

Die Asynchronmaschine (Versuch ASM)

1 Allgemeine Hinweise

1.1 Darstellung der elektrischen Kennwerte

Auf dem Typenschild von Drehstrommaschinen werden die Spannungen immer als verkettete Spannungen zwischen zwei Aussenleitern angegeben, da bei (häufig) fehlendem Sternpunkt die Sternspannungen nicht direkt messbar sind. Die Ströme sind die Leiterströme in den Zuleitungen.

Im symmetrischen Betrieb, der ja immer angestrebt wird und der – von Störungsfällen abgesehen – durchwegs vorausgesetzt werden darf, genügt es, *eine* Phase allein zu betrachten. Die Beträge der Spannungen, Ströme und Flüsse sind in den beiden anderen Phasen gleich, nur die Phasenwinkel unterscheiden sich um $2\pi/3$, in einer Phase nacheilend gegenüber der Bezugsphase, in der anderen Phase voraus-eilend.

Die zweckmässige Darstellung für die einphasige Betrachtung ist die Sternschaltung. Deshalb wird im Praktikumsversuch diese Schaltung vorausgesetzt. Die Spannungen werden vom Aussenleiter zum Sternpunkt angegeben, die Ströme sind die Leiterströme, die den im Stern geschalteten Strang durchfliessen. Diese Darstellung ist deshalb vorteilhaft, weil die Möglichkeit der Zerlegung in die drei symmetrischen Teilsysteme unmittelbar sichtbar wird.

Die Umrechnung der verketteten Spannung U_{Δ} in die Sternspannung U_Y erfolgt durch:

$$U_Y = \frac{U_{\Delta}}{\sqrt{3}} \quad (1)$$

Selbstverständlich kommt in der Praxis häufig und auch im Praktikumsversuch die Dreieckschaltung vor. Dann sind die an einem herausgetrennten Wicklungsstrang gemessenen Widerstände R_{Strang} in die äquivalenten Widerstände R_Y der Stern-Ersatzschaltung umzurechnen:

$$R_Y = \frac{R_{Strang}}{3} \quad (2)$$

Üblicherweise wird die Verschaltung der Maschine im Klemmenkasten nicht aufgelöst und einfach der Widerstand R_{KK} zwischen zwei Klemmen gemessen. Dann ist der Widerstand R_Y der Sternschaltung oder der Stern-Ersatzschaltung immer:

$$R_Y = \frac{R_{KK}}{2} \quad (3)$$

Üblicherweise haben Stator und Rotor unterschiedliche Windungszahlen N_S und N_R und bisweilen unterschiedliche Schaltungen, z.B. Stern-(Y) oder Dreieck-(Δ)schaltung. Um die Dinge nicht unnötig kompliziert zu machen, rechnet man zweckmässig die Läufergrössen auf die Ständerseite um und kennzeichnet die umgerechneten Grössen mit einem Strich, also z.B. den umgerechneten Rotorwiderstand mit R_R' .

Die Umrechnung der Rotorgrössen in die äquivalenten Grössen auf der Statorseite geschieht mit dem Spannungsverhältnis:

$$\ddot{u} = U_S / U_R = U_{Sv} / U_{Rv} \quad (4)$$

Wir erhalten dann:

$$U_{R'} = \ddot{u} U_R \quad (5)$$

$$I_{R'} = I_R / \ddot{u} \quad (6)$$

$$R_{R'} = \ddot{u}^2 R_R \quad (7)$$

1.2 Näherungen

Es wurde bereits erwähnt, dass beim Betrieb der Induktionsmaschine am Netz der Ständerwiderstand R_S bei vielen Untersuchungen vernachlässigbar ist. (Bei der Berechnung des Kippmoments ergibt sich durch die Vernachlässigung von R_S ein ca. 20 % zu hoher Wert.)

Nun sollen noch einige weitere wichtige Näherungen studiert werden. Eine Induktionsmaschine, die mit der synchronen Drehzahl n_s läuft, was beispielsweise mit einem Hilfsantrieb auch praktisch durchführbar ist, nimmt nur den Magnetisierungsstrom aus dem Netz auf. Dann ist

$$X_S = U_S / I_S = X_{S\sigma} + X_H \quad (8)$$

Beim Praktikumsversuch kann man die Läuferwicklung öffnen und diese Messung ($I_R = 0$) im Stillstand durchführen. Da moderne, gut ausgenutzte Induktionsmaschinen deutlich im Gebiet der Eisensättigung arbeiten, ist der bei Nennspannung U_{Sn} ermittelte Wert von X_S merklich kleiner als der bei Teilspannung gemessene. Weiter ist $X_{S\sigma} \ll X_H$. Man setzt deshalb:

$$X_H \approx U_S / I_S \quad (9)$$

Die Messung ist nicht sehr genau, man muss von einem Fehler von etwa 10 % ausgehen.

Im **Kurzschlussversuch**, d.h. bei kurzgeschlossenem und festgebremstem Rotor ermitteln wir:

$$\frac{U_S}{I_{SK}} = \sqrt{(X_{S\sigma} + X_{R\sigma}')^2 + (R_S + R_R')^2} \quad (10)$$

Die Hauptinduktivität spielt keine Rolle. Man gewinnt hieraus X_{σ} , da R_S und R_R' aus einer Gleichstrommessung bestimmbar sind:

$$X_{\sigma} = X_{S\sigma} + X_{R\sigma}' = \sqrt{\left(\frac{U_S}{I_{SK}}\right)^2 - (R_S + R_R')^2} \quad (11)$$

Die Aufteilung in die Ständer- und Läufer-Streureaktanz ist nicht auf einfache Weise ermittelbar. Da aber die Streureaktanzen gegenüber der Hauptreaktanz X_H klein sind, kann man für die Gesamtstreuzyiffer für $X_\sigma < 0.1 X_H$ mit sehr guter Näherung

$$\sigma = \frac{X_\sigma}{X_\sigma + X_H} \quad (12)$$

setzen.

Die Extremwerte des Stromes I_s liegen bei $\omega_R=0$ ($s=0$) und $\omega_R=\infty$ ($s=\infty$) entsprechend den Drehzahlen $n = n_s$ und $n = \pm \infty$. Der Minimalstrom bei $n = n_s$ ist der Magnetisierungsstrom

$$I_{Ss} = \frac{U_s}{\omega_N \cdot L_s} \approx \frac{U_s}{X_H} \quad (13)$$

und der Maximalstrom

$$I_{S\infty} = \frac{U_s}{\omega_N \cdot L_s \cdot \sigma} \approx \frac{U_s}{X_H \cdot \sigma} \quad (\text{reine Blindströme}) \quad (14)$$

bzw.

$$P_B = 3 \cdot U_s \cdot I_s = \sqrt{3} \cdot U_{S(\text{verkettet})} \cdot I_{Ss} \quad (\text{bzw.} \cdot I_{S\infty}) \quad (15)$$

1.3 Leistungsmessung

Die Scheinleistung kann direkt aus der Messung von Strom und Spannung mit Effektivwert anzeigenden Instrumenten bestimmt werden. In einem symmetrisch belasteten Dreiphasensystem ergibt sich die gesamte Scheinleistung:

$$S_{tot} = 3 \cdot U_{L0} \cdot I_L \quad (16)$$

mit I_L dem Strom eines Leiters und U_{L0} der Spannung gegen Erde.

Die Wirk- und Blindleistung wird in diesem Versuch mit der **Aronschtaltung** (Zwei-Wattmeter-Methode) gemessen. Dabei werden zwei Wattmeter (Produktmittelwert-bildende Instrumente) nach folgender Schaltung eingesetzt:

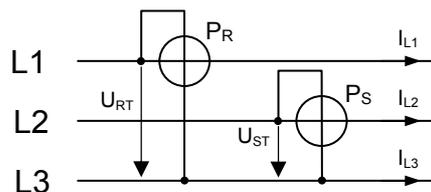


Abb. 1: Aronschtaltung

Sie messen die Produkte:

$$P_R = U_{RT} \cdot I_R + U_S \cdot I_S + U_T \cdot (-I_R - I_S)$$

$$P_R = U_{RT} \cdot I_R = (U_R - U_T) \cdot I_R \quad (17)$$

$$P_S = U_{ST} \cdot I_S = (U_S - U_T) \cdot I_S$$

Ihre Summe ist gleich der gesamten Wirkleistung:

$$P_{tot} = P_R + P_S = U_R \cdot I_R + U_S \cdot I_S + U_T \cdot (-I_R - I_S) \quad (18)$$

$$\text{da } I_R + I_S + I_T = 0$$

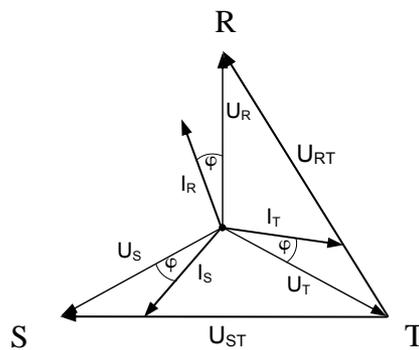


Abb. 2: Zeigerdiagramm bei symmetrischer Belastung

Bei **symmetrischer** Last gilt auch:

$$P_R = U \cdot I \cdot \cos(\varphi - 30^\circ) \quad (19)$$

$$P_S = U \cdot I \cdot \cos(\varphi + 30^\circ) \quad (20)$$

mit der verketteten Spannung U und dem Leiterstrom I . Ihre Summe ergibt:

$$P_{tot} = P_R + P_S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (21)$$

wie erwartet die gesamte Wirkleistung.

Andererseits ergibt die Differenz:

$$P_R - P_S = U \cdot I \cdot \sin \varphi \quad (22)$$

Man erhält also die Blindleistung aus:

$$Q_{tot} = \sqrt{3} \cdot (P_R - P_S) \quad (23)$$

2 Maschinendaten der Asynchronmaschine (ASM) oder Induktionsmaschine (IM)

Laut Typenschild:

Nennspannung Stator	$U_{S_{Nv}} = 380 \text{ V}$	(verkettete Spannung bei Normal-schaltung des Stators in Dreieck)
Nennstrom Stator	$I_{S_n} = 16 \text{ A}$	(Leiterstrom bei Dreieckschaltung)
Nennleistung	$P_n = 7.5 \text{ kW}$	(mech. Leistung an der Welle)
Nennzahl	$n_n = 1420 \text{ U/min}$	(d.h. $\omega_{Nenn} = 2\pi n_n/60 = 148.7 \text{ s}^{-1}$)
Nennfrequenz	$f_n = 50 \text{ Hz}$	
Leistungsfaktor	$\cos \varphi_n = 0.84$	
Verk. Rotorspannung	$U_{R_{Nv}} = 157 \text{ V}$	(verkettete Spannung zwischen den offenen Schleifringen in Sternschaltung bei Stillstand.)
Rotornennspannung	$U_{R_n} = 157/\sqrt{3} = 90.64 \text{ V}$	
Nennstrom des Rotors	$I_{R_n} = 29 \text{ A}$	

Zusätzliche Maschinenparameter, berechnet für Δ -Schaltung des Stators:

Statorwiderstand	$R_S = 0.4 \Omega$
Rotorwiderstand	$R_R = 0.15 \Omega$
Übersetzungsverhältnis	$\ddot{u} = U_{S_n}/U_{R_n} = \frac{380}{\sqrt{3}} / \frac{157}{\sqrt{3}} = 2.42$
Rotorwiderstand (auf Statorseite bezogen)	$R_R' = R_R \ddot{u}^2 = 0.88 \Omega$
Streureaktanz	$X_\sigma = 1.7 \Omega$ (auf Statorseite bezogen)
Hauptreaktanz	$X_H = 28 \Omega$ (auf Statorseite bezogen)
Wirkleistungsaufnahme	$P_w = \sqrt{3} U_{S_{Nv}} I_{S_n} \cos \varphi_n = 3 U_{S_n} I_{S_n} \cos \varphi_n = 8846 \text{ W}$
Wirkungsgrad	$\eta_n = \text{abgeg./aufgen. Wirkleistung} = 7.5\text{kW}/8846\text{W} = 84.8\%$
Gesamtstreuiziffer	$\sigma = 0.057$

3 Versuchsprogramm

3.1 Vorbereitende Aufgaben

3.1.1 Wie gross ist die Polpaarzahl der Induktionsmaschine?

Induktionsmaschinen haben immer einen Nennschlupf s_n von wenigen Prozent.

Nenn Drehzahl der ASM gemäss Typenschild $n_n = 1420$ U/min

Mögliche synchrone Drehzahlen bei 50 Hz:

$p =$	1	2	3	4
$n_s =$	3000	1500	1000	750

Polpaarzahl $p =$	Polzahl =
-------------------	-----------

3.1.2 Berechnen Sie den Kippschlupf s_k und das Kippmoment M_k bei 123V, Statorwicklung in Normal- = Dreieckschaltung

$$s_k = \frac{R'_R}{\frac{X_\sigma}{X_\sigma + X_H} \cdot X_H} \approx \frac{R'_R}{X_\sigma} \quad M_k = \frac{3}{2} p \frac{U_S^2}{\omega_n} \cdot \frac{\frac{X_H}{X_\sigma + X_H}}{\frac{X_\sigma}{X_\sigma + X_H} \cdot X_H} \approx \frac{3}{2} p \frac{U_S^2}{X_\sigma \cdot \omega_{Netz}}$$

$s_k =$	$M_k =$ Nm
---------	---

3.1.3 Berechnen Sie die Schlupfabhängigkeit des Drehmoments für die angegebenen Schlupfwerte nach der sog. KLOSS'schen Formel:

$$\frac{M}{M_k} = \frac{2}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k}}$$

s	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	-10	%
M/M_k												1
M												Nm

3.1.4 Zeichnen Sie das berechnete Drehmoment $M=f(n)$ auf, damit es später mit den gemessenen Werten verglichen werden kann (Diagramm 1)

3.1.5 Vervollständigen Sie die unten abgebildete Messschaltung. Folgende Messgeräte stehen zur Verfügung:

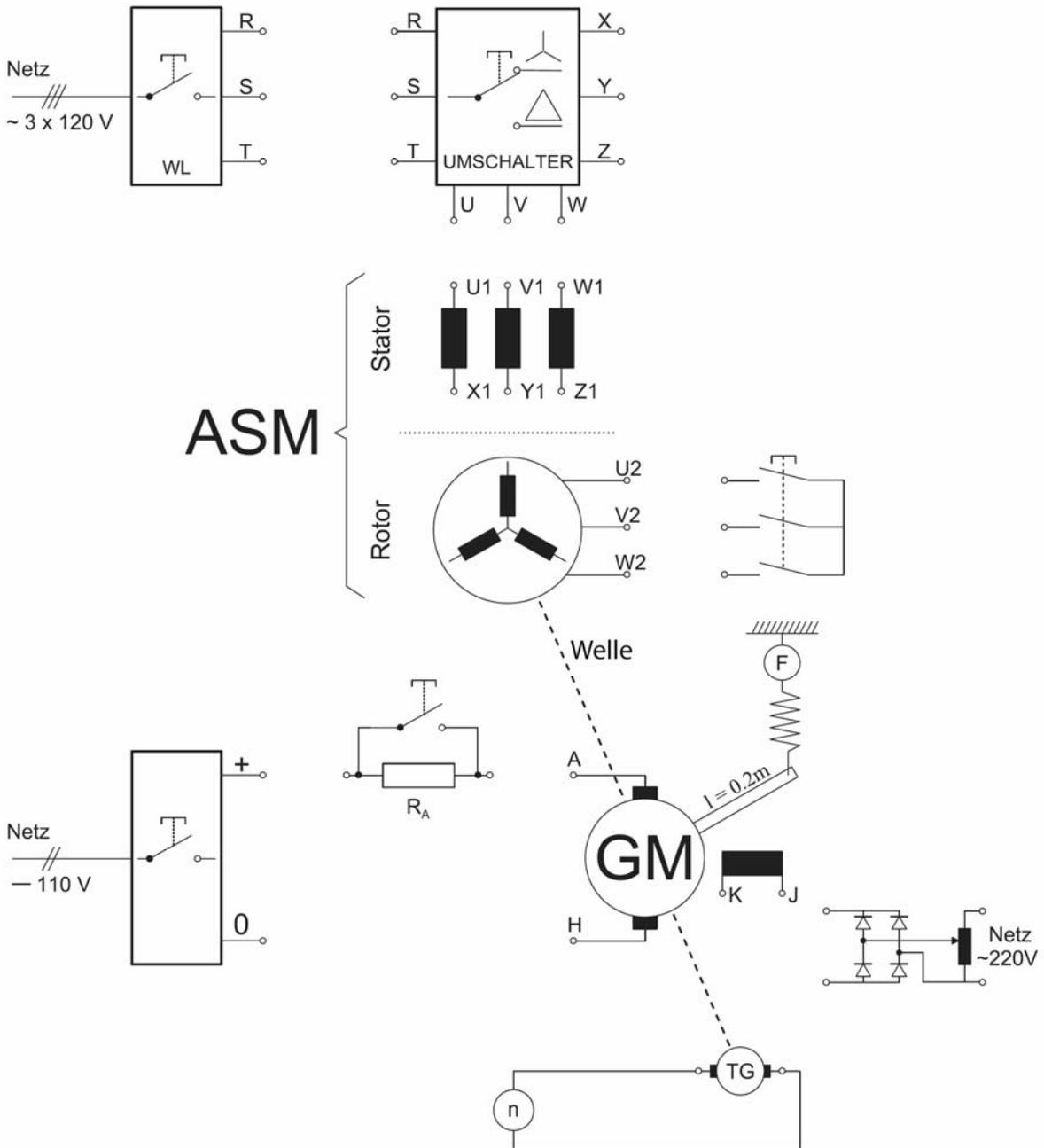


Abb 3: Messschaltung

3.1.6 Wie gross wird der Anlaufstrom (Leiterstrom) der Induktionsmaschine...

bei 123V verketteter Speisespannung und kurzgeschlossenem Rotor

$$(U_S = \frac{U_{S\text{verkettet}}}{\sqrt{3}})$$

- ... wenn die Statorwicklungen in Stern geschaltet sind?
- ... wenn die Statorwicklungen in Dreieck geschaltet sind?

Anmerkung:

Für die Dreieckschaltung sind die angegebenen Impedanzen in die Formel

$$I_a = \frac{U_S}{\sqrt{X_\sigma^2 + (R_S + R'_R)^2}}$$

einzusetzen, für die Sternschaltung die 3-fachen

Werte, gleichbedeutend mit einer Division der Ströme durch 3.

Wie hoch würde er bei Nennspannung $U_{S\text{Nv}} = 380 \text{ V}$?

Was ist deshalb beim Anlaufen einer ASM zu beachten? (siehe auch Bild 4)

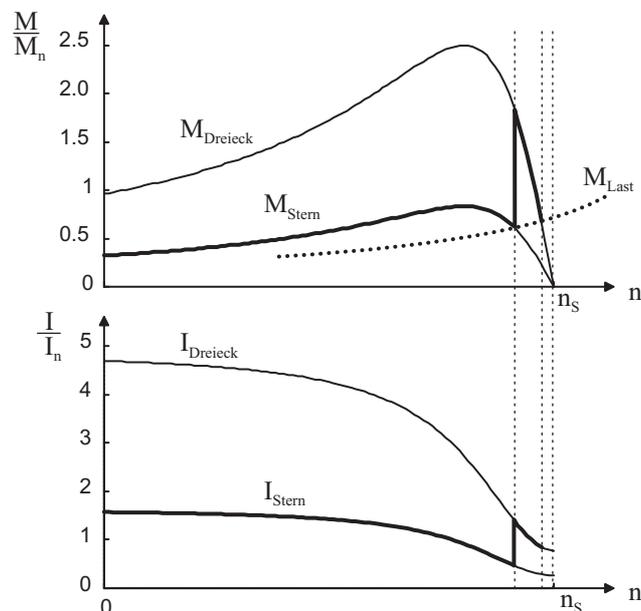


Abb. 4: Stern-Dreieck-Anlauf

3.2 Versuchsdurchführung (mit 123 V verketteter Speisespannung) in Normal- (=Dreieck-)Schaltung

3.2.1 Antrieb der Versuchsmaschine mit der Gleichstrommaschine

Messung der im (nicht kurzgeschlossenen) Rotor induzierten Spannung U_{Rv} und der Rotorfrequenz f_R als Funktion der Drehzahl n :

n	0	750	900	1050	1200	1350	1500	1650	U/min
s	100	50	40	30	20	10	0	-10	%
U_{Rv}									V
f_R									Hz

Zeichnen Sie in Diagramm 2 die induzierte Spannung und die Rotorfrequenz über der Drehzahl auf. Welches Gesetz ist daraus ersichtlich?

Berechnen Sie das Übersetzungsverhältnis der Spannungen im Stillstand:

$$\ddot{u} = U_S / U_{R0} = U_{Sv} / U_{R0v} =$$

3.2.2 Messung des Anlaufstroms (Rotor jetzt kurzgeschlossen)

Messen Sie bei 123V Speisespannung mit der Stromzange den Anlaufstrom in **Sternschaltung** und vergleichen Sie mit der Berechnung:

Rechenwert: $I_{aY} =$ A	Messwert $I_{aY} =$ A
--------------------------	-----------------------

3.2.3 Belastung der Maschine (Stator wieder in Δ !) mit Hilfe der GM

n [U/min]	1500	1420	1350	1200	1650
Schlupf s [%]					
Kraft F [N]					
Drehmoment [Nm]					
U_{Sv} [V]	123	123	123	123	123
$U_S = U_{Sv}$ [V]	123	123	123	123	123
I_S [A]					
$P_S = \sqrt{3} \cdot U_S \cdot I_S$ [kVA]					
P_{mess1} [kW]					
P_{mess2} [kW]					
$P_W = P_1 + P_2$ [kW]					
$P_B = \sqrt{3} \cdot (P_1 - P_2)$ [kVA]					
$\cos \varphi = P_W / P_S$					
φ					

Zeichnen Sie die Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie $M = f(n)$ in das vorbereitete Diagramm 1 ein:

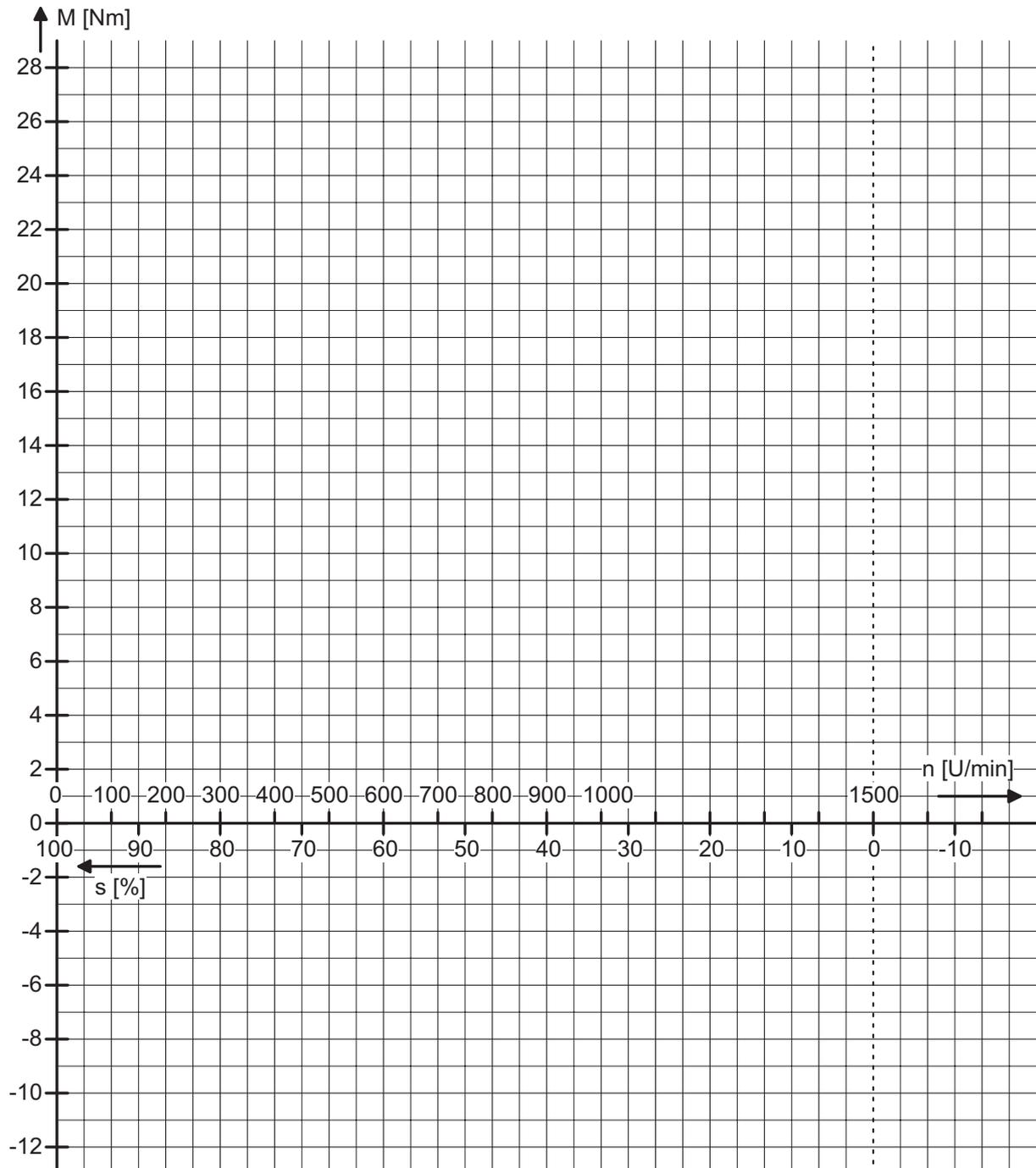


Diagramm 1: Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie $M = f(n)$

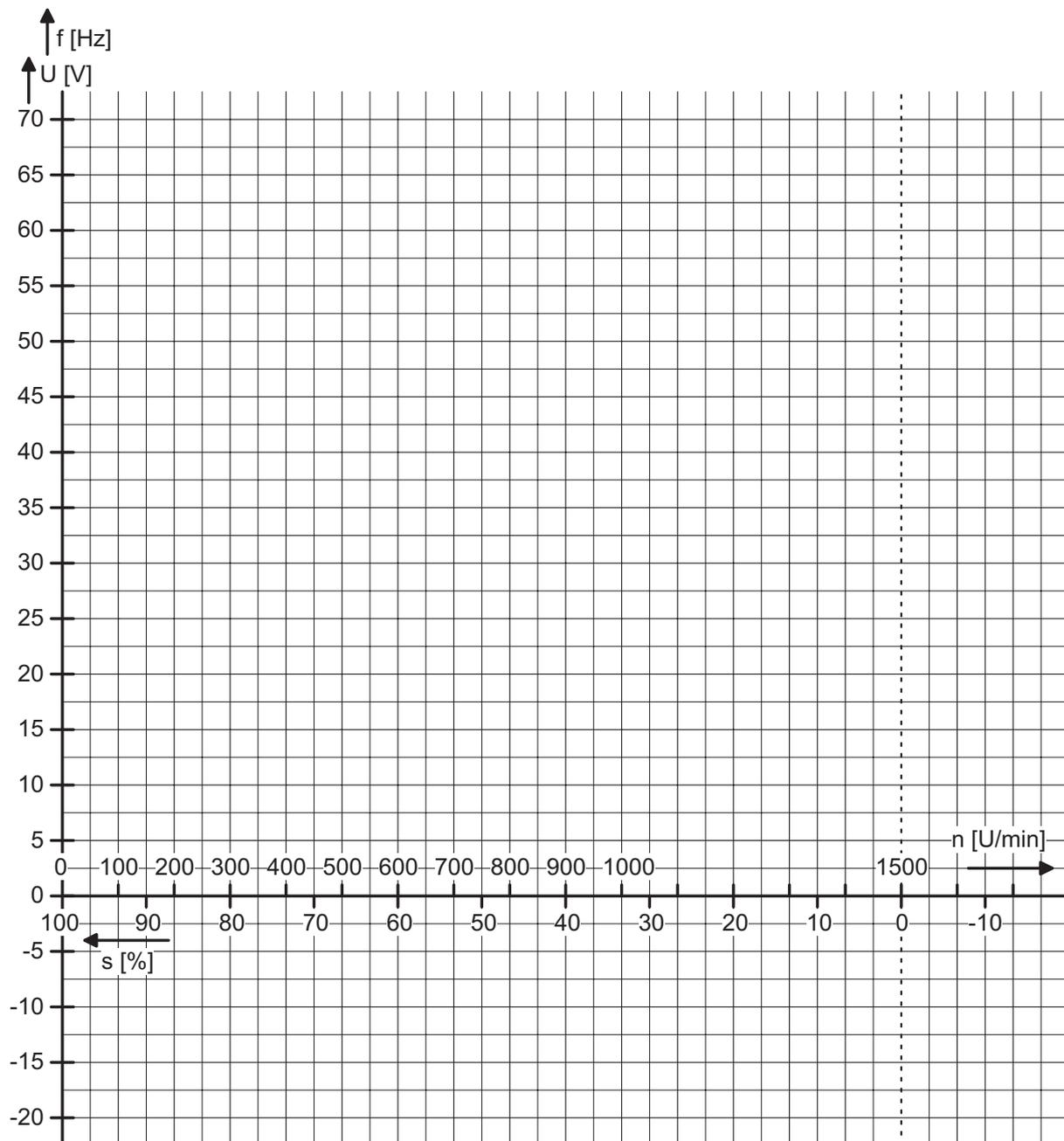


Diagramm 2: Rotorspannung U_R und Rotorfrequenz $f_R = f(n)$