
M10: Wirkungsgrad- bestimmung SM



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Institut für
Elektrische
Energiewandlung

Praktikum



Abbildung des Versuchstands

Inhaltsverzeichnis

1. Allgemeines	2
2. Einzelverlustverfahren	2
2.1. Verluste im Erregerkreis (P_f)	2
2.2. Stromunabhängige Verluste (P_{Fe+R})	2
2.3. Stromabhängige Verluste und lastabhängige Zusatzverluste ($P_{Cu,s+z}$)	3
3. Übererregungsverfahren	3
4. Reaktanzen der Synchronmaschine	5
4.1. Synchronreaktanzen	5
4.2. Induktiver Vollastpunkt und <i>POTIER</i> -Reaktanz	8
5. Bestimmung des Erregerstromes	11
6. Asynchroner Anlauf	15
7. Versuchsdurchführung	16
7.1. Messungen	16
7.1.1. Leerlaufversuch (Generatorbetrieb)	16
7.1.2. Messungen zur <i>POTIER</i> -Reaktanz	16
7.1.3. Gegenerregungsversuch	16
7.1.4. Übererregungsversuch	17
7.1.5. Kurzschlussversuch	17
8. Auswertung	17
8.1. Bestimmung der Reaktanzen	17
8.2. Wirkungsgradbestimmung	17
8.2.1. Einzelverlustverfahren	17
8.2.2. Übererregungsverfahren	18
9. Angaben zum Hilfsmotor	18
10. Literatur	18
11. Anhang	19

1. Allgemeines

Aufbau, Wirkungsweise und Zeigerdiagramme der Synchronmaschinen sind aus der Vorlesung „Elektrische Maschinen und Antriebe“ und aus dem Versuch 5 des Energietechnischen Praktikums bekannt.

Da die Synchronmaschine zumeist in Kraftwerken als Generator mit großer Typenleistung eingesetzt wird, kommt der exakten Bestimmung des Wirkungsgrades besondere Bedeutung zu. Es werden deshalb hauptsächlich indirekte Messverfahren verwendet. Sie sind in der Norm EN 60034 festgelegt. Teil 4 enthält außerdem besonders ausführliche Angaben zur Ermittlung der Kenngrößen und des Nennerergerstromes von Synchronmaschinen mit Leistungen größer 100 kVA.

In diesem Versuch soll der Wirkungsgrad einer Synchronmaschine nach zwei verschiedenen indirekten Verfahren bestimmt und kritisch verglichen werden. Es wird hier der allgemeine Fall einer Schenkelpolmaschine durchgeführt; für die Vollpolmaschine vereinfachen sich einige Berechnungen.

2. Einzelverlustverfahren

Bei der Ermittlung des Wirkungsgrades von Mehrphasensynchronmaschinen sind folgende Verluste zu berücksichtigen:

1. Verluste im Erregerkreis
2. Stromunabhängige Verluste
3. Stromabhängige Verluste
4. Lastabhängige Zusatzverluste

2.1. Verluste im Erregerkreis (P_f)

Zu den Verlusten im Erregerkreis gehören die Stromwärmeverluste in der Feldwicklung selbst, den Bürsten und den Zuleitungen, die Übergangsverluste an den Bürsten, die Verluste im Stellwiderstand des Haupterregerkreises sowie die Verluste der Erregermaschine, wenn diese mechanisch mit der Hauptmaschine gekoppelt ist.

In dem hier durchgeführten Versuch wird mit einer festen Erregerspannung U_f gearbeitet, so dass die Verluste im Erregerkreis aus $P_f = U_f I_f$ bestimmt werden können. Der für den betreffenden Betriebszustand benötigte Erregerstrom muss aus dem Zeigerdiagramm bestimmt werden (siehe Abschnitt 5).

2.2. Stromunabhängige Verluste (P_{Fe+R})

Unter stromunabhängigen Verlusten versteht man die Ummagnetisierungsverluste, die Lager- und Bürstenreibungsverluste sowie die gesamten Lüftungsverluste.

Die Summe der stromunabhängigen Verluste kann im Leerlaufversuch bestimmt werden. Die Maschine muss dabei wegen der Drehzahlabhängigkeit der Reibungsverluste mit der Synchrondrehzahl n_{syn} laufen. Da die Ummagnetisierungsverluste mit der Größe des Drehfeldes geändert werden, muss zusätzlich die gleiche Hauptfeldspannung U_h wie im interessierenden Belastungsfall eingestellt werden.

Die Maschine wird von einem kalibrierten Hilfsmotor (Gleichstrommotor) mit $n = n_{syn}$ angetrieben. Bei offenen Klemmen erhält man die Summe der stromunabhängigen Verluste, nämlich die an der

Welle aufgenommene Leistung, in Abhängigkeit von der Hauptfeldspannung. Bei Wegfall der Erregung können die Ummagnetisierungs- und Reibungsverluste getrennt werden. Die von der SM an der Welle aufgenommene Leistung ist gleich der vom Hilfsmotor aufgenommenen elektrischen Leistung, vermindert um seine eigenen Verluste.

2.3. Stromabhängige Verluste und lastabhängige Zusatzverluste ($P_{Cu,s+z}$)

Stromabhängige Verluste sind die Stromwärmeverluste in den Wicklungen. Zusatzverluste entstehen im magnetischen Kreis, in anderen Metallteilen und in stromführenden Leitern. Stromabhängige Verluste und Zusatzverluste werden gemeinsam im Kurzschlussversuch bei Nenndrehzahl gemessen. Man erhält sie, nachdem von der an der Welle aufgenommenen Leistung die Reibungsverluste subtrahiert werden.

3. Übererregungsverfahren

Während für die Bestimmung des Wirkungsgrades nach dem Einzelverlustverfahren ein kalibrierter Hilfsmotor zur Verfügung stehen muss, wird beim Übererregungsverfahren keine zusätzliche Maschine benötigt.

Die Gesamtverluste, ausgenommen die Verluste P_f im Erregerkreis, werden in einem einzigen Versuch bei Leerlauf-Motorbetrieb anstelle des Betriebs beim gewünschten Lastpunkt gemessen. Es muss jetzt die Synchronzahl, gleiche Hauptfeldspannung U_h und gleicher Ständerstrom I_s wie im interessierenden Belastungsfall eingehalten werden. Zu den so ermittelten Verlusten $P_{dü}$ müssen noch die Verluste im Erregerkreis addiert werden, um die Gesamtverlustleistung

$$P_d = P_{dü} + P_f \quad (1)$$

zu erhalten. Der im Belastungsfall tatsächlich benötigte Erregerstrom muss wiederum aus dem Zeigerdiagramm für den jeweiligen Lastfall bestimmt werden.

Begründung:

Durch Übererregung (hoher Feldstrom = hohes U_p ; Zeigerdiagramm Abbildung 1b für die Vollpolmaschine) wird erreicht, dass in der Maschine der gewünschte Strom I_s fließt. Durch die Einstellung von U_s wird erreicht, dass die Hauptfeldspannung U_h (= prop. Luftspaltflussdichte) dem Wert des gewünschten Lastpunkts entspricht. Der sich einstellende $\cos(\varphi)$ ist relativ klein, z. B. ca. 0.05 (siehe Abbildung 1b). Aus dem Ersatzschaltbild pro Strang (Abbildung 1a für die Vollpolmaschine) folgt, dass die aufgenommene Leistung alle relevanten Verlustkomponenten umfasst, nämlich die Ständerstromwärmeverluste $3 \cdot R_s I_s^2$, die Zusatzverluste in der Ständerwicklung $P_{z,s}$ (z. B. Wirbelströme in der Ständerwicklung), die Ummagnetisierungsverluste P_{Fe} (im Ständerblechpaket!) und die im Läufer stattfindenden Verluste (außer P_f), die als Luftspaltleistung P_δ im Motorbetrieb auf den Läufer vom Ständer übertragen werden.

$$P_{e,in} = 3 \cdot R_s I_s^2 + P_{z,s} + P_{Fe} + P_\delta \quad (1)$$

mit

$$P_\delta = P_R + P_{z,r} = 2\pi \cdot n_{syn} \cdot M_{brems}$$

$$P_{Fe} = 3 \cdot U_h^2 / R_{Fe}$$

Die Läuferverluste umfassen die Reibungsverluste P_R und die Läuferzusatzverluste $P_{z,l}$, die durch die Relativbewegung des Läufers zum Ständerfeld entstehen (z. B. Polschuhoberflächenverluste durch Wirbelströme, hervorgerufen durch die Feldpulsationen infolge der Stator-Nutöffnungen). Sie bremsen den Läufer mit dem Bremsmoment M_{brems} . Diese Luftspaltleistung ist im Ersatzschaltbild Abbildung 1a gegeben durch das Produkt aus Polradspannung und paralleler Stromkomponente des komplexen Zeigers $\underline{I}_s - \underline{I}_{Fe}$.

Zu bedenken sind allerdings die Fehler, die durch die Verwendung der Wandler und Messgeräte entstehen, die bei diesem Versuch von recht großem Einfluss sein können. Wegen des kleinen Leistungsfaktors von ca. 0.02 (große) ... 0.05 (mittlere) ... 0.1 (kleine Maschinen) machen sich die Fehlwinkel der Stromwandler bereits bemerkbar. In der Messgröße

$$P_{e,\text{in}} = 3 \cdot U_s I_s \cos(\varphi) = P_{\text{dÜ}} \quad (2)$$

wirkt sich daher dieser Fehlwinkel besonders bei großen Synchronmaschinen auf alle Verlustkomponenten gleichermaßen störend aus.

Beispiel:

a) $\cos(\varphi) = 0.02$: entspricht einem Winkel $\varphi = 88.85^\circ$. Fehlwinkel eines Präzisions-Stromwandlers (Klasse 0.1): 5 Winkelminuten = 0.083°

$\cos(88.85^\circ - 0.083^\circ) = 0.0215$. Die Verlustleistung wird folglich gemäß $0.0215/0.02 = 1.076$ um 7.6% zu groß gemessen. Das Messergebnis ist bedingt brauchbar.

b) $\cos(\varphi) = 0.1$: entspricht einem Winkel $\varphi = 84.25^\circ$. Fehlwinkel eines Stromwandlers (Klasse 0.2): 0.2°

$\cos(84.25^\circ - 0.2^\circ) = 0.104$. Die Verlustleistung wird folglich gemäß $0.104/0.1 = 1.04$ um 4 % zu groß gemessen. Das Messergebnis ist brauchbar. Hinzu kommen aber noch die Messgenauigkeiten des Wandleramplitudenfehlers (0.2 %), des Spannungspfad (typisch 0.5 %) und der Wattmeter (typisch 0.5 %).

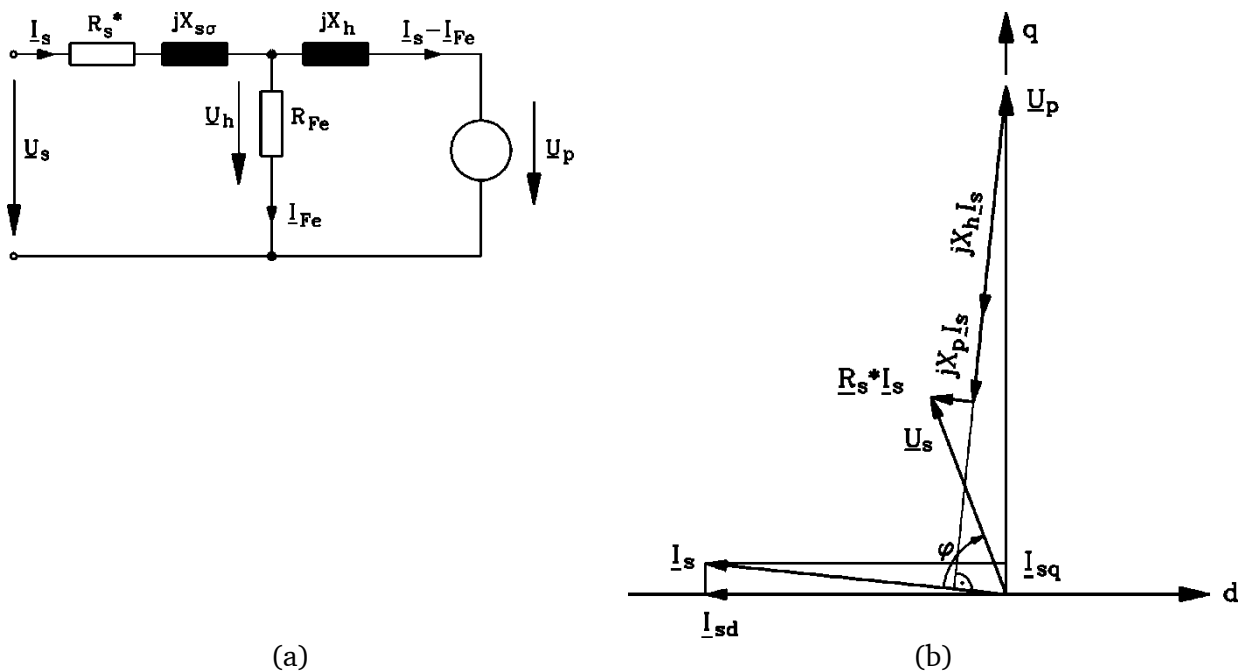


Abbildung 1: a) Ersatzschaltbild je Strang der Vollpol-Synchronmaschine mit Ersatzwiderständen für die Umagnetisierungsverluste (R_{Fe}) und die Ständerzusatzverluste $R_s^* = R_s + P_{zs}/(3I^2)$, b) zugehöriges Zeigerdiagramm für den Übererregungsversuch

4. Reaktanzen der Synchronmaschine

Zur Kennzeichnung des Betriebsverhaltens und zur Konstruktion des Zeigerdiagramms der Synchronmaschine benötigt man die Synchronreaktanzen der Längs- und der Querachse sowie die Ständerstreureaktanz. Sie werden üblicherweise als relative Größen angegeben, indem sie auf die Nennimpedanz Z_N bezogen werden und durch Kleinschreibung gekennzeichnet.

$$x_i = X_i / Z_N \quad \text{mit} \quad Z_N = \frac{U_{sN}}{I_{sN}} = \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot I_N} \quad (3)$$

Für eine reale Maschine muss man unterscheiden zwischen den gesättigten und den ungesättigten Werten, die in der Theorie meist verwendet werden.

4.1. Synchronreaktanzen

Bei offenem Erreger- und Dämpferkreis könnten die Synchronreaktanzen in einer Statorwicklung, für Längs- bzw. Querstellung des Polrades zur Wicklungsachse, an der stillstehenden Maschine direkt gemessen werden. Die Vollpolmaschine liefert wegen der Rotationssymmetrie ihres Polrades, wenn der Einfluss der Nuten der Erregerwicklung vernachlässigt wird,

$$X_d = X_q = X_h + X_{s\sigma} \quad (4)$$

Für die Schenkelpolmaschine erhält man dagegen in beiden Achsen unterschiedliche Werte :

$$X_d = c_d \cdot X_h + X_{s\sigma} = X_{hd} + X_{s\sigma}$$

$$X_q = c_q \cdot X_h + X_{s\sigma} = X_{hq} + X_{s\sigma}$$

Die Polformfaktoren c_d und c_q berücksichtigen dabei die Verminderung der Hauptreaktanz infolge des unterschiedlichen Luftspaltes in der d - und q -Achse gegenüber der Vollpolmaschine (siehe „Elektrische Maschinen und Antriebe“).

Da der Dämpferkreis meist nicht geöffnet werden kann und außerdem Wirbelströme im massiven Eisen des Läufers das Ergebnis verfälschen würden, können Messungen nur bei synchroner Drehzahl oder sehr kleinem Schlupf vorgenommen werden. Die Synchron-Längsreaktanz X_d kann aus dem Kurzschlussversuch bei Synchrondrehzahl ermittelt werden. Für Vollpol- und Schenkelpolmaschine gilt dann

$$\underline{U}_s = \underline{U}_p + j X_d \cdot \underline{I}_{sk} = 0 \quad (5)$$

so dass die Längsreaktanz durch

$$X_d = \frac{U_p}{I_{sk}} \quad (6)$$

gegeben ist. Die Größe von U_p ist meist durch U_N vorgegeben. Über die Leerlaufkennlinie erhält man den zugehörigen Erregerstrom I_f . Wird I_f aus der Luftspaltkennlinie entnommen (= linearer Teil der Leerlaufkennlinie), so ergeben sich die ungesättigten Werte.

Wird mit I_{f0} ("Leerlauf-Erregerstrom") jener Erregerstrom bezeichnet, bei dem die Leerlaufspannung den Wert der Nenn-Strangspannung erreicht ($U_{s0} = U_{sN}$), so folgt aus Abbildung 2, dass bei diesem Erregerstrom im Kurzschlussfall der Kurzschlussstrom I_{sk0} in der Ständerwicklung fließt. Folglich muss gelten:

$$I_{sk0} = \frac{U_p(I_{f0})}{X_d} = \frac{U_{sN}}{X_d} \quad (7)$$

Daraus folgt unmittelbar der Messwert für die Synchronreaktanz bei Nennfluss

$$X_d = \frac{U_{sN}}{I_{sk0}} \quad (8)$$

Oft wird die Synchronreaktanz als auf die Nennimpedanz $Z_N = U_{sN}/I_{sN}$ bezogener Wert angegeben.

$$x_d = \frac{X_d}{Z_N} = \frac{U_{sN}}{I_{sk0}} \cdot \frac{I_{sN}}{U_{sN}} = \frac{I_{sN}}{I_{sk0}} = \frac{I_{fk}}{I_{f0}} \quad (9)$$

Dabei ist die in Abbildung 2 erkennbare geometrische Relation

$$\frac{I_{sN}}{I_{sk0}} = \frac{I_{fk}}{I_{f0}} \quad (10)$$

verwendet worden, die den linearen Verlauf der Kurzschlusskennlinie wiedergibt. Dabei ist I_{fk} ("Kurzschluss-Erregerstrom") der Erregerstrom, bei dem der in der kurzgeschlossenen Ständerwicklung fließende Dauerkurzschlussstrom den Wert des Nennstroms erreicht.

Fazit:

Die bezogene synchrone Reaktanz ist das Verhältnis des Kurzschluss-Erregerstroms zum Leerlauf-Erregerstrom. Dessen Kehrwert wird "Leerlauf-Kurzschluss-Verhältnis" k_K bezeichnet.

$$k_K = \frac{I_{f0}}{I_{fk}} = \frac{I_f(U_s = U_{sN}, I_s = 0)}{I_f(U_s = 0, I_s = I_{sN})} = \frac{1}{x_d} \quad (11)$$

Seine graphische Bestimmung ist in Abbildung 2 eingezeichnet.

Die **synchrone Reaktanz** besteht hauptsächlich aus der Hauptinduktivität X_h des Luftspaltfelds und ist proportional $N_s^2 \tau_p / \delta$.

Die leistungsstarken, zumeist nur zweipoligen **Turbogeneratoren** erhalten ihr hohes Drehmoment wegen des durch die Sättigung begrenzten Luftspaltfelds nur durch einen hohen Ständerstrombelag (hohe Windungszahl N_s und intensive Leiterkühlung). Wegen der niedrigen Polzahl ist auch die Polteilung groß, folglich haben Turbos eine große Synchronreaktanz bzw. ein kleines Leerlauf-Kurzschlussverhältnis (typisch nur 0,5). Die hohe Synchronreaktanz verringert das Kippmoment, so dass **Turbogeneratoren** eine geringe statische Stabilitätsreserve aufweisen. Sie werden mit geregelter Erregerstrom betrieben. Zusätzlich wird versucht, durch Vergrößerung des Luftspalts (mehrere cm!) die Synchronreaktanz zu verkleinern. Das erhöht jedoch den Erregerstrombedarf, so dass auch die Läuferwicklung intensiv gekühlt werden muss.

Wasserkraftgeneratoren drehen langsam, sind daher hochpolig und weisen in der Regel nicht so hohe Synchronreaktanzen auf. Ihr **Leerlauf-Kurzschluss-Verhältnis** liegt typisch zwischen 0,8 und 1,2; die statische Stabilität ist ausreichend groß.

Die Synchron-Querreaktanz X_q wird hier nach dem **Gegenerregungsverfahren** ermittelt.

Gegenerregungsverfahren:

Die Maschine wird am Netz leerlaufend als Motor betrieben. Bei unerregter Maschine ist der Ständerstrom (siehe Abbildung 3a)

$$\underline{I}_{s0} = -j \frac{U_s}{X_d} \tag{12}$$

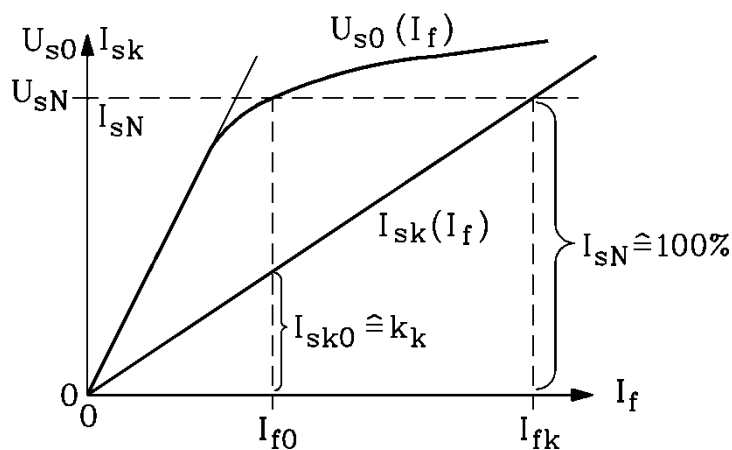


Abbildung 2: **Leerlaufkennlinie** $U_{s0}(I_f)$ und **Kurzschlusskennlinie** $I_{sk}(I_f)$ bei Berücksichtigung der Eisensättigung. Bestimmung des **Leerlauf-Kurzschluss-Verhältnisses** k_k eingezeichnet.

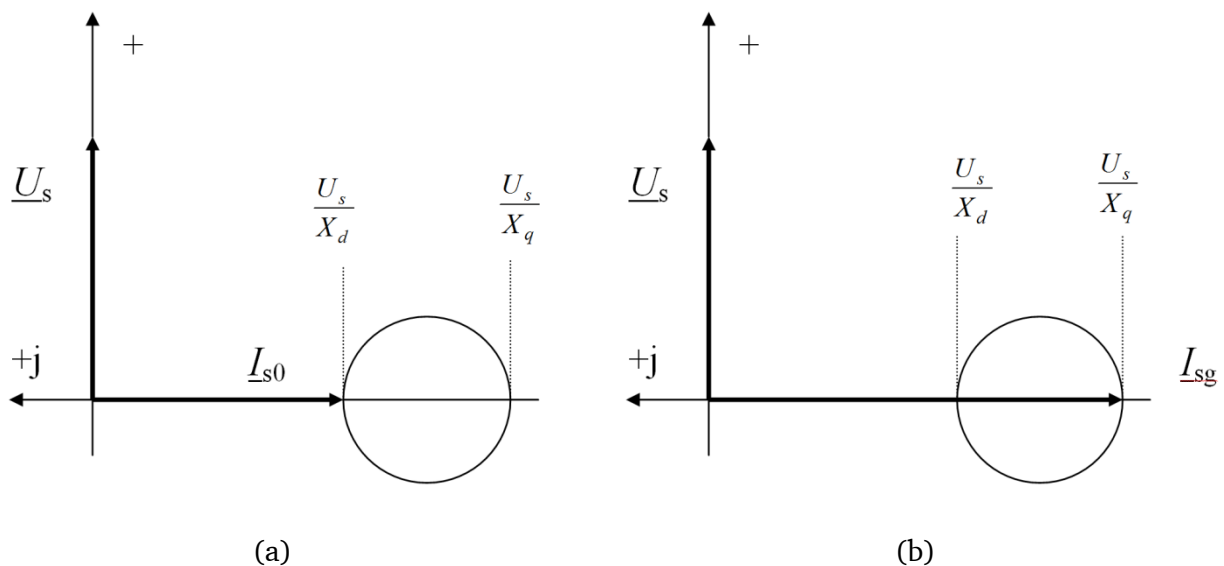


Abbildung 3: (a) Unerregte Maschine; (b) Maschine bei maximaler Gegenerregung

Die Maschine wird jetzt langsam gegenerregt, bis der Läufer um eine Polteilung zurückfällt. Der Strom im Augenblick des Zurückfallens ist (siehe Abbildung 3b)

$$I_{s,g} = -j \frac{U_s}{X_q} \quad (13)$$

Je nach Größe der angelegten Netzspannung erhält man somit die gesättigten oder ungesättigten Werte der Reaktanzen aus

$$X_d = \frac{U_s}{I_{s0}} \quad \text{und} \quad X_q = \frac{U_s}{I_{s,g}} \quad (14)$$

Die Schwankung der Klemmenspannung infolge vorgeschalteter Reaktanzen muss berücksichtigt werden.

4.2. Induktiver Vollastpunkt und *POTIER*-Reaktanz

a) *Der Streufluss im Polrad (Abbildung 5b):*

Nicht nur in den Ständernnuten und im Wickelkopfbereich, sondern auch im Polrad bildet sich ein Streufluss zwischen benachbarten Polen aus (**Polstreufluss** Φ_{of}). Er ist zwar i. a. deutlich kleiner als der Hauptfluss Φ_h , überlagert sich aber im Polschaft dem Hauptfluss und erhöht dort die Flussdichte. Er wird von der Polraddurchflutung benachbarter Pole $2N_{\text{fpol}} I_f$ erregt und ist folglich im übererregten Betrieb, wo der Feldstrom wegen der hohen Polradspannung am höchsten ist, maximal. Er kann dann den Polschaft in Sättigung treiben.

b) *Der induktive Voll-Lastpunkt bedeutet erhöhten Polradstreufluss:*

Maximaler Erregerstrom bei Betrieb am starren Netz mit Nennspannung und Nennstrom (Volllastbetrieb) tritt bei Übererregung und reiner Blindlast auf; hier addieren sich Ständer-spannung U_N und Ankerrückwirkung $X_d I_N$ algebraisch (Abbildung 4) und ergeben damit maximale Polradspannung U_p . Da in diesem Betriebspunkt die Synchronmaschine wie ein kapazitiver Verbraucher wirkt, kann sie selbst induktive Verbraucher mit Blindleistung versorgen. Daher nennt man diesen Betriebspunkt **induktiven Voll-Lastpunkt (IVP)**. Wegen des hohen Erregerstroms wird die Polradwicklung thermisch am höchsten belastet. In der Regel sind daher nur Prüffeldgeneratoren und Phasenschieber so ausgelegt, dass sie diesen Betrieb dauernd fahren können. Der hohe Polradstreufluss bewirkt eine Sättigung der Polschäfte im Polrad.

c) *Berücksichtigung der Polrad-Eisensättigung nach POTIER – Die POTIER-Reaktanz*

Wegen der Polschaftsättigung ist das in Bild 4 dargestellte Zeigerdiagramm nicht mehr länger gültig. Damit der Hauptfluss Φ_h auch **bei Polschaftsättigung** in voller Höhe aufrecht erhalten werden kann, muss die erregende Durchflutung und damit der Erregerstrom erhöht werden (Abbildung 5a: $\Delta I_f'$). Um den gleichen Betrag steigt folglich die den Hauptfluss magnetisierende Durchflutung an. Im Zeigerdiagramm dargestellt durch den Magnetisierungsstrom:

$$\Delta I_m = \Delta I_f' \quad (15)$$

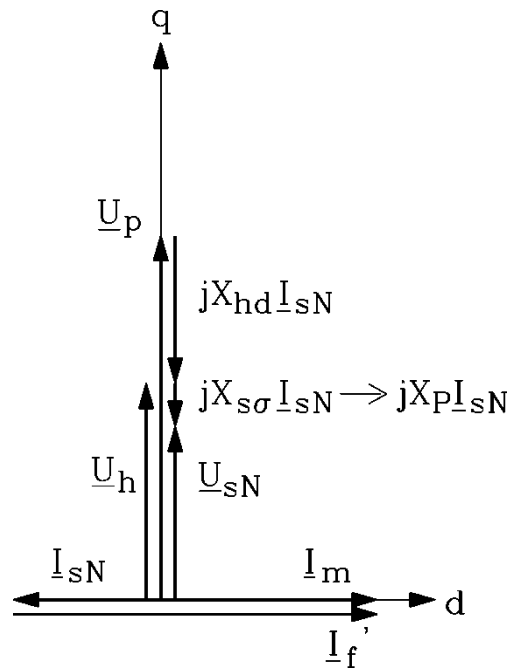


Abbildung 4: Zeigerdiagramm für den induktiven Vollastpunkt $U_s = U_N$, $I_s = I_N$, $\cos\varphi = 0$ ü.e.

Die Polschaftsättigung ist eine Streuflusssättigung und lässt die Hauptreaktanz X_{hd} unverändert. Folglich steigt rein rechnerisch im Zeigerdiagramm (Abbildung 5a) die Polradspannung U_p um den Betrag ΔU_p an, ebenso die Hauptfeldspannung um ΔU_h .

$$\begin{aligned}
 U_p &= X_{hd} \cdot I_f' \\
 \Delta U_p &= X_{hd} \cdot \Delta I_f' \\
 \Delta U_h &= X_{hd} \cdot \Delta I_m
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

Die Klemmenspannung ist aber konstant (gleich der Nennspannung), so dass die Streureaktanz $X_{s\sigma}$ erhöht werden muss, damit rechnerisch das Zeigerdiagramm weiterhin die Klemmengrößen Spannung und Strom richtig wiedergibt. Diese (etwas willkürlich) erhöhte Streureaktanz im Zeigerdiagramm nennt man **POTIER-Reaktanz X_P** .

$$X_P > X_{s\sigma}
 \tag{17}$$

Sie berücksichtigt neben der Ständerstreuung auch pauschal die erhöhte Polradstreuung und die dadurch hervorgerufene Polschaftsättigung.

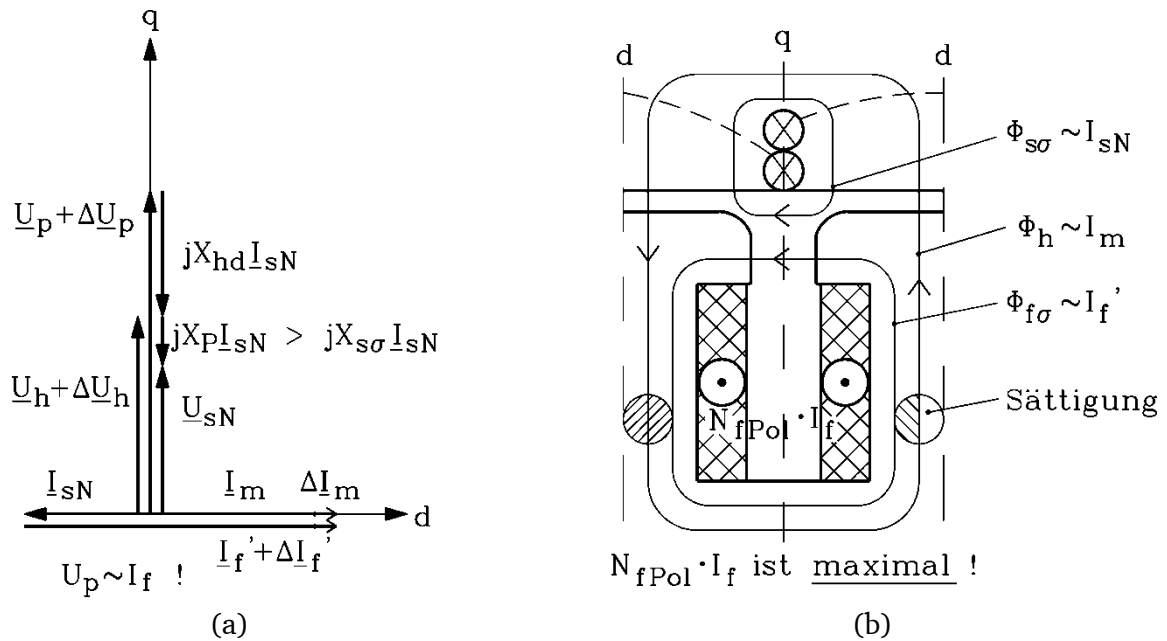


Abbildung 5: **POTIER-Reaktanz**: a) Zeigerdiagramm im induktiven Vollastpunkt, b) Schematische Darstellung der Flussverkettungen im induktiven Vollastpunkt.

d) Messtechnische Ermittlung der **POTIER-Reaktanz** mit dem **FISCHER-HINNEN-Verfahren**:

Wenn Leerlaufkennlinie, Kurzschlusskennlinie und der Erregerbedarf für den **induktiven Vollastpunkt (IVP)** messtechnisch bestimmt wurden, kann daraus die **POTIER-Reaktanz** ermittelt werden (Abbildung 6). Dabei geht man von dem Zeigerdiagramm für den IVP (Abbildung 4) aus. Zum gemessenen Erregerstrom im IVP muss die zugehörige Hauptfeldspannung U_h ermittelt werden. Die Differenz zwischen U_h und U_N ist dann $X_p I_N$. Daher muss der zu U_h gehörende Magnetisierungsstrom gefunden werden, da $U_h(I_m)$ gleichzeitig $U_{s0}(I_f')$ ist. In der Regel werden Leerlauf- und Kurzschlusskennlinie nicht über $I_f' = I_f / \dot{u}_{I_f}$, sondern direkt über dem Messwert I_f aufgetragen. Daher wird eigentlich $I_m \dot{u}_{I_f}$ benötigt.

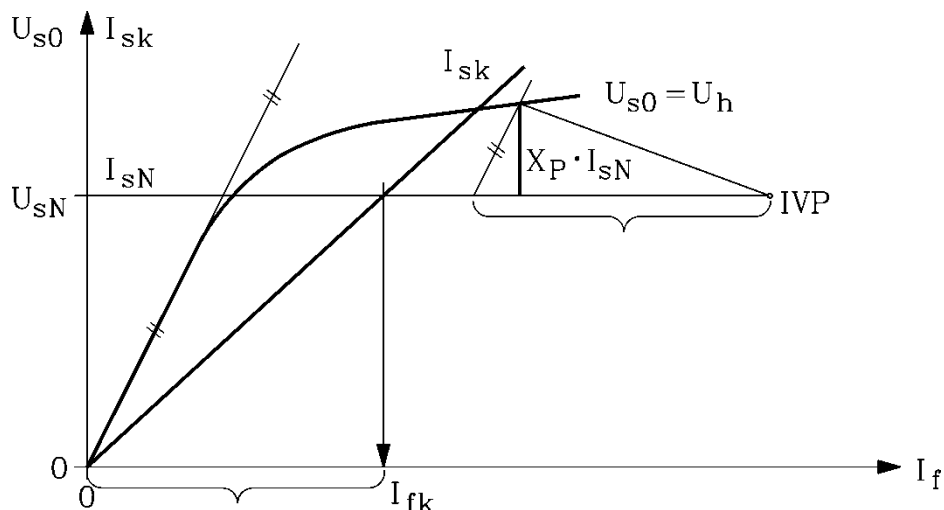


Abbildung 6: Bestimmung der **POTIER-Reaktanz** aus gemessener Leerlauf- und Kurzschlusskennlinie und dem Erregerbedarf für den induktiven Vollastpunkt (IVP) mit dem Verfahren von **FISCHER-HINNEN**

Um dieses nicht bestimmen zu müssen, greift man zu folgendem **Trick**:

Der $X_p I_N$ entsprechende Spannungsfall bei $U_s = 0$ ist $X_{s\sigma} I_N$. Er ist in Abbildung 7 für einen beliebigen Ankerstrom I_{sk} als Dreieck mit dem magnetischen Arbeitspunkt A mit Hilfe der Kurzschlusskennlinie

in die Leerlaufkennlinie eingezeichnet. Dieses Dreieck wird nun für $I_{sk} = I_N$ verwendet, da dieses I_{sk} gleich dem Strom I_s im IVP ist. Von diesem Dreieck sind bekannt:

- die Basis (Hypotenuse) $I_{fk}' = I_m + I_{sk}$ und
- die Neigung einer Kathete \overline{OA} , nämlich die Neigung der Leerlaufkennlinie im ungesättigten Bereich.

Dieses Dreieck wird für $U_s = U_N$ vom IVP aus eingezeichnet. Die Neigungslinie der Kathete schneidet auf der Leerlaufkennlinie folglich U_h für den IVP ab. Der verbleibende Ordinatenabschnitt $U_h - U_N$ ist daher $X_p I_N$. Das so entstandene Dreieck (**POTIER-Dreieck**) gibt gemäß dem Zeigerdiagramm Abbildung 5a die Aufteilung des benötigten Erregerstroms $I_{f,IVP}'$ in den Anteil $I_s = I_N$ und I_m annähernd richtig wieder.

Die Synchronreaktanzen kann man gedanklich in Haupt- und Streureaktanz zerlegen, die den entsprechenden Feldern zugeordnet sind. Diese Trennung ist jedoch messtechnisch nicht einfach möglich. Oft wird die Ständerstreureaktanz $X_{\sigma s}$ ermittelt, indem man die Reaktanz des Stators bei ausgebautem Rotor mißt und davon die berechenbare „Bohrungsreaktanz“ des Bohrungsfeldes abzieht. Insbesondere zur Bestimmung des Erregerstromes verwendet man jedoch üblicherweise die „POTIER-Reaktanz“ X_p , die neben der Streuung auch die Sättigung in guter Näherung berücksichtigt.

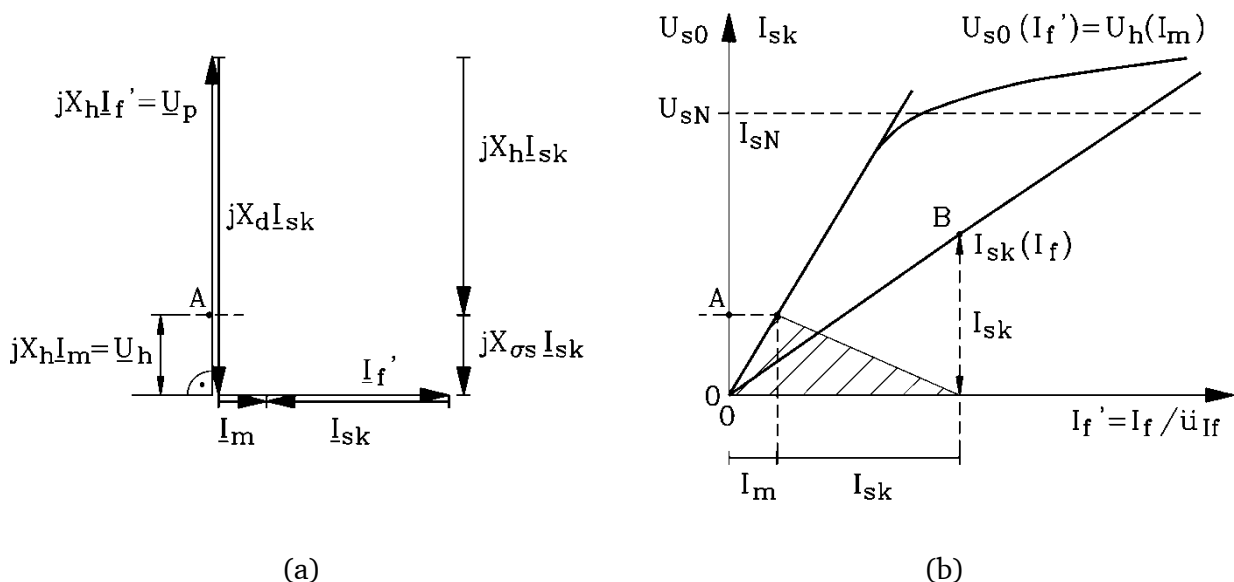


Abbildung 7: Kurzschlusskennlinie $I_{sk}(I_f)$: a) Zeigerdiagramm für den Dauerkurzschluss, b) Hauptfeld-Sättigungskennlinie $U_h(I_m)$ und Kurzschlusskennlinie $I_{sk}(I_f)$

5. Bestimmung des Erregerstromes

Aus der gemessenen Leerlauf- und Kurzschlusskennlinie kann bei bekannter POTIER-Reaktanz (und bekanntem Strangwiderstand R_s) der Erregerbedarf einer Synchronmaschine für einen beliebigen Lastpunkt (U_s, I_s, φ) mit guter Genauigkeit vorherbestimmt werden. Hier beschränken wir uns auf die Vollpolmaschine. Für übererregten Betrieb ist aber das Verfahren für die Vollpolmaschine ersatzweise auch für die Schenkelpolmaschine ausreichend genau.

Zunächst wird – ausgehend vom Zeigerdiagramm der Vollpolmaschine zum gewählten Lastpunkt – die Hauptfeldspannung bestimmt, da diese den magnetischen Arbeitspunkt E festlegt (Abbildung 8). Über die Leerlaufkennlinie erhält man so den Magnetisierungsstrom.

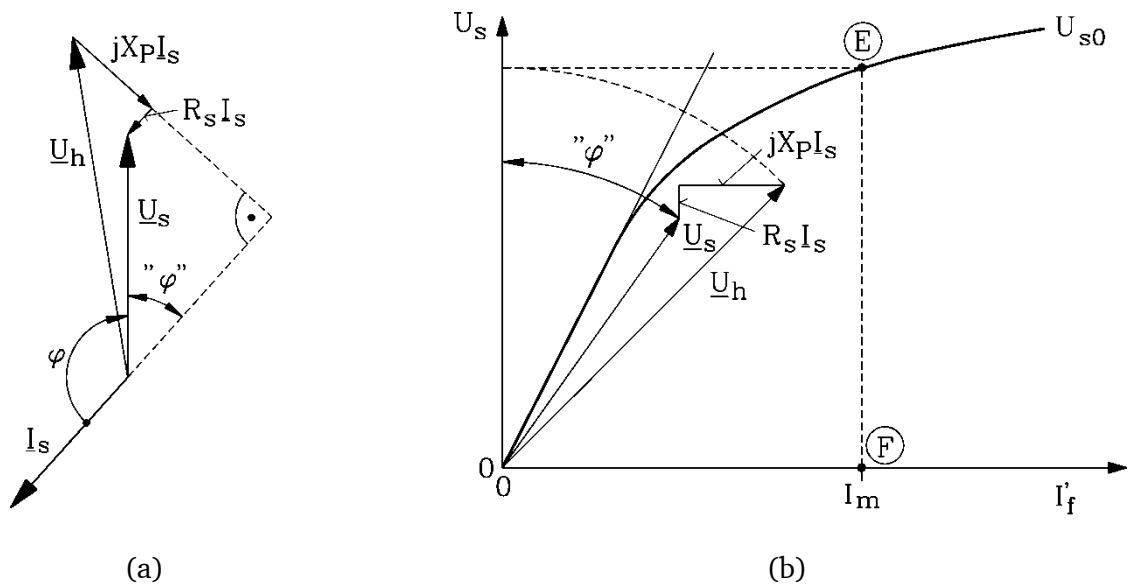


Abbildung 8: Bestimmung des magnetischen Arbeitspunktes E für die Vollpolmaschine zu einem beliebig gewählten Lastpunkt (U_s, I_s, φ) a) Bestimmung der Hauptfeldspannung mit dem Zeigerdiagramm, b) Bestimmung des Magnetisierungsstroms mit der Leerlaufkennlinie

Die zugehörige Ankerrückwirkung der bestromten Ständerwicklung erhält man wieder über das Zeigerdiagramm (Abbildung 9a). Allerdings benötigt man $I_s \dot{u}_{If}$, um I_f und nicht I_f' verwenden zu können. Dies gelingt mit Hilfe der Kurzschlusskennlinie in Kombination mit der Leerlaufkennlinie (Abbildung 9b), da sich im Kurzschluss die Durchflutungen von Ständer und Polrad algebraisch summieren. Dabei wird statt $X_{s\sigma} I_s$ näherungsweise $X_p I_s$ als induzierte Spannung eingesetzt, da zumeist nur X_p bekannt ist. Nun kann das zu Abbildung 9a geometrisch ähnliche Dreieck Abbildung 10 gezeichnet werden, aus dem direkt der Erregerbedarf I_f als Zahlenwert (Länge des Zeigers) abgelesen werden kann.

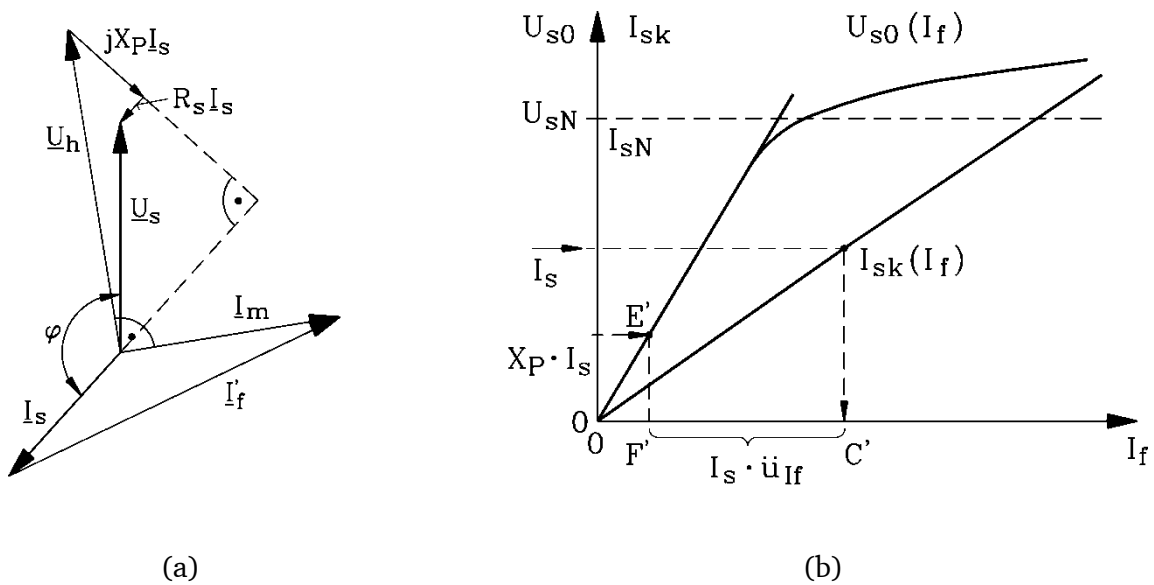


Abbildung 9: Bestimmung der Ankerrückwirkung der Vollpolmaschine aus Messwerten: a) Durchflutungs-Zeigerdiagramm, b) Bestimmung der Ankerrückwirkung $I_s \dot{u}_{If}$

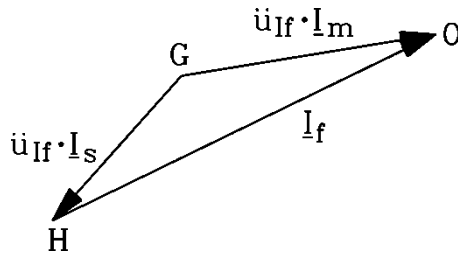


Abbildung 10: Bestimmung des Erregerbedarfs I_f aus dem Durchflutungs-Zeigerdiagramm

Der Praktiker führt dieses Verfahren so durch, dass er alles in **EIN Bild** zeichnet (Abbildung 11). Das spart Platz, verwirrt aber auf den ersten Blick. Dabei wird das Diagramm Abbildung 8a so geschwenkt, dass die Stromrichtung I_s in der Ordinatenrichtung liegt. Der Phasenwinkel φ muss dann für den übererregten Fall nach rechts, für den untererregten Fall nach links aufgetragen werden. Für Winkelwerte größer als 90° trägt man das entsprechende Komplement auf 180° ein (siehe Abbildung 11). Der Spannungsfall $R_s I_s$ liegt ebenfalls parallel zur Ordinate, der Streuspannungsfall $jX_p I_s$ in Abszissenrichtung. Mit den Buchstaben A bis C ist die Konstruktion der Hauptfeldspannung eingetragen, die – auf der Ordinate mit D eingetragen – über E den Magnetisierungsstrom (F) ergibt. Das Durchflutungs-Zeigerdiagramm ist ebenfalls in geschwenkter Position eingetragen, und zwar so, dass der Magnetisierungsstrom-Zeiger parallel zum Hauptfeldspannungszeiger liegt (Strecke \overline{OG}). Dann muss der Zeiger der Ankerrückwirkung $I_s \dot{u}_{If}$ parallel zur Abszisse liegen. Die oben beschriebene Bestimmung der Größe $I_s \dot{u}_{If}$ erfolgt gemäß der Buchstabenfolge A' bis F', wobei die Strecke $\overline{C'F'}$ dem Wert $I_s \dot{u}_{If}$ entspricht. Diese wird als Strecke \overline{GH} in das Durchflutungs-Zeigerdiagramm (Dreieck O-G-H) eingefügt. Die Strecke \overline{OH} , aufgetragen auf der Abszisse als Strecke \overline{OI} , ist **der gesuchte Erregerstrom**.

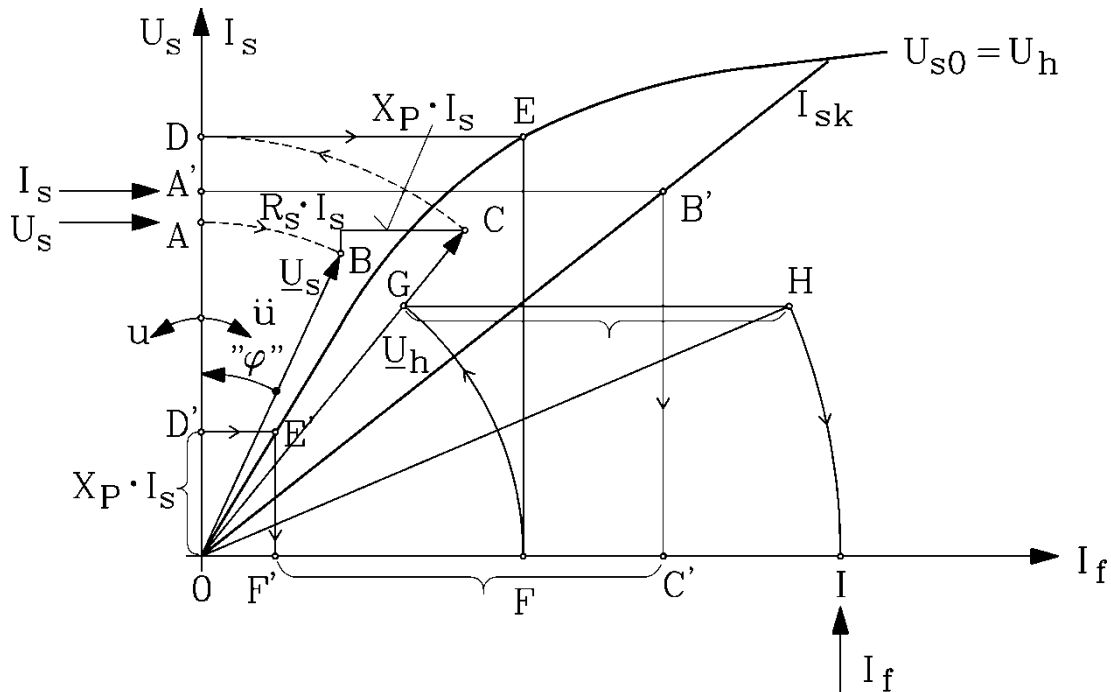
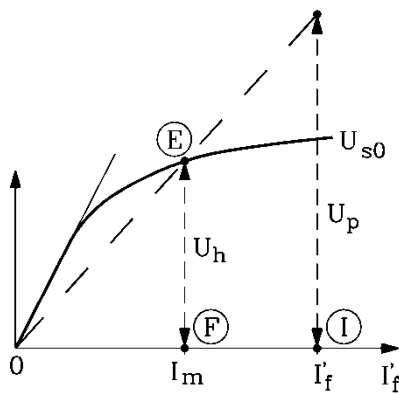
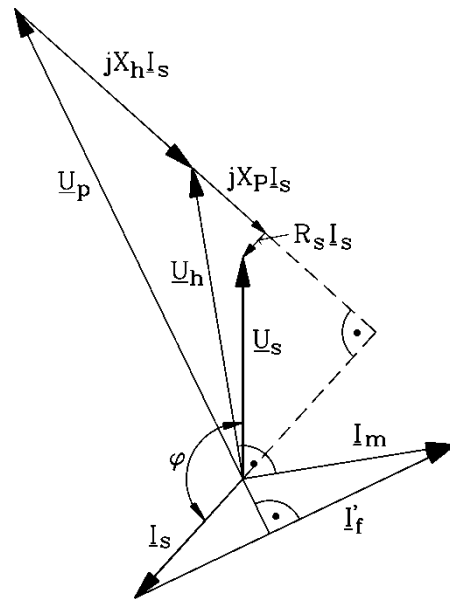


Abbildung 11: In der Praxis übliche Erregerbedarfs-Konstruktion, gezeigt am Beispiel eines übererregten, generatorischen Betriebspunkts



(a)



(b)

Abbildung 12: Die gesättigte Vollpolmaschine: a) Bestimmung des magnetischen Arbeitspunkts E und der (fiktiven) Polradspannung U_p , b) zugehöriges Zeigerdiagramm

Das Zeigerdiagramm für den gesättigten Betrieb der Vollpol-Synchronmaschine kann unmittelbar im Anschluss an die Erregerbedarfs-Ermittlung gezeichnet werden. Wegen

$$\begin{aligned} \underline{U}_h &= j X_h \cdot \underline{I}_m \\ \underline{U}_p &= j X_h \cdot \underline{I}'_f \end{aligned} \quad (18)$$

folgt

$$\frac{U_p}{U_h} = \frac{I'_f}{I_m} \quad (19)$$

Die Polradspannung für das im magnetischen Arbeitspunkt E gezeichnete Zeigerdiagramm wird folglich über den Strahlensatz aus Abbildung 12a bestimmt. Sie stellt die (fiktive) Ersatzspannung eines im Arbeitspunkt E **linearisierten Modells** der Vollpol-Synchronmaschine dar. Die linearisierte Kennlinie ist die Gerade \overline{OE} . Das zugehörige Zeigerdiagramm mit gesättigtem X_h wird wie folgt ermittelt.

- Wähle den Lastpunkt $\underline{U}_s, \underline{I}_s$ und zeichne die beiden Zeiger.
- Über die bekannten Werte R_s, X_p wird \underline{U}_h in gewohnter Weise ermittelt.
- Aus der gesättigten Leerlaufkennlinie $U_h(I_m)$ (das ist gleichzeitig $U_{s0}(I'_f)$) wird mit U_h der Magnetisierungsstrom I_m ermittelt und im rechten Winkel zu \underline{U}_h im Zeigerdiagramm als \underline{I}_m eingetragen.
- Aus dem Durchflutungs-Zeigerdiagramm wird damit I'_f bestimmt und mit I'_f die Spannung U_p errechnet.
- Der Zeiger \underline{U}_p wird im rechten Winkel zu \underline{I}'_f ins Zeigerdiagramm eingetragen.
- Die Strecke zwischen den Zeigerspitzen von Polrad- und Hauptfeldspannung ist dann $X_h I_s$, wobei X_h die **gesättigte Hauptfeldreaktanz** ist.

Wird die Synchronmaschine ausgehend von einem bestimmten Lastpunkt entlastet (Leistungsschalter öffnet, Ständerstrom wird abgeschaltet), die Polraderregung aber unverändert beibehalten, so

steigt die Klemmenspannung auf den U_{s0} über dem Punkt I (Abbildung 12a) an – und **natürlich nicht** auf den Wert der fiktiven Polradspannung, die über die (fiktive) linearisierte Kennlinie gewonnen wurde. Dieser Spannungsanstieg beträgt – ausgehend von 100% Nennspannung – in der Regel zwischen 25% und 30% („Spannungsanstieg bei Lastabwurf“).

6. Asynchroner Anlauf

Eine Synchronmaschine kann durch Ausnutzung ihrer Dämpferwicklung auch asynchron betrieben werden. Da in der offenen Erregerwicklung unzulässig hohe Spannungen induziert werden würden, ist diese bei asynchronem Lauf stets kurzgeschlossen. Der Erregerkreis wirkt dann als zusätzliche Kurzschlusswicklung in der d -Achse. Zur Erzielung eines großen Drehmomentes erfolgt der Kurzschluss deshalb oft über einen Zusatzwiderstand R_1 , der etwa das 5- bis 10-fache des Erregerwiderstandes betragen kann.

Der asynchrone Hochlauf einer Synchronmaschine ist ein dynamischer Vorgang, dessen exakte Berechnung sehr aufwendig ist. Betrachtet man jedoch den Anlaufvorgang als eine Folge von stationären Zuständen bei nichtsynchrone Drehzahl, so ist eine geschlossene Lösung möglich.

Analog zur Asynchronmaschine definiert man den Schlupf $s = 1 - n/n_{syn}$ und kann durch die Rechnung mit komplexen Wechselgrößen die Maschinengleichungen lösen. Unter Vernachlässigung des Statorwiderstandes R_s erhält man das bezogene Drehmoment in p.u. zu

$$m_{el} = \frac{u^2}{2} \cdot \left[\operatorname{Im} \left\{ \frac{1}{x_d(j s \omega_s)} + \frac{1}{x_q(j s \omega_s)} \right\} + \left| \frac{1}{x_d(j s \omega_s)} - \frac{1}{x_q(j s \omega_s)} \right| \sin(2 s \omega_s t) \right] \quad (20)$$

Das Drehmoment besteht immer aus einem konstanten Anteil, auch Asynchronmoment genannt,

$$m_a = \frac{u^2}{2} \cdot \operatorname{Im} \left\{ \frac{1}{x_d(j s \omega_s)} + \frac{1}{x_q(j s \omega_s)} \right\} \quad (21)$$

und einem Pendelmoment mit doppelter Schlupffrequenz

$$m_p = \frac{u^2}{2} \cdot \left| \frac{1}{x_d(j s \omega_s)} - \frac{1}{x_q(j s \omega_s)} \right| \sin(2 s \omega_s t) \quad , \quad (22)$$

das durch die magnetischen und elektrischen Unterschiede zwischen d - und q -Achse verursacht wird. Im synchronen Betrieb, bei $s = 0$, verschwindet das Asynchronmoment und das Pendelmoment geht über in das bekannte Reluktanzmoment. Insgesamt verhält sich die Maschine ganz ähnlich wie ein gewöhnlicher Asynchronmotor. Insbesondere bei großen Trägheitsmomenten (Schwungmassen) hat das Pendelmoment keinen sehr starken Einfluss (siehe Abbildung 13).

Da beim asynchronen Anlauf sehr große Ströme fließen können, wird dieser, wenn möglich, bei verminderter Spannung durchgeführt, um eine unzulässige Erwärmung des Stators zu vermeiden.

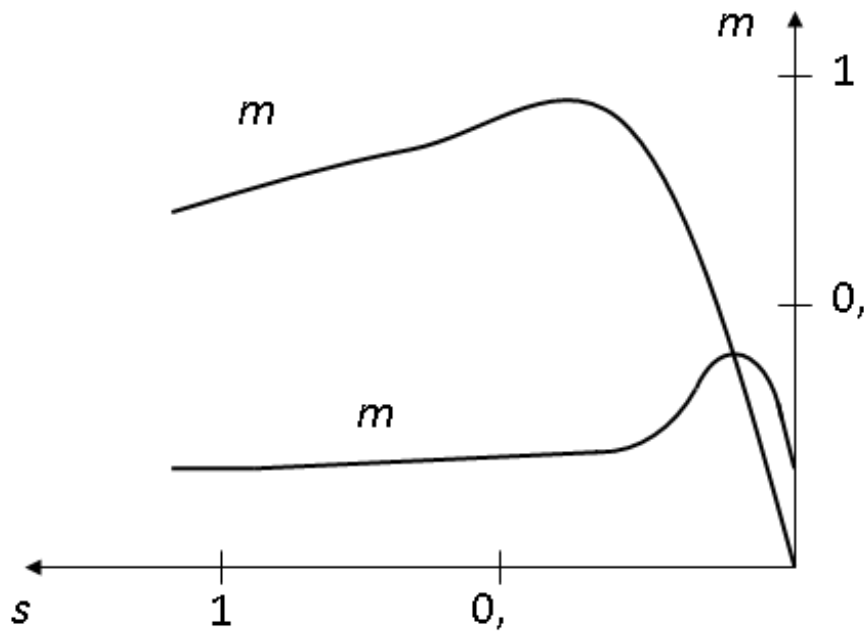


Abbildung 13: Asynchron- und Pendelmoment

7. Versuchsdurchführung

7.1. Messungen

Die Synchronmaschine ist mit einer Gleichstrommaschine kuppelbar, deren Verluste aus den in Abschnitt 9 („Angaben zum Hilfsmotor“, Seite 18) angegebenen Messergebnissen berechnet werden können. Die bei der Gleichstrommaschine zu messenden Größen Ankerspannung und Ankerstrom sind U_a und I_a .

Die Synchronmaschine ist gemäß Abbildung 14 zu verschalten.

7.1.1. Leerlaufversuch (Generatorbetrieb)

Die SM wird durch die GM mit $n = n_N = n_{syn}$ angetrieben (exakte Einstellung mittels $I_{f,GM}$!). Die Leerlaufspannung $U_h = f(I_f)$, sowie $U_a, I_a = f(I_f)$ sind im Bereich $I_f = 0 \dots 1,1 \cdot I_{fN}$ zu messen. $U_h = f(I_f)$ ist gleichzeitig zu zeichnen. Fehlende Zwischenpunkte sollen sofort nachgemessen werden.

7.1.2. Messungen zur POTIER-Reaktanz

Die SM wird mit der GM hochgefahren und mit dem Netz ($U_s = U_N$) synchronisiert. Für $\cos \varphi = 0$ übererregt (IVP) ist bei $I_s = I_{sN}$ der Erregerstrom I_f und die Spannung U_s zu messen.

7.1.3. Gegenerregungsversuch

Die Schaltkupplung zwischen SM und GM ist auszurücken. Der Erregerkreis der SM wird über den vorhandenen Schalter kurzgeschlossen. Bei minimaler Sekundärspannung des Transformators kann die SM zugeschaltet und durch langsames Erhöhen der Spannung mit $I_s \leq I_{sN}$ asynchron angefahren werden.

Nach Erreichen der Synchrondrehzahl wird der Erregerkreis wieder aufgetrennt. Die Maschine wird gegenerregt, bis der Läufer um eine Polteilung zurückfällt. Der in diesem Augenblick auftretende Ständerstrom $I_{sg} = f(U_s)$ sowie der Ständerstrom ohne Erregung $I_{s0} = f(U_s)$ sind im Bereich $U_s = 0,4 \cdot U_N \dots U_N$ zu messen. Die bezogenen Reaktanzen x_d und x_q sind zu berechnen und über U_s aufzutragen.

7.1.4. Übererregungsversuch

Die SM wird asynchron hochgefahren. Die Erregung wird eingeschaltet und so eingestellt, dass die Maschine übererregt den Strom $I_s = I_{sN}$ aufnimmt. Die Spannung U_s sollte so eingestellt werden, dass sich rechnerisch über das Zeigerdiagramm die Hauptfeldspannung U_h des entsprechenden Lastpunkts ergibt. Da dies nur bei genauer Kenntnis der Streureaktanz X_{σ} möglich ist, wird ein Spannungsbereich gemessen, der es gestattet, anschließend in der Auswertung die „richtige“ Spannung U_s auszuwählen. Die aufgenommene Wirkleistung $P_s = f(U_s)$ ist im Bereich $U_s = 0,5 \cdot U_N \dots U_N$ zu messen und aufzutragen. Der bei der Messung auftretende Leistungsfaktor ist nicht Null, aber klein (typisch $\cos \varphi = 0,1$).

7.1.5. Kurzschlussversuch

Der Ankerkreis ist gemäß Abbildung 14b in Sternschaltung zu schalten. Die SM wird von der GM mit $n = n_N = n_{syn}$ angetrieben. Im Bereich $I_{sk} = 0 \dots 1 \cdot I_{sN}$ sind I_{sk} , U_a , $I_a = f(I_f)$ zu messen. I_{sk} ist in das Diagramm zu 7.1.1 einzuzeichnen. Die POTIER-Reaktanz ist jetzt zu bestimmen.

8. Auswertung

8.1. Bestimmung der Reaktanzen

Nach den in Abschnitt 4 beschriebenen Verfahren sollen die Reaktanzen X_p , X_q , X_{qh} sowie die gesättigten und ungesättigten Werte für X_d , X_{dh} bestimmt werden. Die absoluten und die bezogenen Werte sind in einer Tabelle zusammenzustellen und, soweit sie nach verschiedenen Verfahren gemessen wurden, kritisch zu vergleichen. Das Leerlauf-Kurzschlussverhältnis k_K ist für die gesättigte und ungesättigte Maschine zu bestimmen. Aus dem POTIER-Dreieck ist das Übersetzungsverhältnis $\ddot{u}_{if} = I_f / I_f'$ zu ermitteln.

8.2. Wirkungsgradbestimmung

Der Wirkungsgrad der SM im Generatorbetrieb bei $U_s = U_{sN}$, $I_s = I_{sN}$ ist nach den beiden beschriebenen Verfahren jeweils für die drei Belastungsfälle $\cos \varphi = 1$ und $\cos \varphi = 0,7$ unter- und übererregt zu bestimmen. Die Zeigerdiagramme zur Ermittlung des Erregerstromes sind entsprechend der Konstruktion für den Erregerbedarf zu zeichnen. Verwenden Sie für den Strangwiderstand der Statorwicklung der Synchronmaschine $R_s = 0,63 \Omega$.

8.2.1. Einzelverlustverfahren

Die Verlustleistung ist $P_d = P_{Fe+R} + P_{Cu,s+Z} + P_f$.

$P_{Fe+R} = f(U_h)$ ist aus dem Leerlaufversuch (Abschnitt 7.1.1) zu berechnen und aufzutragen.

$P_{Cu,s+Z} = f(I_s)$ ist aus dem Kurzschlussversuch zu berechnen und aufzutragen.

8.2.2. Übererregungsverfahren

Die Verluste sind $P_d = P_{d\dot{u}} + P_f$. Aus dem Übererregungsversuch ist $P_{d\dot{u}} = P_s = f(U_h)$ bekannt und kann zur Bestimmung der Gesamtverlustleistung P_d verwendet werden. Wegen $\cos \varphi \approx 0$ übererregt gilt: $U_h = U_s + I_s \cdot X_p$

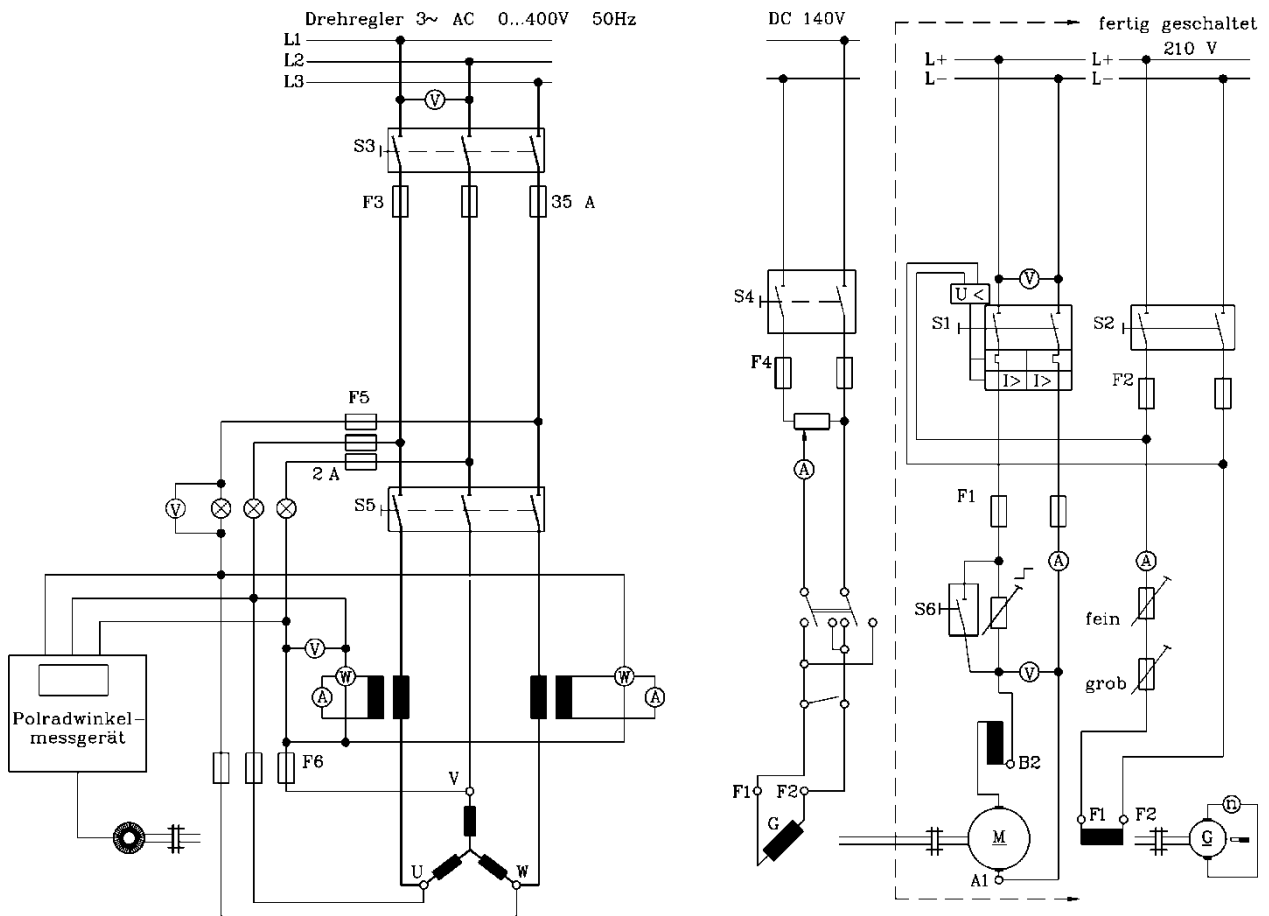
9. Angaben zum Hilfsmotor

Von der GM ist aus einer Widerstandsmessung mit Gleichstrom $U_a = f(I_a)$ und aus einem Leerlaufversuch $P_{Fe+R,GM} = f(U_i)$ bei $n = n_{syn}$ bekannt. Die Kurven sind in Abbildung 15 dargestellt.

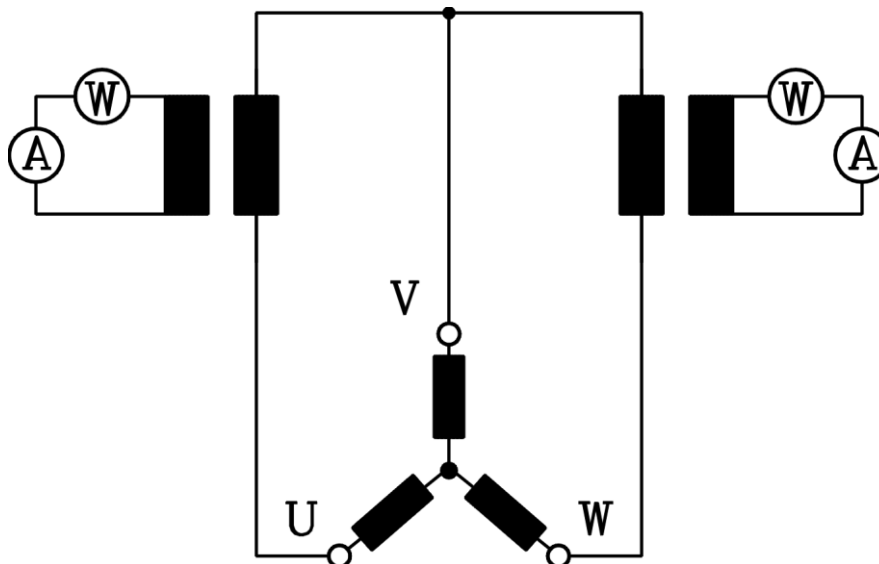
10. Literatur

- [1] Normen: DIN EN60034
- [2] NÜRNBERG, W.: Die Prüfung elektrischer Maschinen, Springer, Berlin, 1981
- [3] BONFERT, K.: Betriebsverhalten der Synchronmaschine, Springer, Berlin, 1962
- [4] LAIBLE, Th.: Die Theorie der Synchronmaschine im nichtstationären Betrieb, Springer, Berlin, 1952.

11. Anhang



† (a) Schaltung für Versuche 7.1.1 bis 7.1.4



† (b) Schaltung für Kurzschlussversuch 7.1.5

Abbildung 14: (a) Schaltung für Versuch 7.1.1; (b) Schaltung des Ständerkreises für den Kurzschlussversuch

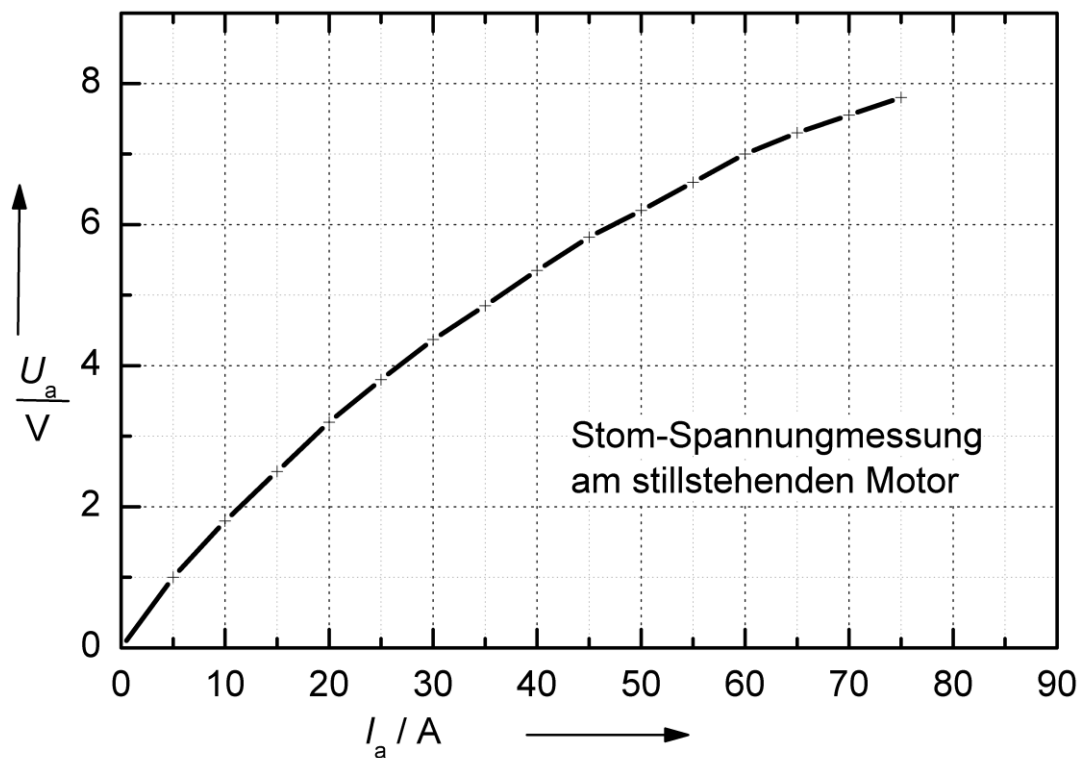
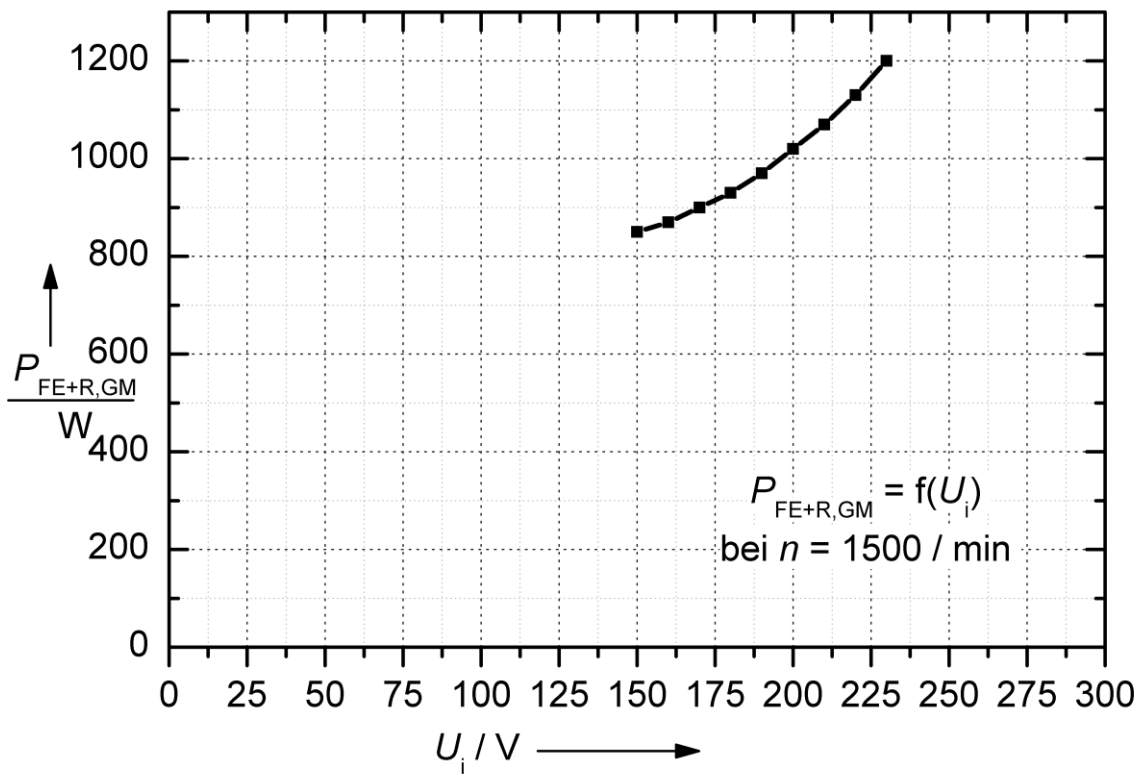


Abbildung 15: Berücksichtigung der Verluste der Gleichstrommaschine