z. B.: elektrische Stromstärke, Effektivwert oder Gleichstrom-Wert
\underline{I}	unterstrichen: komplexe Größen
\hat{I}	Spitzenwert, Amplitude
I'	auf Ständerwicklungsdaten mit \hat{u} umgerechnet
Re(.)	Realteil von ..., Im(.) Imaginärteil von ...