

1

Gleichstrommaschine

Im Folgenden sollen als Beispiel der Entwurf und die Berechnung eines fremderregten, kompensierten Gleichstrom-Walzenzugmotors mit den Bemessungswerten

$$\begin{aligned}P_N &= 1000 \text{ kW} \\U_N &= 600 \text{ V} \\n_N &= 500 \text{ min}^{-1} \\n_{\max} &= 1000 \text{ min}^{-1}\end{aligned}$$

und einer kurzzeitigen 1,6fachen Stromüberlastbarkeit gezeigt werden. Die Isolierung des Motors soll thermisch nach Wärmeklasse 130 ausgenutzt werden. Der Entwurfs- und Berechnungsgang werden entsprechend der Darstellung in den Abschnitten 9.1 und 9.2.2 des Bands *Berechnung elektrischer Maschinen* durchgeführt. Die angegebenen Gleichungsnummern verweisen auf die entsprechende Beziehung in diesem Band. Für die berechneten Zahlenwerte gilt eine Genauigkeit von drei Stellen.

1.1

Entwurf

Für die Bestimmung der Hauptabmessungen und für die elektromagnetischen Beanspruchungen ist die kleinste Drehzahl, die sog. Grunddrehzahl, und für die mechanischen Beanspruchungen die größte Drehzahl maßgebend. Wegen des geforderten Drehzahlstellbereichs werden zunächst Wirkungsgrad und elektromagnetische Beanspruchung an der unteren Grenze des Drehzahlstellbereichs angenommen. Infolge der Fremderregung ist der Ankerstrom gleich dem Maschinenstrom. Die Speisung der Erregerwicklung soll mit maximal 220 V erfolgen.

1.1.1

Bestimmungen der Hauptabmessungen

Aus $P_N = P_{\text{mech}} = 1000 \text{ kW}$ und mit dem aus Bild 9.1.3 entnommenen Erfahrungswert für den Wirkungsgrad $\eta \approx 93,5\%$ ergibt sich für die elektrische Leistung

$$P_{\text{el}} = P = \frac{P_{\text{mech}}}{\eta} \approx \frac{1000 \text{ kW}}{0,935} \approx 1070 \text{ kW} . \quad (9.1.12)$$

Hieraus erhält man mit der gegebenen Bemessungsspannung den Ankerstrom zu

$$I = I_N = \frac{P_{\text{el}}}{U_N} = \frac{1070 \text{ kW}}{600 \text{ V}} = 1783 \text{ A} \approx 1800 \text{ A} .$$

Aus der einem ersten Schätzwert für die innere Leistung

$$P_i \approx [1 - 0,7(1 - \eta)]P \approx (1 - 0,7 \cdot 0,065)1070 \text{ kW} \approx 1020 \text{ kW} \quad (9.1.8)$$

folgt der erste Schätzwert für die in der Ankerwicklung induzierte Spannung

$$E = U \frac{P_i}{P} = 600 \text{ V} \frac{1020 \text{ kW}}{1070 \text{ kW}} = 572 \text{ V} . \quad (9.1.6)$$

Mit $P_i/n_N \approx 1020 \text{ kW}/500 \text{ min}^{-1} = 2,04 \text{ kWmin}$ entnimmt man Bild 9.1.2

$$\begin{aligned} p &= 3 \quad \text{oder} \quad p = 4 \\ C &\approx 4,8 \frac{\text{kWmin}}{\text{m}^3} \\ D &\approx 0,97 \text{ m} . \end{aligned}$$

Mit $p = 4$ erhält man für die maximale Ankerfrequenz

$$f_{a \text{ max}} = pn_{\text{max}} = 4 \cdot 1000 \text{ min}^{-1} = 66\frac{2}{3} \text{ Hz} ,$$

was ein recht hoher Wert wäre. Daher wird $p = 3$ gewählt, so dass die Ankerfrequenz unter $f_{a \text{ max}} = 3 \cdot 1000 \text{ min}^{-1} = 50 \text{ Hz}$ bleibt. Ein erster Schätzwert für die ideelle Länge ergibt sich mit den aus Bild 9.1.2 entnommenen Werten für Ausnutzungsfaktor und Ankerdurchmesser nach (9.1.3) und (9.1.4) zu

$$l_i = \frac{P_i}{CD^2n} = \frac{1020}{4,8 \cdot 0,97^2 \cdot 500} \text{ m} = 0,45 \text{ m} .$$

Die Kontrolle der Polteilung führt auf den ersten Schätzwert

$$\tau_p = \frac{\pi D}{2p} = \frac{\pi \cdot 0,97 \text{ m}}{6} = 0,51 \text{ m} ,$$

was innerhalb des zulässigen Bereichs nach Tabelle 9.1.9 liegt. Die Kontrolle der relativen Länge ergibt

$$\lambda = \frac{l_i}{\tau_p} = \frac{0,45 \text{ m}}{0,51 \text{ m}} = 0,88 \quad (9.1.5)$$

und liegt damit ebenfalls innerhalb des in Tabelle 9.1.3 angegebenen zulässigen Bereichs. Mit k_1 und k_2 aus Tabelle 9.1.2 wird schließlich der Ankerdurchmesser überprüft. Man erhält den verbesserten Wert

$$D = k_1 + k_2 \sqrt[3]{\frac{P_i/n}{\text{VA min}} \frac{p}{\lambda}} = 7 \text{ cm} + 4,7 \text{ cm} \sqrt[3]{\frac{1020000}{500} \cdot \frac{3}{0,88}} = 96,7 \text{ cm} . \quad (9.1.19b)$$

Unter Berücksichtigung vorhandener Blechschnitte wird der Durchmesser endgültig zu $D = 980 \text{ mm}$ gewählt und abschließend die maximale Umfangsgeschwindigkeit

$$v_{\max} = D\pi n_{\max} = 0,98 \text{ m} \cdot \pi \cdot 1000 \text{ min}^{-1} = 51,3 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (9.1.15a)$$

kontrolliert, was auf einen zulässigen Wert führt. Mit dem gewählten Durchmesser erhält man als endgültigen Wert der Polteilung

$$\tau_p = \frac{D\pi}{2p} = \frac{980 \text{ mm} \cdot \pi}{6} = 513 \text{ mm}$$

und als ersten verbesserten Wert der ideellen Länge

$$l_i = \frac{1020 \text{ kW}}{4,8 \text{ kWmin/m}^3 \cdot (0,98 \text{ m})^2 \cdot 500 \text{ min}^{-1}} = 0,443 \text{ m} .$$

Auf der Grundlage dieses Werts wird die Länge der Pole zu $l_p = 460 \text{ mm}$ gewählt und für den Anker eine Aufteilung in $l_{\text{Fe}} = 410 \text{ mm}$ Eisenlänge und 6 Ventilationskanäle mit je $l_v = 10 \text{ mm}$ Länge festgelegt. Die Gesamtlänge des Ankers ist damit

$$l = l_{\text{Fe}} + 6l_v = 470 \text{ mm} .$$

Um überprüfen zu können, ob diese Aufteilung die zuvor berechnete ideelle Länge ergibt, muss zunächst die Luftspaltlänge ermittelt werden. Dazu wird aus Bild 9.1.2 mit $D = 0,98 \text{ m}$ der erste Schätzwert für die Luftspaltinduktion $B_{\max} \approx 1 \text{ T}$ entnommen. Unter Annahme des für Bild 9.1.2 vorausgesetzten ideellen Polbedeckungsfaktors von $\alpha_i \approx 2/3$ erhält man als ersten Schätzwert für den Strombelag

$$A = \frac{C}{\pi^2 \alpha_i B_{\max}} = \frac{4,8 \text{ kW min/m}^3}{\pi^2 \cdot \frac{2}{3} \cdot 1 \text{ T}} \cdot 60 \frac{\text{s}}{\text{min}} = 44 \frac{\text{kA}}{\text{m}} , \quad (9.1.4)$$

was etwas unterhalb des im Bild 9.1.2 angegebenen Werts $A = 50 \text{ kA/m}$ liegt. Für kompensierte Maschinen gilt

$$\delta \geq \left[(0,22 \dots 0,25) \frac{\tau_p}{\text{m}} \frac{\frac{A}{\text{A/mm}}}{\frac{B_{\max}}{\text{T}}} \right] \text{mm} \approx \left[(0,22 \dots 0,25) \cdot 0,513 \frac{44}{1} \right] \text{mm} \\ \approx 5,0 \dots 5,6 \text{ mm} . \quad (9.1.33b)$$

Auf dieser Grundlage wird als erster Schätzwert für die Luftspaltlänge $\delta = 6 \text{ mm}$ gewählt, und es ergibt sich ein Verhältnis $\delta/l_v = 6/10 = 0,6$. Ein zweiter verbesserter Wert der ideellen Länge berechnet sich aus den gewählten Werten für l , l_p und l_v sowie einem ersten Wert der Hilfsgröße γ_v nach Bild 2.3.6 oder

$$\gamma_v = \frac{1}{1 + 5 \frac{\delta}{l_v}} = \frac{1}{1 + 5 \frac{6 \text{ mm}}{10 \text{ mm}}} = 0,25 \quad (2.3.20)$$

zu

$$l_i = l - n_v \gamma_v l_v - \frac{l - l_p}{2} = \left(470 - 6 \cdot 0,25 \cdot 10 - \frac{470 - 460}{2} \right) \text{mm} = 450 \text{ mm} , \quad (2.3.22)$$

was dem zuvor berechneten ersten verbesserten Wert gut entspricht.

1.1.2

Entwurf der Ankerwicklung

Gewählt wird ein Polbedeckungsgrad von $\alpha = 0,7$. Da die Maschine mit einer Kompensationswicklung ausgeführt werden soll, muss der Luftspalt unter dem Polschuh konstant sein (s. Bild 1.2), und es gilt

$$\alpha_i \approx (1,05 \dots 1,1) \alpha = (1,05 \dots 1,1) \cdot 0,7 = 0,735 \dots 0,77 \quad (2.3.4b)$$

und damit $\alpha_i \approx 0,75$. Daher kann die Luftspaltinduktion gegenüber dem Bild 9.1.2 entnommenen Wert von 1 T , der für $\alpha_i = 2/3$ gilt, auf den endgültigen Wert

$$B_{\max} = \frac{2/3}{0,75} 1 \text{ T} = 0,89 \text{ T}$$

reduziert werden. Damit ergibt sich für den Luftspaltfluss

$$\Phi_\delta = B_{\max} \alpha_i \tau_p l_i = 0,89 \text{ T} \cdot 0,75 \cdot 0,513 \text{ m} \cdot 0,45 \text{ m} = 0,154 \text{ Vs} . \quad (2.3.2)$$

Für die Windungszahl eines Zweigs folgt daraus als erster Schätzwert

$$w = \frac{|E|}{4np\Phi_\delta} = \frac{580 \text{ V}}{4 \cdot 500 \text{ min}^{-1} \cdot 3 \cdot 0,154 \text{ Vs}} \cdot 60 \frac{\text{s}}{\text{min}} \approx 38 . \quad (1.3.30)$$

Es ist zu überprüfen, ob sich diese Windungszahl mit zulässigen Werten für Kommutatorstegzahl und Stegspannung realisieren lässt. Nach Unterabschnitt 1.3.3.2a beträgt die zulässige Stegspannung für große kompensierte Maschinen $u_{\text{st,zul}} = 20 \text{ V}$, und die Kommutatorteilung sollte einen Wert von $\tau_{\text{k,min}} \approx 5 \text{ mm}$ nicht unterschreiten. Für den Kommutatordurchmesser gilt

$$D_{\text{k}} = (0,6 \dots 0,9)D = (0,6 \dots 0,9) \cdot 980 \text{ mm} = (590 \dots 880) \text{ mm} . \quad (9.2.1b)$$

Aufgrund der hohen maximalen Drehzahl wird der Kommutatordurchmesser im unteren Teil dieses Bereichs zu $D_{\text{k}} = 650 \text{ mm}$ gewählt. Damit ergeben sich gemäß (1.3.36) als Grenzen für die Zahl der Kommutatorstege

$$\begin{aligned} k_{\text{max}} &= \frac{D_{\text{k}}\pi}{\tau_{\text{k,min}}} = \frac{650 \text{ mm} \cdot \pi}{5 \text{ mm}} = 408 \\ k_{\text{min}} &= (20 \dots 30)2p = (20 \dots 30) \cdot 6 = 120 \dots 180 \\ k_{\text{min}} &= \frac{2pU}{u_{\text{st,zul}}} = \frac{6 \cdot 600 \text{ V}}{20 \text{ V}} = 180 \end{aligned}$$

und damit $180 \leq k \leq 400$. Auf Grundlage von Tabelle 1.3.3 wird als Wicklungsführung eine eingängige Stab-Schleifenwicklung gewählt, da die ermittelte Zweigwindungszahl $w = 38$ dann innerhalb des zulässigen Bereichs

$$w \approx \frac{k}{2p} = 30 \dots 68$$

liegt. Damit liegen bereits die Werte

$$\begin{aligned} w_{\text{sp}} &= 1 \\ m &= 1 \\ 2a &= 2pm = 6 \end{aligned}$$

fest. Die Grenzen für die Nutzahl folgen aus (1.3.37) zu

$$\begin{aligned} N_{\text{min}} &= (8 \dots 12)2p = (8 \dots 12) \cdot 6 = 48 \dots 72 \\ N_{\text{max}} &= \frac{D\pi}{\tau_{\text{n,min}}} = \frac{980 \text{ mm} \cdot \pi}{12 \text{ mm}} = 257 . \end{aligned}$$

Daraus folgt die Zahl der in einer Schicht nebeneinander liegenden Spulenseiten je Nut zu

$$u \approx \frac{k_{\text{min}}}{N_{\text{min}}} \approx \frac{k_{\text{max}}}{N_{\text{max}}} \approx 2 . \quad (1.3.37)$$

Da nach Möglichkeit ein ungeradzahliges Wert für N/p gewählt werden sollte, folgt

$$\frac{N}{p} = \frac{k}{up} = \frac{k}{2p} = w \in \mathbb{U} .$$

Damit kann zwischen den folgenden Varianten gewählt werden:

w	35	37	39	41	43
N	105	111	117	123	129
k	210	222	234	246	258
τ_n/mm	29,3	27,7	26,3	25,0	23,9

Festgelegt wird wegen der günstigen Nutteilung $w = 41$. Damit erhält man

$$\begin{aligned}
 N &= wp = 41 \cdot 3 = 123 \\
 k &= Nu = 123 \cdot 2 = 246 \\
 z_a &= 2k = 2 \cdot 246 = 492 \\
 \tau_n &= \frac{\pi D}{N} = \frac{\pi \cdot 980 \text{ mm}}{123} = 25,0 \text{ mm} \\
 u_{\text{st}} &= \frac{2pU}{k} = \frac{600 \text{ V} \cdot 6}{246} = 14,6 \text{ V} < 20 \text{ V} \quad (\text{zulässig}) \\
 \Phi_\delta &= \frac{|E|}{4wnp} \approx \frac{580 \text{ V}}{4 \cdot 41 \cdot 500/\text{min}^{-1} \cdot 3} \cdot 60 \frac{\text{s}}{\text{min}} = 0,141 \text{ Vs} \\
 B_{\text{max}} &= \frac{\Phi_\delta}{\alpha_i \tau_p l_i} = \frac{0,141 \text{ Vs}}{0,75 \cdot 0,513 \text{ m} \cdot 0,45 \text{ m}} = 0,814 \text{ T} .
 \end{aligned}$$

Der endgültige Wert des Strombelags folgt aus dem Zweigstrom

$$I_{\text{zw}} = \frac{I}{2a} \approx \frac{1800 \text{ A}}{6} = 300 \text{ A}$$

zu

$$A = \frac{I_{\text{zw}} z_a}{D\pi} \approx \frac{300 \text{ A} \cdot 492}{0,98 \text{ m} \cdot \pi} = 47,9 \frac{\text{kA}}{\text{m}} . \quad (2.7.1)$$

Aufgrund der günstigen Kommutierung wird eine ungekreuzte, getreppte, unge-sehnte Wickung gewählt. Der erste Teilschritt ergibt sich damit zu

$$y_1 = \frac{k}{2p} = \frac{246}{6} = 41 , \quad (1.3.1)$$

der resultierende Schritt zu

$$y_r = m = 1 , \quad (1.3.4)$$

der zweite Teilschritt zu

$$y_2 = y_1 - y_r = 41 - 1 = 40 \quad (1.3.4)$$

und der Nutenschritt zu

$$y_n = \frac{y_1}{u} = \frac{41}{2} = 20,5 . \quad (1.3.2)$$

Zur Ermittlung der Nutabmessungen wird Tabelle 9.1.4 als Richtwert für die Stromdichte der Ankerwicklung $S \approx 5 \text{ A/mm}^2$ entnommen, was nach (9.1.28) auf

einen zulässigen Wert für die elektrische Beanspruchung

$$AS = 47,9 \frac{\text{A}}{\text{mm}} \cdot 5 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2} = 240 \frac{\text{A}}{\text{mm}} \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$$

führt. Aus dem Richtwert der Stromdichte folgt als erster Schätzwert für den Leiterquerschnitt

$$A_L = \frac{I_{zw}}{S} = \frac{300 \text{ A}}{5 \text{ A/mm}^2} = 60 \text{ mm}^2 .$$

Aus Tabelle 9.1.6 lässt sich als Richtwert für den Nutfüllfaktor einer Niederspannungs-Stabwicklung $\varphi_n \approx 0,4$ entnehmen, was auf den Nutquerschnitt

$$A_n = \frac{z_n A_L}{\varphi_n} = \frac{4 \cdot 60 \text{ mm}^2}{0,4} = 600 \text{ mm}^2 \quad (9.1.37)$$

führt. Mit einem ersten Schätzwert für die Nuthöhe

$$h_n = 60 \text{ mm} \frac{D}{D + 300 \text{ mm}} = 60 \text{ mm} \cdot \frac{980 \text{ mm}}{(980 + 300) \text{ mm}} = 46 \text{ mm} \quad (9.1.38)$$

erhält man den ersten Schätzwert für die Nutbreite

$$b_n = \frac{A_n}{h_n} = \frac{600 \text{ mm}^2}{46 \text{ mm}} = 13 \text{ mm} .$$

Die Kontrolle der maximalen Zahninduktion ergibt als Zahnbreite am Nutgrund

$$b_{zmin} = \frac{(D - 2h_n)\pi}{N} - b_n = \frac{(980 - 2 \cdot 46) \text{ mm} \cdot \pi}{123} - 13 \text{ mm} = 9,7 \text{ mm}$$

und damit bei Verwendung eines 0,5 mm dicken, lackisolierten, schlussgeglühten Elektrolechs mit dem Eisenfüllfaktor $\varphi_{Fe} = 0,94$

$$B_{zmax} = \frac{B_{max} \tau_n l_i}{b_{zmin} \varphi_{Fe} l_{Fe}} = \frac{0,814 \text{ T} \cdot 25 \text{ mm} \cdot 450 \text{ mm}}{9,7 \text{ mm} \cdot 0,94 \cdot 410 \text{ mm}} \approx 2,45 \text{ T} . \quad (2.4.3)$$

Dieser Wert ist nach Tabelle 9.1.5 gerade noch zulässig. Daher wird der Leiterquerschnitt so gewählt, dass sich eine etwas geringere Nutbreite ergibt. Zur Unterdrückung zusätzlicher Verluste durch Stromverdrängung während der Stromwendung erfolgt die Unterteilung in zwei übereinander liegende Teileiter. Mit Leiterabmessungen von $2 \times 8 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ erhält man aus einer Nutraumbilanz (s. Bild 1.1) als endgültige Nutmaße $h_n = 48 \text{ mm}$ und $b_n = 12 \text{ mm}$. Unter Berücksichtigung der abgerundeten Teileiterecken beträgt der endgültige Leiterquerschnitt dann $A_L = 62,2 \text{ mm}^2$, und die endgültige Stromdichte ist

$$S = \frac{I_{zw}}{A_L} = \frac{300 \text{ A}}{62,2 \text{ mm}^2} = 4,8 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2} .$$

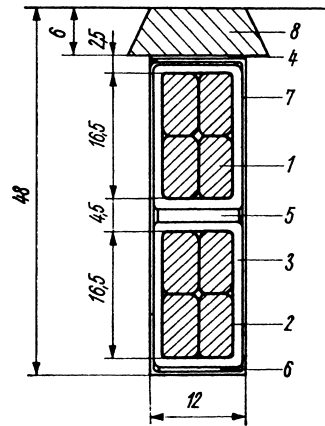


Bild 1.1 Nutquerschnitt

Gemäß Abschnitt 1.3.1.5 müssen Ausgleichsverbindungen erster Art mit einem Schritt von

$$y_{a1} = \frac{k}{p} = \frac{246}{3} = 82 \quad (1.3.20)$$

vorgesehen werden, wobei jeder Steg angeschlossen wird.

1.1.3

Entwurf der Kompensationswicklung

Der gesamte Ankerstrom von $I = 1800 \text{ A}$ würde einen zu großen Leiterquerschnitt der Kompensationswicklung von

$$A_{Lk} = \frac{I}{S_k} = \frac{1800 \text{ A}}{4 \text{ A/mm}^2} = 450 \text{ mm}^2$$

erfordern. Die Kompensationswicklung wird daher in zwei parallele Gruppen mit einem Strom von jeweils $I_k = I_a/2 = 900 \text{ A}$ unterteilt. Ein erster Schätzwert für die Leiterzahl der Kompensationswicklung je Pol ergibt sich dann zu

$$z_k = \frac{\alpha_i \tau_p A}{I_k} = \frac{0,75 \cdot 513 \text{ mm} \cdot 47,9 \text{ A/mm}}{900 \text{ A}} = 20,5. \quad (1.4.11)$$

Da die Leiterzahl je Pol gerade sein sollte, wird endgültig $z_k = 18$ gewählt. Bei Leiterabmessungen von $40 \text{ mm} \times 5,5 \text{ mm}$ ergibt sich als Leiterquerschnitt $A_{Lk} = 219 \text{ mm}^2$ und damit als Stromdichte

$$S_k = \frac{900 \text{ A}}{219 \text{ mm}^2} = 4,1 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}.$$

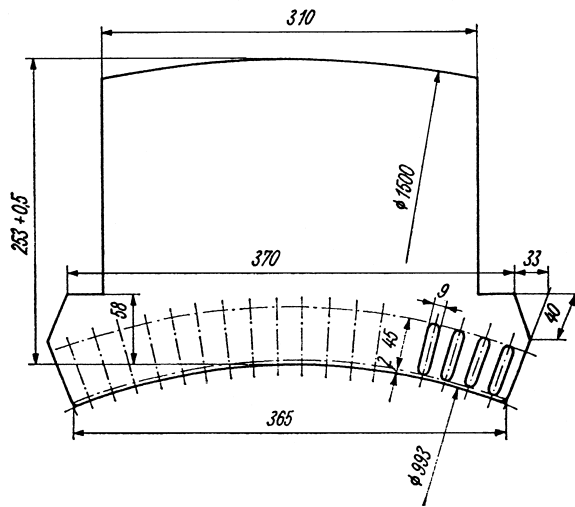


Bild 1.2 Hauptpolblech

Unter Berücksichtigung einer 1,5 mm dicken Isolation erhält man als Nuthöhe $h_{nk} = 45$ mm und als Nutbreite $b_{nk} = 9$ mm (s. Bild 1.2). Aus dem Polbogen

$$b_p \approx \alpha \frac{(D + 2\delta)\pi}{6} = 0,70 \cdot \frac{(980 + 12) \text{ mm} \cdot \pi}{6} = 364 \text{ mm}$$

erhält man schließlich die Kompensationsnutteilung

$$\tau_{nk} = \frac{364 \text{ mm}}{18} = 20,2 \text{ mm} \approx 20 \text{ mm} .$$

1.1.4

Entwurf des Kommutators

Aus dem bereits gewählten Kommutatordurchmesser $D_k = 650$ mm erhält man

$$\tau_k = \frac{D_k \pi}{k} = \frac{650 \text{ mm} \cdot \pi}{246} = 8,3 \text{ mm}$$

$$v_{k,\max} = D_k \pi n_{\max} = 0,65 \text{ m} \cdot \pi \cdot 1000 \text{ min}^{-1} \cdot 60 \frac{\text{s}}{\text{min}} = 34 \frac{\text{m}}{\text{s}} .$$

Nach (9.2.2) ist damit noch eine Schwalbenschwanzkonstruktion zulässig. Gewählt werden Elektrographitbürsten und eine Dicke der Stegisolierung von 0,8 mm. Aus dem Bürstenstrom

$$I_B = \frac{I}{p} = \frac{1800 \text{ A}}{3} = 600 \text{ A} \quad (9.2.3)$$

und der Tabelle 4.4.1 entnommenen maximalen Bürstenstromdichte folgt der Mindestwert für den Bürstenquerschnitt

$$A_{B,\min} = \frac{I_B}{S_{B,\max}} = \frac{600 \text{ A}}{12 \text{ A/cm}^2} = 50 \text{ cm}^2.$$

Gewählt werden mit Rücksicht auf die geforderte 1,6fache Stromüberlastbarkeit sieben Doppelbürsten mit je 2 mm Abstand und den Abmessungen $(16 + 2 + 16) \text{ mm} \times 32 \text{ mm}$ je Bolzen. Damit ergeben sich die Kennwerte

$$A_B = 7 \cdot (16 + 16) \text{ mm} \cdot 32 \text{ mm} = 7160 \text{ mm}^2 = 71,6 \text{ cm}^2$$

$$S_B = \frac{I_B}{A_B} = \frac{600 \text{ A}}{71,6 \text{ cm}^2} = 8,4 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}.$$

Die Bürstenstromdichte bei Bemessungsstrom ist relativ klein; bei 1,6fachem Bemessungsstrom steigt sie auf $S_{B,\max} = 13,4 \text{ A/cm}^2$. Die relative Bürstenbreite

$$\beta_B = \frac{b_B}{\tau_k} = \frac{(16 + 2 + 16) \text{ mm}}{8,3 \text{ mm}} = 4,1 \quad (4.2.7)$$

wird zur Erzielung einer kleinen Ankerreaktanzspannung relativ groß gewählt. Bei einem axialen Abstand zwischen den Bürsten von 8 mm und einer axialen Bürstenstaffelung von 20 mm sowie einem Randzuschlag von $2 \cdot 5 \text{ mm}$ ergibt sich die Schleiflänge des Kommutators zu

$$l_k = 7 \cdot 32 \text{ mm} + 6 \cdot 8 \text{ mm} + 20 \text{ mm} + 2 \cdot 5 \text{ mm} = 302 \text{ mm}.$$

1.1.5

Entwurf des Magnetkreises

Aus den bereits berechneten Werten $\Phi_\delta = 0,141 \text{ Vs}$, $B_{\max} = 0,814 \text{ T}$, $A = 47,9 \text{ kA/m}$ und $\tau_p = 513 \text{ mm}$ wird ein verbesserter Wert der Luftspaltlänge zu

$$\delta \geq \left[(0,22 \dots 0,25) \frac{\tau_p}{\text{m}} \frac{\frac{A}{\text{A/mm}}}{\frac{B_{\max}}{\text{T}}} \right] \text{ mm} \approx \left[(0,22 \dots 0,25) \cdot 0,513 \frac{47,9}{0,814} \right] \text{ mm}$$

$$\approx 6,6 \dots 7,5 \text{ mm} \quad (9.1.33b)$$

berechnet. Gewählt wird endgültig $\delta = 6,5 \text{ mm}$. Aus dem Fluss im Ankerrücken $\Phi_{r\max} = 0,141 \text{ Vs}/2 = 0,0705 \text{ Vs}$ und der Tabelle 9.1.5 entnommenen zulässigen Induktion errechnet sich die Rückenlänge zu

$$h_r \geq \frac{\Phi_{r\max}}{l_{\text{Fe}} \varphi_{\text{Fe}} B_{r\text{zul}}} = \frac{0,0705 \text{ Vs}}{0,41 \text{ m} \cdot 0,94 \cdot (1,0 \dots 1,5) \text{ T}} = (0,183 \dots 0,122) \text{ m}. \quad (9.1.30)$$

Gewählt wird $h_r = 167 \text{ mm}$, so dass sich als Ankerinnendurchmesser

$$D_i = D - 2h_n - 2h_r = 980 \text{ mm} - 2 \cdot 48 \text{ mm} - 2 \cdot 167 \text{ mm} = 550 \text{ mm} \quad (9.2.5)$$

errechnet. Die Pole werden aus lackisoliertem 2-mm-Stahlblech mit dem Eisenfüllfaktor $\varphi_{\text{Fe}} = 0,96$ ausgeführt. Aus dem Fluss im Polkern

$$\Phi_{\text{pk}} \approx (1,1 \dots 1,2) \Phi_\delta = (1,1 \dots 1,2) \cdot 0,141 \text{ Vs} = (0,155 \dots 0,169) \text{ Vs} \quad (2.4.32)$$

und der in Tabelle 9.1.5 angegebenen zulässigen Polkerninduktion folgt die Polkernbreite

$$b_{\text{pk}} \geq \frac{\Phi_{\text{pk}}}{B_{\text{pkzul}} \varphi_{\text{Fe}} l_{\text{Fe}}} = \frac{0,169 \text{ Vs}}{(1,2 \dots 1,7) \text{ T} \cdot 0,96 \cdot 0,46 \text{ m}} = (0,319 \dots 0,225) \text{ m} . \quad (9.1.29)$$

Gewählt wird $b_{\text{pk}} = 310 \text{ mm}$. Die Polkernhöhe ergibt sich auf Grundlage der in Tabelle 9.1.7 angegebenen Richtwerte zu

$$h_{\text{pk}} \approx 0,4 \tau_p = 0,4 \cdot 513 \text{ mm} = 205 \text{ mm} .$$

Gewählt wird $h_{\text{pk}} = 195 \text{ mm}$. Den Polblechschnitt zeigt Bild 1.2. Zur Kontrolle der Polhornwurzel wird zunächst der Fluss je Kompensationszahn $\Phi_\delta/18 = 0,141 \text{ Vs}/18 = 0,00783 \text{ Vs}$ ermittelt. Der Fluss durch die Polhornwurzel setzt sich nach Bild 1.2 minimal aus dem Fluss von 2,5 Kompensationszähnen zusammen. Dieser Mindestwert wird durch maximal die Hälfte des Polstreufflusses

$$\Phi_\sigma < \Phi_{\text{pk}} - \Phi_\delta = (0,169 - 0,141) \text{ Vs} = 0,028 \text{ Vs}$$

erhöht. Es ergibt sich

$$\begin{aligned} 2,5 \cdot 0,00783 \text{ Vs} < \Phi_{\text{pw}} < 2,5 \cdot 0,00783 \text{ Vs} + \frac{1}{2} 0,028 \text{ Vs} \\ 0,0196 \text{ Vs} < \Phi_{\text{pw}} < 0,0336 \text{ Vs} \end{aligned}$$

und damit eine Höhe der Polwurzel von

$$\begin{aligned} \frac{0,0196 \text{ Vs}}{2 \text{ T} \cdot 0,96 \cdot 0,46 \text{ m}} < h_{\text{pw}} < \frac{0,0336 \text{ Vs}}{2 \text{ T} \cdot 0,96 \cdot 0,46 \text{ m}} \\ 0,022 \text{ m} < h_{\text{pw}} < 0,038 \text{ m} . \end{aligned}$$

Ausgeführt wird $h_{\text{pw}} = 35 \text{ mm}$. Als Jochmaterial wird ebenfalls lackisoliertes 2-mm-Stahlblech mit dem Eisenfüllfaktor $\varphi_{\text{Fe}} = 0,96$ gewählt. Zwischen Pol und Joch werden 0,5 mm Hartpapier zur Vermeidung von Eisenschlüssen vorgesehen. Als Folge ist der Jochfluss aufgrund des Streufflusses kleiner als der halbe Polfluss. Überschlüssig ergibt sich

$$\begin{aligned} \Phi_j &= \frac{1}{2} \cdot 1,16 \cdot \Phi_\delta = 0,58 \cdot 0,141 \text{ Vs} = 0,0818 \text{ Vs} \\ A_j &= \frac{0,0818 \text{ Vs}}{(1,1 \dots 1,5) \text{ T}} = (74400 \dots 54500) \text{ mm}^2 \\ D_{ij} &= 980 \text{ mm} + 2 \cdot (6,5 + 58 + 195 + 0,5) \text{ mm} = 1500 \text{ mm} . \end{aligned}$$

Das Joch wird axial durch zwei 40 mm dicke Stahlpressringe gehalten, so dass sich die magnetisch wirksame Länge

$$l_j = 470 \text{ mm} \cdot 0,96 + 2 \cdot 40 \text{ mm} = 531 \text{ mm}$$

ergibt. Die Jochhöhe $h_j = A_j/l_j$ sollte also im Bereich

$$\frac{74400 \text{ mm}^2}{531 \text{ mm}} = 140 \text{ mm} > h_j > 103 \text{ mm} = \frac{54500 \text{ mm}^2}{531 \text{ mm}}$$

liegen. Gewählt wird $h_j = 140 \text{ mm}$, was auf den Außendurchmesser des Jochs

$$D_{aj} = 1500 \text{ mm} + 2 \cdot 140 \text{ mm} = 1780 \text{ mm}$$

führt.

1.2

Nachrechnung

1.2.1

Magnetischer Kreis (s. Abschn. 2.6.1)

Der endgültige Wert der ideellen Länge errechnet sich mit

$$\gamma_v = \frac{1}{1 + 5 \frac{\delta}{l_v}} = \frac{1}{1 + 5 \cdot \frac{6,5 \text{ mm}}{10 \text{ mm}}} = 0,23 \quad (2.3.20)$$

zu

$$l_i = l - n_v \gamma_v l_v - \frac{l - l_p}{2} = 470 \text{ mm} - 6 \cdot 0,23 \cdot 10 \text{ mm} - \frac{(470 - 460) \text{ mm}}{2} = 451 \text{ mm} . \quad (2.3.22)$$

Für den Carterschen Faktor ergibt sich (s. Bild 2.3.6)

$$\gamma \approx \frac{1}{1 + 5 \frac{\delta}{b_s}} = \frac{1}{1 + 5 \cdot \frac{6,5 \text{ mm}}{12 \text{ mm}}} = 0,26$$

und damit

$$k_c = \frac{\tau_n}{\tau_n - \gamma b_s} = \frac{25 \text{ mm}}{25 \text{ mm} - 0,26 \cdot 12 \text{ mm}} = 1,14 . \quad (2.3.19)$$

Der magnetische Spannungsabfall im Luftspalt und der Luftspaltfluss werden für einen gegebenen Wert B_{\max} nach (2.3.28) und (2.3.29) berechnet. Für das Zahngebiet gilt entsprechend Abschnitt 2.4.2 (s. Bilder 2.4.1 bis 2.4.4) der Zahnquerschnitt

$$A_z = b_z(s) \varphi_{Fe} l_{Fe} \quad (2.4.1)$$

und damit

– für die Stelle maximaler Induktion

$$\begin{aligned}\tau_n &= \frac{(980 \text{ mm} - 2 \cdot 48 \text{ mm})\pi}{123} = 22,6 \text{ mm} \\ b_z &= 22,6 \text{ mm} - 12 \text{ mm} = 10,6 \text{ mm} \\ A_z &= 10,6 \text{ mm} \cdot 0,94 \cdot 410 \text{ mm} = 4090 \text{ mm}^2 \\ A_{\text{luft}} &= 22,6 \text{ mm} \cdot 470 \text{ mm} - 4090 \text{ mm}^2 = 6530 \text{ mm}^2 \\ \frac{A_{\text{luft}}}{A_z} &= \frac{6530 \text{ mm}^2}{4090 \text{ mm}^2} \approx 1,60 ,\end{aligned}$$

– für die Stelle mittlerer Induktion

$$\begin{aligned}\tau_n &= 23,8 \text{ mm} \\ b_z &= 11,8 \text{ mm} \\ A_z &= 4550 \text{ mm}^2 \\ \frac{A_{\text{luft}}}{A_z} &= 1,46 ,\end{aligned}$$

– für die Stelle minimaler Induktion

$$\begin{aligned}\tau_n &= 25 \text{ mm} \\ b_z &= 13 \text{ mm} \\ A_z &= 5010 \text{ mm}^2 \\ \frac{A_{\text{luft}}}{A_z} &= 1,35 .\end{aligned}$$

Daraus werden die Zahninduktion nach (2.4.9) und Bild 2.4.3 sowie der Zahnspannungsabfall nach (2.4.5b) ermittelt. Die Werte des Rückengebiets ergeben sich aus (2.4.11) und Bild 2.4.5 zu

$$\begin{aligned}A_r &= h_r \varphi_{\text{Fe}} l_{\text{Fe}} = 167 \text{ mm} \cdot 0,94 \cdot 410 \text{ mm} = 64400 \text{ mm}^2 \\ \tau_r &= (D - 2h_n) \frac{\pi}{2p} = (980 \text{ mm} - 2 \cdot 48 \text{ mm}) \cdot \frac{\pi}{6} = 463 \text{ mm} .\end{aligned}$$

Mit dem Verhältnis $h_r/\tau_r = 167/463 = 0,361$ entnimmt man Bild 2.4.12 den Wert $C_r = 0,8$. Damit folgt für den reduzierten Integrationsweg

$$s_{\text{red}} = C_r \frac{\tau_r}{2} = 0,8 \cdot \frac{463 \text{ mm}}{2} = 185 \text{ mm} . \quad (2.4.29)$$

Die Rückeninduktion folgt aus (2.4.15b) und der Rückenspannungsabfall schließlich aus (2.4.28b). Zur Berechnung des magnetischen Spannungsabfalls der Kompensationszähne nach (2.4.5c) wird zunächst der Kompensationszahnquerschnitt

im Polschuh bei $1/3$ der Zahnhöhe

$$\begin{aligned}\tau_n(h_n/3) &= 20 \text{ mm} \cdot \frac{(980 + 2 \cdot 6,5 + 2 \cdot 2 + 2 \cdot 45/3) \text{ mm}}{993 \text{ mm}} = 20,7 \text{ mm} \\ b_z(h_n/3) &= 20,7 \text{ mm} - 9 \text{ mm} = 11,7 \text{ mm} \\ A_z(h_n/3) &= 11,7 \text{ mm} \cdot 0,96 \cdot 460 \text{ mm} = 51700 \text{ mm}^2\end{aligned}$$

benötigt. Damit folgt die Zahninduktion aus (2.4.3) und der Zahnspannungsabfall aus (2.4.5c). Für den Polkern ergibt sich

$$\begin{aligned}A_p &= 310 \text{ mm} \cdot 0,96 \cdot 460 \text{ mm} = 137000 \text{ mm}^2 \\ s_p &= h_p = 195 \text{ mm} \\ \Phi_p &= 1,2 \cdot \Phi_\delta ,\end{aligned}$$

für die Hartpapierzwischenlage am Polkern gilt

$$V = \frac{0,96 B_p \cdot 0,5 \text{ mm}}{\mu_0}$$

und für das Joch schließlich

$$\begin{aligned}A_j &= 74500 \text{ mm}^2 \\ \Phi_j &= 0,58 \cdot \Phi_\delta \\ s_j &= \frac{(1500 \text{ mm} + 140 \text{ mm})\pi}{2 \cdot 2 \cdot 3} \approx 430 \text{ mm} .\end{aligned}$$

Die induzierte Spannung folgt mit (1.3.30). Die auf diese Weise ermittelten Werte sind in Tabelle 1.1 wiedergegeben. Die Leerlaufkennlinie ist im Bild 1.3 dargestellt.

1.2.2

Stromwendung und Wendepolkreis (s. Abschn. 4.3)

Zur die Berechnung der relativen magnetischen Leitwerte sind entsprechend (3.7.2), (3.7.3), Bild 3.7.2 und Tabelle 3.7.1 die Abmessungen $h_L = 33 \text{ mm}$, $d = 4,5 \text{ mm}$, $h_{\ddot{u}} = 2,5 \text{ mm}$, $h_k = 6 \text{ mm}$, $b_n = b_{\ddot{u}} = 12 \text{ mm}$, $b_k = 15 \text{ mm}$ und $b_s = 12 \text{ mm}$ maßgebend. Der Wendepolluftspalt wird entsprechend Abschnitt 4.3.3 zu $\delta_w = 18 \text{ mm}$ gewählt. Die Länge eines Ankerleiters ist

$$l_s = (0,47 + 1,3 \cdot 0,513 + 0,03 + 0,02 \cdot 0,6) \text{ m} = 1,18 \text{ m} . \quad (9.1.39)$$

Daraus ergibt sich die Wicklungskopflänge $l_w = l_s - l = 1,18 \text{ m} - 0,47 \text{ m} = 0,71 \text{ m}$ sowie das Verhältnis

$$\frac{b_s}{\delta_w} = \frac{12}{18} = 0,667$$

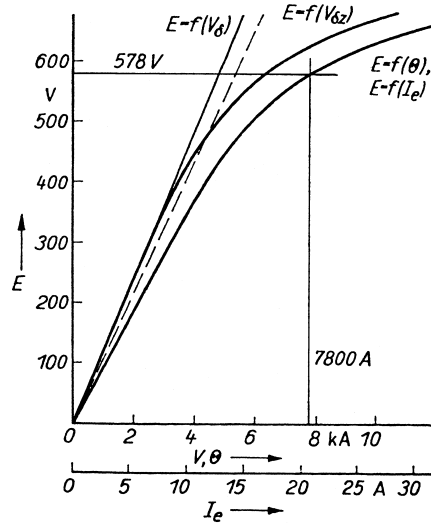


Bild 1.3 Magnetisierungskennlinien und Leerlaufkennlinie

und damit der relative Zahnkopfstreuleitwert im Bereich der Wendepole $\lambda_z = 0,52$.
Aus Abschnitt 3.7.1 folgt für die übrigen Leitwerte

$$\begin{aligned}\lambda_o &= \frac{33}{6 \cdot 12} + \frac{2,5}{12} + \frac{6}{15} + 0,52 = 1,59 \\ \lambda_u &= \frac{33}{6 \cdot 12} + \frac{4,5 + 16,5}{12} + \frac{2,5}{12} + \frac{6}{15} + 0,52 = 3,34 \\ \lambda_g &= \frac{33}{4 \cdot 12} + \frac{2,5}{12} + \frac{6}{15} + 0,52 = 1,82 \\ \lambda_{ws} &= 0,3 \\ \lambda_w &= \lambda_{ws} \frac{l_w}{l_i} = 0,3 \cdot \frac{0,71 \text{ m}}{0,451 \text{ m}} = 0,47.\end{aligned}$$

Zur Ermittlung der mittleren Ankerreaktanzspannung errechnet sich der Pichel-mayersche Kommutierungsfaktor ζ nach Abschnitt 4.3.2 mit

$$\begin{aligned}\beta_k &= \frac{b_k}{\tau_k} = \frac{34}{8,3} = 4,1 \\ u &= 2 \\ \beta_v &= 0 \\ c_m &= 1,75\end{aligned}$$

entsprechend (4.2.6), (4.3.11), (4.3.12) und Bild 4.3.3 zu

$$\zeta = 1,256 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \left[\frac{1,75}{2 \cdot 4,1} (1,59 + 3,34 + 2 \cdot 1,82) + 0,47 \right] = 2,89 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}.$$

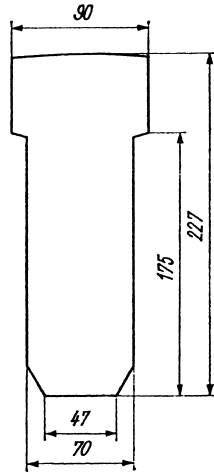


Bild 1.4 Wendepolblech

Damit erhält man

$$e_{\text{rm}} = 2 \cdot 47,9 \frac{\text{kA}}{\text{m}} \cdot 451 \text{ mm} \cdot 27,5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 2,89 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} = 3,2 \text{ V} .$$

Für die mittlere Ankerreaktanzspannung im Fall maximaler Drehzahl und Stromüberlastung folgt analog dazu

$$e_{\text{rm,max}} = 2 \cdot 1,6 \cdot 3,2 \text{ V} = 10,3 \text{ V} .$$

Dieser Wert ist zulässig.

Der Spannungsabfall im Wendepolluftspalt errechnet sich nach (4.3.19) sowie mit den Bildern 4.3.5 und 4.3.6 entsprechend Abschnitt 4.3.3. Aus der Wendezonenbreite

$$b_{\text{wz}} = \frac{1}{2} \cdot (4,1 + 2 - 1) \cdot 25 \text{ mm} \approx 64 \text{ mm} \quad (4.3.18)$$

folgt der erste Schätzwert für die Wendepolbreite

$$b_{\text{w}} \geq \frac{2}{3} \cdot 64 \text{ mm} \approx 43 \text{ mm} .$$

Gewählt wird $b_{\text{w}} = 47 \text{ mm}$. Somit ist $b_{\text{wz}}/b_{\text{w}} = 64/47 = 1,36$ und $\delta_{\text{w}}/b_{\text{w}} = 18/47 = 0,38$. Aus Bild 4.3.6 entnimmt man damit den Hilfsfaktor $k_{\text{w}} = 1,125$. Der Cartersche Faktor unter dem Wendepol wird mit $b_{\text{s}}/\delta_{\text{w}} = 12/18 = 0,667$ und somit $\gamma_{\text{w}} = 0,1$ zu $k_{\text{cw}} = 1,05$. Damit folgt schließlich für den magnetischen Spannungsabfall im Wendepolluftspalt

$$V_{\text{w}\delta} = 1,125 \cdot \left(1 + \frac{0,5}{3,2}\right) \cdot 47,9 \frac{\text{kA}}{\text{m}} \cdot 2,3 \cdot 1,05 \cdot 18 \text{ mm} = 2700 \text{ A} . \quad (4.3.19)$$

Zur Verkleinerung des Streuflusses wird unter dem aus 2-mm-Stahlblech ausgeführten Wendepolkern (s. Bild 1.4) eine Hartpapierzwischenlage von 8 mm angeordnet. Durch diese Maßnahme beträgt der Wendepolstreufluss kompensierter Maschinen nur noch das 1- bis 1,5fache des Wendepolluftspaltflusses. Der Wendepolluftspaltfluss lässt sich mit (4.3.16) und Bild 4.3.5 zu

$$\Phi_{w\delta} \gtrsim B_{wm} b_{wz} l_i = 1,16 \cdot 47,9 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \cdot 2,89 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot 64 \text{ mm} \cdot 451 \text{ mm} = 0,005 \text{ Vs}$$

abschätzen. Für die Zwischenlage gilt

$$B_{\text{Zwischenlage}} \approx (1 + 1,5) \cdot \frac{0,005 \text{ Vs}}{0,09 \text{ m} \cdot 0,47 \text{ m}} = 0,3 \text{ T}$$

$$V_{\text{Zwischenlage}} \approx \frac{0,3 \text{ T} \cdot 8 \text{ mm}}{1,256 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}} \approx 2000 \text{ A}$$

und damit für den gesamten magnetischen Spannungsabfall des Wendepols

$$V_w \approx 2700 \text{ A} + 2000 \text{ A} = 4700 \text{ A} .$$

Die Wendepoldurchflutung errechnet sich aus (4.3.21), (4.3.22) und (4.3.23) zu

$$\Theta_{\text{am}} = 47,9 \frac{\text{kA}}{\text{m}} \cdot \left(\frac{513}{2} - \frac{64}{3} \right) \text{ mm} = 11300 \text{ A}$$

$$\Theta_k = \frac{1}{2} I_k z_k = \frac{1}{2} \cdot 900 \text{ A} \cdot 18 = 8100 \text{ A}$$

$$\Theta_w = 11300 \text{ A} - 8100 \text{ A} + 4700 \text{ A} = 7900 \text{ A} .$$

Die Wendepolwicklung wird in zwei parallelen Zweigen ausgeführt. Damit ist $I_w = 900 \text{ A}$, und die Windungszahl je Pol errechnet sich zu

$$w_w = \frac{\Theta_w}{I_w} = \frac{7900 \text{ A}}{900 \text{ A}} \approx 8,8 .$$

Gewählt wird $w_w = 9$. Die Leiterabmessungen werden mit $20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ unisoliert festgelegt, so dass der Leiterquerschnitt mit Eckenabzug $A_{Lw} = 199 \text{ mm}^2$ beträgt. Die Wendepole werden hochkant bewickelt. Die Überprüfung der Stromdichte führt auf den für einlagige, unisolierte Wicklungen zulässigen Wert

$$S_w = \frac{I_w}{A_{Lw}} = \frac{900 \text{ A}}{199 \text{ mm}^2} = 4,5 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2} .$$

1.2.3

Wicklungswiderstände

Die mittleren Windungslängen der Wicklungen werden aus Konstruktionszeichnungen entnommen, die hier nicht dargestellt sind. Sie lassen sich auch anhand

ermittelter Spulenquerschnitte und der Polabmessungen schätzen (s. Bilder 1.2 u. 1.4).

Die Berechnung der Wicklungswiderstände (s. Abschn. 6.3.2) führt für die Ankerwicklung bei 20°C auf

$$R_a = \frac{z_a l_s}{(2a)^2 \kappa A_L} = \frac{492 \cdot 1,18 \text{ m}}{6^2 \cdot 58 \text{ Sm/mm}^2 \cdot 62,2 \text{ mm}^2} = 4,47 \text{ m}\Omega .$$

Bei 95°C steigt der Widerstand auf $R_a = 5,79 \text{ m}\Omega$.

Die Kompensationswicklung besitzt die gesamte Windungszahl $18 \cdot 3 = 54$. Mit der mittleren Leiterlänge $l_m = 2,62 \text{ m}$ und bei Berücksichtigung der Schaltung in zwei parallelen Zweigen errechnet sich für ihren Widerstand bei 20°C

$$R_k = \frac{54 \cdot 2,62 \text{ m}}{4 \cdot 58 \text{ Sm/mm}^2 \cdot 219 \text{ mm}^2} = 2,78 \text{ m}\Omega$$

und bei 95°C $R_k = 3,60 \text{ m}\Omega$.

Die gesamte Windungszahl der Wendepolwicklung ist $9 \cdot 6 = 54$. Unter Berücksichtigung der Schaltung in zwei parallelen Zweigen und mit der mittleren Windungslänge $l_m = 1,25 \text{ m}$ errechnet sich ihr Widerstand bei 20°C zu

$$R_w = \frac{54 \cdot 1,25 \text{ m}}{4 \cdot 58 \text{ Sm/mm}^2 \cdot 199 \text{ mm}^2} = 1,46 \text{ m}\Omega$$

und bei 95°C zu $R_w = 1,89 \text{ m}\Omega$. Der gesamte Spannungsabfall im Ankerkreis summiert sich bei 95°C bei einem Bürstenspannungsabfall von 1 V auf

$$\Delta U = 1800 \text{ A} \cdot (5,79 + 3,60 + 1,89) \text{ m}\Omega + 2 \cdot 1 \text{ V} = 22,3 \text{ V} .$$

Damit errechnet sich die induzierte Spannung endgültig zu

$$E = U - \Delta U = 600 \text{ V} - 22,3 \text{ V} = 578 \text{ V} ,$$

und als zugehörige Erregerdurchflutung entnimmt man der Leerlaufkennlinie $\Theta_e = 7800 \text{ A}$. Die Ankerrückwirkung wird durch die Kompensationswicklung verhindert. Zur sicheren Einstellung der Grunddrehzahl soll die Spannung der Erregermaschine im Bemessungsbetrieb 200 V betragen. Damit ergibt sich der Leiterquerschnitt für die Erregerwicklung nach Abschnitt 1.4.1.1 mit Reihenschaltung aller Polspulen bei $l_{me} = 1,8 \text{ m}$ und 95°C

$$A_{Le} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 7800 \text{ A} \cdot 1,8 \text{ m}}{44,8 \text{ Sm/mm}^2 \cdot 200 \text{ V}} = 9,4 \text{ mm}^2 .$$

Gewählt wird ein mit Lackglasseide isolierter Draht mit den Abmessungen $6 \text{ mm} \times 1,6 \text{ mm}$, der mit Eckenabzug den Querschnitt $A_{Le} = 9,29 \text{ mm}^2$ besitzt. Für die Windungszahl je Pol gilt

$$w_p = \frac{7800 \text{ A}}{9,29 \text{ mm}^2 (1,5 \dots 5,5) \text{ A/mm}^2} = 560 \dots 150 .$$

Ausgeführt wird $w_p = 375$, aufgeteilt in drei Teilsulen mit je 125 Windungen. Damit errechnen sich Strom und Kaltwiderstand der Erregerwicklung zu

$$I_e = \frac{7800 \text{ A}}{375} = 20,8 \text{ A}$$

$$R_e = \frac{2 \cdot 3 \cdot 375 \cdot 1,8 \text{ m}}{58 \text{ Sm/mm}^2 \cdot 9,29 \text{ mm}^2} = 7,52 \Omega .$$

Bei 95°C erhöht sich der Widerstand auf $R_e = 9,73 \Omega$, und für die Erregerspannung gilt $U_e = 20,8 \text{ A} \cdot 9,73 \Omega = 202 \text{ V}$.

1.2.4

Verluste und Wirkungsgrad bei 95°C (s. Kap. 6)

Die Verluste in den Stromkreisen setzen sich aus den folgenden Einzelverlusten zusammen:

- Wicklungsverluste der Ankerwicklung

$$P_{vwa} = (1800 \text{ A})^2 \cdot 0,00579 \Omega = 18,8 \text{ kW} \approx 19 \text{ kW} ,$$

- Wicklungsverluste der Kompensationswicklung und der Wendepolwicklung

$$P_{vwk} = (1800 \text{ A})^2 \cdot 0,00549 \Omega = 17,8 \text{ kW} \approx 18 \text{ kW} ,$$

- Wicklungsverluste der Erregerwicklung

$$P_{vwe} = 20,8 \text{ A} \cdot 202 \text{ V} = 4,2 \text{ kW} \approx 4,5 \text{ kW} ,$$

- Bürstenübergangsverluste bei einer Bürstenstromdichte von $8,4 \text{ A/cm}^2$ und damit einer Bürstenspannung von etwa $1,2 \text{ V}$ (s. Bild 4.4.2)

$$P_{v\ddot{u}} = 2 \cdot 1,2 \text{ V} \cdot 1800 \text{ A} = 4,3 \text{ kW} \approx 4,5 \text{ kW} .$$

Zur Ermittlung der Ummagnetisierungsverluste bei 500/min müssen die spezifischen Verluste mit der Ummagnetisierungsfrequenz umgerechnet werden. Mit $f_a = 25 \text{ Hz}$, einer nach Abschnitt 6.4.1.3 geschätzten Aufteilung auf Wirbelstrom- und Hysteresanteil $\sigma_{\text{hyst}1,5} = 5,3 \text{ W/kg}$ und $\sigma_{\text{wb}1,5} = 2,7 \text{ W/kg}$ und Zuschlagfaktoren entsprechend Tabelle 6.4.2 folgt für die einzelnen Teile des magnetischen Kreises:

- Ummagnetisierungsverluste der Ankerzähne

$$m_{\text{Fe}} = [(98 + 88,4) \text{ cm} \cdot \frac{\pi}{2} - 123 \cdot 1,2 \text{ cm}] \cdot 4,8 \text{ cm} - 0,94 \cdot 41 \text{ cm} \cdot 7,85 \frac{\text{g}}{\text{cm}^2} \\ = 211 \text{ kg}$$

$$B_{\text{zm}} = 1,97 \text{ T} \quad (\text{tatsächliche mittlere Zahninduktion})$$

$$k_{\text{u}} = 2,5$$

$$P_{\text{vuz}} = 2,5 \cdot \left[5,3 \frac{\text{W}}{\text{kg}} \cdot \left(\frac{25 \text{ Hz}}{50 \text{ Hz}} \right) + 2,7 \frac{\text{W}}{\text{kg}} \cdot \left(\frac{25 \text{ Hz}}{50 \text{ Hz}} \right)^2 \right] \left(\frac{1,97 \text{ T}}{1,5 \text{ T}} \right)^2 \cdot 211 \text{ kg} \\ \approx 3,0 \text{ kW} ,$$

- Ummagnetisierungsverluste im Ankerrücken

$$m_{\text{Fe}} = (88,4 + 55) \text{ cm} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot 16,7 \text{ cm} \cdot 0,94 \cdot 41 \text{ cm} \cdot 7,85 \frac{\text{g}}{\text{cm}^2} = 1140 \text{ kg}$$

$$B_{\text{r}} = 1,1 \text{ T}$$

$$k_{\text{u}} = 2,0$$

$$P_{\text{vur}} = 2,0 \cdot \left[5,3 \frac{\text{W}}{\text{kg}} \cdot \left(\frac{25 \text{ Hz}}{50 \text{ Hz}} \right) + 2,7 \frac{\text{W}}{\text{kg}} \cdot \left(\frac{25 \text{ Hz}}{50 \text{ Hz}} \right)^2 \right] \left(\frac{1,1 \text{ T}}{1,5 \text{ T}} \right)^2 \cdot 1140 \text{ kg} \\ \approx 4,0 \text{ kW} .$$

Für die Reibungsverluste folgt nach (6.2.1), (6.2.6) und Tabelle 6.2.1:

- Gasreibungsverluste

$$P_{\text{vrbG}} = (8 \dots 10) \frac{\text{Ws}^2}{\text{m}^4} \cdot 0,98 \text{ m} \cdot (0,47 + 0,8^3 \cdot 0,6 \cdot 0,513) \text{ m} \cdot (25,7 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 \approx 4,5 \text{ kW} ,$$

- Bürstenreibungsverluste

$$P_{\text{vrbB}} = 0,1 \frac{\text{Ws}}{\text{Am}} \cdot 1800 \text{ A} \cdot 17 \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 3 \text{ kW} .$$

Die zusätzlichen Verluste werden hier pauschal mit 0,5% der aufgenommenen Leistung veranschlagt und ergeben so

$$P_{\text{vz}} \approx 0,005 \cdot 1070 \text{ kW} \approx 5,5 \text{ kW} .$$

Damit summieren sich die Gesamtverluste auf $\sum P_{\text{v}} \approx 65 \text{ kW}$, und der Wirkungsgrad errechnet sich zu

$$\eta = \frac{1000 \text{ kW}}{1000 \text{ kW} + 65 \text{ kW}} = 0,94 = 94\% .$$

Tabelle 1.1 Tabelle zur Berechnung des magnetischen Kreises einer Gleichstrommaschine

	$\frac{B_{max}}{\pi}$ $\frac{\phi_{\delta}}{V_{\delta}}$ $\frac{F}{V}$	0,300 0,052 213	0,500 0,087 356	0,700 0,121 498	0,800 0,139 569	0,900 0,156 640
Abschnitt	A $\frac{A_{Luft}}{A_g}$ s mm	B T H kA m V A	B T H kA m V A	B T H kA m V A	B T H kA m V A	B T H kA m V A
Luftpalt		0,300 1770	0,50 2950	0,70 4130	0,80 4720	0,90 5310
Zähne	max mit min Mittelwert	40,9 1,60 45,5 1,46 50,1 1,35 48	0,827 0,32 0,743 0,26 0,675 0,22 12	1,38 1,45 1,24 0,90 1,13 0,65 46	1,93 19,0 1,73 9,5 4,5 10,3 494	2,21 56 1,98 23 12 1,80 26,7 1282
$V_{\delta z} = V_{\delta} + V_z$		1782	2996	4624	6002	8468
Rücken	644 185	0,404 0,12 22	0,675 0,22 41	0,939 0,43 80	1,08 0,58 107	1,21 0,82 152
Poischutzähne	51,7 45	0,523 0,52 23	0,872 0,82 37	1,22 1,60 72	1,40 2,60 117	1,57 4,3 194
Polken	1370 195	0,455 0,47 92	0,762 0,70 137	1,06 1,14 222	1,22 1,6 312	1,37 2,4 468
Zwischenlage	1430 0,5	0,437 174	0,732 291	1,02 406	1,17 466	1,31 521
Joch	745 430	0,405 0,44 189	0,677 0,63 271	0,942 0,93 400	1,08 1,2 516	1,21 1,06 688
$\Theta = \Sigma V$		2282	3773	5804	7520	10491
e/A		6,1	10,0	15,5	20,1	28,0