



LEISTUNGSELEKTRONIK KONDENSATOREN Projektierungsleitfaden

- UL zertifiziert • IEC 61071 konform

$$\Delta T = R_{th} \times P_{loss}$$

$$= (V_{pp})^2 \times \pi \times f_0 \times C \times \tan \delta_0$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi f \times \sqrt{L \times C_v}}$$



Die richtige Auswahl
des Leistungselektronik
Kondensators

IN WENIGEN SCHRITTEN ZUM RICHTIGEN LEISTUNGSELEKTRONIK KONDENSATOR



SPANNUNG	SCHRITT 1 SPANNUNG AM KONDENSATOR
KAPAZITÄT	SCHRITT 2 KAPAZITÄT DES KONDENSATORS
STROM	SCHRITT 3 STROMBELASTBARKEIT DES KONDENSATORS
TEMPERATUR	SCHRITT 4 LEISTUNGSVERLUSTE UND TEMPERATURANSTIEG EINES KONDENSATORS
ANWENDUNGEN	ANWENDUNGSGEBIETE FÜR LEISTUNGSELEKTRONIK KONDENSATOREN
DEFINITIONEN	DEFINITIONEN VON BEGRIFFEN AUS DEM BEREICH DER WECHSELSTROMANWENDUNGEN UND NÜTZLICHE BERECHNUNGSFORMELN





IN WENIGEN SCHRITTEN ZUM RICHTIGEN LEISTUNGSELEKTRONIK KONDENSATOR

SPANNUNG

KAPAZITÄT

1. SPANNUNG AM KONDENSATOR

(d.h. die angegebene Spannungsfestigkeit)

Bei der Auswahl eines Leistungselektronik Kondensators für Wechselstromanwendungen muss die Nennspannung des Kondensators größer sein als der Spitzenwert der Wechselspannung. Wählen Sie aus Gründen der Sicherheit und Lebensdauer immer die höhere Spannungsstufe.

Beispiel:

Spitzenspannung = 420V;
Nennspannung des Kondensators $U_N = 450V$

Bei PWM-Filteranwendungen kann die Spitzenspannung \geq der Wechselrichter-Zwischenkreisspannung sein. Bitte beachten Sie dies bei der Auswahl.

2. AUSWAHL DER KAPAZITÄT DES KONDENSATORS

Die gewünschte Kapazität muss in Abhängigkeit von der Spannung und der Anschlussart gemäß der **FRAKO** Broschüre Leistungselektronik Kondensatoren anhand der Tabellen ausgewählt werden.

Beispiel:

$U_N = 450V$; $C_{\text{gewünscht}} = 50\mu F$

Typenliste 3-Phasen-Kondensatoren mit AKD

	$U_N = 450V$ $U_{rms} = 320V$ $U_s = 970V$									
	Artikel-Nr.	Typ	Kapazität in μF	I_{max} in A	\hat{I} in kA	R_{th} in K/W	R_s in $m\Omega$	Durchmesser in mm	Höhe in mm	Gewicht in kg
320 U_{rms}	31-13000	LKT-F-020.0-3-450-BC	3*20	22	0,7	$\leq 4,2$	1,36	60	150	0,590
	31-13001	LKT-F-030.0-3-450-BC	3*30	22	1,0	$\leq 4,2$	1,10	60	150	0,590
	31-13002	LKT-F-040.0-3-450-BF	3*40	28	1,4	$\leq 3,5$	1,79	70	223	1,090
450 U_{pk}	31-13003	LKT-F-050.0-3-450-BF	3*50	28	1,7	$\leq 3,5$	1,66	70	223	1,090
450 U_{dc}	31-13004	LKT-F-075.0-3-450-BF	3*75	28	2,6	$\leq 3,5$	1,49	70	223	1,090
	31-13011	LKT-F-100.0-3-450-BJ	3*100	45	3,5	$\leq 2,9$	0,57	85	215	1,550
	31-13012	LKT-F-135.0-3-450-BK	3*135	50	4,7	$\leq 2,6$	0,80	85	278	1,900
	31-13013	LKT-F-150.0-3-450-BK	3*150	50	5,2	$\leq 2,6$	0,77	85	278	1,900



IN WENIGEN SCHRITTEN ZUM RICHTIGEN LEISTUNGSELEKTRONIK KONDENSATOR



3. AUSWAHL DER STROMBELASTBARKEIT DES KONDENSATORS

(unter Berücksichtigung des Spitzenstroms und des Effektivstroms)

Typische Berechnung für eine AC-Anwendung – ein Zahlenbeispiel:

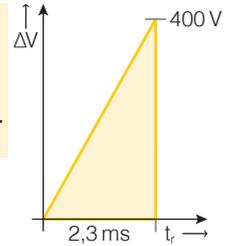
Gegebene Parameter für das Berechnungsbeispiel:

Spannung $U_{\text{Spitze-Spitze}}$ $U_{SS} = 500\text{ V}$
 Frequenz $f = 100\text{ Hz}$
 Anstiegszeit $t_r = 2,3\text{ ms}$
 Kapazität $C = 150\text{ }\mu\text{F}$

Die Steigung kann auch viel größer oder schneller sein, in diesem Fall muss der höchste Anstieg bei der Berechnung berücksichtigt werden.

Formel für eine steigende Flankensteilheit:

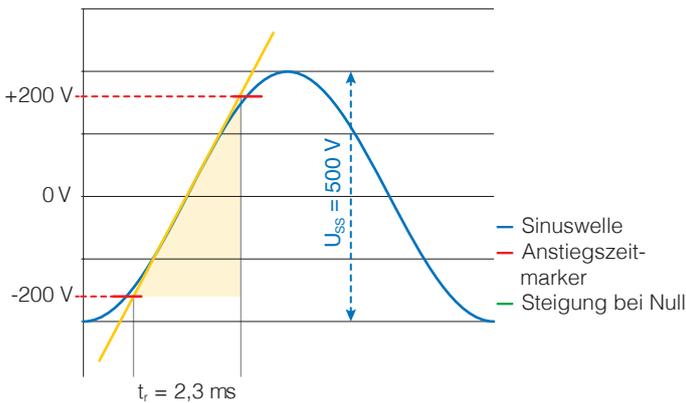
$$\frac{du}{dt} = \frac{\Delta U}{t_r} = \frac{400\text{ V}}{2,3\text{ ms}} = 173,91 \frac{\text{V}}{\text{ms}} = 0,174 \frac{\text{V}}{\mu\text{s}}$$



ΔU = Spannungsanstieg in V
 dt = Zeitintervall des Spannungsanstiegs

3.1. Berechnung der Steigung einer Spannungsflanke

Nachfolgend ein Beispiel für eine steigende Flanke mit den entsprechenden Werten.



U_{SS} = Spannung $U_{\text{Spitze-Spitze}}$

t_r = Anstiegszeit eines Wertes (in der Regel als Zeit von 10% bis 90% der Spitzenspannung)

Ermittelte Werte:

Hier ist $t_r = 2,3\text{ ms}$ (10% bis 90% der Spitzenspannung) -200V bis +200V = +400V während der Zeit von t_r

3.2. Berechnung des Spitzenstroms

Der periodisch wiederkehrende Spitzenstrom I_S ist gegeben durch

$$I_S = C * \frac{du}{dt} = 150\text{ }\mu\text{F} * \frac{0,174\text{ V}}{\mu\text{s}} = 26,09\text{ A}$$

C = Kapazität in Farad

I_S = Spitzenstrom in der Anwendung

du = Spannungserhöhung in V

dt = Schrittweite der Zeit

3.3. Berechnung des Effektivwerts des Stroms

$$I_{RMS} = I_S * \sqrt{2 * f * t_r}$$

I_{RMS} = Quadratischer Mittelwert (I_{RMS}) des Kondensatorstroms

I_S = Spitzenstrom in der Anwendung

f = Wechselstromfrequenz in Hz

t_r = Anstiegszeit in s

$$I_{RMS} = I_S * \sqrt{2 * f * t_r} = 26,09\text{ A} * \sqrt{2 * 100 * 2,3 * 10^{-3}} = 17,7\text{ A (at } f = 100\text{ Hz)}$$

Typenliste 3-Phasen-Kondensatoren mit AKD

	Artikel-Nr.	Typ	$U_N = 450\text{ V}$		$U_{rms} = 320\text{ V}$		$U_S = 970\text{ V}$		Durchmesser in mm	Höhe in mm	Gewicht in kg
			Kapazität in μF	I_{max} in A	\hat{I} in kA	R_{th} in K/W	R_S in m Ω				
320 U_{rms}	31-13000	LKT-F-020,0-3-450-BC	3*20	22	0,7	$\leq 4,2$	1,36	60	150	0,590	
	31-13001	LKT-F-030,0-3-450-BC	3*30	22	1,0	$\leq 4,2$	1,10	60	150	0,590	
	31-13002	LKT-F-040,0-3-450-BF	3*40	28	1,4	$\leq 3,5$	1,79	70	223	1,090	
450 U_{pk}	31-13003	LKT-F-050,0-3-450-BF	3*50	28	1,7	$\leq 3,5$	1,66	70	223	1,090	
450 U_{dc}	31-13004	LKT-F-075,0-3-450-BF	3*75	28	2,6	$\leq 3,5$	1,49	70	223	1,090	
	31-13011	LKT-F-100,0-3-450-BJ	3*100	45	3,5	$\leq 2,9$	0,57	85	215	1,550	
	31-13012	LKT-F-135,0-3-450-BK	3*135	50	4,7	$\leq 2,6$	0,80	85	278	1,900	
	31-13013	LKT-F-150,0-3-450-BK	3*150	50	5,2	$\leq 2,6$	0,77	85	278	1,900	



IN WENIGEN SCHRITTEN ZUM RICHTIGEN LEISTUNGSELEKTRONIK KONDENSATOR

4. LEISTUNGSVERLUSTE UND TEMPERATURANSTIEG EINES KONDENSATORS

Gesamtverlustleistung:

Die Gesamtverlustleistung (P_V) in einem Kondensator setzt sich aus den ohmschen Verlusten durch den Stromfluss und den dielektrischen Verlusten im Kondensator zusammen.

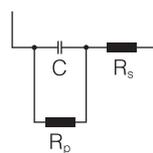
$$P_V = P_{\text{ohmsche Verluste}} + P_{\text{dielektrische Verluste}}$$

Der Verlustfaktor ist der Tangens des Verlustwinkels δ eines Kondensators und wird wie folgt berechnet:

$$\tan \delta = \frac{P}{Q}$$

Dies ist das Verhältnis zwischen dem (fiktiven) Ersatzwiderstand in Reihe mit dem Kondensator und seinem kapazitiven Blindwiderstand bei einer bestimmten Wechselspannung und Frequenz.

Ersatzschaltung



Der Tangens des Verlustwinkels eines Kondensators ($\tan \delta$) ist somit gegeben durch:

$$\tan \delta = \tan \delta_0 + 2\pi * f_0 * C * R_s + \frac{1}{2\pi * f_0 * C * R_p}$$

Der letztgenannte Term ist bei AC-Anwendungen sehr klein und kann vernachlässigt werden

- f_0 = Frequenz der AC-Komponente in der Anwendung
- C = Kapazität des Kondensators
- R_s = Effektiver ohmscher Widerstand der Leiter und des metallischen Überzugs im Kondensator (Wert auf dem Datenblatt angegeben)
- $\tan \delta_0$ = Verlustfaktor der verwendeten gewickelten dielektrischen Folie (z.B. $\tan \delta_0$ bei Polypropylene = $2 * 10^{-4}$)
- R_p = Parallelwiderstand – Stellt den Isolationswiderstand des Dielektrikums in Bezug auf den Reststrom dar (dieser Wert ist sehr klein und kann daher vernachlässigt werden)

ESR - Äquivalenter Serienwiderstand

Der äquivalente Serienwiderstand (ESR) gibt den effektiven ohmschen Widerstand an, der zwischen den Anschlüssen des Kondensators besteht. Dabei werden alle ohmschen Komponenten zusammengefasst (Zuleitungsdrähte, Übergangswiderstände und die Elektroden). ESR-Werte werden in den jeweiligen Datenblättern der einzelnen Serien nicht erwähnt. Werte für spezifische Kapazitäten können mit der folgenden Formel berechnet werden:

$$ESR = \frac{\tan \delta}{2 * \pi * f * C}$$

ESR = Äquivalenter Serienwiderstand

$\tan \delta$ = Verlustfaktor

f = Frequenz der Wechselspannungskomponente in der Anwendung

C = Nennkapazität des Kondensators

Es ist wichtig zu beachten, dass der ESR frequenzabhängig ist und nur für bestimmte Größen berechnet werden kann. R_s ist der effektive ohmsche Widerstand der Leiter und der metallischen Beschichtung im Kondensator. Es ist besser, den R_s mit den nachfolgenden Formeln zu verwenden, da er nicht frequenzabhängig ist. Der Vollständigkeit halber wird hier jedoch ESR erwähnt.

IN WENIGEN SCHRITTEN ZUM RICHTIGEN LEISTUNGSELEKTRONIK KONDENSATOR



4. LEISTUNGSVERLUSTE UND TEMPERATURANSTIEG EINES KONDENSATORS

4.1. Berechnung der Gesamtverluste (P_V) eines Kondensators

$$P_V = P_{\text{ohmsche Verluste}} + P_{\text{dielektrische Verluste}}$$

Berechnung der ohmschen Verluste:

$$P_{\text{ohmsche Verluste}} = (I_{\text{RMS}})^2 * R_s$$

In diesem Beispiel:

$$P_{\text{ohmsche Verluste}} = (I_{\text{RMS}})^2 * R_s = (17,7 \text{ A})^2 * 0,77 \text{ m}\Omega = 241 \text{ mW}$$

wobei

- $P_{\text{ohmsche Verluste}}$ = ohmsche Verluste im Kondensator
- I_{RMS} = Effektivwert des Stroms im Kondensator
- R_s = wirksamer ohmscher Widerstand der Leiter und des metallischen Überzugs im Kondensator (Wert auf dem Datenblatt angegeben)

4.2. Berechnung der dielektrischen Verluste

$$P_{\text{dielektrische Verluste}} = (U_{\text{SS}})^2 * \pi * f_0 * C_N * \tan \delta_0$$

In diesem Beispiel:

$$\begin{aligned} P_{\text{dielektrische Verluste}} &= (U_{\text{SS}})^2 * \pi * f_0 * C_N * \tan \delta_0 \\ &= (500 \text{ V})^2 * 3,141 * 100 \text{ Hz} * 150 \mu\text{F} * 2 * 10^{-4} \\ &= 2,36 \text{ W} \end{aligned}$$

wobei

- $P_{\text{dielektrische Verluste}}$ = dielektrische Verluste des Kondensator
- U_{SS} = Spitze-Spitze-Spannung in V zwischen dem höchsten und dem niedrigsten Punkt der Sinusschwingung
- f_0 = Frequenz
- C_N = Nennkapazität
- $\tan \delta_0$ = Verlustfaktor (Datenblatt); für Polypropylen $\tan \delta_0 = 2 * 10^{-4}$

4.3. Berechnung der gesamten Verlustleistung (P_V)

Gesamtverlustleistung:

$$P_V = P_{\text{ohmsche Verluste}} + P_{\text{dielektrische Verluste}}$$

In diesem Beispiel:

$$P_V = P_{\text{ohmsche Verluste}} + P_{\text{dielektrische Verluste}} = 0,241 \text{ W} + 2,36 \text{ W} = 2,601 \text{ W}$$

4.4. Berechnung des Temperaturanstiegs

Temperaturerhöhung (ÜE) gegenüber der Umgebungstemperatur (Eigenerwärmung)

$$\dot{U}T = R_{\text{th}} * P_V$$

$\dot{U}T$ = Übertemperatur in Kelvin

R_{th} = Wärmewiderstand

(auf dem Datenblatt des Kondensators)

P_V = Gesamtverlustleistung im Kondensator

In diesem Beispiel:

$$\dot{U}T = R_{\text{th}} * P_V = 2,6 \frac{\text{K}}{\text{W}} * 2,601 \text{ W} = 6,76 \text{ K}$$

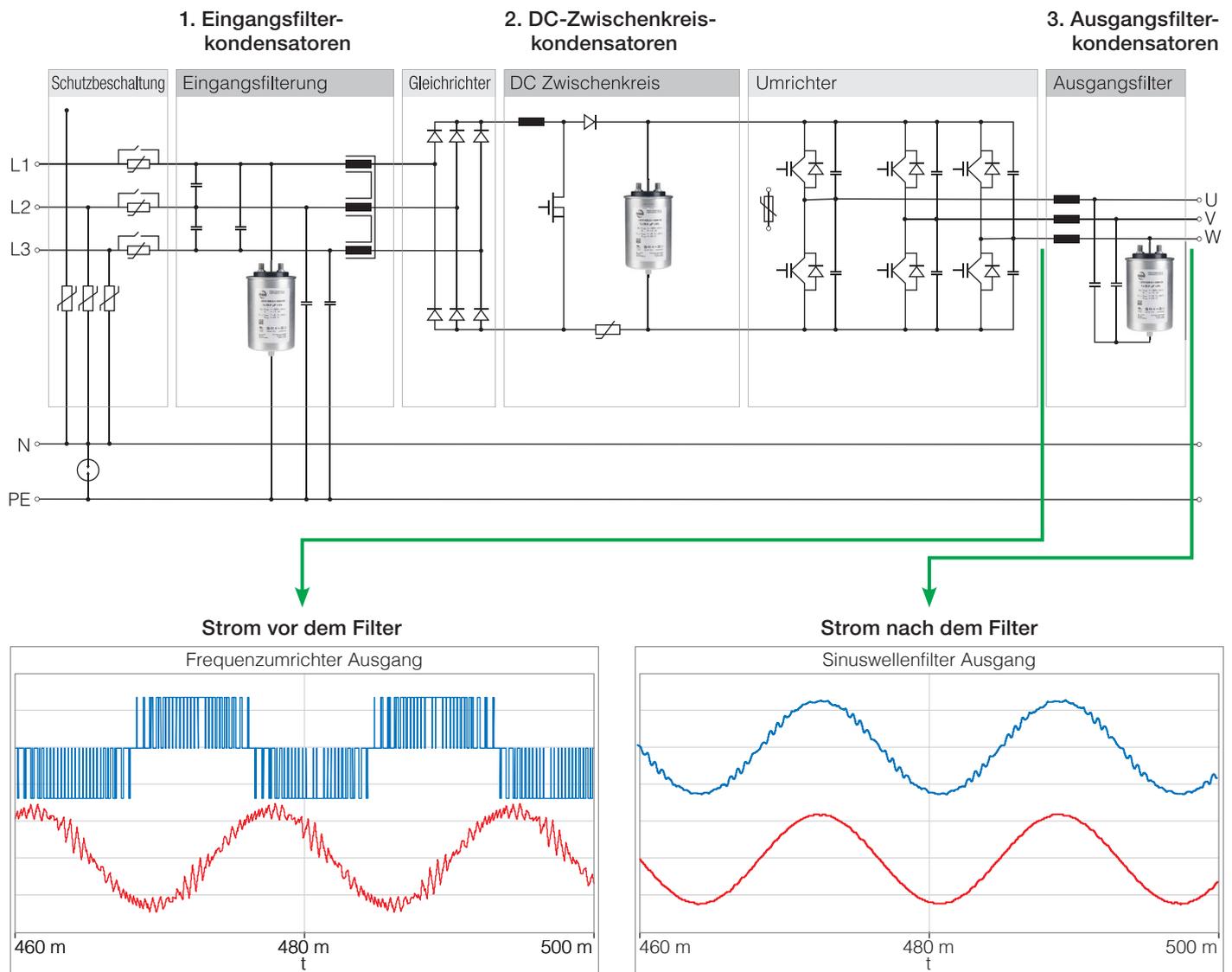
Im Falle der Wechselstromanwendung in diesem Beispiel würde die heißeste Stelle des Kondensators also um 6,76 Kelvin über die Umgebungstemperatur ansteigen.

ANWENDUNGSGEBIETE FÜR LEISTUNGSELEKTRONIK KONDENSATOREN

TYPISCHE ANWENDUNGEN FÜR LEISTUNGSELEKTRONIK KONDENSATOREN IN FREQUENZUMRICHTERN

Ein typisches Anwendungsgebiet für Leistungselektronik Kondensatoren ist z. B. ein Filter für die Antriebstechnik. Der Aufbau eines solchen Antriebs ist unten dargestellt. Am Eingang eines Umrichters erfolgt die Filterung hinsichtlich

der Netzspannung, um diese nicht zu beeinträchtigen. Am Ausgang des Umrichters erfolgt die Filterung des Ausgangssignals für eine elektrische Maschine. In beiden Fällen kommen die Leistungselektronik Kondensatoren von **FRAKO** zum Einsatz.



Am Ausgang eines Wechselrichters ist der Strom nicht sinusförmig (links). Durch den Einsatz eines Filterkondensators ist der Strom wieder sinusförmig (rechts).

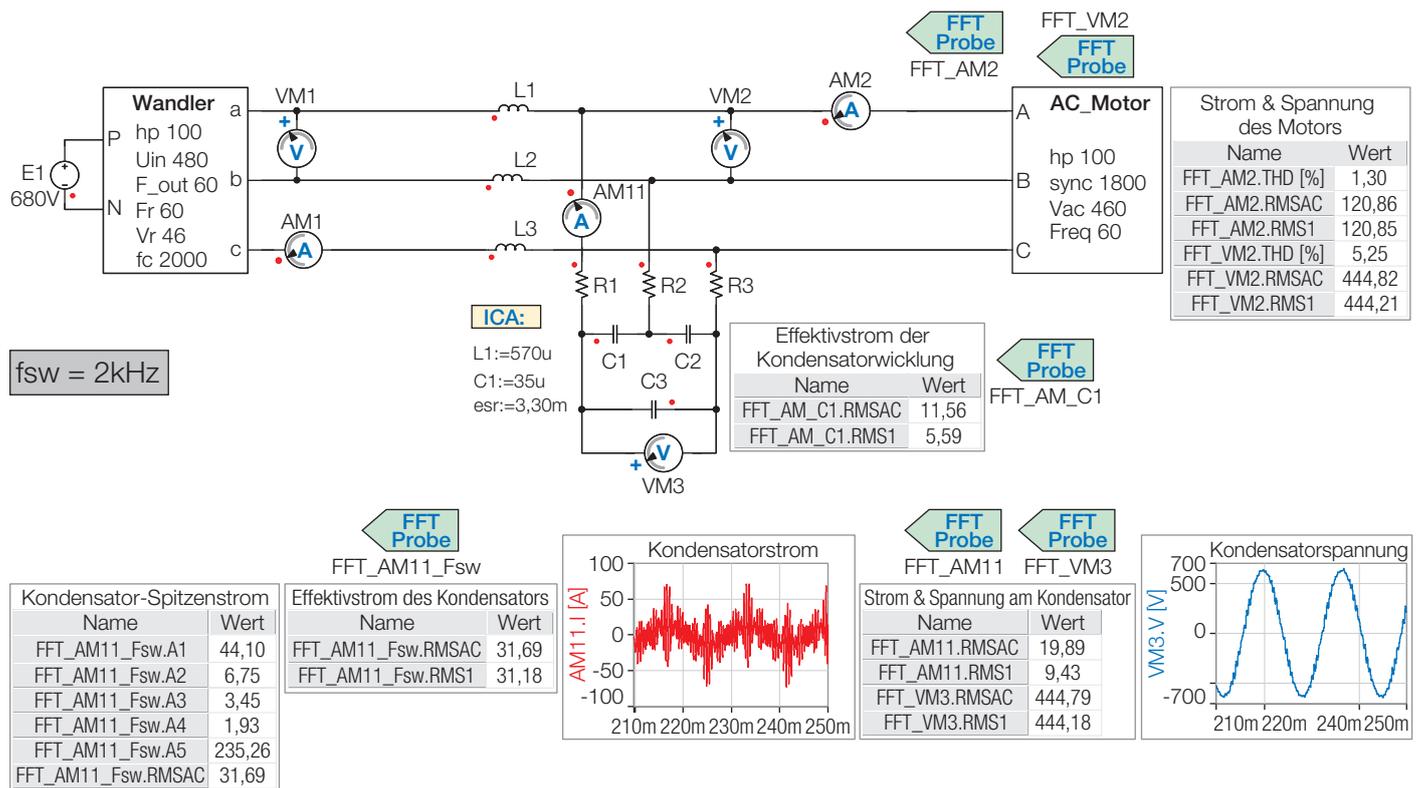
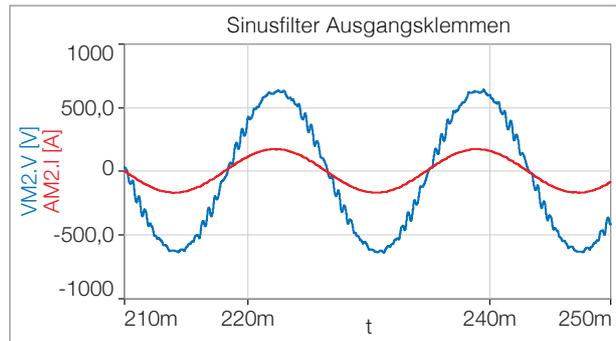
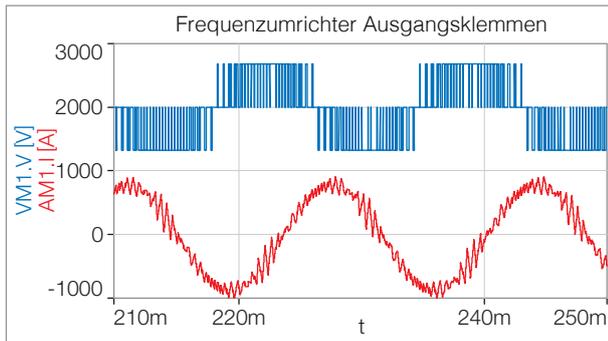
ANWENDUNGSGEBIETE FÜR LEISTUNGSELEKTRONIK KONDENSATOREN



ANWENDUNG EINES SINUSFILTERS

Analyse durch eine Simulation

Simulation eines Sinusfilters an einer elektrischen Maschine:



Die Wellenformen in blau zeigen die Spannung der Sinusfilteranwendung. Die Wellenformen in Rot zeigen den Strom.

Vor der Filterung:

Die Wellenform auf der linken Seite oben, zeigt die Ausgangsspannung und den Ausgangsstrom eines Wechselrichters. Der Strom ist nicht sinusförmig und eignet sich nicht für die Speisung einer elektrischen Maschine.

Während der Filterung:

Die beiden Kurvenformen unten zeigen den Filterstrom und die Spannung des Sinusfilters am Kondensator.

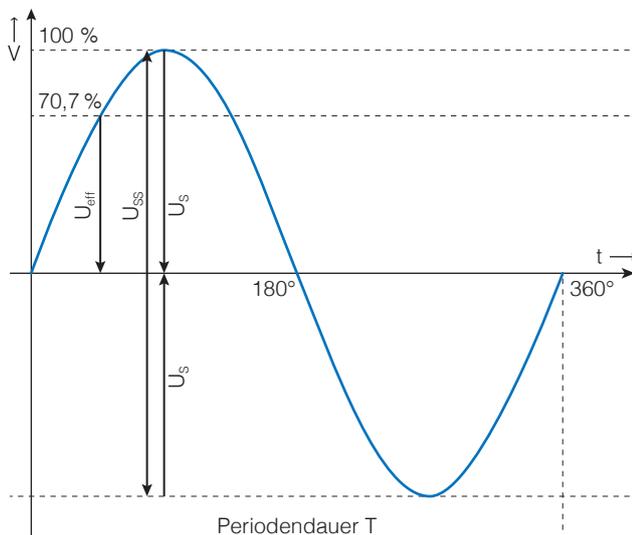
Nach der Filterung:

Die Wellenform auf der rechten Seite zeigt die Spannung und den Strom nach dem Sinusfilter (Spannung und Strom für den Motor). Jetzt ist der Strom sinusförmig und eignet sich zum Antrieb einer elektrischen Maschine.



BEGRIFFE UND FORMELN BEI WECHSELSPANNUNGSANWENDUNGEN

SINUSKURVENPARAMETER



Symbol	Beschreibung	Formeln
U_{SS}	Spitze-Spitze-Spannung zwischen dem höchsten und dem niedrigsten Punkt der Sinuswelle	$U_{\text{SS}} = 2 * U_{\text{S}}$ $U_{\text{S}} = 2 * U_{\text{eff}} * \sqrt{2}$ $\sqrt{2} = 1,414$
U_{S}	Spitzenspannung zwischen dem höchsten oder niedrigsten Punkt der Sinuswelle und der horizontalen x-Achse.	$U_{\text{S}} = U_{\text{eff}} * \sqrt{2}$ $\sqrt{2} = 1,414$
U_{eff}	Effektivwert (eff.), etwa 70,7 % der Spitzenspannung U_{S} Wechselspannungen werden in der Regel durch ihren Effektivwert angegeben. Ein Wechselstrom von 1 A (Effektivwert) erzeugt die gleiche Wärmemenge wie ein Gleichstrom von 1 A. Die Effektivspannung ist ein effektiver Mittelwert und wird daher als Nennspannung einer Wechselstromversorgung verwendet.	$U_{\text{eff}} = U_{\text{S}} * \frac{1}{\sqrt{2}}$ $\frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$
T	Volle Periodendauer: Die Zeit, die die Sinuswelle der Spannung benötigt, um einen Zyklus zu durchlaufen.	$T = \frac{1}{f}$
f	Frequenz: Die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde	$f = \frac{1}{T}$

BEGRIFFE UND FORMELN BEI WECHSELSPANNUNGSANWENDUNGEN



NÜTZLICHE BERECHNUNGSFORMELN FÜR LEISTUNGSELEKTRONIK KONDENSATOREN

Kapazität [C] = μF

$$C = \frac{Q_C [\text{kvar}] * 1000}{(V_{\text{Phasenspannung}})^2 * 2\pi f}$$

Verhältnis [C_D] - [C_Y] = F

$$C_D = 3 * C_Y \quad C_Y = \frac{1}{3} * C_D$$

Blindleistung [Q_C] = kvar

$$Q_C [\text{kvar}] = \frac{2\pi f * C * (V_{\text{Phasenspannung}})^2}{1000}$$

Strom [I] = A

$$I = \frac{Q_C [\text{kvar}] * 1000}{V_{\text{Phasenspannung}} * \sqrt{3}}$$

Kapazitiver Blindwiderstand [X_C] = Ω

$$X_C = \frac{1}{2\pi f * C_Y}$$

Resonanzfrequenz [f_r] = Hz

$$f_r = \frac{1}{2\pi f * \sqrt{L * C_Y}}$$

Spitzenstrom [I_S] = A

$$I_S = C * \frac{dv}{dt}$$

Gesamtverlustleistung [P_{Verlust}] = W

$$P_{\text{Verlust}} = P_{\text{ohmsche Verluste}} + P_{\text{dielektrische Verluste}}$$

Ohmsche Verluste bei AC-Anwendungen

[P_{ohmsche Verluste}] = W

$$P_{\text{ohmsche Verluste}} = (I_{\text{eff}})^2 * R_s$$

Dielektrische Verluste bei AC-Anwendungen

[P_{dielektrische Verluste}] = W

$$P_{\text{dielektrische Verluste}} = (U_{SS})^2 * \pi * f_0 * C * \tan \delta_0$$

Übertemperatur (ÜT) über Umgebungstemperatur [T_{Umgebung}] = K

$$\text{ÜT} = R_{\text{th}} * P_V$$

PROJEKTIERUNGSLEITFADEN ZUR AUSWAHL VON LEISTUNGSELEKTRONIK KONDENSATOREN

Ideal für Filteranwendungen



LEGENDE

C_N	Nennkapazität
U_N	Maximale wiederkehrende Betriebsspitzenspannung jeder Polarität einer Spannungsamplitude, für die der Kondensator ausgelegt ist.
U_{eff}	Quadratischer Mittelwert der maximal wiederkehrenden Betriebsspannung.
U_S	Spannungsspitzen, die durch Schaltvorgänge oder andere Störungen des Systems hervorgerufen werden, die nur für eine begrenzte Anzahl von Zeitpunkten und für eine Dauer, die kürzer als die Grundswingungsdauer ist, zulässig sind.
U_i	Effektivwert der Sinusspannung, für die die Isolierung zwischen den Anschlüssen der Kondensatoren und dem Gehäuse oder der Erde ausgelegt ist.
$U_{B/B}$	Spannung Belag/Belag
$U_{B/G}$	Spannung Belag/Gehäuse
U_i	Isolationsspannung
U_{SS}	Spitze-Spitze-Spannung in V zwischen dem höchsten und dem niedrigsten Punkt der Sinuswelle
I_{max}	Effektivwert des maximalen Stroms im Dauerbetrieb
I	Maximaler wiederkehrender Spitzenstrom, der im Dauerbetrieb kurzzeitig auftreten kann
I_S	Nicht wiederkehrender Spitzenstrom, der durch Schaltvorgänge oder andere Störungen des Systems hervorgerufen wird und für eine begrenzte Anzahl von Zeitpunkten für eine Dauer zugelassen ist, die kürzer als die Grundswingungsdauer ist
L_{eigen}	Eigeninduktivität
R_{th}	Wärmewiderstand (auf dem Datenblatt des Kondensators)
R_S	Effektiver ohmscher Widerstand der Leiter und des metallischen Überzugs eines Kondensators unter bestimmten Betriebsbedingungen
P_V	Maximale Verlustleistung, mit der der Kondensator bei maximaler Gehäusetemperatur betrieben werden darf
$P_{\text{ohmsche Verluste}}$	Ohmsche Verluste im Kondensator
$P_{\text{dielektrische Verluste}}$	Dielektrische Verluste im Kondensator
f_0	Wechselspannungsfrequenz
f_1	Frequenz, bei der die Verlustleistung des Kondensators bei Nennspannung maximal ist
f_2	Maximale Frequenz, bei der der maximale Strom die maximale Verlustleistung im Kondensator erzeugt
θ_{min}	Niedrigste Temperatur, bei der der Kondensator erregt werden darf
θ_{max}	Höchste Temperatur des Gehäuses, bei der der Kondensator betrieben werden darf
OT	Temperaturerhöhung in Kelvin
tan δ_0	Verlustfaktor der verwendeten gewickelten dielektrischen Folie (tan $\delta_0 = 2 \cdot 10^{-4}$ bei FRAKO Kondensatoren)

