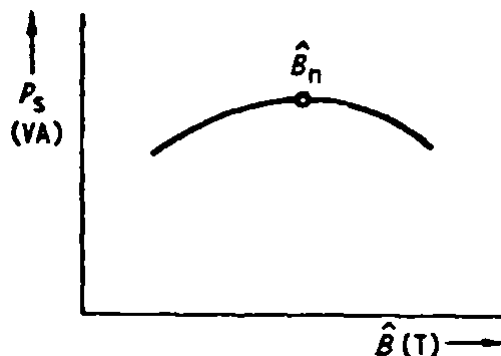


Dimensionierung von Netztransformatoren

Die elektrischen und magnetischen Daten der genormten Typenkerne sind in DIN 41 300 festgelegt. Das Festlegen der Typendaten erfolgte nach einer neuen Betrachtungsweise der Transformatorenberechnung: für eine bestimmte Übertemperatur wurde eine Maximalleistung ermittelt. Die Daten sind in DIN 41 300 festgelegt. Die Übertemperatur beträgt $\vartheta_{ii}=75^{\circ}\text{C}$, die Umgebungstemperatur $\vartheta_{k}=40^{\circ}\text{C}$, die Betriebsfrequenz $f=50\text{ Hz}$. Die Daten gelten für ungetränkte Wicklungen und für reine Widerstandslast im betriebswarmen Zustand.

1 Optimale Induktion

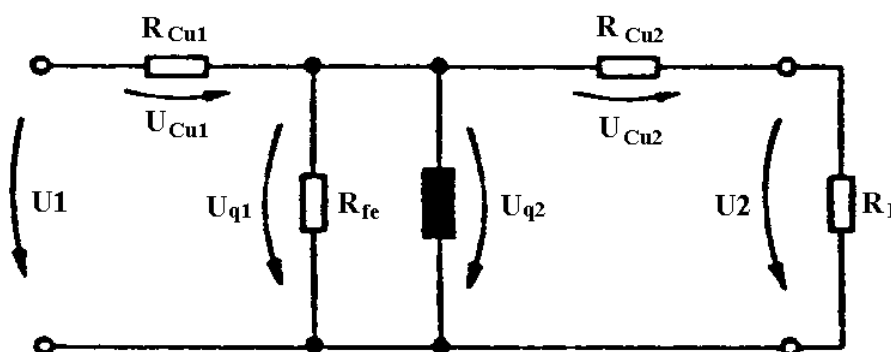


Die Energieübertragung erfolgt im Transformator über das Magnetfeld. $E = \frac{B \cdot H}{2}$ ist die je Volumseinheit

gespeicherte Energie. Daher benötigt man für eine bestimmte Trafonennleistung (Energie/Zeit) bei einer bestimmten Kerngröße (Kernvolumen) eine bestimmte Mindestinduktion (Flußdichte). Eine große Flußdichte bewirkt aber auch große Eisenverluste und damit Erwärmung, welche die mit einem bestimmten Kern übertragbare Leistung begrenzt. Für jeden Kern läßt sich daher zu einer bestimmten Übertemperatur eine optimale Induktion bestimmen, bei der die übertragbare Scheinleistung maximal wird.

In Spalte 3 der Tabelle ist dieser Wert für einige SBK-Transformatoren angegeben. Damit ist die wichtigste Festlegung für die Größe des Netztransformators getroffen.

2 Vereinfachtes Ersatzschaltbild



Für die Bestimmung der Spannungen auf der Primär- und Sekundärseite muß das in Bild 2 dargestellte vereinfachte Ersatzschaltbild des Transformators betrachtet werden. Die an der Primärseite liegende Spannung U_1 wird durch den primären Wirk-Wicklungswiderstand R_{cu} um die Spannung U_{cu1} vermindert. Für die Induktionsspannung U_1 gilt deswegen

$$U_1 = U'_1 - U_{cu1}$$

Die am Lastwiderstand R_L entstehende Sekundärspannung U_2 ist um den Spannungsabfall U_{cu2} gegenüber der Induktionsspannung U_1 vermindert. Der Spannungsabfall entsteht am Wirk-Wicklungswiderstand der Sekundärwicklung.

$$U_2 = U''_1 - U_{cu2}$$

3 Ermittlung der Windungszahlen

Durch die Spannungsabfälle auf der Primär- und Sekundärseite muß das rechnerische Übersetzungsverhältnis \bar{u} verändert werden, um bei Vollast und bei betriebswarmen Transformator die gewünschte Sekundärspannung zu erhalten. Dies geschieht mit dem oben hergeleiteten Spannungsfaktor Δu . Er gibt an, um welchen Faktor die Windungszahlen der Sekundärseite vergrößert werden müssen, um den Wirkanteil der Spannungsabfälle der Wicklungen auszugleichen. In Spalte 7 der Tabelle ist der Faktor bei kleinen Transformatoren nicht zu vernachlässigen.

Bei größeren Transformatoren, ab etwa 1500VA, unterscheiden sich Primär- und Sekundärwindungszahlen nur noch um etwa 3% und weniger. In diesem Bereich nähert sich das rechnerische Übersetzungsverhältnis dem Praktischen. Die Betrachtung soll deswegen dem schwierigen Rechengang der kleineren Netztransformatoren gelten. Alle Angaben, die die Windungszahlen betreffen, sind als Windungszahlen pro Volt, der spezifischen Windungszahl, angegeben.

$$n_{1,2} = \frac{N_{1,2}}{U_{1,2}} \quad \text{in} \quad \frac{\text{Wdg.}}{\text{V}}$$

Für jeden Transformatortyp können drei analoge Kenndaten für die Dimensionierung der Wicklungen festgelegt werden:

3.1 Die spezifische Windungszahl aus dem Induktionsgesetz

Aus den Abmessungen des Kernes und dem verwendeten Kernmaterial ergibt sich aus der bekannten Transformatorformel die spezifische Windungszahl für die Induktionsspannung

$$n_1 = \frac{N_1}{U_{\text{eff}}} = \frac{10^4}{4,44 \cdot f \cdot \hat{B} \cdot A_{FE}} \quad \text{für } f = 50\text{Hz} \quad n_{q1} = \frac{45}{\hat{B} \cdot A_{FE}}$$

(f in Hz, B in T, A_{FE} in cm^2)

In Spalte 4 der Tabelle ist dieser Wert für einige SBK-Transformatoren ausgerechnet.

3.2 Spezifische Windungszahl für die Sekundärwicklung

Der dort berechnete Wert ist Ausgangspunkt für die Ermittlung der spezifischen Windungszahl für die Sekundärwicklung n_2 . Sie ist gegenüber n_{q1} um den Spannungsabfall der Sekundärwicklung größer.

Es gilt:

$$U_{cu_1} = U_{cu_2} = U_{cu}$$

$$\Delta s = \frac{U_{cu}}{U_1}$$

$$n_2 = n_1 \cdot (1 + \Delta s) \quad \text{oder} \quad \frac{U_1}{U_2} \approx 1 + \Delta s, \quad \text{wenn } U_1 \approx U_2.$$

Dieser Wert ist für einige SBK-Typen in Spalte 6 der Tabelle ausgerechnet.

Auch der sekundäre Spannungsabfall $1 + \Delta s = 1 + \frac{U_{cu}}{U_1} = \frac{2 \cdot \Delta u}{\Delta u + 1}$ ist in der Tabelle, Spalte 8, ausgerechnet.

Durch Multiplikation der Sekundärspannung mit der spezifischen Windungszahl n_2 kann die Windungszahl der Sekundärwicklung ermittelt werden. $N_2 = n_2 \cdot U_2$

3.3 Spezifische Windungszahl der Primärwicklung

Aus der Gleichung für den Spannungsfaktor ist bereits zu sehen, daß sich die Primärspannung um den Spannungsfaktor Δu von der Sekundärspannung im Leerlauf des Transformators unterscheidet.

$$\Delta u = \frac{U'_1}{U''_2} = \frac{U_1 + U'_{cu}}{U_1 - U''_{cu}} \quad \text{mit} \quad \Delta s = \frac{U_{cu}}{U_1} \quad \Delta u = \frac{1 + \Delta s}{1 - \Delta s} \approx 1 + 2 \cdot \Delta s$$

Wobei Δu der Spannungsfaktor und Δs der relative sekundäre Spannungsabfall ist.

Die Erklärung ergibt sich aus der Potenzreihenentwicklung für $\frac{1 + \Delta s}{1 - \Delta s}$.

$$f_{(\Delta s)} = f_{(0)} + \frac{f'_{(0)}}{1!} \cdot \Delta s + \frac{f''_{(0)}}{2!} \cdot \Delta s^2 + \dots$$

$$\frac{U'_1}{U_1} = \frac{\Delta u \cdot U''_2}{U_1} = \frac{1}{U_1} \cdot \frac{1 + \Delta s}{1 - \Delta s} \cdot \frac{U_1}{1 + \Delta s} = \frac{1}{1 - \Delta s} \approx 1 + \Delta s$$

Die spezifische Windungszahl für die Primärwicklung kann errechnet werden mit $n_1 = \frac{n_2}{\Delta u}$. Die Windungszahl der

Primärwicklung ergibt sich dann zu $N_1 = n_1 \cdot U_1$. Sowohl Δu als auch n_1 sind in Spalte 5 und 7 der Tabelle angegeben, für Netztransformatoren bis etwa 1500VA.

Die Faktoren Δs und Δu berücksichtigen den Spannungsabfall bei betriebswarmer Wicklung, sodaß eine Berichtigung der Windungszahlen nach der ersten Erprobung im allgemeinen nicht erforderlich ist.

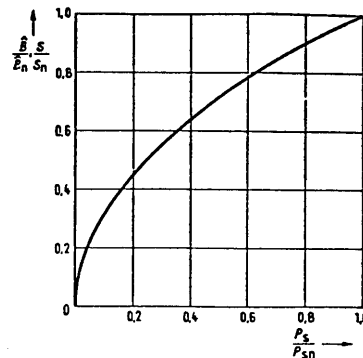
Mit dem Übersetzungsverhältnis $\ddot{u}_{sp} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{U_{q1} + U_{cu1}}{U_{q2} - U_{cu2}}$ ist $U'_2 = \frac{\ddot{u}_{sp} \cdot U_2}{\Delta u}$

Ohne Verluste: $n_1 = \frac{N_1}{U_1}$ mit $\frac{U_1}{U_2} = \ddot{u}_{sp} = \frac{N_1}{N_2}$ ergibt sich $n_1 = \frac{N_1}{U_1} = \frac{N_2}{U_2} = n_2$

Mit Verlusten: $U_2 = \frac{N_2}{N_1} \cdot U_1 = \frac{N_2}{N_1} \cdot (U_1 - U_{cu})$

$$\frac{N_2}{U_2} = \frac{N_1}{U_1 - U''_{cu}} = \frac{N_1}{U_1} \cdot \frac{1}{1 - \frac{U''_{cu}}{U_1}} \approx \frac{N_1}{U_1} \cdot \left(1 + \frac{U''_{cu}}{U_1} \right) = \frac{N_1}{U_1} \cdot (1 + \Delta s)$$

4 Scheinleistung



Veränderung der übertragbaren Scheinleistung in Abhängigkeit von der Induktion

Die in Spalte 2 der Tabelle angegebene Scheinleistung wurde berechnet nach der Formel:

$$P_s = 10^{-4} \cdot k \cdot \hat{B} \cdot \sqrt{P_{cuw}} \cdot \left(\frac{1 - \Delta s}{\Delta i + 1} \right) \text{ in VA}$$

mit $k = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot A_{FE} \cdot \sqrt{\frac{A_{cu}}{2 \cdot l_w \cdot \rho_w}}$

5 Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad kann mit den Strom- und Spannungsfaktoren $\Delta i = \frac{I'_1}{I''_2}$ und $\Delta u = \frac{U'_1}{U''_2}$ hergeleitet werden.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

$$I'_1 = I''_2 \cdot \Delta i = \frac{P_2}{U_1} \cdot \Delta i \cdot \Delta u$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{1}{\Delta i \cdot \Delta u}$$

6 Stromdichte

Während die Windungszahl von der Arbeitsinduktion bestimmt wird, ist der Drahtquerschnitt und damit der Drahtdurchmesser von der Stromdichte S_n abhängig. Für eine Übertemperatur von $\vartheta_{ii} = 75^\circ\text{C}$ wurde dieser Wert in DIN 41 300 errechnet und für alle genormten Kerntypen angegeben. Soweit er hier interessiert, wurde er auszugsweise in Spalte 9 der Tabelle angeführt.

Allgemeine Definition der Stromdichte: $S = \frac{I}{A}$

$$\Delta i = \frac{I_1 \cdot N_1}{I_2 \cdot N_2} = \frac{I'_1}{I''_2} \quad \dots \quad \text{Stromfaktor}$$

mit $P = I^2 \cdot R$ ergibt sich aus der allgemeinen Definition $S_n = \sqrt{\frac{P_{cu}}{\rho_w \cdot l_m \cdot A_{cu}}}$

$$P_{cu} = P_{cu_2} \cdot (\Delta i + 1) = I_2^2 \cdot R_{cu_2} \cdot (\Delta i + 1)$$

$$A_{cu} = A_{cu_1} + A_{cu_2} = A_{cu_1} \frac{1 + \Delta i}{\Delta i} = A_{cu_2} \cdot (1 + \Delta i)$$

$$R_{cu_2} = \frac{\rho_w \cdot l_w \cdot N_2^2}{A_{cu_2}} = \frac{\rho_w \cdot l_w}{A_{cu}} \cdot N_2^2 \cdot (\Delta i + 1)$$

$$A_{cu_2} = N_2 \cdot a_{cu_2}$$

6.1 Drahtstärke der Sekundärwicklung

Zur Berechnung der Drahtstärke der Sekundärwicklung werden die Sekundärströme aus den Leistungen ermittelt:

$$I_{21} = \frac{P_{21}}{U_{21}}; \quad I_{22} = \frac{P_{22}}{U_{22}}; \quad \dots$$

Die Summe der Sekundärleistungen darf die Typenleistung des Transformators natürlich nicht überschreiten:

$$P_{2n} \geq P_{21} + P_{22} + P_{23} + \dots$$

Aus der in der Tabelle angegebenen Stromdichte sind dann die Drahtquerschnitte bzw. -durchmesser der einzelnen Wicklungen zu errechnen:

$$a_{cu_{21}} = \frac{I_{21}}{S_n}; \quad a_{cu_{22}} = \frac{I_{22}}{S_n}; \quad \dots \quad \text{mit} \quad a_{cu_2} = \frac{d_2^2 \cdot \pi}{4} \quad (a_{cu_2} \text{ in } \text{mm}^2) \quad \text{wird}$$

$$d_2 = \sqrt{\frac{4}{\pi}} \cdot \sqrt{\frac{I_2}{S_n}} = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{I_2}{S_n}}$$

Der Drahtdurchmesser ist auf die in DIN 46435 genormten Abmessungen auf- oder abzurunden.

6.2 Drahtstärke der Primärwicklung

Man geht hier ähnlich wie im vorigen Abschnitt vor. Der Primärstrom ergibt sich aus

$$I'_1 = I''_2 \cdot \Delta i \approx \frac{P_2}{U'_1} \cdot \Delta i \cdot \Delta u = \frac{P_2}{U''_2} \cdot \Delta i = I''_2 \cdot \Delta i$$

Der Stromfaktor Δi berücksichtigt den zusätzlichen in der Primärwicklung auftretenden Magnetisierungsstrom. Er ist abhängig von der Arbeitsinduktion und vom Kerntyp.

In Spalte 10 der Tabelle sind in DIN 41300 genormte Faktoren angeführt.

Der Drahtdurchmesser errechnet sich nach der Formel

$$d_1 = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{I'_1}{S_n}} = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{I_I \cdot \Delta i}{S_n}} = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{I''_2 \cdot \Delta i}{S_n} \cdot \frac{N_2}{N_1}}$$

7 Kupferquerschnitt

Bei der Ermittlung der Transformatoraten sind sie Rechendaten auf genormte Werte bzw. ganze Zahlen auf- oder abzurunden. Es ergibt sich darum die Notwendigkeit, die festgelegten Werte daraufhin zu prüfen, ob sie auf den vorgesehenen Wickelkörper passen. Der Kupferfüllfaktor kann sehr stark schwanken und ist vom Drahtdurchmesser und von der Isolation abhängig. Die in DIN 41300 genannten Werte für den Kupferquerschnitt A_{cu} (Spalte 11 der Tabelle) berücksichtigen auch ungünstige Wickeltechnik und hohen Isolationsaufwand.

Der gesamte Kupferquerschnitt $A_{cu} = a_{cu_1} \cdot N_1 + a_{cu_2} \cdot N_2 = \frac{\pi}{4} \cdot (d_1^2 \cdot N_1 + d_{21}^2 \cdot N_{21} + d_{22}^2 \cdot N_{22} + \dots)$ muß kleiner

sein als der in der Tabelle, Spalte 11, genannte Wickel-Nennquerschnitt. Dann können Platzschwierigkeiten nur noch in sehr ungünstigen Fällen auftreten.

Es gilt also: $A_{cu_n} \geq A_{cu}$

8 Abweichungen von der optimalen Induktion

In bestimmten Fällen muß von der optimalen Induktion abgewichen werden. Einige Forderungen können sein:

- kleinere Übertemperatur des Transformators wegen der Wärmeempfindlichkeit umliegender Bauelemente oder wegen sehr hoher Umgebungstemperatur
- geringere Arbeitsinduktion wegen kleinerer magnetischer Streufelder oder wegen kleiner Einschaltströme
- geringere Stromdichten wegen kleinerer Übertemperatur

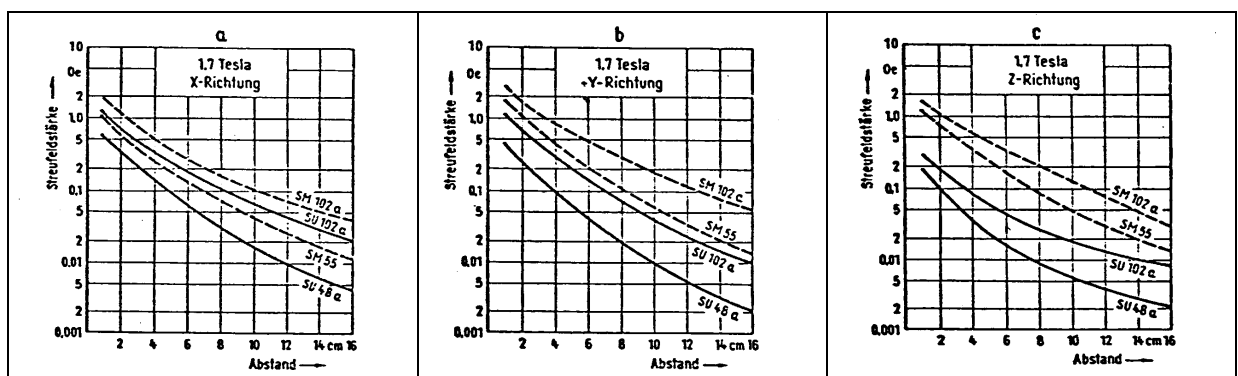
In jedem Fall ist mit einer Reduzierung der maximal übertragbaren Nenn-Scheinleistung zu rechnen. In welchem Maße dies der Fall ist, kann Bild 5 entnommen werden. Hier sind die relativen Werte der Induktion und der Stromdichte in Abhängigkeit vom Relativwert der Scheinleistung aufgetragen.

Weiters ist zu beachten, daß durch Abweichung von der optimalen Induktion die spezifischen Windungszahlen neu festzulegen sind.

9 Einschaltströme

Der Einschaltstromstoß eines Transformators wird maßgeblich von der Arbeitsinduktion bestimmt. Da der Einschaltstromstoß auch von den Kupferwiderständen abhängt, muß die Reduzierung der Induktion durch Versuche ermittelt werden.

10 Magnetisches Streufeld



Vom Kern- und Wicklungsaufbau sowie von der Induktion ist das Streufeld eines Transformators abhängig. SBK-Transformatoren zeichnen sich durch besonders günstige Werte aus. Bild 6 und 7 zeigen die Streufelder für SBK-

Transformatoren in verschiedenen Richtungen. Der deutliche Vorteil bei Verwendung eines symmetrisch bewickelten SU-Transformators ist erkennbar. Eine weitere Verbesserung des Streuverhaltens kann durch Reduzierung der Arbeitsinduktion erzielt werden.¹

11 Einbauvolumen

Die Dimensionierung eines Netztransformators mit einem Schnittbandkern hat eine deutliche Verminderung des Einbauvolumens zur Folge. In günstigsten Fällen ist bei leistungsgleichen Transformatoren eine Volumsverkleinerung von 30 – 40% gegenüber Schachtelkerntransformatoren mit Dynamoblechen möglich.

Transformatoren im SU-Typ ermöglichen besonders flache Bauform und sind daher besonders für Stromversorgungen in Steckkartentechnik interessant.

12 Preisbetrachtungen

Der Kilogrammpreis des SBK ist höher als der des Kupferdrahtes. SBK-Transformatoren sollen deswegen kupferintensiv dimensioniert werden. SU-Kerne sind wegen ihres relativ großen Wickelfensters hier zu gut geeignet.

¹ $\Delta s, P_{\text{ew}}$ - Einschaltstrom
Wolfgang BIDMON, Franz MAILER

Tabelle der Transformatoraten mit Schnittbandkernen

	Sekundärleistung Psn (VA)	magn. Induktion \bar{B}_n (T)	Spez. Ind.-Windg. n_i (Wdg./V) ¹⁾	Spez. Primär-Windg. n_p (Wdg./V)	Spez. Sek.-Windg. n_s (Wdg./V)	Spannungsfaktor ΔU	sek. Spannungsabfall 1+ Λ 's	Stromdichte Sn (A/mm ²)	Stromfaktor Δi	Wickelquerschnitt A_{Cu_n} (cm ²)	Eisenquerschnitt A_{Fe} (cm ²)	Cu-Gewicht n_{Cu} (kg)	Fe-Gewicht n_{Fe} (kg)	Transform.-Gewicht m_T (ka)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
SM 42	5,3	1,75	17,8	13,2	22,3	1,68	1,25	7	1,16	0,04	0,44	0,031	0,108	0,139
SM 55	21,1	1,76	8,8	7,7	9,85	1,28	1,12	5,3	1,14	0,85	2,92	0,085	0,276	0,361
SM 65	45,7	1,78	5,6	5,1	6,05	1,18	1,08	4,4	1,1	1,35	4,5	0,166	0,5	0,666
SM 74	84	1,79	4	3,75	4,2	1,12	1,06	3,83	1,1	1,95	6,3	0,342	0,79	1,132
SM 85a	115	1,78	3,2	3,1	3,4	1,1	1,05	3,8	1,09	2,1	8	0,32	1,12	1,44
SM 85b	159	1,76	2,3	2,2	2,4	1,08	1,04	3,72	1,09	2,1	11,3	0,366	1,59	1,956
SM 102a	206	1,79	2,5	2,4	2,6	1,08	1,04	3,28	1,09	3,3	10,4	0,58	1,77	2,35
SM 102b	300	1,78	1,64	1,6	1,7	1,06	1,03	3,15	1,08	3,3	15,6	0,68	2,64	3,32
SE 130a	387	1,83	2,2	2,2	2,3	1,06	1,03	2,4	1,07	7,6	11,3	1,64	2,24	3,88
SE 130b	484	1,83	1,7	1,7	1,8	1,05	1,03	2,3	1,07	7,6	14,4	1,47	2,86	4,33
SE 150a	590	1,83	1,7	1,7	1,8	1,05	1,03	2,2	1,06	9,8	14,4	2,45	3,26	5,71
SE 150b	720	1,83	1,4	1,35	1,4	1,04	1,02	2,2	1,07	9,8	18	2,63	4,08	6,71
SE 150c	860	1,83	1,1	1,06	1,1	1,04	1,02	2,1	1,07	9,8	21,6	2,8	4,91	7,71
SE 170a	1130	1,83	1,1	1,06	1,1	1,035	1,02	1,9	1,06	14	21,8	4,21	5,8	10,01
SE 170b	1308	1,83	0,95	0,93	0,96	1,03	1,015	1,9	1,06	14	25,9	4,46	6,8	11,26
SE 170c	1490	1,83	0,83	0,82	0,84	1,03	1,015	1,8	1,06	14	29,8	4,71	7,9	12,61
SU 30a	3,3	1,79	30	18,2	41,3	2,27	1,375	9,3	1,18	0,4	0,82	0,021	0,072	0,093
SU 30b	6,3	1,78	19	13,6	24,1	1,77	1,27	9	1,17	0,4	1,34	0,025	0,117	0,142
SU 39a	12,4	1,8	17,5	13,7	21,2	1,55	1,21	7	1,13	0,85	1,43	0,057	0,162	0,219
SU 39b	20	1,79	11,1	9,35	12,9	1,38	1,16	6,7	1,13	0,85	2,24	0,068	0,253	0,321
SU 48a	30,5	1,81	11,4	9,8	13	1,33	1,14	5,7	1,12	1,5	2,19	0,125	0,303	0,428
SU 48b	48,6	1,8	7,25	6,5	8	1,23	1,1	5,5	1,11	1,5	3,47	0,15	0,48	0,63
SU 60a	82	1,83	7,1	6,5	7,7	1,19	1,09	4,4	1,1	3	3,5	0,312	0,61	0,922
SU 60b	122	1,82	4,7	4,4	5	1,14	1,07	4,3	1,1	3	5,3	0,37	0,92	1,29
SU 75a	200	1,84	4,4	4,2	4,7	1,12	1,06	3,6	1,09	5,3	5,6	0,7	1,21	1,91
SU 75b	306	1,83	2,2	2,1	2,3	1,08	1,04	3,4	1,09	5,3	9	0,84	1,94	2,78
SU 90a	387	1,85	3,1	3	3,22	1,08	1,04	3,1	1,08	8,3	8	1,29	2,08	3,37
SU 90b	630	1,84	1,8	1,8	1,9	1,06	1,03	3	1,08	8,3	13,4	1,58	3,49	5,07
SU 102a	620	1,85	2,3	2,3	2,4	1,06	1,03	2,8	1,08	11	10,5	1,97	0,09	5,06
SU 102b	960	1,84	1,45	1,4	1,5	1,04	1,02	2,7	1,07	11	17	2,38	4,99	7,37
SU 114a	920	1,86	1,87	1,82	1,92	1,05	1,025	2,5	1,073	15	12,9	2,98	4,23	7,21
SU 114b	1440	1,85	1,15	1,15	1,2	1,035	1,02	2,3	1,07	15	21,2	3,62	7	10,62

Erläuterung -> Seite 185

$$1) \quad n_i = \frac{N_i}{U_i} \quad \frac{1}{n_i} = \frac{U_i}{N_i} \quad \dots \text{Windungsspannung}$$

Füllfaktor ist schon berücksichtigt (siehe §7)

