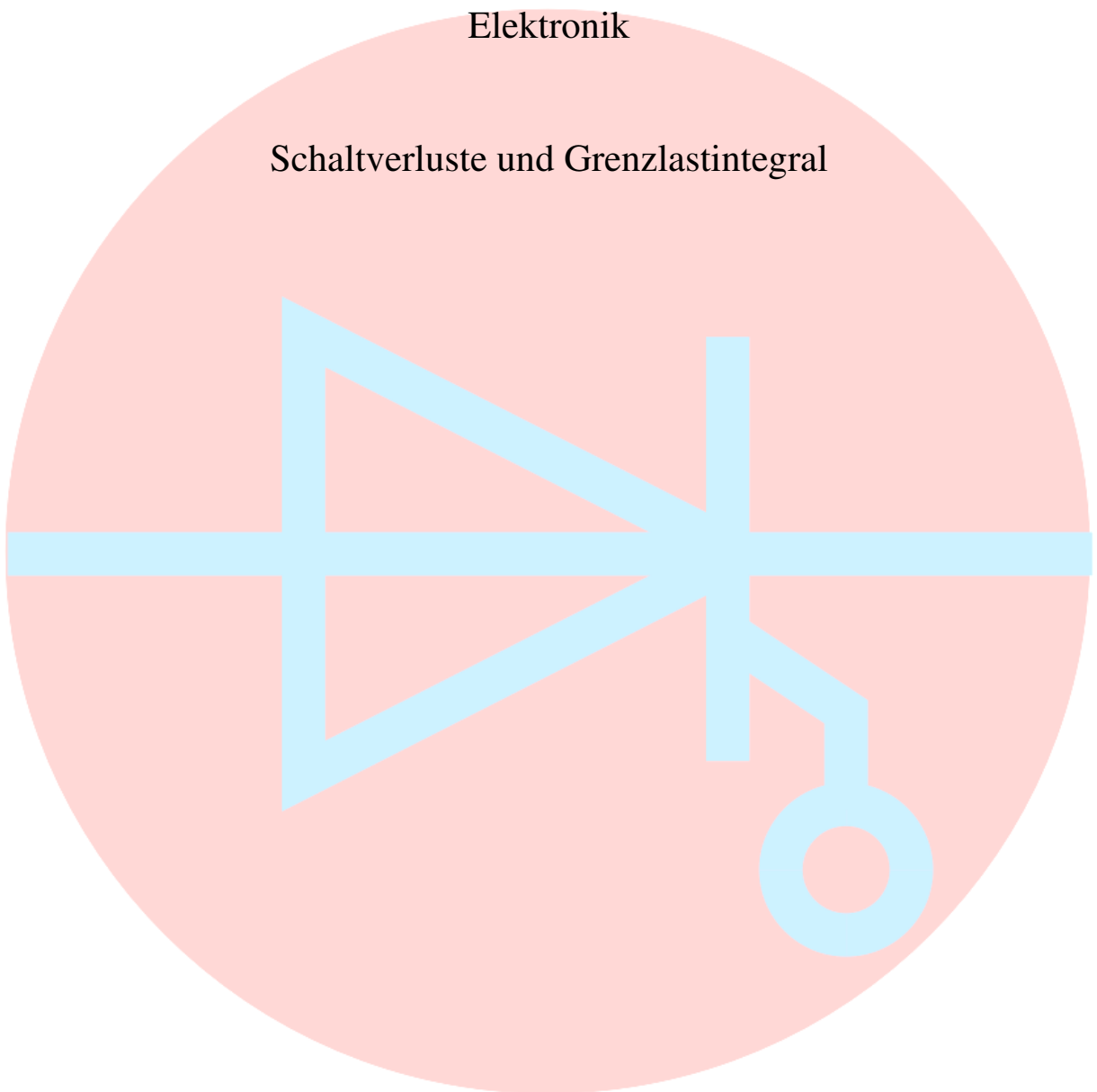


Skript für die Vorlesung

Elektronik

Schaltverluste und Grenzlastintegral



Ein- und Ausschaltverluste

Der Einschaltvorgang eines Halbleiterbauelements vollzieht sich aufgrund der begrenzten Diffusionsgeschwindigkeit der Ladungsträger nicht instantan, sondern über eine endliche Zeitspanne (1ns bis 1µs). Das Diagramm in *Abb.1* zeigt anhand des Schaltverhaltens eines Thyristors, das Abfallen der Vorwärts-Sperrspannung U_D als Funktion der Zeit t und parallel dazu den gleichzeitigen Anstieg des Durchlassstroms I_D . Das Produkt aus den beiden Größen stellt die zugehörige *Verlustleistung* dar.

Nach Anlegen des Steuerimpulses an die Gateelektrode ändert sich die Spannung U_D nur wenig. Die Zeit, bis sie auf 90% ihres Anfangswertes gefallen ist, wird *Zündverzugszeit* t_{gd} genannt (bei anderen Halbleiterbauelementen, wie dem bipolaren Transistor wird sie Verzögerungszeit t_d oder einfach Delay genannt). In Abhängigkeit von der Impedanz des Lastkreises steigt der Durchlassstrom entsprechend steil an.

Die Zeit, in der die Vorwärts-Sperrspannung U_D auf 10% abfällt, wird als *Durchschaltzeit* t_{gr} bezeichnet (bei Transistoren spricht man von der Anstiegszeit t_r des Kollektorstromes). Der Stromanstieg erreicht währenddessen seinen Maximalwert. An die Durchschaltzeit schließt sich die *Zündausbreitungszeit* t_{gs} an. Sie erstreckt sich bis zu dem Zeitpunkt, an dem der Thyristor seine minimale Durchlassspannung (1.5V bis 3V) erreicht.

Im Moment des Einschaltens treten in Halbleitern hohe Verluste auf. Sie sind bedingt durch die noch ausstehende Vorwärts-Sperrspannung und den hohen Stromanstieg beim Einschalten. Die Einschaltverluste sind eine Funktion der Zeit und haben in der Regel ein *lokales Maximum*.

$$\dot{W}(t) = U_D(t)I_D(t). \quad (1)$$

Aufgrund der ausgeprägten Dynamik der beiden elektrischen Größen U_D und I_D , impliziert der Einschaltvorgang Verluste, die bei der Auslegung einer Schaltung und der Dimensionierung der aktiven Bauelemente von Bedeutung sind.

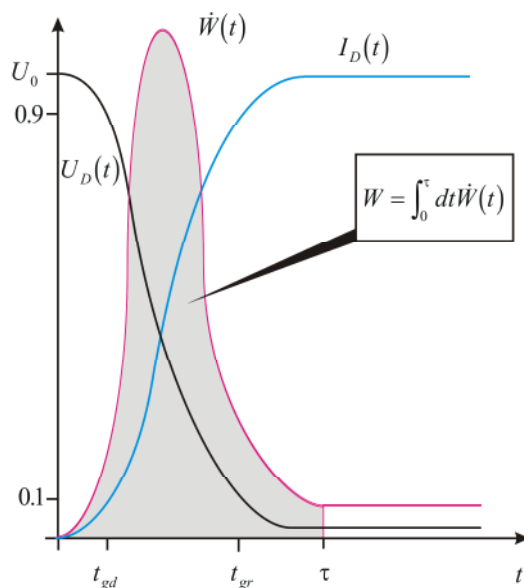


Abb.1: Darstellung des Einschaltvorgangs bei einem Halbleiter mit Einschaltzeit τ . Die Durchlassspannung ist Schwarz, der Strom ist blau und die resultierende Verlustleistung ist rot dargestellt.

Wie in *Abb.1* zu erkennen ist, ergeben der Stromanstieg und die noch ausstehende Durchlassspannung bei ihrer Multiplikation eine Verlustleistung, die während der Durchschaltzeit maximal wird. Nach dem Einschaltvorgang breitet sich die Leitfähigkeit des Halbleiterkristalls vom Steueranschluss her aus. Da zunächst nur ein kleiner Bereich in unmittelbarer Umgebung der Steuerelektrode stromtragfähig ist, wird die Verlustleistung lediglich in einem sehr kleinflächigen Teil des Halbleiterkristalls umgesetzt und kann dort das Bauelement beschädigen. Aus diesem Grund ist es erforderlich, die Stromanstiegsrate unterhalb der im Datenblatt angegebenen *kritischen Stromsteilheit* $(dI/dt)_{cr}$ zu halten. Dies ist vor allen Dingen bei Leistungsimpulsanwendungen von Bedeutung, wo oft eine hohe Stromanstiegsrate gewünscht ist und die zugehörigen Bauelemente bis an ihre Leistungsgrenze ausgereizt werden.

Sowohl der Abfall der Vorwärts-Sperrspannung als auch der Anstieg des Durchlassstromes lassen sich in guter Näherung durch analytische Funktionen approximieren.

Für die Vorwärts-Sperrspannung gilt:

$$U(t) = U_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_0}\right). \quad (2)$$

Für den Durchlassstrom gilt:

$$I(t) = \left(\frac{dI}{dt}\right)t. \quad (3)$$

Die Verlustleistung ist gegeben durch das Produkt aus Vorwärts-Sperrspannung und Durchlassstrom, mit:

$$\dot{W}_{ein}(t) = U_0 \left(\frac{dI}{dt}\right)t \exp\left(-\frac{t}{\tau_0}\right). \quad (4)$$

Integration über die Zeitachse ergibt die im Halbleiterkristall während des Einschaltvorgangs dissipierte Gesamtenergie:

$$\begin{aligned} W_{ein} &= \int_0^{+\infty} dt \dot{W}_{ein}(t) \\ &= U_0 \left(\frac{dI}{dt}\right) \int_0^{+\infty} dt t \exp\left(-\frac{t}{\tau_0}\right) \\ &= U_0 \left(\frac{dI}{dt}\right) \int_0^{+\infty} dt \frac{d}{dt} \left\{ -\tau_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_0}\right) \right\} \\ &= U_0 \left(\frac{dI}{dt}\right) \tau_0 \int_0^{+\infty} dt \exp\left(-\frac{t}{\tau_0}\right) \\ &= -U_0 \left(\frac{dI}{dt}\right) \tau_0^2 \exp\left(-\frac{t}{\tau_0}\right) \Big|_0^{+\infty} \\ &= U_0 \left(\frac{dI}{dt}\right) \tau_0^2 \end{aligned}$$

Hierbei ist τ_0 die Zeit, bis die Vorwärts-Sperrspannung auf $1/e$ ihres ursprünglichen Wertes abgefallen ist. Für gewöhnlich ist τ_0 nicht in Datenblättern angegeben und muss daher bei Bedarf experimentell ermittelt werden. Zudem ist τ_0 vom Gatestrom und dessen Anstiegsrate abhängig.

Wichtig für das schnelle Durchsteuern ist die steile Ansteuerung der Gateelektrode. Hierdurch werden möglichst viele Ladungsträger innerhalb kürzester Zeit in den Halbleiterkristall getragen und ermöglichen dadurch eine Ausreizung der maximalen Anstiegsrate.

Die beim Einschalten im Halbleiter dissipierte Energie lässt sich in guter Näherung durch die Vorwärts-Sperrspannung U_0 und den Stromanstieg (dI/dt) ausdrücken:

$$W_{ein} = U_0 \left(\frac{dI}{dt} \right) \tau_0^2. \quad (5)$$

Hierbei ist τ_0 die Zeitspanne bis die Vorwärts-Sperrspannung U_0 auf $1/e$ ihres ursprünglichen Wertes abgefallen ist.

Über die kritische Stromsteilheit lassen sich dann die maximal zulässigen Einschaltverluste W ermitteln. Eine solche Vorgehensweise ist dann angebracht, wenn ein Thyristor für Anwendungen eingesetzt werden soll, bei denen die Stromsteilheit über den im Datenblatt angegebenen Maximalwert liegt. Es kann dann experimentell ermittelt werden, wie sich eine steilere Ansteuerung der Gateelektrode mit höheren Impulsströmen auf die Zeitkonstante τ_0 und somit auf die Durchschaltzeit t_{gr} auswirkt. Lässt sich die Durchschaltzeit durch solche Maßnahmen verringern, dann kann die Stromsteilheit entsprechend gesteigert werden. Wichtig ist, dass der kritische Wert für die im Halbleiterkristall während des Einschaltvorgangs dissipierte Energie

$$W_{ein} = U_0 \left(\frac{dI}{dt} \right) \tau_0^2,$$

nicht überschritten wird.

Vorlesungsversuch: Für die Vorlesung wurde ein Versuch mit einem Thyristor vom Typ SKT551/16E vorbereitet. Es sollen die Einschaltverluste bei maximalen Parametern ermittelt werden. In *Abb.2* ist die Schaltung zu sehen.

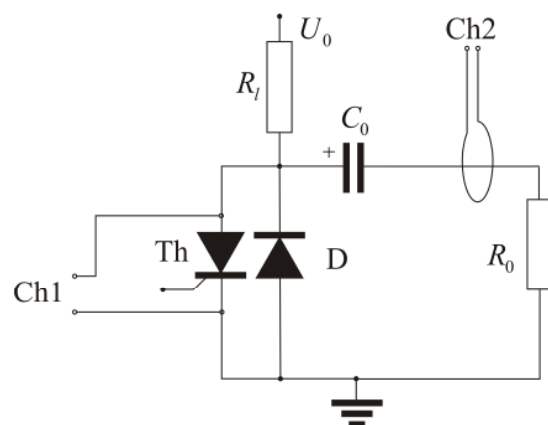


Abb.2: Schaltungsaufbau zur Messung der Einschaltverluste.

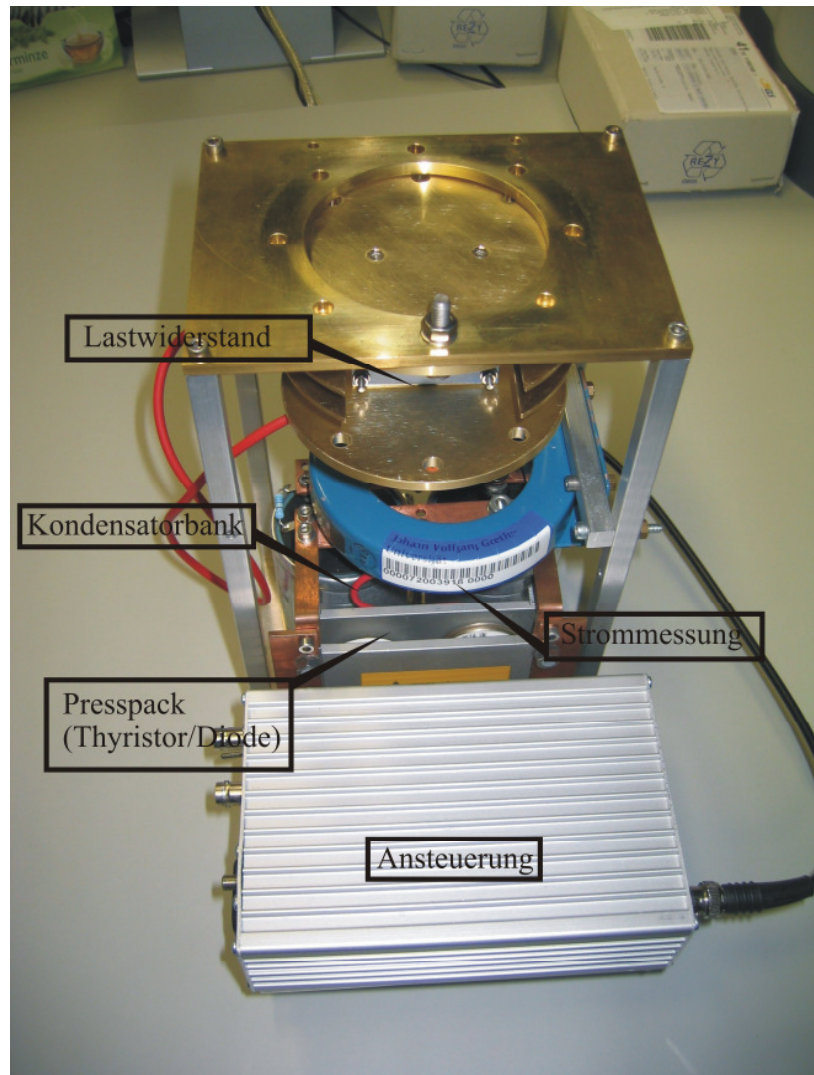


Abb.3: Versuchsaufbau zur Messung der Einschaltverluste eines Leistungsthyristors vom Typ SKT551/16E.

Die Spannung am Leistungsthyristor wird direkt zwischen der Anode und der Kathode gemessen. Für die Strommessung wird eine Rogowski-Spule verwendet. In *Abb.4* und *Abb.5* sind die aufgenommenen Messkurven zu sehen. Die Ladespannung der Kondensatoren betrug 400V bzw. 600V.

Bei $t = -1\mu\text{s}$ erfolgte die Gatetriggerung über einen Stromimpuls von ca. 2A mit einer Steilheit von 100ns. Gut erkennbar in *Abb.4* ist die Zündverzugszeit, die mit $t_{gd} = 700\text{ns}$ angegeben werden kann. Die Spannung am Thyristor fällt danach in guter Näherung exponentiell ab, während gleichzeitig der Strom ansteigt. Der Stromanstieg ist aufgrund des relativ hohen Widerstands moderat. Die aus Spannungsabfall und gleichzeitigem Stromanstieg resultierende Verlustleistung ist als rote Kurve in *Abb.4* und *Abb.5* zu sehen. Die Messung erfolgte bei einer Ladespannung von 400V.

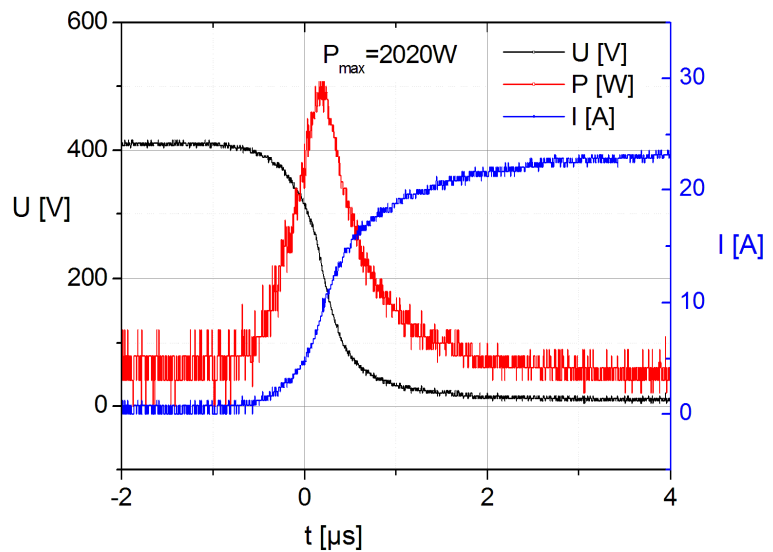


Abb.4: Messung der Einschaltverluste bei einer Kondensatorspannung von 400V.

Der Kurvenverlauf der Verlustleistung lässt sich in guter Näherung durch (4) beschreiben.

In Abb. 5 ist der Kurvenverlauf für eine Ladespannung von 600V gezeigt.

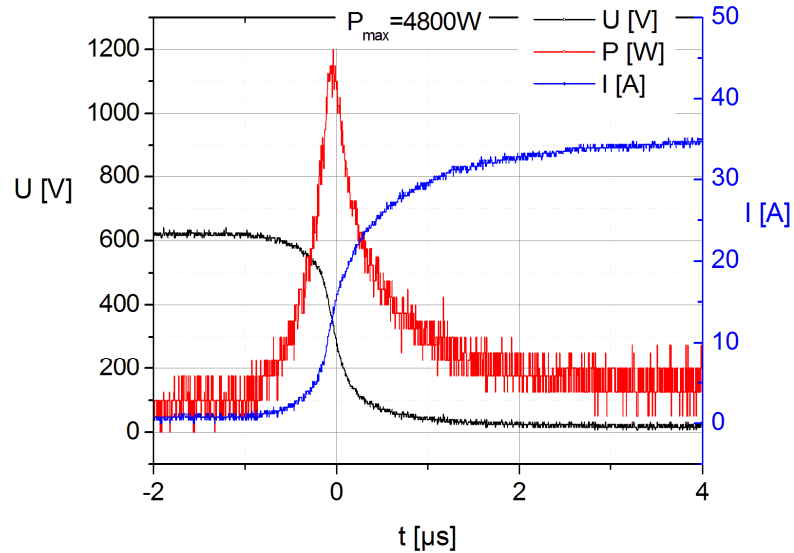


Abb.5: Messung der Einschaltverluste bei einer Kondensatorspannung von 600V.

Deutlich erkennbar ist der signifikante Anstieg der Verlustleistung bis auf 4800W.

Analog zu dem Entstehungsmechanismus von Einschaltverlusten kommt es auch beim Abschalten von Halbleiterbausteinen zu Verlusten, die bei der Auslegung von Schaltungen und Bauelementen beachtet werden müssen.

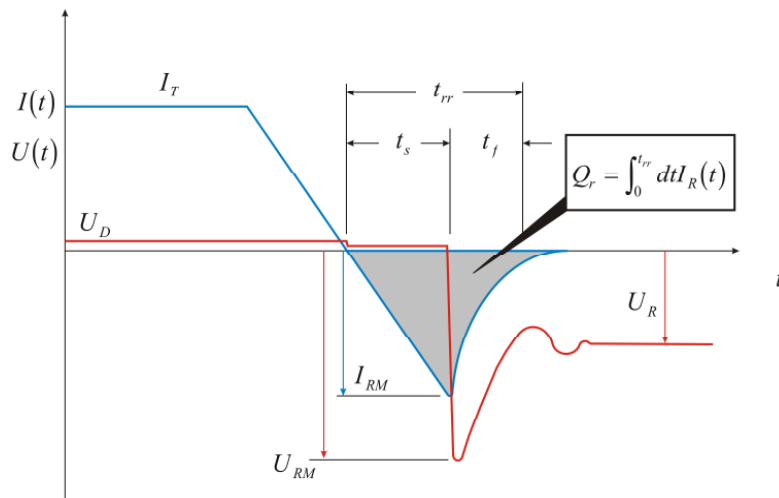


Abb.6: Ausschaltverhalten einer Diode bzw. eines Thyristors.

Sowohl Dioden als auch Thyristoren sperren nicht unmittelbar beim Nulldurchgang des Stroms, sondern leiten den Strom zunächst in negative Richtung weiter, bis der PN-Übergang von Ladungsträgern frei geräumt worden ist und die Sperrspannung übernommen werden kann. Dieses Phänomen wird als Sperrträchtigkeit bezeichnet. Die Sperrverzögerungszeit von Thyristoren und Dioden liegt im Bereich von $8\mu\text{s}$ bis $300\mu\text{s}$. Schnelle Dioden erreichen auch Verzögerungszeiten von weniger als 100ns .

In Abb.6 ist der Sachverhalt mit den zugehörigen Bezeichnungen dargestellt. Beim Anlegen der Sperrspannung fällt der Strom linear ab und erreicht nach dem Nulldurchgang ein lokales Maximum, das in Datenblättern als **Rückstromspitze** I_{RM} bezeichnet wird. Integration des Stromes über die Zeit ergibt eine Ladung Q . Sie fließt nach dem Nulldurchgang des in Rückwärtsrichtung der Diode/des Thyristors ab, bis der Sperrstrom seinen stationären Wert erreicht.

Während des Ausschaltens fließt der Strom kurz in Rückwärtsrichtung weiter. Innerhalb dieser Zeit wird die **Sperrverzögerungsladung** Q_r abgebaut.

Die Zeit die vergeht, bis diese Sperrverzögerungsladung Q_r abgeflossen ist, wird als **Sperrverzögerungszeit** t_{rr} bezeichnet und im zugehörigen Datenblatt angegeben. Analog zum Einschaltvorgang erzeugt der steile Anstieg der Sperrspannung mit dem Rückstrom I_{RM} eine Ausschaltverlustleistung.

Während des Ausschaltens treten bei Dioden und Thyristoren relativ hohe Verluste auf. Der Abbau der Sperrverzögerungsladung führt zu einem kurzzeitig hohen Sperrstrom, der mit der ausstehenden Sperrspannung eine Verlustleistung bedingt:

$$\dot{W}_{aus}(t) = U_R(t) I_R(t). \quad (6)$$

Die Kenntnis der Ein- und Ausschaltverluste ist wichtig bei der Auslegung von Schaltungen, bei denen eine periodischen Wechselspannung erzeugt oder verstärkt werden soll. Bei sehr

hohen Schaltfrequenzen können die Schaltverluste über den eigentlichen Durchlassverlusten liegen, was bei der Auswahl der Bauelemente und der Wärmeabfuhr beachtet werden muss.

Das Grenzlastintegral

Bei Halbleitern wird in den zugehörigen Datenblättern die höchste zulässige Impulsbelastung in Form des so genannten *Grenzlastintegrals* angegeben. In der Regel bezieht sich diese Größe auf eine Sinushalbwellen mit einer Dauer von 10ms, was einer halben Periode von 50Hz entspricht. Das Grenzlastintegral hat die Dimension [A²s] und ist ein Maß für die Wärmeaufnahmefähigkeit des Halbleiterkristalls bei Überstromspitzen, ohne dass es zu einer Beeinträchtigung der Funktion kommt. Ein Überschreiten des im Datenblatt angegebenen Maximalwertes für das Grenzlastintegral kann zu einer Zerstörung des Bauelements führen.

Definition: Grenzlastintegral.

$$\Lambda := \int_0^{\tau} dt |I(t)|^2 . \quad (7)$$

Eine Multiplikation des Grenzlastintegrals mit dem Durchlasswiderstand des Halbleiters r_T ergibt die dissipierte Wärmemenge Q_{diss} .

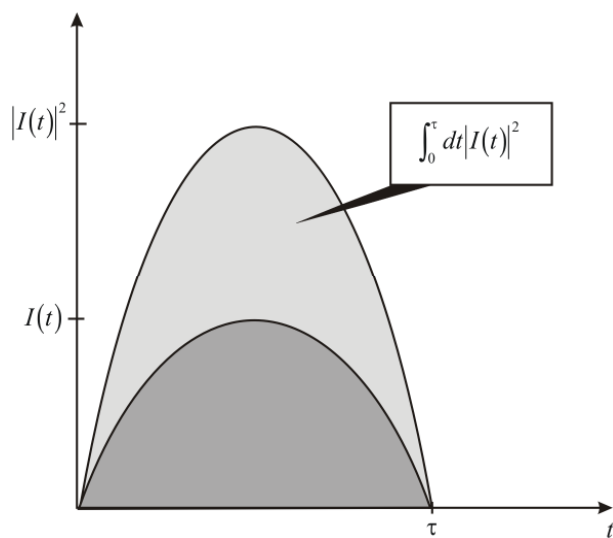


Abb.7: Zum Grenzlastintegral einer sinusförmigen Halbwellen.

Die Stromstärke als Funktion der Zeit in Abb.7 ist gegeben durch:

$$I(t) = I_0 \sin(\omega t) \quad , \quad \text{mit } t \in \left[0, \frac{\pi}{\omega} \right] . \quad (8)$$

Für das Grenzlastintegral ergibt sich:

$$\begin{aligned}
 \Lambda &= \int_0^\tau dt |I(t)|^2 \\
 &= I_0^2 \int_0^{\frac{\pi}{\omega}} dt \sin^2(\omega t) \\
 &= I_0^2 \int_0^{\frac{\pi}{\omega}} dt \sin(\omega t) \frac{d}{dt} \left\{ -\frac{1}{\omega} \cos(\omega t) \right\} \\
 &= I_0^2 \int_0^{\frac{\pi}{\omega}} dt \cos^2(\omega t) \\
 &= I_0^2 \int_0^{\frac{\pi}{\omega}} dt [1 - \sin^2(\omega t)] \\
 &= \frac{I_0^2}{2} \frac{\pi}{\omega}
 \end{aligned}$$

Ist τ die Periodendauer einer vollen Schwingung, dann gilt:

Grenzlastintegral einer halben Sinusschwingung:

$$\Lambda = \frac{\tau}{2} I_0^2 = \tau I_{eff}^2 \quad (9)$$

Aufgrund der Trägheit der Wärmeübertragung ist das Grenzlastintegral keine zeitlich konstante Größe. So fällt der höchstzulässige Wert für Belastungen im μ s-Bereich merklich ab, zumal sich die durch ohmsche Verluste entstandene Wärmemenge bei derart kurzen Zeitspannen auf dem Halbleiterkristall konzentriert, ohne dass die kühlende Wirkung des Gehäuses zum tragen kommt.

Das Grenzlastintegral spielt eine große Rolle, wenn es darum geht, für eine gegebene Impulsform den maximal zulässigen Spitzenstrom zu bestimmen, mit dem das zum Einsatz kommende Bauelement belastet werden darf. Der im Datenblatt angegebene, maximal zulässige Wert darf auf keinen Fall überschritten werden, da es ansonsten zu einer Zerstörung des Bauteils kommen kann.

Beispielaufgabe: Im Datenblatt für die Diode 10ETF ist das Grenzlastintegral mit $\Lambda=112.5A^2s$ angegeben. Es soll der maximale Spitzenimpulsstrom für eine 10ms Halbwelle ermittelt werden. Nach (9) gilt:

$$\Lambda = \frac{\tau}{2} I_0^2$$

Die Periodendauer ist $\tau=20ms$. Umformen nach I_0 ergibt:

$$\begin{aligned}
 I_0 &= \sqrt{\frac{\Lambda}{\tau}} \\
 &= \sqrt{\frac{2 \cdot 112.5 A^2 s}{0.02 s}} \\
 &= 106,1 A
 \end{aligned}$$

Die Diode, die eigentlich für einen maximalen Betriebsstrom von 10A ausgelegt ist, kann demnach kurzzeitig mit mehr als der 10-fachen

Stromstärke belastet werden. Für noch kürzere Zeitspannen kann der Strom sogar noch höher liegen.