

Transformatoren berechnen - leicht gemacht!

Programmbeschreibung zu ‚Trafo.xls‘, 1. Überarbeitung (Mai 2009)

Bei Bastelprojekten ist es gelegentlich notwendig, einen Trafo oder Übertrager zu wickeln, denn nicht immer ist der im Laden so zu kaufen, wie man ihn gerade braucht. Weil die Berechnung von Hand doch vergleichsweise umständlich ist, habe ich vor einiger Zeit ein kleines EXCEL-Blatt erstellt, das nun den Großteil der Mühe abnimmt. Das Programm ist von der Internet-Seite des Oberösterreichischen Amateurfunkverbandes herunterzuladen [1]. Nur noch ein paar Werte eingegeben und schwupp – schon hat man einen Zettel mit den Wickeldaten in der Hand!

Die Rechnung liefert für 50Hz-Netztransformatoren im Leistungsbereich von 5 bis ca. 500VA brauchbare Werte. Die Bedienung ist einfach, aber man muß wissen, was die Angaben in den einzelnen Feldern bedeuten. Hier ist die Anleitung für all jene, die glauben, daß sie so etwas auch einmal brauchen können.

Berechnungsblatt:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1															
2	Eingaben:														
3															
4	Kern:			Art:											
5	Äußere Länge	12	[cm]	Netztrafo											
6	Äußere Breite	15	[cm]												
7	Stegbreite	4	[cm]	Netto-Kernfläche:											
8	Dicke	5	[cm]	18.800	[cm ²]										
9	Kerntyp:	EI 150b		Kernmaterial:			Kerngewicht:								
10	Blechdicke:	0,5	[mm]	Warmgewalztes Blech			4,40	[kg]							
11	Kernfüllfaktor:	0,94	[-]												
12	Induktion:	1,30	[T]	Eisenverluste:					Gesamtgewicht:						
13	Frequenz:	50	[Hz]	6,820	[W]				6,495	[kg]					
14	Spulenkörper:														
15	Fensterlänge	7,00	[cm]	Stegbreite:			Fensterfläche:				Fensterfüllfaktor:				
16	Fensterbreite	3,20	[cm]	4,60	[cm]		22.400	[cm ²]			0,846	<<Platz genug!			
17	Wicklungsfüllfaktor:	0,64	[-]	Stegdicke:											
18	Kurzschlußspg:	6	[%]	5,80	[cm]										
19	Wicklungen:	Spannung:		Strom:			Par. Drähte:	Durchm.:			Drabtisolierung:		Drabtfläche:		
20	Primär_1:	115	[V]	2,675	[A]		1	1,10	[mm]		0,05	[mm]	0,950	[mm ²]	
21	Primär_2:	115	[V]	2,675	[A]		1	1,10	[mm]		0,05	[mm]	0,950	[mm ²]	
22	Sekundär_1:	230	[V]	2,500	[A]		1	1,10	[mm]		0,05	[mm]	0,950	[mm ²]	
23	Sekundär_2:		[V]	1,000	[A]		1	0,50	[mm]			[mm]	0,196	[mm ²]	
24	Sekundär_3:		[V]	1,000	[A]		1	0,50	[mm]			[mm]	0,196	[mm ²]	
25	Sekundär_4:		[V]	1,000	[A]		1	0,50	[mm]			[mm]	0,196	[mm ²]	
26															
27	Ausgaben:														
28															
29	Prim.Wicklungssp:	0,5426	[V/Wdg]												
30	Wicklungen:	Windungszahl:		Leistung:			Art der Last:	Stromdichte:					Wickelfläche:		
31	Primär_1:	212,0	[Wdg]	307,6	[VA]		Ohmsch	2,81	[A/mm ²]				4,380	[cm ²]	
32	Wicklungsisolation:	0,40	[mm]										0,438	[cm ²]	
33	Primär_2:	212,0	[Wdg]	307,6	[VA]		Ohmsch	2,81	[A/mm ²]				4,380	[cm ²]	
34	Wicklungsisolation:	0,40	[mm]										0,438	[cm ²]	
35															
36	Sek.Wicklungssp:	0,5100	[V/Wdg]												
37	Wicklungen:	Windungszahl:		Leistung:			Art der Last:	Stromdichte:					Wickelfläche:		
38	Sekundär_1:	451,0	[Wdg]	575,0	[VA]		Ohmsch	2,63	[A/mm ²]				9,319	[cm ²]	
39	Sekundär_2:	0,0	[Wdg]	0,0	[VA]		Ohmsch	0	[A/mm ²]				0,000	[cm ²]	
40	Sekundär_3:	0,0	[Wdg]	0,0	[VA]		Ohmsch	0	[A/mm ²]				0,000	[cm ²]	
41	Sekundär_4:	0,0	[Wdg]	0,0	[VA]		Ohmsch	0	[A/mm ²]				0,000	[cm ²]	
42															
43		Drahtlänge:		Drahtgewicht:			Widerstand@20°C:				Kupferverlust@20°C:		Kupferverlust@75°C:		
44	Primär_1:	46,7	[m]	0,426	[kg]		0,86	[Ohm]			6,17	[W]	7,51	[W]	
45	Primär_2:	52,6	[m]	0,479	[kg]		0,97	[Ohm]			6,94	[W]	8,44	[W]	
46	Sekundär_1:	130,6	[m]	1,190	[kg]		2,41	[Ohm]			15,07	[W]	18,33	[W]	
47	Sekundär_2:	0,0	[m]	0,000	[kg]		0,00	[Ohm]			0,00	[W]	0,00	[W]	
48	Sekundär_3:	0,0	[m]	0,000	[kg]		0,00	[Ohm]			0,00	[W]	0,00	[W]	
49	Sekundär_4:	0,0	[m]	0,000	[kg]		0,00	[Ohm]			0,00	[W]	0,00	[W]	
50															
51		Wickeldraht-Gesamtgewicht:		2,095	[kg]		Wirkungsgrad:	93,3	[%]		Primäre Gesamtleistung:		616,10	[VA]	
52											1,07		1,0715		

Abb. 1: Berechnungsblatt

Berechnungsvorgang:

Ein üblicher Ausgangspunkt ist, daß man bestimmte Spannungen mit bestimmten Strömen braucht und einen Kern hat oder gar unter mehreren unterschiedlichen Kernen wählen kann. Es geht nun darum, zu prüfen, ob die benötigte Leistung mit dem Kern der Wahl übertragen werden kann. Die Grenzen des Machbaren werden durch die Erwärmung von Wicklung und Kern einerseits sowie durch den zur Verfügung stehenden Wickelraum andererseits vorgegeben. Die Erwärmung wird nicht gesondert berechnet, sondern durch Wahl eines Wertes für die Stromdichte und für die Induktion indirekt berücksichtigt.

Geht man bei Stromdichte und Induktion von den Standardwerten aus, so erhält man als Ergebnis einen Transformator, der für Dauerbetrieb mit voller Last ausgelegt ist. Wird der Trafo nur kurzzeitig voll belastet und ist sonst im Leerlauf oder wird er mit Teillast betrieben, so kann man durchaus höhere Stromdichten ansetzen, wie das beispielsweise bei einem Experimentier-Netzgerät der Fall ist.

Die andere Möglichkeit besteht darin, bei einem vorhandenen Kern die maximal übertragbare Leistung bei einer bestimmten Betriebsart zu ermitteln. Beide Möglichkeiten werden unterstützt, wenn man die entsprechenden Parameter verändert und die Ergebnisse der einzelnen Berechnungen vergleicht.

Eingabefelder:

Angaben zum Kern:

Äußere Länge: Siehe Abb. 2 (wird nicht für die Berechnung verwendet)

Äußere Breite: Siehe Abb. 2 (wird nicht für die Berechnung verwendet)

Innere Breite, auch Stegbreite: Siehe Abb. 2

Dicke: Siehe Abb. 2

Art: Angaben zum Verwendungszweck des Transformators (wird nicht für die Berechnung verwendet)

Kerntyp: Angaben zur Art des verwendeten Kernes; nähere Hinweise z.B. im → WERKBUCH der ELEKTRONIK [2] (wird nicht für die Berechnung verwendet)

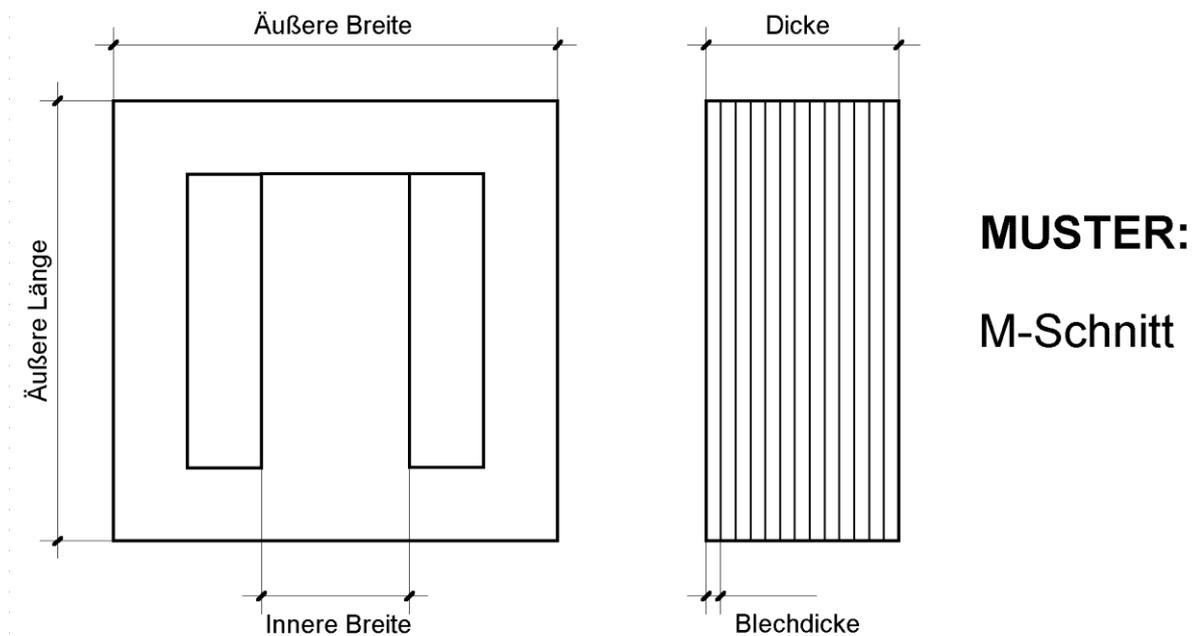


Abb. 2: Aus Einzelblechen geschichteter Kern

Blechdicke: Üblich sind Dicken von 0,3 mm bis 0,5 mm (wird nicht für die Berechnung verwendet)

Kernfüllfaktor: Berücksichtigt, daß die Bleche nicht absolut eben sind und somit zwischen ihnen auch im gepreßten Zustand ein kleiner Spalt bleibt. Ein guter Wert ist 0,95

Induktion: Ist ein Maß für die magnetische Beanspruchung des Kernmaterials bei Nennspannung. Übliche Werte für warmgewalztes dickes Blech (0,5mm) liegen bei 1,2T und für dünnes Blech (0,35mm) bei 1,3T. Vergleichbare Werte für kaltgewalztes Blech liegen zwischen 1,7T und 1,8T.

Frequenz: Frequenz, bei der der Transformator betrieben wird

Kernmaterial: Man kann aus 4 Materialien wählen; üblich ist warmgewalztes Blech für geschichtete Kerne und kaltgewalztes Blech für Schnittbandkerne und Ringkerne. Ferrit und Eisenpulver sind Sondermaterialien für Impulsübertrager und HF-Technik. (Wird nicht für die Berechnung verwendet)

Kerngewicht: Mit einer Waage ermitteltes Gewicht des Eisenkernes

Angaben zum Spulenkörper:

Fensterlänge netto: Siehe Abb. 3

Fensterbreite netto: Siehe Abb. 3

Stegbreite: Breite des Spulenkörpers, auf der die innerste Wicklungslage aufgebracht wird

Stegdicke: Dicke des Spulenkörpers, auf der die innerste Wicklungslage aufgebracht wird

Wicklungsfüllfaktor: Die von einer Wicklung beanspruchte Fläche ist nicht völlig mit Kupfer ausgefüllt, weil

- der Draht runden und nicht quadratischen Querschnitt hat
- der Draht außen mit einer Isolierschicht überzogen ist
- die einzelnen Lagen der Wicklung gegeneinander isoliert sind
- die Wicklungen gegeneinander isoliert sein müssen
- die Wicklung nicht 100%ig Windung an Windung aufgebracht werden kann

Ein höherer Füllfaktor als 65% ist in der Praxis kaum zu erreichen, meist liegt der Wert sogar etwas darunter! Voraussetzung hierfür ist, daß nicht ‚wild‘, sondern sehr sauber gewickelt wird (Windung an Windung).

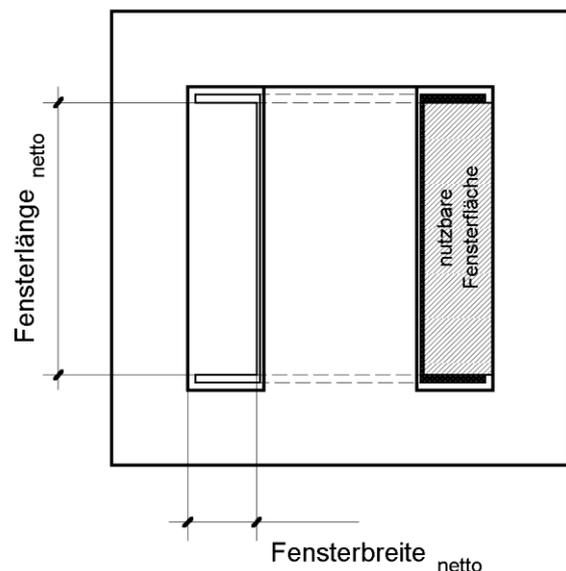


Abb. 3: Spulenkörper des Transformators

Kurzschlußspannung: Jene Spannung in Prozent der Nennspannung, die man beim fertigen Trafo an der Primärseite anlegen muß, damit auf der kurzgeschlossenen Sekundärseite der Nennstrom fließt. Bei den von uns benötigten Trafos bewegt sich der Wert etwa zwischen 5% und 15%.

Angaben zu den Wicklungen:

Spannung und Strom der einzelnen Wicklungen: Es sind die Nennspannungen und Nennströme anzugeben, die im normalen Dauerbetrieb erreicht werden sollen.

Parallele Drähte: Es müssen alle Felder mit einem Zahlenwert versehen sein, weil sonst Fehlermeldungen erzeugt werden!

Die Grenze für den Übergang auf 2 oder mehr Einzeldrähte hängt von der Größe des Trafos ab. Durchmesser über 1,0 mm sind auch mit Wickelvorrichtung zunehmend schwierig zu verarbeiten.

Durchmesser: Hier ist der Durchmesser des blanken Kupferleiters einzusetzen. Es müssen alle Felder mit einem Zahlenwert versehen sein, weil sonst Fehlermeldungen erzeugt werden!

Drahtisolation: Stärke des Lackauftrages auf den Durchmesser bezogen

Gewichtszuschlag für Drahtisolation: Der Wert hängt vom Drahtdurchmesser und der Art der Isolierung ab. 7 % ist ein guter Mittelwert.

Wicklungsisolierung: Isolierlage zwischen den Wicklungen zur Gewährleistung der elektrischen Sicherheit

Art der Last: Je nach angeschlossener Last ist die Verlustleistung und damit die Erwärmung der Wicklungen unterschiedlich.

Man kann aus 3 Möglichkeiten wählen, wobei die kapazitive Belastung den ungünstigsten Fall darstellt, denn dort ist die für den Stromfluß zur Verfügung stehende Zeit kürzer als in den anderen Fällen und der Strom und damit auch die Verlustleistung werden dementsprechend hoch ($\rightarrow P = I^2 \cdot R$).

Ausgabefelder:

Netto-Kernfläche: Eisenquerschnitt des Kernes

Eisenverluste: Die im Kern entstehende Verlustleistung. Siehe auch „Allgemeine Hinweise“.

Gesamtgewicht: Summe von Eisen- und Kupfergewicht

Fensterfläche: Die Wickelfläche im Fenster, die tatsächlich zur Verfügung steht

Fensterfüllfaktor: Ein Maß für den am Ende des Wickelvorganges verbrauchten Platz im Fenster. Füllfaktor 1 bedeutet, daß absolut kein freier Platz für weitere Windungen mehr zur Verfügung steht.

Die Rechnung setzt voraus, daß die Wicklung stramm und so platzsparend wie nur möglich aufgebracht worden ist!

Strom der Primärwicklung(en): Ergibt sich aus der sekundär verlangten Leistung und den im Trafo entstehenden Verlusten.

Drahtfläche: Der Kupferquerschnitt der verwendeten Wickeldrähte

Primäre Windungsspannung: Das Ergebnis aus den in der *FORMEL* eingesetzten Werten

Primäre Windungszahl: Anzahl der Windungen jener Wicklung(en), welche dem Trafo die Leistung zuführt

Leistung: Zur Berechnung der primären Gesamtleistung ist der im Feld M52 errechnete Faktor von Hand in das Feld K52 zu schreiben. Die direkte Verwendung von M52 hätte einen Zirkelbezug mit Fehlermeldung zur Folge!

Sekundäre Windungsspannung: Der um den Betrag der Kurzschlußspannung verringerte Wert der primären Windungsspannung

Sekundäre Windungszahl: Anzahl der Windungen jener Wicklungen, die dem Trafo Leistung entnehmen

Stromdichte: Ein Maß für die Strombelastung und damit für die Erwärmung der Wickeldrähte. Für kleine Trafos (5 – 25VA) nimmt man 3,0 bis 4,0, für mittlere (25 – 200VA) 2,5 bis 3,0 und für große 2,0 bis 2,5 als Richtwert an.

Wickelfläche: Platzbedarf der jeweiligen Wicklung unter Einrechnung des Wicklungsfüllfaktors

Drahtlänge: Ungefähre Länge des notwendigen Wickeldrahtes

Drahtgewicht: Ungefähres Gewicht des notwendigen Wickeldrahtes (hängt von Dicke und Material der Drahtisolation ab)

Widerstand: Ohm'scher Widerstand der Wicklungen bei 20 °C und bei 75 °C

Kupferverlust: Die in den Wicklungen entstehende Verlustleistung

Wickeldraht-Gesamtgewicht: Kupfergesamtgewicht zur Ermittlung des Trafo-Gesamtgewichtes

Wirkungsgrad: Wert für die Güte des Trafos aus der Sicht des Energieverbrauchs

Primäre Gesamtleistung: Summe aus sekundären Nennleistungen und allen im Trafo entstehenden Verlusten

Allgemeine Hinweise:

Die obengenannten Zahlenwerte für die Stromdichte sind für den Dauerbetrieb des Transformators bei natürlicher Luftkühlung gültig. Der Einbau in ein Gehäuse erhöht die Betriebstemperatur, ein stetiger Luftstrom verringert sie (forcierte Luftkühlung). Wer sich für den Rechengang interessiert, kann zum besseren Verständnis die den Feldern hinterlegten Formeln nachvollziehen. Die Werte für Induktion, Füllfaktoren etc. sind Mittelwerte aus der Praxis und nicht unbedingt auch für Sonderfälle gültig.

In der Datei `Kap3_Transformator.pdf` sind auf der Seite 5 zur Orientierung Magnetisierungskurven für warm- und kaltgewalztes Blech angegeben und auf Seite 7 Kurven für die Eisenverluste dieser Bleche in Abhängigkeit von der Induktion [3]. Der Arbeitspunkt liegt bei Nennspannung üblicherweise im Knick der Magnetisierungskennlinie.

Es gibt aber auch Blech, wo das nicht der Fall ist: die Kurve in Abb. 4 wurde an einem recht alten E1150-Kern aufgenommen. Die Spannung war dabei an einer 110-V-Wicklung angelegt, die horizontale Achse gibt den bei der jeweiligen Spannung fließenden Magnetisierungsstrom an. Der Betriebspunkt liegt bei diesem Blech bei einer Induktion von 1,3 T bei 160V und 370 mA, also weit oberhalb des Knicks.

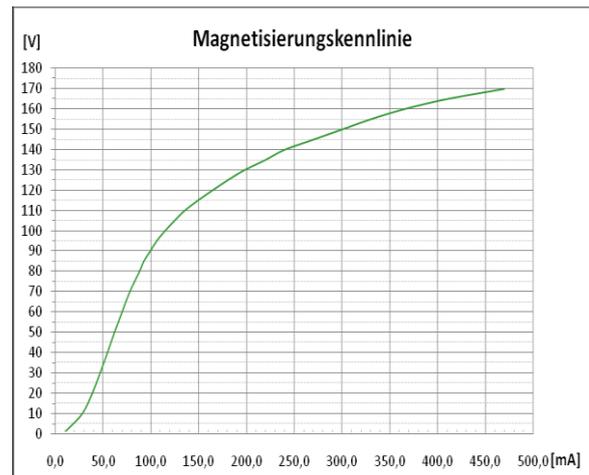


Abb. 4: Magnetisierungskurve eines alten E1150-Kernes

Für die Größe des Leerlaufstromes gibt es eine Faustregel: sein Wert in Milliampere soll nicht größer sein als die Nennleistung des Transformators in VoltAmpere entsprechend der Summe der Leistungen der Sekundärwicklungen. Mit den oben angeführten Werten für die Induktion in den beiden Blechsorten betragen die Verluste im Eisen ca. 1,55 W/kg, der Leerlaufstrom ist geringer als in der Faustformel angegeben. Bei abweichender Induktion ist der Wert entsprechend den Kurven in [3], Seite 7, zu korrigieren. Will man es anlässlich eines bestimmten Anwendungsfalles noch genauer wissen, so ist es ratsam, sich Unterlagen über die magnetischen Eigenschaften der ins Auge gefaßten Kerne bei Herstellern oder Händlern von Trafokernen zu beschaffen. Damit weiß man dann ziemlich exakt, welcher Wert für Induktion und Eisenverlust anzusetzen ist (das Kernmaterial ist die größte Unbekannte in unserer Rechnung).

Helmut, OE5GPL

Literatur und Verweise:

- [1] Internetseite des Oberösterreichischen Amateurfunkverbandes OAFV, TECHNIK/SOFTWARE/HELPER, Transformatorenberechnung:
<http://www.oe5.oevsv.at/opencms/technik/>
- [2] Nährmann, D.: Das große Werkbuch Elektronik
- [3] Greilach, Berechnung Elektrischer Maschinen: Kap. 3, Transformator
http://www.eit.uni-kl.de/wcms/uploads/media/Kap3_Transformator.pdf