

## Berechnung der Wickelgüter

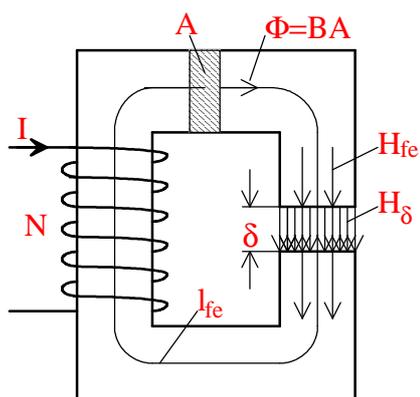
Als Wickelgüter bezeichnet man alle induktiven Bauelemente des Schaltnetzteils. Dies sind zum einen die **Speicherdrosseln** (hierzu gehört auch der Speichertransformator des Sperrwandlers!) und die **Hochfrequenz-Transformatoren**. Als Kernmaterial wird in erster Linie Ferrit benutzt. Aber auch andere hoch permeable und hoch sättigbare Kernmaterialien sind handelsüblich.

### Berechnung von Speicherdrosseln:

Gesucht sei eine Drossel mit der Induktivität  $L$  und einer Strombelastbarkeit  $\hat{I}$ .

Speicherdrosseln sollen Energie speichern. Die gespeicherte Energie beträgt:  $W = \frac{1}{2}L\hat{I}^2$ . Diese Energie ist in Form von magnetischer Feldenergie gespeichert, und zwar sowohl im Ferrit als auch im Luftspalt des Kerns (siehe auch Abbildung 5.1.1).

- Die Baugröße einer Speicherdrossel wächst ungefähr proportional zur zu speichernden Energie.



- I: Drosselstrom
- N: Zahl der Windungen
- A: Kernquerschnitt
- $l_{fe}$ : effektive magnetische Kernlänge
- $\delta$ : Luftspaltlänge
- $\Phi$ : magnetischer Fluß
- B: magnetische Flußdichte
- $H_{fe}$ : magnetische Feldstärke im Kern
- $H_{\delta}$ : magnetische Feldstärke im Luftspalt

Abbildung 5.1.1: Speicherdrossel mit ihren magnetischen und mechanischen Größen

Die Feldenergie in der Speicherdrossel beträgt:

$$W = \frac{1}{2} \int \vec{H} \cdot \vec{B} dV \approx \underbrace{\frac{1}{2} \vec{H}_{Fe} \cdot \vec{B}_{Fe} \cdot V_{Fe}}_{\text{Energie im Ferrit}} + \underbrace{\frac{1}{2} \vec{H}_{\delta} \cdot \vec{B}_{\delta} \cdot V_{\delta}}_{\text{Energie im Luftspalt}} \quad (1)$$

Die magnetische Flußdichte  $\vec{B}$  ist stetig und hat im Luftspalt und im Ferrit näherungsweise die gleiche Größe, d.h.  $\vec{B} \approx \vec{B}_{Fe} \approx \vec{B}_{\delta}$ . Die magnetische Feldstärke  $\vec{H}$  ist nicht stetig, sie ist im Luftspalt um den Faktor  $\mu_r$  größer als im Ferrit. Führt man dies in Gleichung (1) ein, so ergibt sich mit  $\vec{B} = \mu_0 \mu_r \cdot \vec{H}$ ,  $V_{Fe} = l_{Fe} \cdot A$  und  $V_{\delta} = \delta \cdot A$ :

$$W \approx \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} \left( \frac{l_{Fe}}{\mu_r} + \delta \right) \cdot A$$

$\mu_r$  beträgt im Ferrit ca. 1000...4000. Die effektive magnetische Kernlänge geht nur mit  $l_{Fe}/\mu_r$  in die Energieberechnung ein. Daher kann man bei üblichen Kernabmessungen sagen, daß die Energie maßgeblich im Luftspalt gespeichert ist.

Daher gilt in guter Näherung:  $W \approx \frac{1}{2} \frac{B^2 \cdot A \cdot \delta}{\mu_0}$

- ◆ Speicherdrosseln brauchen einen Luftspalt. In diesem ist die Energie gespeichert.

Da die Energie im Luftspalt gespeichert ist, benötigt man ein bestimmtes Luftspaltvolumen, um die geforderte Energie  $\frac{1}{2} L \hat{I}^2$  zu speichern. Die maximal zulässige Flußdichte  $B$  beträgt bei handelsüblichen Ferriten ca.  $B_{\max} \leq 0,3 \text{ T}$ . Das notwendige Luftspaltvolumen beträgt:

$$V_{\delta} = A \cdot \delta \geq \frac{L \hat{I}^2 \cdot \mu_0}{B_{\max}^2} \quad \text{mit } B_{\max} = 0,3 \text{ T}$$

Mit diesem Volumen kann ein entsprechender Kern aus einem Datenbuch gewählt werden.

Die Windungszahl  $N$  kann mit Hilfe des magnetischen Leitwertes  $A_L$  (auch  $A_L$ -Wert genannt) berechnet werden:

$$N = \sqrt{\frac{L}{A_L}} \quad A_L : \text{magnetischer Leitwert}$$

Der  $A_L$ -Wert kann dem Datenblatt entnommen werden.

Zur Kontrolle kann nun noch die maximal auftretende magnetische Flußdichte mit den Datenblattangaben berechnet werden. Diese darf üblicherweise nicht größer als 0,3 Tesla sein.

$$B = \frac{L \cdot \hat{I}}{N \cdot A_{\min}} = \frac{N \cdot A_L \cdot \hat{I}}{A_{\min}} \stackrel{!}{\leq} 0,3 \text{ T}$$

$A_{\min}$ : Minimaler Kernquerschnitt zur Berechnung der maximalen Flußdichte,  $A_{\min}$  ist im Datenblatt des Ferritkerns angegeben.

### Berechnung des Drahtdurchmessers:

Die Stromdichte  $S$  der Wicklung kann zwischen 2 und 5 A/mm<sup>2</sup> gewählt werden (je nach Größe und Isolation, sprich: je nach dem, wie die Wärme abgeführt werden kann). Daraus folgt für den Drahtdurchmesser  $d$ :

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot I}{\pi \cdot S}} \quad \text{mit } S = 2 \dots \underline{3} \dots 5 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$$

## Berechnung von Hochfrequenztransformatoren:

Hochfrequenztransformatoren übertragen elektrische Leistung. Ihre Baugröße hängt von der zu übertragenden Leistung, sowie von der Betriebsfrequenz ab. Je höher die Frequenz, desto kleiner die Baugröße. Üblich sind Frequenzen zwischen 20 und 100kHz. Als Kernmaterial wird hauptsächlich Ferrit benutzt.

Datenbücher für geeignete Kerne beinhalten üblicherweise Angaben über die übertragbare Leistung der verschiedenen Kerne.

Für die Berechnung eines Hochfrequenztransformators beginnt man daher damit, daß man einen, für die geforderte Leistung und die gewünschte Frequenz, geeigneten Kern entsprechend den Datenbuchangaben auswählt. Im zweiten Schritt wird die primäre Windungszahl berechnet, denn diese bestimmt die magnetische Flußdichte im Kern. Danach wird der Drahtdurchmesser berechnet, er ist abhängig von den Stromstärken auf Primär- und Sekundärseite.

### Berechnung der primären Mindestwindungszahl:

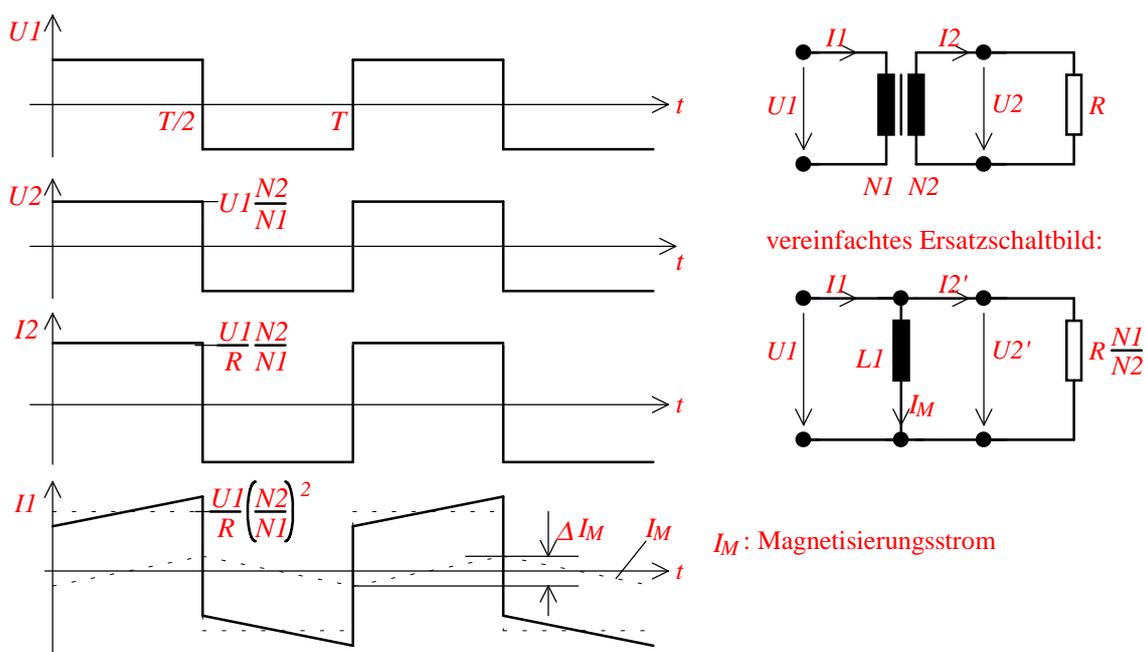


Abbildung 5.2.1: Spannungen und Ströme am Transformator

An der Primärseite des Transformators liege eine rechteckförmige Spannung  $U_1$ . Diese bewirkt einen Eingangsstrom  $I_1$ , der sich zusammensetzt aus dem rücktransformierten Sekundärstrom  $I_2$  und dem Magnetisierungsstrom  $I_M$  (siehe Abbildung 5.2.1). Damit der Magnetisierungsstrom  $I_M$  möglichst klein bleibt, wird ein Kern ohne Luftspalt eingesetzt.

Die Rechteckspannung  $U_1$  am Eingang des Transformators verursacht einen dreieckförmigen Magnetisierungsstrom  $I_M$ , näherungsweise unabhängig vom Sekundärstrom  $I_2$  (siehe auch das Ersatzschaltbild in Abbildung 5.2.1). Der Magnetisierungsstrom ist in etwa proportional

zum magnetischen Fluß bzw. zur magnetischen Flußdichte. Die Eingangsspannung  $U_1$  bestimmt den magnetischen Fluß im Transformator Kern. Der entsprechende physikalische Zusammenhang ist durch das Induktionsgesetz  $u = N \cdot \frac{d\Phi}{dt}$  gegeben.

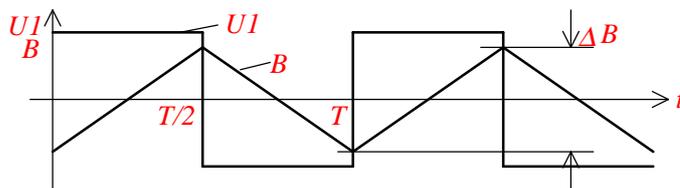


Abbildung 5.2.2: Eingangsspannung und magnetische Flußdichte am Transformator

Für den in Abbildung 5.2.1 gezeigten Transformator gilt dann:

$$\Delta B = \frac{U_1 \cdot T/2}{N_1 \cdot A}$$

- ♦ Der Flußdichtehub  $\Delta B$  ist umso kleiner, je größer die Frequenz und je größer die Windungszahl  $N_1$  ist.

Nun kann eine Mindestwindungszahl  $N_{1 \min}$  berechnet werden, die notwendig ist, um einen vorher gewählten Flußdichtehub  $\Delta B$  nicht zu überschreiten. Die Sättigungsflußdichte von  $\hat{B} \approx 0,3 \text{ T}$  d.h.  $\Delta B \approx 0,6 \text{ T}$  kann bei Hochfrequenztransformatoren in der Regel nicht ausgenutzt werden. Bei Gegentaktwandlern würde dann bei jedem Takt die volle Hystereseschleife durchlaufen werden, was zu einer, in der Regel, unzulässig hohen Erwärmung des Kerns führe. Wenn keine genauen Angaben über Wärmeabgabe und Kernverluste vorliegen, sollte man bei üblichen Frequenzen (20kHz bis 100kHz)  $\Delta B \approx 0,3 \dots 0,2 \text{ T}$  wählen. Je kleiner  $\Delta B$  ist, desto kleiner sind die Hystereseverluste.

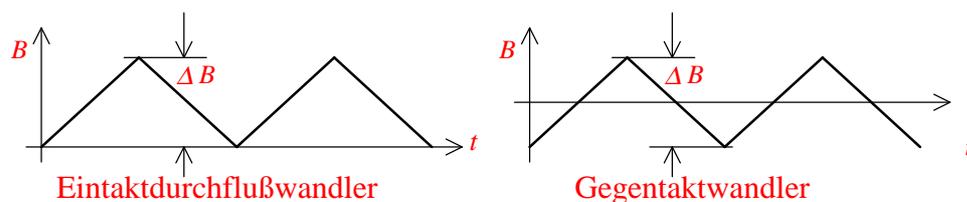
Daraus ergibt sich eine Mindestwindungszahl für  $N_1$ :

$$N_{1 \min} \geq \frac{U_1 \cdot T/2}{\Delta B \cdot A_{\min}} \quad \text{mit} \quad \Delta B \approx 0,2 \dots 0,3 \text{ T}$$

$A_{\min}$ : minimaler Kernquerschnitt, er bestimmt die maximale Flußdichte,  $A_{\min}$  ist im Datenblatt angegeben

HINWEIS:

Bei Eintaktdurchflußwandlern wird der Kern nur in eine Richtung aufmagnetisiert, während er bei Gegentaktwandlern in beide Richtungen magnetisiert wird.



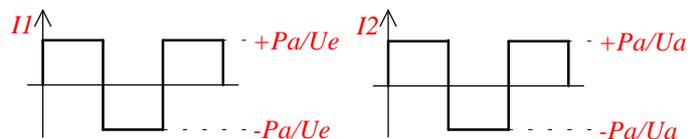
Die Berechnung für die Mindestwindungszahl  $N_{1 \min}$  ist bei beiden Wandlern gleich.

**Berechnung des Drahtdurchmessers:**

Der Drahtdurchmesser richtet sich nach dem jeweiligen Effektivwert des Wicklungsstromes. Dieser kann aus der übertragenen Leistung berechnet werden. Unter Vernachlässigung der Verluste und unter der Annahme, daß bei minimaler Eingangsspannung das maximale Tastverhältnis gefahren wird, ergibt sich:

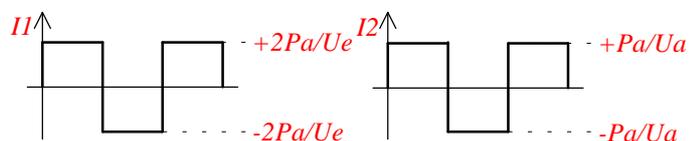
Für den Gegentaktwandler:

$$I_{1\text{eff}} \approx \frac{P_a}{U_e} \quad \text{und} \quad I_{2\text{eff}} = \frac{P_a}{U_a}$$



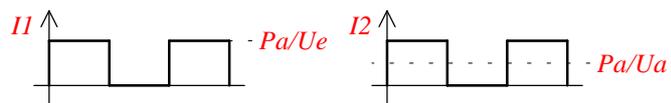
Für den Halbbrückengegentsaktwandler:

$$I_{1\text{eff}} \approx \frac{2P_a}{U_e} \quad \text{und} \quad I_{2\text{eff}} = \frac{P_a}{U_a}$$



Für den Flußwandler:

$$I_{1\text{eff}} \approx \frac{\sqrt{2} P_a}{U_e} \quad \text{und} \quad I_{2\text{eff}} = \frac{\sqrt{2} P_a}{U_a}$$



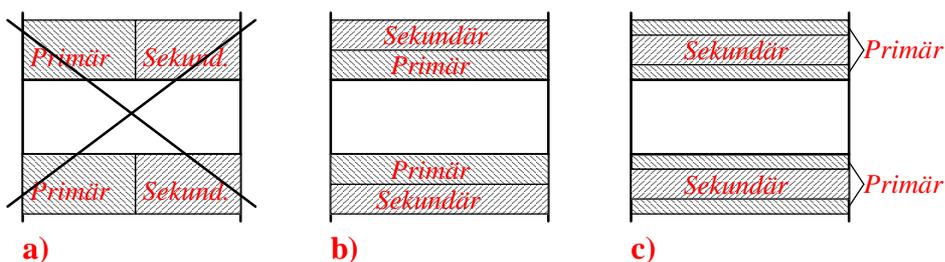
Der Magnetisierungsstrom kann dabei vernachlässigt werden. Die Stromdichte wird wie bei der Speicherdrossel zwischen 2 und 5 A/mm gewählt, je nachdem, wie die Wärmeabgabe ist. Der Drahtquerschnitt  $A_{\text{Draht}}$  und der Drahtdurchmesser  $d_{\text{Draht}}$  berechnet sich dann:

$$A_{\text{Draht}} = \frac{I}{S} \quad \text{und} \quad d_{\text{Draht}} = \sqrt{\frac{I \cdot 4}{S \cdot \pi}} \quad \text{mit} \quad S = 2 \dots \underline{3} \dots 5 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$$

Übliche Kerne sind so konstruiert, daß der verfügbare Wickelraum bei dieser Auslegung ausreicht. Primär- und Sekundärwicklung nehmen dabei den gleichen Wickelquerschnitt ein.

**HINWEIS:**

Wenn es auf gute Kopplung zwischen den Wicklungen ankommt, sollten die Wicklungen übereinander, gegebenenfalls sogar verschachtelt, gewickelt werden. So ist die Kopplung zwischen Primär- und Sekundärwicklung für a) schlecht, für b) gut und für c) ca. viermal besser als b).



**HINWEIS:**

Die Primärwindungszahl sollte nicht wesentlich höher, als  $N_{1\min}$  gewählt werden, weil sonst die Kupferverluste infolge des längeren Drahtes unnötig erhöht werden. Weiterführende Literatur gibt sogar ein optimales  $\Delta B_{opt}$  an, bei dem Hysterese und Kupferverluste zusammen ein Minimum annehmen.

**HINWEIS:**

Bei hohen Frequenzen und großem Drahtdurchmesser muß der Skineneffekt berücksichtigt werden. Es empfiehlt sich bei Frequenzen  $> 20\text{kHz}$  und Drahtquerschnitten  $> 1\text{mm}^2$  Kupferfolie oder HF-Litze zu verwenden.