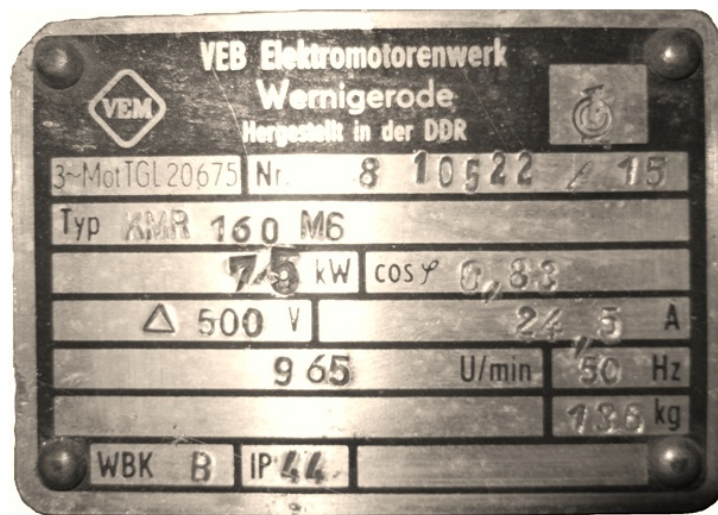


Drehzahlermittlung
einer

Drehstromasynchronmaschine

Fabrikat: VEB, Typ: KMR 160 M6

zur Verwendung als Generator
im Kleinwasserkraftwerk Niedermühle



Leibetseder Manuel
Graz, November 2011

Aufgabenstellung

Ziel der folgenden Berechnung ist die Ermittlung der optimalen Generatorwellendrehzahl im Kleinwasserkraftwerk Niedermühle. Grundprinzip dabei ist die Gleichsetzung der Turbinenleistung und der Generatorleistung unter Vernachlässigung der Riemenverluste. Die Berechnung der Drehstromasynchronmaschine [DASM] bzw. deren elektrischen Ersatzschaltbild liefert die entsprechende Kennlinie, aus welcher die optimale Generatorwellendrehzahl bei gegebener Leistung ermittelt werden kann.

Angaben

- **Typenschilddaten der DASM:**

Spannung [V]:	500
Leistung [kW]:	15
Schaltung:	Δ
Synchrondrehzahl n_s [min^{-1}]:	1000 (bei 50 Hz)

- **Ersatzwiderstände der DASM:**

R_{1w} [Ω]: (bei 120 °C)	1,2920
R'_{2w} [Ω]: (bei 120 °C)	1,3780
R_{Fe} [Ω]:	1119
$X_{1\sigma}$ [Ω]:	2,782
$X'_{2\sigma}$ [Ω]:	3,495
X_h [Ω]:	88,061

sämtliche Werte gelten für sinusförmige Spannung!

- **Elektrische Daten des Netzes:**

Spannung [V]:	400
Frequenz [Hz]:	50

Das Ersatzschaltbild

Das in in Abb. 1 dargestellte Ersatzschaltbild einer Drehstromasynchronmaschine [DASM] dient als Grundlage für die weiteren Berechnungen. Es zeigt die beiden interagierenden Teile der Maschine:

1. den Stator, mit Index 1 bezeichnet
2. den Läufer, mit Index 2 bezeichnet

welche jeweils durch ihren ohmschen Widerstand R_{1w} bzw. R'_{2w} und ihre Reaktanzen $X_{1\sigma}$ bzw. $X'_{2\sigma}$ dargestellt werden. Weiters sind noch die Magnetisierungs- und Eisenverluste als R_{Fe} und X_h zusammengefasst eingezeichnet.

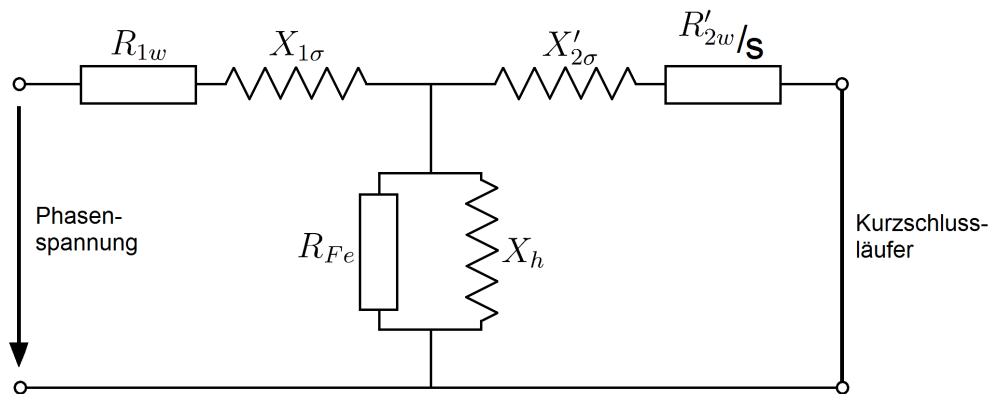


Abbildung 1: Ersatzschaltbild der DASM

Zur Berechnung muss der ohmsche Läuferwiderstand R'_{2w} durch den Schlupf s dividiert werden. Der Schlupf ist folgendermaßen definiert:

$$s = \frac{n_s - n_2}{n_s} \quad (1)$$

Wobei n_s die Drehfeld- oder Synchrondrehzahl und die n_2 die Läuferdrehzahl darstellt.

Hinweis: Die im Ersatzschaltbild dargestellte Schaltung stellt nur eine der drei „Phasen“ der DASM dar. Es sind folglich drei in Δ -Schaltung verknüpfte Ersatzschaltbilder zu berechnen!

Berechnung der Stromortskurve (*Ossanna - Kreis*)

Die Stromortskurve stellt auf zwei rechtwinklig zueinander stehenden Koordinatenachsen den Wirk- und den Blindstrom der Maschine in Abhängigkeit des Schlupfes dar. Die vertikale Achse wird i. A. dem Wirkstrom $[I_{\text{Re}}$] zugeordnet, die horizontale Achse demnach dem Blindstrom $[I_{\text{Im}}]$. Für die folgende Betrachtung wird nur der rechte Teil, also die Ortskurve des Statorstromes in Betracht gezogen. siehe Abb. 2

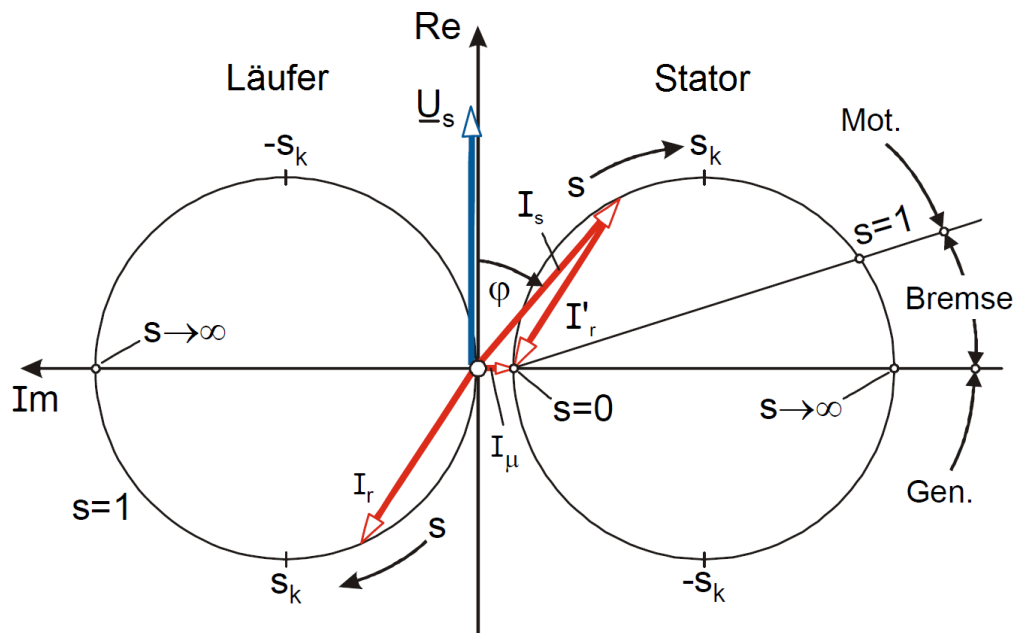


Abbildung 2: Stromortskurve schematisch

Die Strecke zwischen Koordinatenursprung und einem beliebigen Punkt auf der rechten Seite des Diagramms kann sodann als Gesamtstrom des Stators interpretiert werden. - Es ist also jener Strom welcher über die elektrischen Leitungen von oder zur Maschine fließen muss. Durch Veränderung des Schlupfes verändert sich auch der Betrag und die Phasenlage des Stromes, sodass dieser näherungsweise eine Kreisbahn beschreibt. Abhängig vom Schlupf wirkt die DASM als Motor, Generator oder Bremse. Auf die vertikale Achse wird ebenso die Spannung aufgetragen und von ihr ausgehend der

Phasenwinkel φ . Der Leistungsfaktor $\cos(\varphi)$ ist demnach jener Anteil des Gesamtstromes welcher in dieselbe Richtung zeigt wie die Spannung. - Es ist der Wirkstrom welcher von der Maschine zur Erzeugung mechanischer Leistung eingesetzt wird. Der Blindstrom hingegen, wird von der Maschine lediglich für die ständige Ummagnetisierung des Eisens benötigt und erzeugt keine nutzbare Leistung.

Es ist am einfachsten die Berechnung in der komplexen Zahlenebene auszuführen. Dazu werden die Reaktanzen $X_{1\sigma}$, $X'_{2\sigma}$ und X_h mit der imaginären Einheit \mathbf{j} multipliziert und wie normale Widerstände in die Berechnung der Ersatzschaltbildschaltung miteinbezogen. Man kann sich die imaginäre Einheit $\mathbf{j} = \sqrt{-1}$ als einen Zeiger vorstellen welcher eine 90° -Phasenverschiebung bewirkt. Folgende Gleichung beschreibt den komplexen Gesamtwiderstand \vec{Z} der Ersatzschaltbildschaltung:

$$\vec{Z} = R_{1w} + X_{1\sigma} \cdot \mathbf{j} + \frac{1}{\frac{1}{X'_{2\sigma} \cdot \mathbf{j} + \frac{R'_{2w}}{s}} + \frac{1}{X'_h \cdot \mathbf{j}} + \frac{1}{R_{Fe}}} \quad (2)$$

Das Ohmsche Gesetz ist auch auf komplexe Widerstände anwendbar und liefert den Strom als Quotient aus Spannung und Widerstand:

$$\vec{I} = \frac{\vec{U}}{\vec{Z}} \quad (3)$$

Der Vektor \vec{I} lässt sich nun mathematisch auf die Form $\vec{I} = I_{\Re} + I_{\Im} \cdot \mathbf{j}$ bringen, wobei I_{\Re} der Realteil des Stromes bzw. der *Wirkstrom* ist und I_{\Im} , also jener Teil welcher mit \mathbf{j} multipliziert wird, als der Imaginärteil des Stromes oder als *Blindstrom* zu bezeichnen ist. Durch wiederholtes Durchrechnen mit unterschiedlichen Schlupfwerten kann nun die Stromortskurve Punkt für Punkt ermittelt werden.

Aus dieser Kurve kann man nun die Kennwerte der Maschine herauslesen. So zum Beispiel ist das Verhältnis von Verlustleistung zu theoretischer, mechanischer Leistung als Längenverhältnis zwischen den senkrechten Abständen von Ortskurve, Leistungsgerade und Blindstromachse interpretierbar. Abb. 3 zeigt dies schematisch.

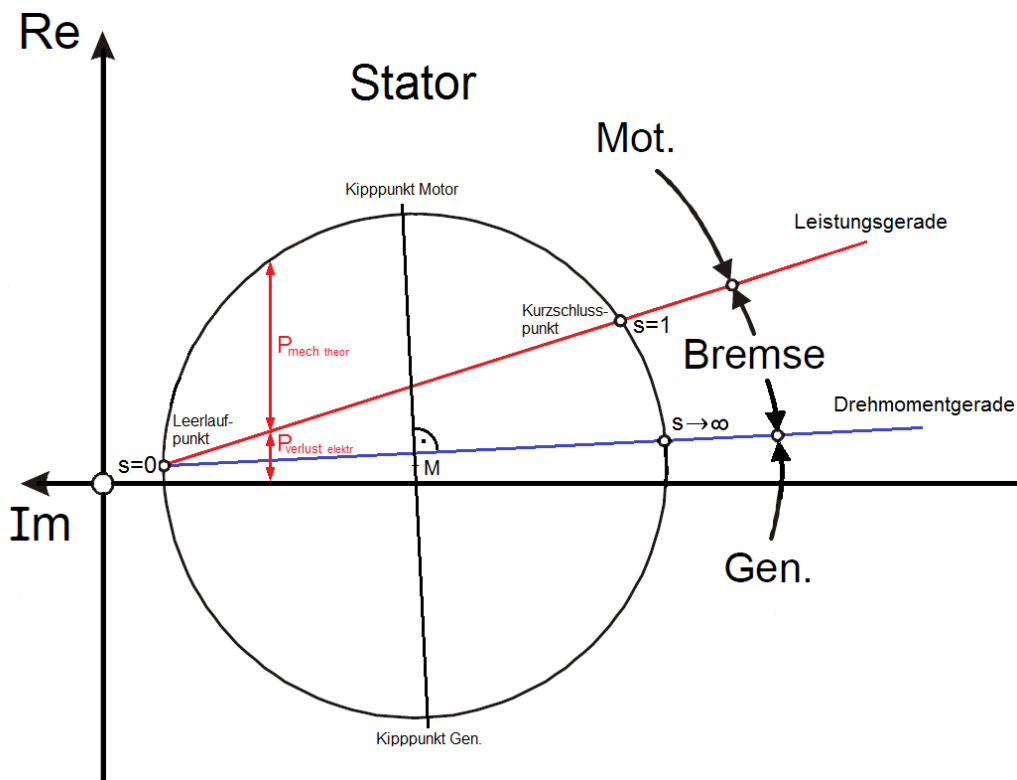


Abbildung 3: Stromortskurve, Leistungsverhältnis

Die Leistungsgerade (*rot*) ist zwischen Leerlaufpunkt und Kurzschlusspunkt aufgespannt, die Drehmomentgerade (*blau*) zwischen Leerlaufpunkt und jenem Punkt der Ortskurve mit unendlichem Schlupf. Man kann erkennen, dass für die weitere Berechnung der Maschine die Definition eines Verlustmomentes für die mechanischen Verluste (Lagerreibung, Lüfter, ...) von Vorteil ist, da jenes eher konstant bleibt als eine Verlostleistung. Gedanke dazu: Eine Leistung ist Moment und Drehzahlabhängig, so würde selbst ein großes Verlustmoment bei $Drehzahl = 0$ keine nennenswerte Verlostleistung erzeugen, jedoch ein kleines Moment bei hoher Drehzahl schon. Das die Verlustberücksichtigung mit Verlustmoment von Vorteil ist, dürfte anhand des Beispiels ausreichend erklärt worden sein, das diese aber trotzdem nur die bessere Annäherung an die Realität ist wird dann klar, wenn man sich die Verluste des Lüfters ansieht. Das Lüfterverlustmoment ist ohne Zweifel wiederum drehzahlabhängig, in erster Näherung proportional zum Quadrat der Drehzahl. Das diese Abhängigkeiten in Folge vernachlässigt werden, sei durch die verhältnismäßig kleine Variation der Drehzahlen (*von 950 - 1050 U/min*) in den, für den Dauerbetrieb zulässigen, Betriebsbereichen erklärt.

Berechnung der Maschine mit MATLAB[®]

In diesem Kapitel soll das MATLAB[®]-Script näher dokumentiert werden. Das MATLAB[®]-Script ist im Anhang beigelegt und beschreibt die Berechnung der Kennlinien jener VEB KMR 160 M6 Drehstromasynchronmaschine welche im Kleinwasserkraftwerk Niedermühle zur Verwendung kommt.

- *Zeile 23:* Hier wird jene Leistung eingegeben für welche das Ausgabefenster 5: *Zusammenfassung der Daten für die vorgeg. Leistung* die berechneten Daten explizit ausgibt.
- *Zeile 31:* Die in *Zeile 30* eingegebene Effektivspannung des Netzes wird hier in einen komplexen Zeiger umgewandelt. Die Spannung U wird zum Spannungsvektor \vec{U} , welcher in Richtung der realen (Wirkstrom-) Achse zeigt.
- *Zeile 34:* Gilt nur für eine Netzfrequenz von 50 Hz und beschreibt indirekt eine DASM mit Polpaarzahl 3
- *Zeile 37:* Aus Typenschilddaten
- *Zeile 40:* Schätzwert bzw. Annahme auf Grundlage von Erfahrungswerten ähnlicher Maschinen.
- *Zeile 43:* 120 °C ist jene Wicklungstemperatur für welche die Ersatzschaltbilddaten ermittelt worden sind. Eine abweichende Temperatur hat eine Veränderung der ohmschen Ersatzwiderstände zur Folge (siehe *Zeilen 57 u. 58*).
- *Zeile 46 und 47:* linearer und quadratischer Temperaturkoeffizient von Kupfer bei 20 °C
- *Zeile 57 u. 58:* Temperaturabhängiges Widerstandsgesetz. Bei einer von 120 °C abweichenden Betriebstemperatur macht diese Berechnungsformel einen Fehler! Man bräuchte hierfür die Temperaturkoeffizienten vom Wicklungswerkstoff bei 120 °C.
- *Zeile 53 - 55:* Beträge der induktiven Ersatzwiderstände bei 50 Hz Netzfrequenz.

- *Zeile 60 - 62:* „Komplexmachen“ der induktiven Ersatzwiderstände durch Drehen dieser in Richtung der komplexen (Blindstrom-) Achse.
- *Zeile 65:* Ein Array N wird mit Drehzahlwerten vollgeschrieben für welche die Berechnung des Ersatzschaltbildes durchgeführt wird. Die Definition erfolgt folgendermaßen:

UntererDrehzahlwert : Auflösung in U/min : ObererDrehzahlwert

- *Zeile 66:* Die Dimension (Anzahl der Einträge) des Drehzahlarrays N werden gezählt und als Wert dim abgespeichert.
- *Zeile 69 ff:* Weitere Arrays, mit der selben Dimension wie das Drehzahlarray, zur Speicherung von betriebspunktspezifischen Werten werden erzeugt. Bei der Erzeugung werden diese mit Nullen (*zeros*) vollgeschrieben.
- *Zeile 103:* for-Schleife: Innenliegende Berechnungsschritte werden für jeden Arrayeintrag einzeln ausgeführt.
- *Zeile 104- 107:* Die aktuelle Drehzahl wird ausgelesen, der Schlupf und der Strom berechnet. Die Operatoren *real* und *imag* generieren aus dem Gesamtstromvektor den Realteil und den Imaginärteil, welche separat in das Wirk- und Blindstromarray gespeichert werden.
- *Zeile 114 f:* Berechnung der Leerlaufströme. Leerlauf bedeutet *kein Schlupf*. Die Generatorwelle dreht sich mit Synchrondrehzahl.
- *Zeile 121 f:* Berechnung der Kurzschlussströme. Kurzschluss bedeutet *Schlupf = 1*. Die Generatorwelle steht still.
- *Zeile 128 f:* Berechnung der Ströme bei unendlichem Schlupf. Die Generatorwelle dreht sich richtungsunabhängig theoretisch mit unendlicher Drehzahl.
- *Zeile 136 f:* Die Leistungsgerade liegt zwischen Leerlaufpunkt und Kurzschlusspunkt. Die Steigung ($\frac{\Delta y}{\Delta x}$) berechnet sich aus der Differenz der Wirkströme von Kurzschluss- und Leerlaufpunkt dividiert durch die Differenz der Imaginärströme derselben. Der Offset berechnet sich durch Umformung der Geradengleichung $y = k \cdot x + d$ auf $d = y - k \cdot x$ und Einsetzen eines beliebigen Punktes der Geraden, in diesem Fall den Leerlaufpunkt.

- *Zeile 140 f:* Analog zur Leistungsgeraden werden hier die Steigung und der Offset der Drehzahlgeraden berechnet. Diese erstreckt sich jedoch zwischen Leerlaufpunkt und dem Punkt mit unendlichem Schlupf.
- *Zeile 147:* Auffinden der Position der Nenndrehzahl im Drehzahlarray.
- *Zeile 148:* Berechnung des Verlustmomentes am Nennpunkt.

$$T_{verlust} = \frac{(1 - \eta_{mech}) \cdot P_{mech,theor}}{\omega_{nenn}}$$

Hierzu wird die die theoretische mechanische Leistung folgendermaßen beschrieben.

$$P_{mech,theor} = 3 \cdot U \cdot (I_{Reenn} - (k_p \cdot I_{Smenn} + d_p))$$

Der Koeffizient 3 steht für die drei Wicklungen, die Spannung U für die Leiterspannung und der Klammerausdruck für jenen Anteil des Wirkstromes welcher lt. Abb. 3 für die theoretische mechanische Leistung verantwortlich ist. Die Multiplikation dieses Terms mit $(1 - \eta_{mech})$ wird dadurch notwendig, da die, in der Stromortskurve eingezeichnete, theoretische mechanische Leistung lediglich die elektrischen Verluste jedoch keine Lagerreibung, Lüfterverluste, etc... berücksichtigt. Um von einer Verlustleistung auf ein Verlustmoment zu kommen, muss dies noch durch die Nennwinkelgeschwindigkeit $\omega_{nenn} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{nenn}}{60}$ dividiert werden.

- *Zeile 150:* for-Schleife: Innenliegende Berechnungsschritte werden für jeden Arrayeintrag einzeln ausgeführt.
- *Zeile 151:* Der Leistungsfaktor: $\cos(\varphi) = \cos(\arctan(\frac{I_{Sm}}{I_{Re}}))$
- *Zeile 152:* Die elektrische Wirkleistung: $P_{wirk} = 3 \cdot U \cdot I_{Re}$ Diese Leistung ist die Summe aus theoretischer mechanischer Leistung $P_{mech,theor}$ und den elektrischen Wirkleistungsverlusten $P_{verlust,elektr}$. Die elektrischen Wirkleistungsverluste sind zum Beispiel die Wärmeverluste der elektrischen Wicklungen, jedoch NICHT jene der mechanischen Bauteile z.B.: der Lager!
- *Zeile 153:* Die tatsächliche mechanische Leistung ist jene Leistung, welche an der Generatorriemenscheibe übertragen wird. Dazu wird die

in der Stromortskurve bezeichnete theoretische mechanische Leistung um die Verlustleistung vermindert.

$$P_{mech,tats} = P_{mech,theor} - P_{verlust}$$

$$P_{mech,tats} = 3 \cdot U \cdot (I_{Re} - (k_p \cdot I_{Sm} + d_p)) - T_{verlust} \cdot \omega$$

$$\text{mit } \omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}$$

- *Zeile 154:* Der Wirkungsgrad als Quotient aus tatsächlicher mechanischer Leistung und elektrischer Leistung.

$$\eta_{mech} = \frac{P_{mech,tats}}{P_{wirk}}$$

- *Zeile 155:* Das Drehmoment an der Generatorwelle:

$$T_{welle} = \frac{P_{mech,tats}}{\omega} = \frac{P_{mech,tats}}{\frac{2 \cdot n \cdot \pi}{60}}$$

Die nachfolgenden Zeilen beschreiben lediglich die Darstellung und Ausgabe der berechneten Daten. Diese Schritte werden hier nicht mehr explizit dokumentiert.

Ergebnisse (*MATLAB[®] Ausgabefenster*)

In diesem Kapitel seien beispielhaft die Ausgabefenster der MATLAB[®]-Berechnung dargestellt. Folgende Abbildung (Abb. 4) zeigt die berechnete Stromortskurve der Maschine.

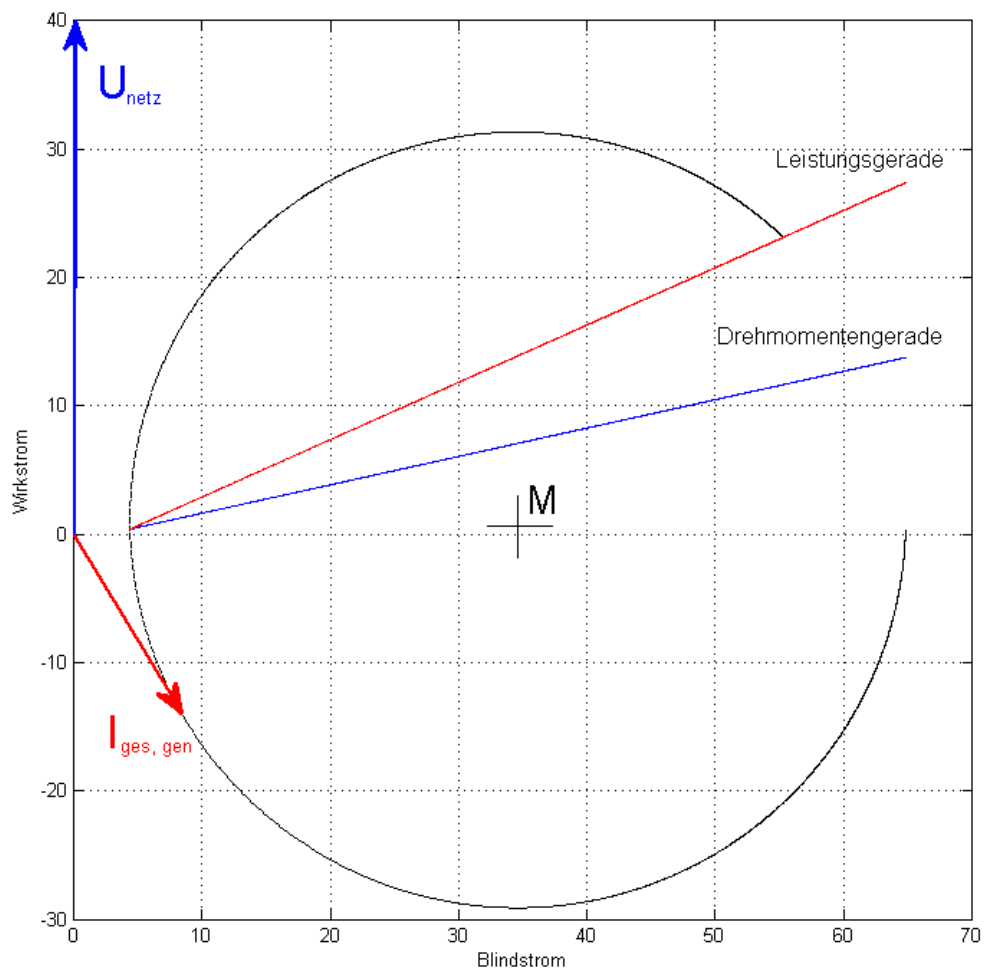


Abbildung 4: Stromortskurve VEB KMR 160 M6

Abbildungen 5 und 6 zeigen die Betriebscharakteristik der Maschine anhand von Kennlinien, welche die relevantesten Werte graphisch darstellen.

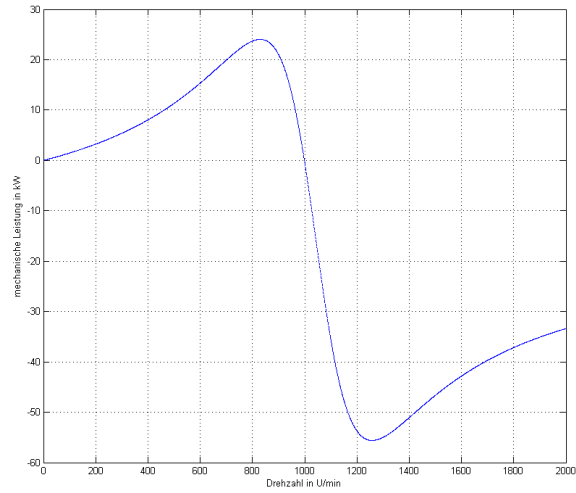


Abbildung 5: tatsächl. mech. Leistung an der Welle über der Drehzahl

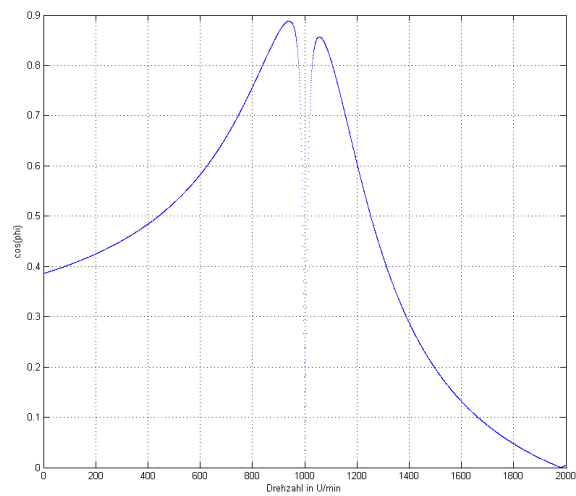


Abbildung 6: Leistungsfaktor $\cos(\varphi)$ über der Drehzahl

Abbildungen 7, 8 und 9 zeigen eine detailliertere Darstellung der Betriebscharakteristik anhand dreier Kennlinien, welche die relevantesten Werte graphisch darstellen.

Die Tabelle (Abb. 10) beschreibt alles noch einmal tabellarisch.

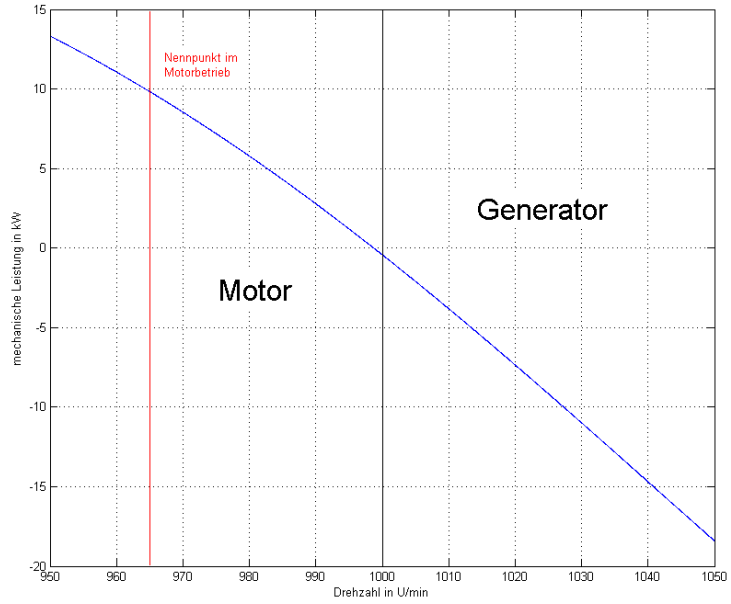


Abbildung 7: tatsächl. mech. Leistung über der Drehzahl

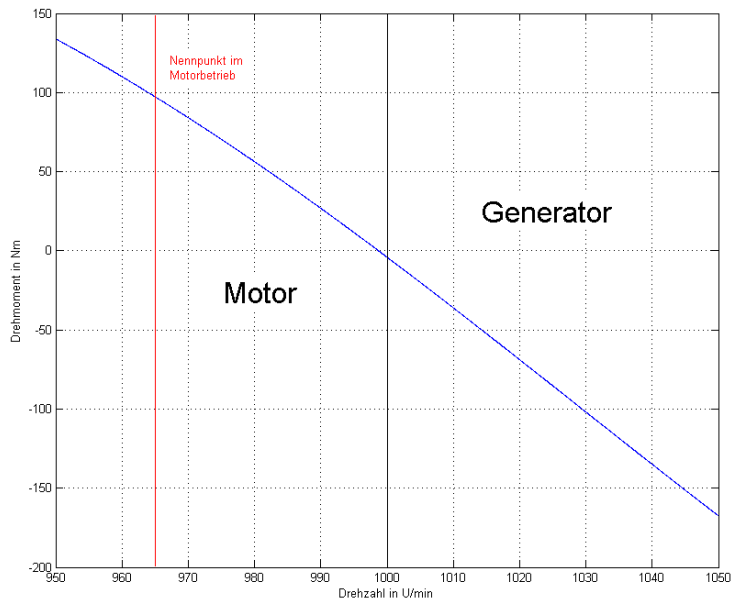


Abbildung 8: Drehmoment über der Drehzahl

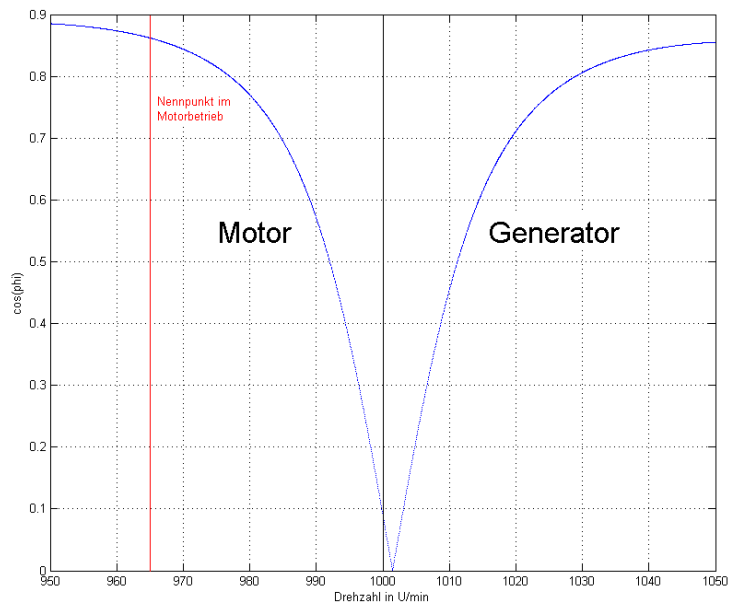


Abbildung 9: Leistungsfaktor $\cos(\varphi)$ über der Drehzahl

$P_{\text{mech,tats}}$ [kW]	P_{el} [kW]	P_{verl} [kW]	η	$\cos(\varphi)$	n_{welle} [U/min]	T_{welle} [Nm]	I_{ges} [A]
10	11.55	1.54	0.87	0.86	964.3	99.1	19.3
9	10.4	1.4	0.87	0.85	968.3	88.8	17.6
8	9.29	1.28	0.86	0.83	972	78.7	16.1
7	8.19	1.18	0.86	0.81	975.7	68.6	14.6
6	7.1	1.1	0.85	0.78	979.2	58.6	13.2
5	6.03	1.03	0.83	0.73	982.7	48.7	11.8
4	4.98	0.97	0.8	0.67	986	38.8	10.7
3	3.95	0.94	0.76	0.59	989.3	29.1	9.6
2	2.93	0.91	0.69	0.48	992.5	19.4	8.7
1	1.91	0.9	0.53	0.34	995.6	9.7	8.1
0	0.9	0.9	0	0.17	998.7	0	7.7
-1	-0.08	0.91	0.08	0.01	1001.7	-9.4	7.6
-2	-1.06	0.94	0.53	0.19	1004.7	-19	7.9
-3	-2.02	0.97	0.68	0.35	1007.6	-28.3	8.3
-4	-2.97	1.02	0.75	0.47	1010.5	-37.7	9
-5	-3.91	1.07	0.78	0.57	1013.4	-47	9.9
-6	-4.85	1.14	0.81	0.64	1016.2	-56.3	10.9
-7	-5.77	1.22	0.83	0.7	1019	-65.5	12
-8	-6.69	1.31	0.84	0.74	1021.8	-74.8	13.1
-9	-7.59	1.41	0.84	0.77	1024.6	-83.8	14.3
-10	-8.47	1.51	0.85	0.79	1027.3	-92.8	15.5
-11	-9.36	1.63	0.85	0.81	1030	-101.9	16.8
-12	-10.23	1.76	0.85	0.82	1032.7	-110.8	18
-13	-11.09	1.89	0.85	0.83	1035.4	-119.8	19.3
-14	-11.95	2.04	0.85	0.84	1038.1	-128.7	20.6
-15	-12.8	2.19	0.85	0.84	1040.8	-137.5	21.9
-16	-13.64	2.36	0.85	0.85	1043.5	-146.4	23.2
-17	-14.46	2.53	0.85	0.85	1046.2	-155.2	24.5
-18	-15.27	2.72	0.85	0.85	1048.9	-163.7	25.8
-19	-16.08	2.91	0.85	0.86	1051.6	-172.4	27.1
-20	-16.89	3.11	0.84	0.86	1054.3	-181.1	28.5

Abbildung 10: Zusammenfassung

Literaturverzeichnis

- [1] Email von Hr. Hahnenkamp Gerald, VEB Motorenwerke Werningerode vom 28. Juli 2011
Inhalt: Zahlenwerte der Ersatzwiderstände

- [2] Anleitung zur Konstruktion eines Ossanna-Kreises, TU Darmstadt
URL: http://www.ew.tu-darmstadt.de/media/ew/vorlesungen_4/ema/konstr_ossanna.pdf
Stand: 28. Dez. 2011

- [3] Höger W., Scriptum zur VO EMA, TU München, letzte Akt.: Feb. 11
URL: http://www.hoeger-mechatronik.de/Lehre-Dateien/aktuell-Dateien/Skript_EMA_SS2011.pdf
Stand: 28. Dez. 2011

- [4] Candors W.-R., Sriptum zur VO, TU Braunschweig
URL: http://www.pslib.cz/pe/skola/studijni_materialy/motory/indukcni_motor/Asynchronmaschine_3.pdf
Stand: 28 Dez. 2011

Anhang

MATLAB®-Script, 7 Seiten, 357 Zeilen
Stand: 30. Dez. 2011