3. Kondensator im Wechselstromkreis

3.1 Einführung

Die Kondensatoren sind neben den Widerständen die am häufigsten in elektronischen Schaltungen vorkommenden Bauelemente. Ihr Einsatz ist sehr vielseitig:

- Trennung von Gleich- und Wechselstrom
- Phasenverschiebung von Strom und Spannung
- Kurzschließen von Wechselspannungen
- als Blindwiderstand, Zeitverzögerungsglied und Energiespeicher
- Zur Glättung von Gleichspannungen
- Zum Aufbau von Filtern und Schwingkreisen usw.

Die Kondensatoren werden in den unterschiedlichsten Bauarten hergestellt, man unterscheidet hauptsächlich zwischen:

- Wickelkondensatoren
- Keramikkondensatoren
- Elektrolytkondensatoren und
- Drehkondensatoren

Die wichtigsten Kenngrößen dieses Bauelementes sind:

Kapazität C,
sie ist die Aufnahmefähigkeit für die Ladungsmenge Q und ergibt sich aus der Dielektrizitätskonstante ($\epsilon_0 \cdot \epsilon_r$) und der wirksamen Plattenfläche dividiert durch den Plattenabstand.

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{l}$$

C = Kapazität, Einheit Farad (F) oder As/V
ϵ_0 = Elektrische Feldkonstante ($8{,}85 \cdot 10^{-12}$ As/Vm)
ϵ_r = Dielektrizitätszahl
A = Plattenfläche in m^2
l = Plattenabstand in m

Nennspannung,
sie ist die höchstzulässige Dauerspannung, die am Kondensator anliegen darf.

Spitzenspannung,
kurzzeitig zulässige Spannung (z.B. Scheitelwert oder Spitze-Spitze-Wert)

Isolationswiderstand R_P,
er ist der spezifische Widerstand des verwendeten Dielektrikums. Der Isolationswiderstand sollte möglichst groß sein (> 1 GΩ), damit der durch den aufgeladenen Kondensator fließende Reststrom klein bleibt.

Kapazitiver Blindwiderstand X_C,
er wird durch den Kapazitätswert und die Frequenz der angelegten Wechselspannung bestimmt.

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$$

X_C = Kapazitiver Blindwiderstand in Ω

ω = Kreisfrequenz in Hz $(2 \cdot \pi \cdot f)$

Verlustfaktor tan δ,
er gibt das Verhältnis zwischen dem kapazitiven Blindwiderstand X_C und dem Wirkwiderstand (Isolationswiderstand) R_P eines Kondensators an.

$$\tan\delta = \frac{X_C}{R_P}$$

$\tan\delta$ = Verlustfaktor

R_P = Isolationswiderstand in Ω

Die in einem Kondensator gespeicherte Ladungsmenge Q ist abhängig vom Ladestrom und der Ladezeit:

$Q = I \cdot t$

Q = Ladung in As = C (Coulomb)
I = Ladestrom in A (konstant)
t = Zeit in s

Beim geladenen Kondensator ist:

$Q = C \cdot U$

C = Kapazität in F
U = maximale Ladespannung in V

3.2 Lade- und Entladevorgang eines Kondensators

Allgemeines

Beim Laden und Entladen eines Kondensators an Gleichspannung verlaufen Strom und Spannung nach einer e-Funktion. Dabei ist die Spannung beim Laden nach 1τ auf 63% der Endspannung gestiegen und beim Entladen auf 37% der Anfangsspannung gesunken. τ ist die Zeitkonstante, die sich aus dem Produkt von Widerstand und Kapazität ergibt.

$$\tau = R \cdot C$$

τ = Zeitkonstante in s
C = Kapazität in F
R = Widerstand zur Strombegrenzung in Ω

Der Strom sinkt beim Laden oder Entladen nach 1τ auf 37% seines Anfangswertes. Nach etwa 5τ ist der Lade bzw. Entladevorgang beendet.
Der Augenblicksstrom und die Augenblicksspannung beim Laden oder Entladen eines Kondensators werden mit folgenden Formeln errechnet:

Augenblickswert der Spannung u_C beim Laden:

$$u_C = U \cdot (1 - e^{-t/\tau})$$

U = Ladespannung
e = Basiszahl 2,718
t = Ladezeit in s

Augenblickswert der Spannung u_C beim Entladen:

$$u_C = U \cdot e^{-t/\tau}$$

U = Spannung am geladenen Kondensator
t = Entladezeit in s

Augenblickswert des Stromes i_C beim Laden:

$$i_C = \frac{U}{R} \cdot e^{-t/\tau}$$

R = Widerstand zur Strombegrenzung in Ω

Augenblickswert des Stromes i_C beim Entladen:

$$i_C = -\frac{U}{R} \cdot e^{-t/\tau}$$

Aufgabe

Es sind die Lade- und Entladekurve von Spannung und Strom eines Kondensators zu oszilloskopieren und aus den Kurven die folgenden Größen zu ermitteln:

- Zeitkonstante τ
- Kapazität C
- Augenblicksspannung u_C nach einer Aufladezeit von 2 ms
- Augenblickswert des Stromes i_C bei einer Entladezeit von 2,5 ms

Die aus den Kurven ermittelten Werte sind anschließend rechnerisch zu überprüfen.

Wie groß ist die Ladung Q nach einer Ladezeit von 5 ms?

Schaltung

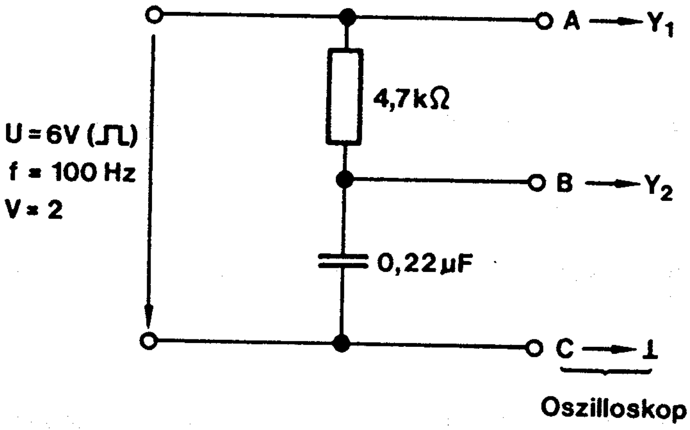


Abb. 3.2.1

Bauelemente und Meßgeräte

1	Widerstand 4,7 kOhm (2 W)	Typ 9104.2-6
1	Kondensator 0,22 µF (160 V)	Typ 9110.3-2
1	Aufbauplatte	
1	Funktionsgenerator	
1	Oszilloskop	
-	Steckverbindungen und Leitungen	Serie 9000

Versuchsdurchführung

Versuch nach Schaltung (Abb. 3.2.1) aufbauen und Funktionsgenerator mit positiver Rechteckspannung anschließen:

U = 6 V; f = 100 Hz; V = 2

Oszilloskop anschließen:

Meßpunkt A an Kanal 1 (Y_1), zur Aufnahme der Eingangsspannung

Meßpunkt B an Kanal 2 (Y_2), zur Aufnahme der Kondensatorspannung bzw. zur Darstellung des Kondensatorstromes

Zur Darstellung des Kondensatorstroms sind der Widerstand 4,7 kΩ und der Kondensator 0,22 μF in der Schaltung zu tauschen, oszilloskopiert wird dann die am Widerstand anliegende Spannung, die proportional dem Kondensatorstrom ist.

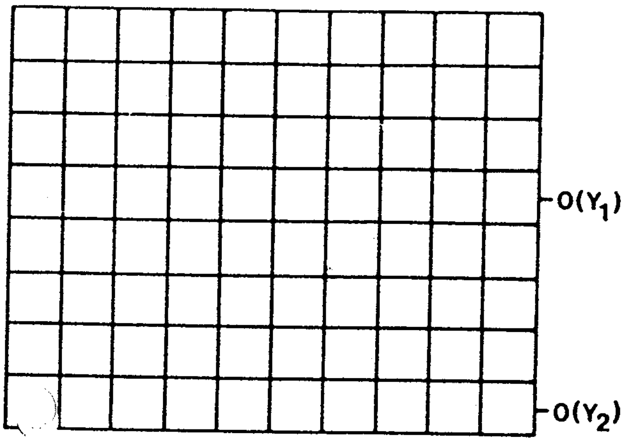
Meßpunkt C an Masse

Übrige Einstellungen am Oszilloskop gemäß den Angaben an den Rasterfeldern 3.2.2 und 3.2.3 vornehmen.

Abgebildete Spannungsverläufe auf dem Oszilloskopschirm jeweils in das Rasterfeld 3.2.2 und 3.2.3 einzeichnen.

Aus den aufgenommenen Spannungsverläufen die in der Aufgabe angegebenen Größen ermitteln.

Ergebnisse und Auswertungen



Einstellungen:

X = 1 ms/Teil

Y_1 = 2 V/Teil

Y_2 = 2 V/Teil

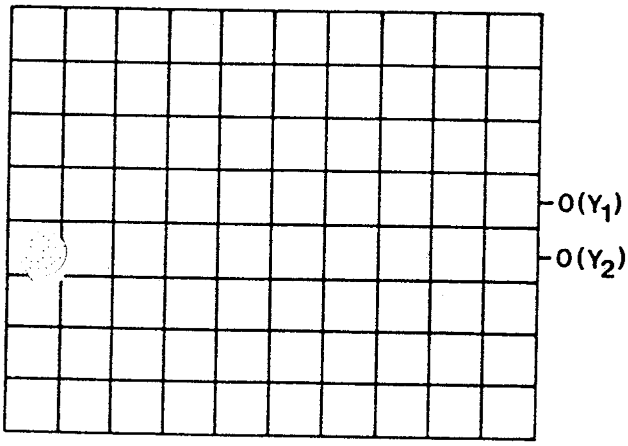
Triggerung: Y_1

Bemerkungen:

Y_1 = Eingangsspannung

Y_2 = Kondensatorspannung

3.2.2



Einstellungen:

X = 1 ms/Teil

Y_1 = 2 V/Teil

Y_2 = 2 V/Teil

Triggerung: Y_1

Bemerkungen:

Y_1 = Eingangsspannung

Y_2 = Spannung am Widerstand (proportional dem Kondensatorstrom)

3.2.3

Zeitkonstante τ

aus Schirmbild ermitteln:

rechnerisch ermitteln:

Kapazität C

aus Schirmbild ermitteln:

rechnerisch ermitteln:

Augenblickswert der Spannung u_C

nach einer Aufladezeit von 2 ms aus Schirmbild ermitteln:

rechnerisch ermitteln:

Augenblickswert des Stromes i_C

nach einer Entladezeit von 2,5 ms aus Schirmbild ermitteln:

rechnerisch ermitteln:

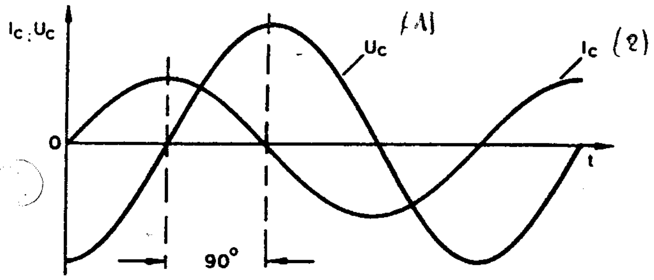
Ladung Q

nur rechnerisch ermitteln:

3.3 Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung am Kondensator

Allgemeines

Wird ein Kondensator an eine sinusförmige Wechselspannung gelegt, so wird er periodisch aufgeladen und entladen. Bedingt durch die Wechselspannung ändert sich dabei auch periodisch die Polarität der Ladung des Kondensators. Der Strom I_C erreicht jeweils bei den Nulldurchgängen der Spannung U_C seinen Höchstwert.



Der Strom I_C in einem Kondensator eilt der Spannung U_C am Kondensator um 90° voraus.

Abb. 3.3.1

Aufgabe

Es ist der Strom- und Spannungsverlauf an einem Kondensator zu oszilloskopieren und aus dem Schirmbild heraus die Phasenverschiebung zwischen dem Strom I_C und der Spannung U_C zu bestimmen.

Schaltung

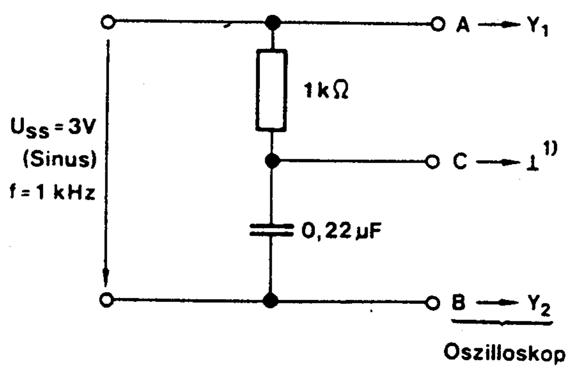


Abb. 3.3.2

1) Es ist darauf zu achten, daß der Meßpunkt C nicht über die Masse der verwendeten Geräte (Funktionsgenerator, Oszilloskop) mit den Meßpunkten B oder A verbunden ist, eventuell Trenntransformator einsetzen.

Bauelemente und Meßgeräte

1 Widerstand 1 kOhm (2 W) . . . . Typ 9104.2-1
1 Kondensator 0,22 μF (160 V) . . . . Typ 9110.3-2
1 Aufbauplatte
1 Funktionsgenerator
1 Oszilloskop
– Steckverbindungen und Leitungen . . . . Serie 9000

Versuchsdurchführung

Versuch nach Schaltung (Abb. 3.3.2) aufbauen und Funktionsgenerator anschließen:

U_{ss} = 3 V (Sinus); f = 1 kHz

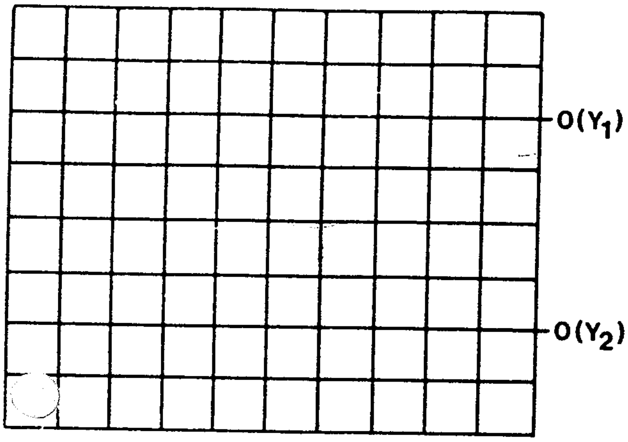
Oszilloskop anschließen:
Meßpunkt A an Kanal 1 (Y_1)
Meßpunkt B an Kanal 2 (Y_2), invers
Meßpunkt C an Masse

Übrige Einstellungen am Oszilloskop gemäß den Angaben am Rasterfeld (Abb. 3.3.3) vornehmen.
Der Widerstand (1 kΩ) in der Schaltung dient als Meßwiderstand. Die an ihm abfallende Spannung U_R ist proportional dem Kondensatorstrom I_C.

Zur gleichzeitigen Darstellung der Kondensatorspannung U_C und des Kondensatorstromes I_C (U_R) wurde der Bezugspunkt der zu messenden Spannungen zwischen Kondensator und Meßwiderstand (1 kΩ) gelegt (Meßpunkt C). Zu berücksichtigen ist hierbei, daß die beiden Spannungen um 180° gegeneinander phasenverschoben dargestellt werden. Durch eine Invertierung einer der beiden Spannungen mit dem Oszilloskop (im Versuch Spannung U_C Kanal 2, Y_2) erfolgt die tatsächliche Darstellung der Spannungsverläufe.

Abgebildete Spannungsverläufe in das Rasterfeld (Abb. 3.3.3) einzeichnen und die Phasenverschiebung zwischen der Kondensatorspannung U_C und dem Kondensatorstrom I_C (U_R) bestimmen.

Ergebnisse und Auswertungen



Einstellungen:

X = 0,1 ms/Teil

Y_1 = 1 V/Teil

Y_2 = 1 V/Teil (invertieren)

Triggerung: Y_1

Bemerkungen:

Y_1: Spannung U_R
(Kondensatorstrom I_C)

Y_2: Kondensatorspannung U_C

Abb. 3.3.3

Phasenverschiebung zwischen Kondensatorstrom und Kondensatorspannung: 90°

3.4 Kapazitiver Blindwiderstand eines Kondensators

Allgemeines

Ein Kondensator hat im Wechselstromkreis eine strombegrenzende Wirkung, die jeweils durch die Gegenspannung des Kondensators beim Umladen entsteht. Diese strombegrenzende Wirkung wird als Blindwiderstand X_C bezeichnet. Die Höhe des Blindwiderstandes ist abhängig von der Kapazität eines Kondensators und der Frequenz der angelegten Wechselspannung. Die Berechnung des Blindwiderstandes erfolgt bei einer sinusförmigen Wechselspannung mit nachstehender Formel:

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$$

X_C = Blindwiderstand des Kondensators in Ω
$2 \cdot \pi \cdot f$ = Kreisfrequenz ω in 1/s
C = Kapazität in F

Sind der Kondensatorstrom und die Kondensatorspannung bekannt, errechnet sich der Blindwiderstand nach dem ohmschen Gesetz:

$$X_C = \frac{U_C}{I_C}$$

Aufgabe

Es ist der Strom- und Spannungsverlauf an verschiedenen Kondensatoren und bei unterschiedlichen Frequenzen zu oszilloskopieren. Der jeweilige Blindwiderstand X_C ist aus dem Schirmbild heraus über die Spitze-Spitze-Werte zu ermitteln und anschließend rechnerisch zu überprüfen.

Schaltung

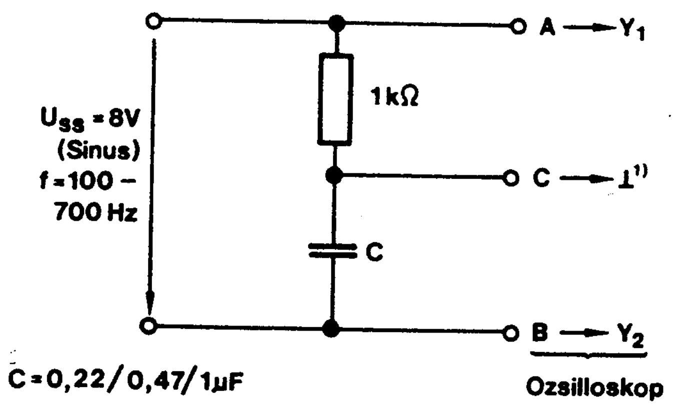


Abb. 3.4.1

1) Es ist darauf zu achten, daß der Meßpunkt C nicht über die Masse der verwendeten Geräte (Funktionsgenerator, Oszilloskop) mit den Meßpunkten B oder A verbunden ist, eventuell Trenntransformator einsetzen.

Bauelemente und Meßgeräte

1	Widerstand 1 kOhm (2 W)	Typ 9104.2-1
1	Kondensator 0,22 µF (160 V)	Typ 9110.3-2
1	Kondensator 0,47 µF (160 V)	Typ 9110.3-3
1	Kondensator 1 µF (100 V)	Typ 9110.3-4
1	Aufbauplatte	
1	Funktionsgenerator	
1	Oszilloskop	
–	Steckverbindungen und Leitungen	Serie 9000

Versuchsdurchführung

Versuch nach Schaltung (Abb. 3.4.1) aufbauen, am Funktionsgenerator eine Spannung von U_{ss} = 8 V (Sinus); f = 0,1 kHz einstellen und mit der Schaltung verbinden.

Oszilloskop anschließen:
Meßpunkt A an Kanal 1 (Y_1)
Meßpunkt B an Kanal 2 (Y_2)
Meßpunkt C an Masse

Der Widerstand (1 kΩ) in der Schaltung dient als Meßwiderstand. Die an ihm abfallende Spannung U_R ist proportional dem Kondensatorstrom I_C.

Der jeweilige Kondensatorstrom errechnet sich danach mit der Formel $I_C = U_R/R$.
Spitze-Spitze-Werte von U_R und U_C bei den in der Tabelle 3.4.2 angegebenen Frequenzen und Kondensatoren vom Schirmbild ablesen und in die Tabelle eintragen.

Werte I_C und X_C errechnen und ebenfalls in die Tabelle 3.4.2 eintragen.

Werte X_C zur Konstruktion der Kennlinien X_C = f (f) in das Diagramm 3.4.3 übernehmen.

Was sagt der Verlauf der Kennlinien aus?

Blindwiderstand X_C des Kondensators 0,47 μF bei 600 Hz rechnerisch überprüfen.

Ergebnisse und Auswertungen

f (kHz)		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
U_C (V)	1,0 µF	7,2	5	4	3	2,5	2,2	1,8
	0,47 µF	8	7,2	6	5	4,2	3,6	3,2
	0,22 µF							
U_R (V)	1,0 µF	4,8	6,5	7,2	7,6	8	8	8
	0,47 µF	2,8	4,8	6	6,8	7,2	7,6	7,6
	0,22 µF							
I_C (mA)	1,0 µF	4,8	6,5	7,2	7,6	8	8	8
	0,47 µF	2,8	4,8	6	6,8	7,2	7,6	7,6
	0,22 µF							
X_C (kΩ)	1,0 µF	1,5	0,77	0,55	0,39	0,3125	0,275	0,225
	0,47 µF	2,8	1,57	1	0,785	0,58	0,473	0,42
	0,22 µF							

Ta 3.4.2

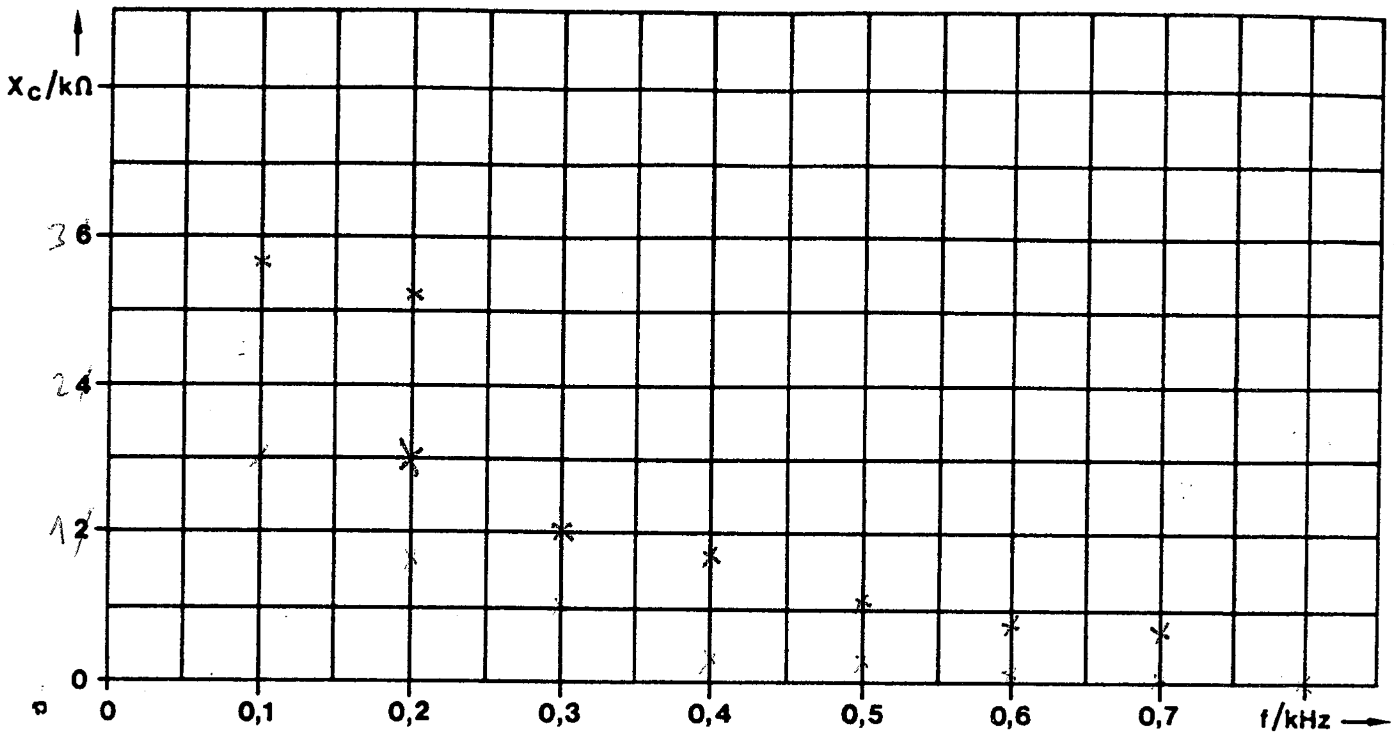


Abb. 3.4.3

Rechnerische Überprüfung des Blindwiderstandes X_C bei C = 0,47 μF und f = 600 Hz:

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} =$$