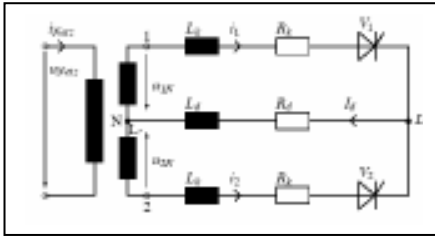


**M2 – Schaltung und B2 - Schaltung mit großer Glättungsinduktivität**



**M2U (OHNE Kommutierung)**

$$U_{di} = 0,9 \cdot U_{1N} = 0,45 \cdot U_{12}$$

**M2U (MIT Kommutierung)**

$$\text{Überlappungswinkel } u: \cos u = 1 - \frac{I_d \cdot L_K \cdot \omega}{\sqrt{2} \cdot U_{1N}}$$

$$\text{Spannungen während Kommutierung: } U_d = \frac{1}{2} \cdot (U_{1N} + U_{2N})$$

Induktive Gleichspannungsänderung:  $D_X = 2 \cdot f \cdot I_d \cdot L_K$  (unabhängig von  $\alpha$ !!!) ;  $d_X = \frac{D_X}{U_{di}}$

$$\rightarrow U_d = U_{di} - D_X ; U_d = U_{di}(1 - d_X)$$

**M2C (für  $\alpha > 90^\circ$  wird  $U_{di}$  negativ => Leistungsumkehr, d.h. Wechselrichterbetrieb)**

$$U_{di\alpha} = U_{di} \cdot \cos \alpha ; D_X = 2 \cdot f \cdot I_d \cdot L_K \rightarrow 2 \cdot d_X = \cos \alpha - \cos(\alpha + u)$$

$$U_{d\alpha} = U_{di} \cdot (\cos \alpha - d_X)$$

**Leistungen: M2 / M3 / B2 B6**

	Einphasiges Netz	Dreiphasiges Netz
Scheinleistung	$S = UI$	$S = \sqrt{3}UI$
Grundschiebung-	$S_1 = UI_1$	$S_1 = \sqrt{3}UI_1$
Scheinleistung	$S_1 = U_{di}I_d$	$S_1 = U_{di}I_d$
Wirkleistung	$P = UI_1 \cos \varphi$	$P = \sqrt{3}UI_1 \cos \varphi$
(ohne Verluste)	$P = U_{di}I_d (\cos \alpha - d_x)$	$P = U_{di}I_d (\cos \alpha - d_x)$
Grundschiebung-	$Q_1 = UI_1 \sin \varphi$	$Q_1 = \sqrt{3}UI_1 \sin \varphi$
blindleistung		
Verschiebung-	$Q_{1\alpha} = U_{di}I_d \sin \alpha$	$Q_{1\alpha} = U_{di}I_d \sin \alpha$
blindleistung		
Kommutierungs-	$Q_{1u} = \sqrt{S_1^2 - P^2} - Q_{1\alpha}$	$Q_{1u} = \sqrt{S_1^2 - P^2} - Q_{1\alpha}$
blindleistung		
Verzerrungs-	$D = U \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}$	$D = \sqrt{3}U \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}$
blindleistung		
Blindleistung	$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$	$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$

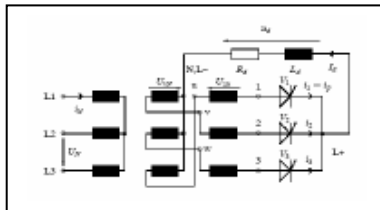
$S = \sqrt{S_1^2 + D^2}$  Leistungsfaktor

$$S_1 = \sqrt{P^2 + Q_1^2} \quad \lambda = \frac{P}{S}$$

$$Q_1 = Q_{1\alpha} + Q_{1u}$$

Sonderfall  $D_X = 0$

$$\Rightarrow P = U_{di\alpha} \cdot I_d = U_{di} \cdot \cos \alpha \cdot I_d$$



**M3 – Schaltung mit großer Glättungsinduktivität**

$$U_{di\alpha} = \frac{p}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{2} \cdot U_{1N} \cdot 2 \cdot \sin \frac{\pi}{p} \cdot \cos \alpha = U_{di} \cdot \cos \alpha = 1,17 \cdot U_{1N} \cdot \cos \alpha = 0,675 \cdot U_{12} \cdot \cos \alpha$$

$$U_{d\alpha} = U_{di\alpha} - D_X \text{ mit } D_X = p \cdot f \cdot I_d \cdot L_K \text{ (hier: Pulszahl } p = 3)$$

**Kommutierung** => 2 Ventile leiten => Die Gleichspannung folgt unabhängig vom Steuerwinkel dem Mittelwert der beiden an der Kommutierung beteiligten Netzspannungen  $U_d = \frac{1}{2} \cdot (U_1 + U_2)$

**B6 – Schaltung mit großer Glättungsinduktivität**

$$\text{Mittelwert der ideellen Leerlaufgleichspannung: } U_{di} = 1,35 \cdot U_{\text{Außenleiter}} ; I_d = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \cdot I_{Nem}$$

$$\text{max. zulässiger Steuerwinkel: } 2 \cdot d_x = \cos_{\alpha \max} - \cos(\pi - \omega \cdot t_x) \text{ (Klammerausdruck: Bogenmaß)!}$$

**B2 – Schaltung mit großem Glättungskondensator**

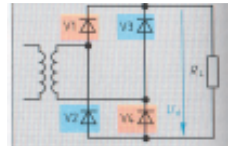
Der Kondensator wird dabei auf  $U_C = U_{Netz} \cdot \sqrt{2}$  aufgeladen

$$\text{Kondensatorstrom: } I_C = \omega \cdot C \cdot \sqrt{2} \cdot U_{Netz} \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

**Kommutierungsinduktivität des Transformators**

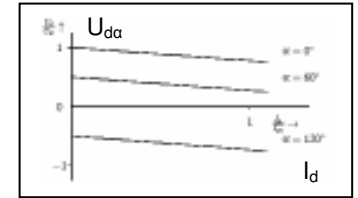
$$\text{Kommutierungsinduktivität: } L_K = L_\sigma = \frac{u_K \cdot U_{Nem}}{\omega \cdot I_{Nem}} \text{ bei DS } L_\sigma = \frac{u_K \cdot U_{Nem}}{\sqrt{3} \cdot \omega \cdot I_{Nem}}$$

$$\text{Nennwertbez. Kurzschlussppg.: } u_K = \frac{U_K}{U_{Nem}} = \frac{\omega \cdot L_\sigma \cdot I_{Nem}}{U_{Nem}}$$



**Belastungskennlinien:**

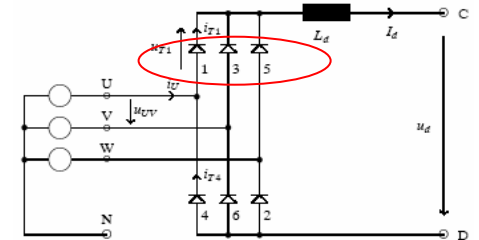
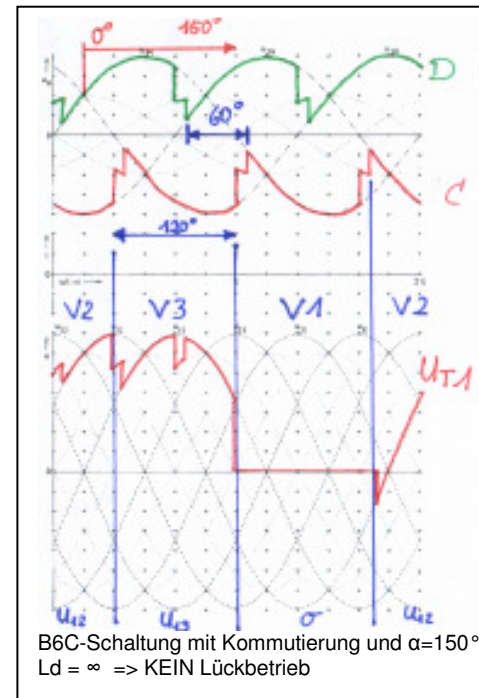
$$U_{d\alpha} = U_{di} \cdot \cos \alpha - D_X - D_R - D_C = U_{di\alpha} - D_X - D_R - D_C$$



**Eigenschaften von Gleichrichterschaltungen bei konstantem Ausgangsstrom**

Bezeichnung der Schaltung	M2	M3	B2	B6
Transformatoren	li0	Dz0 Yz5 Dz6 Yz11	li0	Dd0 Yy0 Yd5 Dy5
Pulszahl	2	3	2	6
$U_{di}/U_{Nem}$	0,45	0,675	0,9	1,35
Zuleitungsstrom $I_1/I_d$	0,707	0,577	1	0,816
Idelle netzseitige Scheinleistung $\frac{S_{1i}}{U_{di}I_d}$	1,11	1,21	1,11	1,05
Bauleistung des Trafos $\frac{S_{1i}}{U_{di}I_d}$	1,34	1,46	1,11	1,05
$d_{st}/u_{st}$	0,707	0,866	0,707	0,5

$$\frac{U_{di}}{U_{Nem}} = \frac{U_{di}}{U_{12}}$$



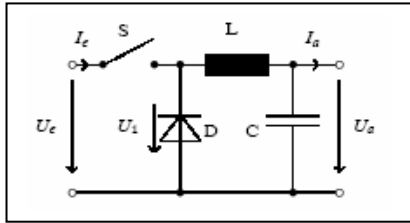
**Konstruieren der Thyristorspannung:**

- V1 leitet =>  $U(T1)=0$
- V2 leitet =>  $U(T1)=U_1-U_2=U_{12}$
- V3 leitet =>  $U(T1)=U_1-U_3=U_{13}$

**Konstruieren von  $U_d$ :**

Für Steuerwinkel größer  $90^\circ$  wird  $U_d$  negativ !!!

### Drosselwandler – Abwärts-Wandler:

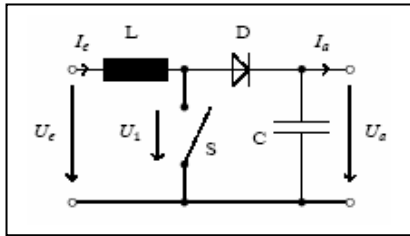


$$U_a = U_e \cdot \frac{t_{ein}}{t_{ein} + t_{aus}} = U_e \cdot \frac{t_{ein}}{T} = U_e \cdot t_{ein} \cdot f$$

$$I_{a_{min}} = \frac{1}{2} \cdot \Delta L = \frac{T}{2 \cdot L} \cdot U_a \cdot \left(1 - \frac{U_a}{U_e}\right)$$

Bei offenem Schalter fließt der Strom durch die Drossel (Energiespeicher) weiter.

### Drosselwandler – Aufwärts-Wandler:

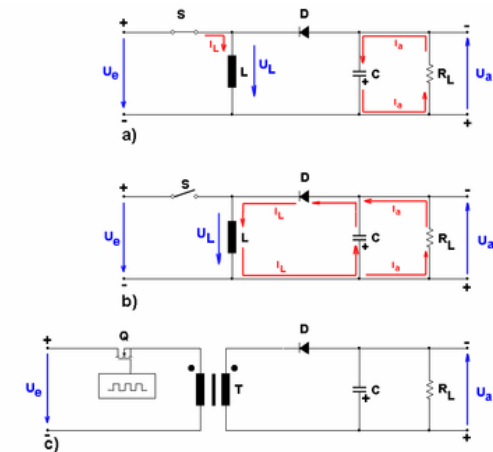


$$U_a = U_e \cdot \frac{t_{ein} + t_{aus}}{t_{aus}} = U_e \cdot \frac{T}{t_{aus}}$$

$$I_{a_{min}} = \frac{T \cdot U_e^2}{2 \cdot L \cdot U_a^2} \cdot (U_a - U_e)$$

Die Ausgangsspannung kann größer als die Eingangsspannung werden.

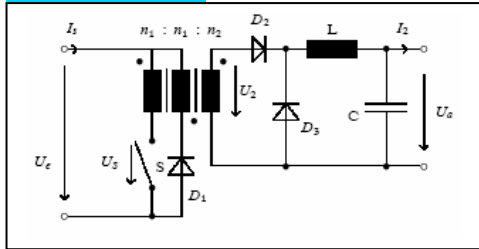
### Sperrwandler:



$$U_a = \frac{t_{ein}}{t_{aus}} \cdot U_e \cdot \frac{N_2}{N_1}$$

Transformator als Energiespeicher, der bei geöffnetem Schalter die Energie an den Kondensator im Sekundärkreislauf abgibt.

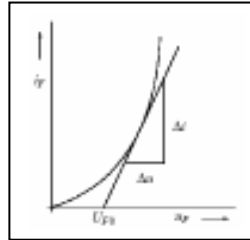
### Durchflusswandler:



$$U_a = \frac{t_{ein}}{T} \cdot U_e \cdot \frac{N_2}{N_1}$$

Max. Schalterspannung:  $U_{S_{max}} = 2 \cdot U_e$   
Während der Leitphase wird Energie von Primär nach Sekundär übertragen und der Kondensator geladen. Während der Sperrphase zieht die Speicherdrossel ihren Strom durch die Diode D3. N1 dient der Entmagnetisierung des Trafokerns während der Sperrphase.

### Verlustleistung von Halbleiterbauelementen:



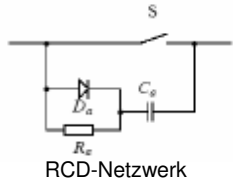
differentieller Widerstand:  $r_F = \frac{\Delta u}{\Delta i} \rightarrow u_F = U_0 + r_F \cdot i_F$

Diode:  $\bar{P} = U_0 \cdot I_{AV} + r_F \cdot I_{F_{RMS}}^2$

(Durchlaßverluste;  $I_{AV}$ : Mittelwert;  $I_{RMS}$ : Effektivwert)

MOSFET:  $P_V = R_{DS_{ein}} \cdot I_D^2$  (Durchlaßverluste)

$P_S = f \cdot W_S = f \cdot (W_{on} + W_{off})$  (Schaltverluste)

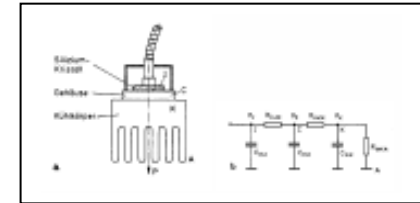


### Entlastungsnetzwerke:

1. Kondensator parallel zum Schalter => lange Anschaltzeit, hoher Kondensatorstrom, hohe Einschaltverluste
2. RC-Glied (TSE-Schaltung) parallel zum Schalter =>  $W = 0,5 \cdot C \cdot U^2$  wird jedes Mal beim Ausschalten in Wärme umgesetzt -> Hohe Verluste im Widerstand
3. RCD-Schaltung parallel zum Schalter => niedrige mittlere Leistung => niedrige mittlere Leistung, Strom durch den Schalter wird begrenzt

### Kühlung von Halbleiterbauelementen:

Elektrische Größen	Thermische Größen
U: Potential in V	T: Temperatur in K
I: Strom in A	P: Leistung in W
κ: el. Leitfähigkeit in A/(V*m)	λ: Wärmeleitfähigkeit in W/(K*m)
ε: Dielektrizitätszahl in A*s/(V*m)	c: spez. Wärmekapazität in W*s/(kg*K)
R: ohmscher Widerstand in V/A	R <sub>th</sub> : Wärmewiderstand K/W
C: Kapazität in A*s/V	C: Wärmekapazität in W*s/K



Konvektion:  $P = \alpha \cdot \Delta T$  ;  $R_{th} = \frac{1}{\alpha \cdot A}$  ; allgemein:  $R_{th} = \frac{T}{P}$

Strahlung:  $P = \alpha_{St} \cdot \Delta T \cdot A$  ;  $R_{th} = \frac{1}{\alpha_{St} \cdot A}$  ;  $\alpha_{St} = C_{12} \cdot \frac{(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4}{T_1 \cdot T_2}$

Wärmewiderstand u. Kühlkörpervolumen:  $R_{th} = \frac{l}{\lambda \cdot A}$  ;  $V = \frac{W}{\Delta T \cdot c \cdot \rho}$

### Allgemeine Fragen:

**Frequenzspektrum** => Bei Drehstromsystemen ist die 3. Harmonische NICHT enthalten  $v = (k \cdot p) \pm 1$

Kapazitive Glättung => Starke Netzstromoberschwingungen (Hohe Amplitude), daher besser induktive Glättung (Amplituden der Oberschwingungen sind deutlich kleiner als bei kapazitiver Glättung)

**Max. Schaltfrequenz** von Schaltnetzteilen wird begrenzt durch: Schaltverluste, Verluste in den magnetischen Komponenten, Skineffekt, Schaltzeiten ...

### EMV:

**Kapazitive Kopplung** => **Abhilfe**: räumliche Trennung, geerdeter Schirm

**Magnetische Kopplung** => **Abhilfe**: kleine Leiterschleifen (Verdrillen), räumliche Trennung

**Massesystem** => **Abhilfe**: 1 zentraler Massebezugspunkt, niedrige Impedanz

**Strahlung** => **Abhilfe**: Metallgehäuse, flächiger Kontakt zwischen Einzelteilen

**Leitungsgebundene Störspannungen** => Netzfilter einbauen

**Niederfrequente Störungen** -> **Stromoberschwingungen** => **Abhilfe**: PFC, Induktive Glättung

**Niederfrequente Störungen** -> **Spannungseinbrüche** => **Abhilfe**: Kommutierungsdrossel einbauen

**Frequenzumrichter** -> **Digitale Pulsweitenmodulation (Raumzeigermodulation)**