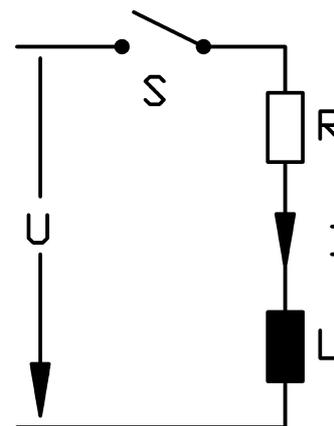


## Optimierung der Einschaltdauer bei Eintakt-Sperrwandlern

Die Energieübertragung bei Eintakt-Sperrwandlern erfolgt durch Speicherung magnetischer Energie in einer Induktivität  $L$  während der Stromflussphase (in der Abbildung bei geschlossenem Schalter  $S$ ). Das Öffnen von  $S$  und somit das Abschalten des Stromes  $I$  zur Zeit  $t_1$  ist der Beginn der Sperrphase; die Induktivität "versucht" den bisherigen Stromfluss aufrecht zu erhalten. Zu diesem Zweck erzeugt sie an ihren Klemmen die für Induktivitäten typische hohe Abschaltspannung, die in einer Schaltung zur Hochspannungserzeugung erwünscht ist.

Es ist jedoch offensichtlich, dass ein Teil der eingesetzten Leistung bzw. Energie am Verlustwiderstand der Induktivität  $R$  verloren geht. Der Anteil dieser Verluste an der eingesetzten Gesamtleistung ist abhängig von der Einschaltdauer. Im Extremfall einer dauernden Einschaltung mit dem Schalter  $S$  wird die gesamte Leistung nur noch (an  $R$ ) in Wärme umgesetzt; kurze Einschaltzeiten müssen sich also günstig auf den Wirkungsgrad auswirken. Andererseits fließt nach kurzer Einschaltdauer nur ein kleiner Strom durch  $L$ , womit beim Abschalten auch nur ein kleiner Energiebetrag zur Hochspannungsseite hin übertragen wird, was die übertragbare Leistung begrenzt.



In diesem Papier soll dieser Konflikt untersucht werden mit dem Ziel, dem Schaltungsentwickler einen Einblick in die Zusammenhänge zu geben, um ihn damit die diesbezügliche Auslegung von Eintakt-Sperrwandlern optimal vornehmen lassen zu können.

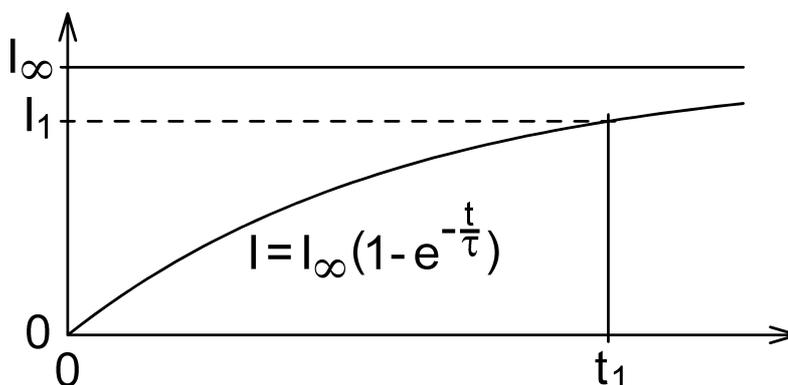
Nach Schließen des Schalters  $S$  steigt der Strom  $I$  durch die Induktivität ab dem Zeitpunkt  $0$  nach der im Bild gezeigten Exponentialfunktion an und besitzt nach der Einschaltzeit  $t_1$  den Wert  $I_1$ . Endstrom  $I_\infty$  sowie Zeitkonstante  $\tau$  ergeben sich elementar zu

$$I_\infty = \frac{U}{R} \quad \text{und} \quad \tau = \frac{L}{R} .$$

Außerdem gilt die in der Grafik gezeigte Gleichung für die Stromzunahme als Funktion der Zeit.

Berechnet werden im folgenden die Abhängigkeiten von der relativen Einschaltzeit  $x = t_1/\tau$  für

- das Verhältnis  $w$  der in  $L$  gespeicherten Energie zur Maximal Speicherbaren Energie
- das Verhältnis  $p$  von übertragener Leistung zur Maximal Aufgenommenen Leistung (unter der Annahme, dass die Einschalt- bzw. Übertragungsfrequenz  $f = 1/(2 \cdot t_1)$  ist).
- die Verkleinerung des Wirkungsgrades  $\eta$  gegenüber dem theoretischen Optimum



Die im magnetischen Feld von  $L$  gespeicherte Energie beträgt zu jeder Zeit genau

$$E = \frac{1}{2} L I^2 \quad \text{und damit zur Zeit } t_I: \quad E_1 = \frac{1}{2} L I_1^2 = \frac{1}{2} L \left( I_\infty \left( 1 - e^{-\frac{t_1}{\tau}} \right) \right)^2$$

$$E_1 = \frac{1}{2} L I_\infty^2 \left( 1 - 2e^{-\frac{t_1}{\tau}} + e^{-\frac{2t_1}{\tau}} \right)$$

Die absolute Zeit  $t_I$  wird ersetzt durch den Anteil von  $t_I$  an der Zeitkonstante  $\tau$ :

$$x = \frac{t_1}{\tau} \quad \text{bzw.} \quad t_1 = x \cdot \tau :$$

$$E_1 = \frac{1}{2} L I_\infty^2 \left( 1 - 2e^{-x} + e^{-2x} \right) \quad (\text{Gespeicherte Energie})$$

$$w = \frac{E_1}{E_\infty} = 1 - 2e^{-x} + e^{-2x} \quad (\text{Gespeicherte Energie durch Maximal Speicherbare Energie})$$

$$p = \frac{P_1}{P_{max}} = \frac{E_1 f}{P_{max}} = \frac{\frac{1}{2} L I_\infty^2 \left( 1 - 2e^{-x} + e^{-2x} \right) \frac{1}{2t_1}}{\frac{1}{2} \frac{U^2}{R}} = \frac{R L I_\infty^2 \left( 1 - 2e^{-x} + e^{-2x} \right)}{U^2 2x \tau}$$

$$p = \frac{1 - 2e^{-x} + e^{-2x}}{2x} \quad (\text{Übertragene Leistung durch Maximal Aufgenommene Leistung})$$

Die bis zum Zeitpunkt  $t_I$  aufgewendete Energie beträgt dagegen

$$E_2 = U \cdot \int_0^{t_1} I dt = U \cdot I_\infty \cdot \int_0^{t_1} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) dt = U \cdot I_\infty \cdot \left( \left[ t_1 + \tau e^{-\frac{t_1}{\tau}} \right] - \left[ 0 + \tau e^{-\frac{0}{\tau}} \right] \right)$$

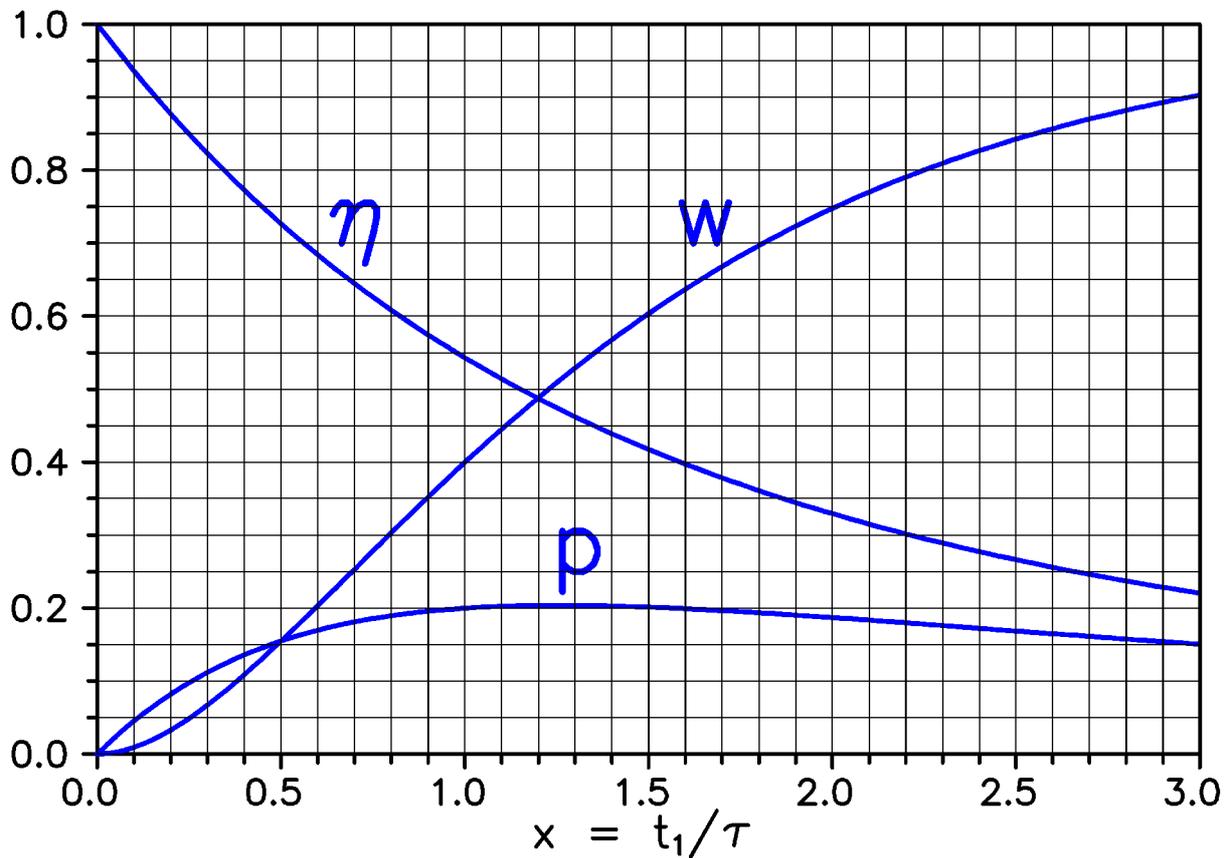
$$E_2 = U \cdot I_\infty \cdot \left( t_1 + \tau e^{-\frac{t_1}{\tau}} - \tau \right)$$

Die absolute Zeit  $t_I$  wird wieder ersetzt durch den Anteil von  $t_I$  an der Zeitkonstante  $\tau$ :

$$E_2 = U \cdot I_\infty \cdot \left( x\tau + \tau e^{-x} - \tau \right) = U \cdot I_\infty \cdot \tau \cdot \left( x + e^{-x} - 1 \right) \quad . \quad \text{Damit wird:}$$

$$\eta = \frac{E_1}{E_2} = \frac{\frac{1}{2} L I_\infty^2 \left( 1 - 2e^{-x} + e^{-2x} \right)}{U \cdot I_\infty \cdot \tau \cdot \left( x + e^{-x} - 1 \right)}$$

$$\eta = \frac{1 - 2e^{-x} + e^{-2x}}{2 \left( x + e^{-x} - 1 \right)} \quad (\text{Wirkungsgrad})$$



Bei hohem zu erzielenden Wirkungsgrad von z.B.  $\eta = 0,9$  (durch kurze Einschaltzeit von  $x \approx 0,15$ ) ist also die je Einschaltzyklus übertragbare Energie ( $w \approx 0,02 = 2\%$  der Maximal Übertragbaren Energie) recht klein. Dass die Kurve der übertragenen Leistung  $p$  in diesem Bereich trotzdem deutlich stärker ansteigt als die von  $w$  (an dieser Stelle ist  $p \approx 0,065$ ), liegt an der bei kurzer Einschaltzeit  $x$  möglichen, höheren Einschalthäufigkeit (= Übertragerfrequenz  $f$ ).

Für die Entwicklung von Hochspannungserzeugern für kleine Leistungen und mit hohem Wirkungsgrad, wie sie etwa für den Betrieb von batteriebetriebenen Geiger-Müller-Zählrohren benötigt werden, ergeben sich folgende Folgerungen:

1. Die Daten (L, R) der Primärseite des verwendeten Übertragers müssen vor der Auslegung genau bekannt sein
2. Die Einschaltzeit sollte zur Erzielung eines hohen Wirkungsgrades klein sein gegenüber der Zeitkonstante der Primärseite des Übertragers (z.B.  $t_1 \approx 0,1 \cdot \tau$  bzw.  $x \approx 0,1$  oder noch kleiner)
3. Die Ansteuerung muss mit dieser Einschaltzeit zuverlässig, konstant, und damit fremdgesteuert erfolgen (d.h. nicht aus dem Übertragerindividuum abgeleitet)
4. Unter diesen Bedingungen ist keine Strombegrenzung oder Stromüberwachung des Primärstroms erforderlich
5. Auch die Größe der je Einschaltzeit übertragenen Energiepakete ist genau berechenbar
6. Damit kann der Ladekondensator auf der Sekundärseite vorab so berechnet und bestimmt werden, dass hier keine unzulässig hohen Spannungszunahmen je Strom-Abschaltvorgang auftreten (Kleinhalten des Rippels (Brummspannung) auf der Hochspannungsseite)
7. Ebenso kann die Größe des zur Aufrechterhaltung der Betriebsspannung während der Einschaltzeit erforderlichen Stützkondensators genau vorab berechnet werden.