

Block 03 — Der reale Kondensator

Student Group

First Name	Surname	Matrikel Nr.

Table of Contents

Block 03 — Der reale Kondensator	3
3.0 Einführung	3
3.0.1 Lernziele	4
3.0.2 Vorbereitung zu Hause	4
3.0.3 90-Minuten-Plan	5
3.0.4 Konzeptübersicht	5
3.1 Kerninhalt	5
3.1.1 Das ideale Kondensatormodell	5
Praktische Untersuchung	6
3.1.2 Das Ersatzschaltbild des realen Kondensators	6
ESR — Equivalent Series Resistance	7
ESL — Equivalent Series Inductance	7
Leckstrom	8
3.1.3 Impedanz eines realen Kondensators	8
Niedrige Frequenzen: kapazitiver Bereich	9
Eigenresonanz	9
Hohe Frequenzen: induktiver Bereich	9
Zusammenhang mit Block 02	10
3.1.4 Praktische Simulation: idealer und realer Kondensator	10
3.1.5 Was bedeutet ESL für die reale Schaltung?	10
Entkoppelkondensator am Mikrocontroller	11
3.1.6 Kondensatoren speichern nicht nur Energie – sie können Ladung verschieben	11
Beispiel: Voltage Doubler / Voltage Inverter	12
Praktische Untersuchung	12
3.1.7 Von der Ladungspumpe zum Bootstrap-Kondensator	12
3.1.8 Welche Kondensatorbauart eignet sich wofür?	13
Keramikkondensator / MLCC	14
Folienkondensator	14
Aluminium-Elektrolytkondensator	14

3.1.9 Auch die Kapazität selbst ist nicht konstant	14
Toleranz	15
Temperatur	15
DC-Bias	15
3.1.10 Baugröße und parasitäre Induktivität	16
3.1.11 Kondensatoren an der Versorgung der Leit-Schaltung	16
3.1.12 Datenblatt eines realen Kondensators lesen	17
3.2 Häufige Fehler	17
3.3 Übungen	17
Exercise E03.1 Vom idealen zum realen Kondensator	18
Exercise E03.2 Eigenresonanz eines realen Kondensators	18
Exercise E03.3 ESR und Ripple-Strom	19
Exercise E03.4 Ladungspumpe und Bootstrap-Prinzip	19
Exercise E03.5 Welcher Kondensator für welche Aufgabe?	20
3.4 Zusammenfassung	21
3.5 Ausblick	21

Block 03 — Der reale Kondensator

3.0 Einführung

In den bisherigen Lehrveranstaltungen wurde der Kondensator zunächst als ideales Bauteil betrachtet.

Für die gespeicherte Ladung gilt

$$Q = C \cdot U$$

und für den Strom

$$i = C \cdot \frac{du}{dt}$$

Im Frequenzbereich wird der Kondensator durch die Impedanz

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C}$$

beschrieben.

Damit folgt für den Betrag:

$$|Z_C| = \frac{1}{\omega C}$$

Je höher die Frequenz wird, desto kleiner wird also nach diesem Modell die Impedanz.

Für $f \rightarrow \infty$ würde damit gelten:

$$|Z_C| \rightarrow 0$$

Ein idealer Kondensator müsste sich bei sehr hohen Frequenzen daher immer stärker wie ein Kurzschluss verhalten.

Ein realer Kondensator tut das jedoch nicht.

Misst man die Impedanz eines realen Kondensators über einen großen Frequenzbereich, ergibt sich typischerweise ein Verlauf wie:

- zunächst fallende Impedanz,
- anschließend ein Minimum,
- danach wieder ansteigende Impedanz.

Der Kondensator scheint bei hohen Frequenzen also irgendwann seine „Rolle zu wechseln“.

Genau diese Beobachtung führt zurück zur zentralen Idee aus Block 01:



Das ideale Modell ist notwendig, aber für den Aufbau einer realen elektronischen Schaltung nicht ausreichend.

In der Leit-Schaltung werden Kondensatoren an sehr unterschiedlichen Stellen eingesetzt.

Sie

- stabilisieren Versorgungsspannungen,
- puffern Energie,
- bilden zusammen mit Widerständen Filter,
- übertragen bei Schaltvorgängen Ladung und
- ermöglichen später sogar die Ansteuerung eines High-Side-MOSFETs.

Damit stellt sich nicht nur die Frage

„Welche Kapazität benötige ich?“

sondern vielmehr:

„Wie verhält sich dieser reale Kondensator bei der Spannung, Frequenz und Strombelastung meiner konkreten Anwendung?“

3.0.1 Lernziele

Nach diesem 90-minütigen Block können Sie

- das ideale Kondensatormodell von einem realen Kondensator unterscheiden,
- ESR, ESL und Leckstrom im Ersatzschaltbild eines realen Kondensators erklären,
- den Impedanzverlauf eines realen Kondensators qualitativ aus seinem Ersatzschaltbild ableiten,
- die Eigenresonanzfrequenz eines Kondensators erklären und näherungsweise bestimmen,
- kapazitiven und induktiven Bereich eines realen Kondensators im Impedanzdiagramm erkennen,
- erklären, warum kleine Kondensatorbauformen häufig für hohe Frequenzen vorteilhaft sind,
- typische Kondensatortechnologien anhand ihrer Eigenschaften und Einsatzbereiche unterscheiden,
- den Einfluss von Toleranz, Temperatur und Gleichspannung auf die wirksame Kapazität beurteilen,
- ESR-Verluste durch Ripple-Ströme abschätzen,
- die Funktion eines Kondensators als Energiespeicher bzw. Ladungstransporter in einer Ladungspumpe erklären,
- den Zusammenhang zwischen einer Ladungspumpe und dem später verwendeten Bootstrap-Kondensator erkennen,
- geeignete Kondensatoren für Abblock-, Puffer- und Bootstrap-Aufgaben anhand einer konkreten Anwendung auswählen.

3.0.2 Vorbereitung zu Hause

Wiederholen Sie:

- $Q = C \cdot U$
- $i = C \cdot \frac{du}{dt}$
- $Z_C = \frac{1}{j\omega C}$
- $|Z_C| = \frac{1}{\omega C}$
- die logarithmische Frequenzachse und das Bode-Diagramm aus Block 02.

Überlegen Sie vor der Veranstaltung:

- Welche Impedanz besitzt ein idealer Kondensator für $\omega \rightarrow 0$?
- Welche Impedanz besitzt er für $\omega \rightarrow \infty$?
- Woher könnten bei einem realen Bauteil ein zusätzlicher Widerstand und eine zusätzliche Induktivität stammen?
- Warum befinden sich an einer Versorgungsspannung häufig mehrere Kondensatoren unterschiedlicher Größe?
- Wie kann ein Kondensator dabei helfen, kurzzeitig eine Spannung bereitzustellen, die oberhalb der eigentlichen Versorgungsspannung liegt?

3.0.3 90-Minuten-Plan

1. **Einstieg (8-10 min):** idealer Kondensator und real gemessener Impedanzverlauf – warum steigt die Impedanz bei hohen Frequenzen wieder?
2. **Reales Ersatzschaltbild (20 min):** Kapazität, ESR, ESL und Leckstrom.
3. **Impedanz über der Frequenz (20 min):** kapazitiver Bereich, Eigenresonanz und induktiver Bereich; Verbindung zu Block 02.
4. **Ladung speichern und verschieben (15 min):** Charge Pump / Voltage Doubler als Anwendung; Brücke zum Bootstrap-Kondensator.
5. **Welche Kondensatortechnologie wofür? (12-15 min):** Keramik, Folie, Aluminium-Elektrolyt anhand der zuvor erarbeiteten Eigenschaften.
6. **Reale Kapazität und Auswahl (10 min):** DC-Bias, Ripple, Spannung, Baugröße; kurze Datenblatt-/Falstad-Aufgabe.
7. **Abschluss (3-5 min):** Übergang zum passiven Filterentwurf in Block 04.

3.0.4 Konzeptübersicht

1. Das ideale Kondensatormodell beschreibt nur die gewünschte Speicherwirkung $Q=C \cdot U$.
2. Ein reales Bauteil besitzt zusätzlich parasitäre Widerstände und Induktivitäten.
3. ESR erzeugt Verluste, ESL begrenzt die Wirkung bei hohen Frequenzen.
4. Deshalb besitzt ein realer Kondensator eine Eigenresonanzfrequenz.
5. Unterhalb dieser Frequenz dominiert die Kapazität, oberhalb die parasitäre Induktivität.
6. Ein Kondensator kann nicht nur Signale filtern, sondern auch Energie bzw. Ladung kurzzeitig speichern und zwischen unterschiedlichen Potentialen transportieren.
7. Genau dieses Prinzip wird bei Ladungspumpen und später beim Bootstrap-Netzwerk verwendet.
8. Erst aus Anwendung, Frequenzbereich, Spannung und Strombelastung ergibt sich, welche Kondensatortechnologie geeignet ist.

3.1 Kerninhalt

3.1.1 Das ideale Kondensatormodell

Beginnen wir mit dem Modell, das bereits bekannt ist.

Für einen idealen Kondensator gilt

$$Q = C \cdot U.$$

Eine Änderung der gespeicherten Ladung führt zu einem Strom:

$$i = \frac{dQ}{dt} = C \cdot \frac{dU}{dt}.$$

Damit kann ein Kondensator seine Spannung nicht sprunghaft ändern: Eine beliebig schnelle

Spannungsänderung würde einen beliebig großen Strom erfordern.

Für sinusförmige Signale kann der Kondensator im Frequenzbereich durch

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C}$$

beschrieben werden.

Für den Betrag folgt:

$$|Z_C| = \frac{1}{\omega C}$$

Wird die Frequenz um den Faktor 10 erhöht, sinkt der Betrag der Impedanz um den Faktor 10.

Aus Block 02 wissen wir:

Ein Faktor 0.1 entspricht -20 dB .

Der Betrag der Kondensatorimpedanz besitzt daher im logarithmischen Diagramm eine Steigung von -20 dB/dec .



Das ideale Kondensatormodell sagt voraus:

- bei niedrigen Frequenzen: hohe Impedanz,
- bei hohen Frequenzen: niedrige Impedanz,
- Steigung: -20 dB/dec .

Praktische Untersuchung

Betrachten Sie einen idealen Kondensator beispielsweise mit

$$C = 100 \text{ nF}$$

Bestimmen Sie $|Z_C|$ bei:

- 100 Hz
- 1 kHz
- 10 kHz
- 100 kHz
- 1 MHz

Bei jeder Verzehnfachung der Frequenz sinkt die Impedanz auf ein Zehntel.

Bis hierhin verhält sich der Kondensator genau so, wie es das bekannte Modell vorhersagt.

Doch reale Kondensatoren zeigen bei ausreichend hohen Frequenzen ein anderes Verhalten.

3.1.2 Das Ersatzschaltbild des realen Kondensators

Ein realer Kondensator besteht nicht nur aus einer idealen Kapazität.

Bereits die Anschlüsse, Elektroden und Materialien des Bauteils besitzen zusätzliche elektrische Eigenschaften.

Ein häufig verwendetes vereinfachtes Ersatzschaltbild enthält:

- die gewünschte Kapazität C ,
- einen Serienwiderstand R_{ESR} ,
- eine Serieninduktivität L_{ESL} und
- einen großen parallelen Leckwiderstand R_{leak} .

Fig. 1: Vereinfachtes Ersatzschaltbild eines realen Kondensators



Start drawing by
clicking here

ESR — Equivalent Series Resistance

Elektroden, Anschlussdrähte, Kontaktierungen und das Elektrolyt besitzen endliche Widerstände.

Diese Verluste werden im vereinfachten Modell als **Equivalent Series Resistance**, kurz **ESR**, zusammengefasst.

Für einen Wechselstrom durch den Kondensator entsteht damit eine Verlustleistung:

$$P_{\text{ESR}} = I_{\text{RMS}}^2 \cdot R_{\text{ESR}}.$$

Das ist insbesondere bei Kondensatoren wichtig, durch die ein großer **Ripple-Strom** fließt.

Ein Kondensator kann sich deshalb deutlich erwärmen, obwohl sein idealer Anteil C selbst keine Wirkleistung aufnimmt.



Ein Kondensator kann thermisch überlastet werden, obwohl seine Spannungsfestigkeit nicht überschritten wird.

Entscheidend kann der Strom durch den ESR sein.

ESL — Equivalent Series Inductance

Jeder Strompfad erzeugt ein Magnetfeld.

Auch die Anschlüsse und internen Elektroden eines Kondensators besitzen deshalb eine Induktivität.

Diese wird im vereinfachten Modell als **Equivalent Series Inductance**, kurz **ESL**, beschrieben.

Für eine Induktivität gilt:

$$Z_L = j\omega L$$

und für den Betrag

$$|Z_L| = \omega L.$$

Anders als beim Kondensator **steigt** die Impedanz einer Induktivität mit zunehmender Frequenz.

Im logarithmischen Diagramm ergibt sich eine Steigung von

$$+20 \frac{\text{dB}}{\text{dec}}.$$

Damit wirken im realen Kondensator zwei Effekte gegeneinander:

- $|Z_C|$ wird mit steigender Frequenz kleiner,
- $|Z_L|$ wird mit steigender Frequenz größer.

Irgendwann sind beide gleich groß.

Leckstrom

Ein realer Kondensator hält seine Ladung nicht unbegrenzt.

Durch das Dielektrikum fließt ein kleiner Leckstrom.

Im vereinfachten Ersatzschaltbild kann dieser durch einen großen parallelen Widerstand R_{leak} beschrieben werden.

Für viele Signal- und Hochfrequenzanwendungen spielt dieser Widerstand nur eine geringe Rolle.

Bei

- sehr großen Kapazitäten,
- langen Speicherzeiten,
- hochohmigen Schaltungen oder
- Ladungspumpen

kann der Leckstrom jedoch relevant werden.

3.1.3 Impedanz eines realen Kondensators

Vernachlässigen wir zunächst den Leckstrom.

Dann ergibt sich aus ESR, ESL und C näherungsweise

$$\underline{Z} = R_{\text{ESR}} + j\omega L_{\text{ESL}} + \frac{1}{j\omega C}.$$

Die beiden imaginären Anteile besitzen entgegengesetztes Vorzeichen:

$$j\omega L_{\text{ESL}}$$

und

$$-\frac{j}{\omega C}.$$

Dadurch können sie sich bei einer bestimmten Frequenz gegenseitig aufheben.

Niedrige Frequenzen: kapazitiver Bereich

Bei niedrigen Frequenzen gilt:

$$|Z_C| \gg |Z_L|.$$

Das Verhalten wird damit überwiegend durch die Kapazität bestimmt.

Mit steigender Frequenz sinkt der Betrag der Impedanz näherungsweise mit

$$-20 \sim \mathrm{dB/dec}.$$

Eigenresonanz

Bei einer bestimmten Frequenz gilt

$$|Z_C| = |Z_L|.$$

Damit:

$$\frac{1}{\omega C} = \omega L.$$

Daraus folgt:

$$\omega^2 = \frac{1}{LC}$$

und damit

$$\boxed{f_{\mathrm{SRF}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}}.$$

Diese Frequenz wird als **Self Resonant Frequency**, kurz **SRF**, bzw. Eigenresonanzfrequenz bezeichnet.

Bei dieser Frequenz heben sich der kapazitive und induktive Blindanteil näherungsweise gegenseitig auf.

Zurück bleibt im vereinfachten Serienmodell hauptsächlich der ESR.

Die Impedanz besitzt daher in der Umgebung der Eigenresonanz ein Minimum.

Hohe Frequenzen: induktiver Bereich

Oberhalb der Eigenresonanz gilt zunehmend

$$|Z_L| > |Z_C|.$$

Der reale Kondensator verhält sich dann überwiegend **induktiv**.

Die Impedanz steigt näherungsweise wieder mit

$$+20 \sim \mathrm{dB/dec}.$$



Ein realer Kondensator ist nur in einem begrenzten Frequenzbereich tatsächlich überwiegend kapazitiv.

- unterhalb der SRF: kapazitiv
- bei der SRF: Impedanzminimum
- oberhalb der SRF: zunehmend induktiv

Zusammenhang mit Block 02

Der typische Verlauf kann nun direkt mit den Werkzeugen aus Block 02 interpretiert werden:

- zunächst $-20 \sim \mathrm{dB/dec}$
- Minimum bei der Eigenresonanz
- anschließend $+20 \sim \mathrm{dB/dec}$

Damit wird deutlich, warum die Bode-Darstellung bereits vor dem realen Kondensator eingeführt wurde.

Sie erlaubt es, das Verhalten eines realen Bauteils über viele Frequenzdekaden auf einen Blick zu erkennen.

3.1.4 Praktische Simulation: idealer und realer Kondensator

Bauen Sie in Falstad zwei Modelle auf:

Modell A: idealer Kondensator

- $C = 100 \sim \mathrm{nF}$

Modell B: vereinfachter realer Kondensator

- $C = 100 \sim \mathrm{nF}$
- $R_{\mathrm{ESR}} = 100 \sim \mathrm{m}\Omega$
- $L_{\mathrm{ESL}} = 10 \sim \mathrm{nH}$

Untersuchen Sie beide Modelle über einen möglichst großen Frequenzbereich.

Beobachten Sie:

1. Wie verändert sich die Impedanz des idealen Kondensators?
2. Bei welcher Frequenz besitzt das reale Modell seine kleinste Impedanz?
3. Wie verhält sich das reale Modell oberhalb dieser Frequenz?
4. Welchen Einfluss besitzt der ESR auf das Impedanzminimum?
5. Was geschieht mit der Eigenresonanzfrequenz, wenn L_{ESL} vergrößert wird?

3.1.5 Was bedeutet ESL für die reale Schaltung?

Die parasitäre Induktivität entsteht nicht nur **im** Kondensator.

Auch die Verbindung zwischen Kondensator und Schaltung besitzt eine Induktivität.

Dazu gehören beispielsweise

- Anschlussdrähte,
- Pads,
- Leiterbahnen und
- Vias.

Damit kann ein grundsätzlich geeigneter Kondensator durch ungünstiges Layout bei hohen Frequenzen deutlich schlechter wirken.

Ein typisches Beispiel ist ein Abblockkondensator.

Soll ein Kondensator schnelle Stromänderungen eines ICs lokal liefern, muss der gesamte Strompfad klein sein.



Bei hohen Frequenzen zählt nicht nur **welcher Kondensator** verwendet wird, sondern auch **wo er sitzt**.

Ein Kondensator direkt neben den Versorgungspins eines ICs kann deshalb deutlich wirksamer sein als derselbe Kondensator einige Zentimeter entfernt.

Entkoppelkondensator am Mikrocontroller

Hinweis: Die Simulation gibt ein stark vereinfachtes Bild wieder. Die Reaktion des Mikrocontroller ist auf ein Dreiecksignal reduziert dargestellt, da die Flankensteilheit der Spannungen nicht abgebildet werden können. Eine reale Simulation erfordert ein leistungsfähiges SPICE-Programm, in welchem die [Leitungstheorie](#) abgebildet werden kann.

Weitere Details sind [hier \(Praxis\)](#) oder [hier \(Platinen-Layout\)](#) zu finden.

3.1.6 Kondensatoren speichern nicht nur Energie - sie können Ladung verschieben

Bisher wurde der Kondensator hauptsächlich als frequenzabhängige Impedanz betrachtet.

Seine grundlegendste Eigenschaft ist jedoch:

$$Q = C \cdot U$$

Ein Kondensator kann also Ladung speichern.

Wird ein geladener Kondensator anschließend mit anderen Knoten einer Schaltung verbunden, kann diese Ladung auf ein anderes Potential „mitgenommen“ werden.

Genau dieses Prinzip wird in **Ladungspumpen** verwendet.

Beispiel: Voltage Doubler / Voltage Inverter

Betrachten Sie die folgende Schaltung.

Die Schaltung besitzt zwei Kondensatoren mit unterschiedlichen Aufgaben.

Der erste Kondensator wird zunächst geladen.

Danach werden seine Anschlüsse durch die Schalter auf andere Potentiale umgeschaltet.

Wichtig ist dabei:

Die Spannung am Kondensator kann sich nicht sprunghaft ändern.

Wurde beispielsweise ein Kondensator auf $1\text{~}\mathrm{V}$ geladen und anschließend sein unterer Anschluss von $0\text{~}\mathrm{V}$ auf $1\text{~}\mathrm{V}$ angehoben, versucht der Kondensator weiterhin seine Spannung von ungefähr $1\text{~}\mathrm{V}$ beizubehalten.

Der obere Anschluss wird dadurch auf ungefähr

$2\text{~}\mathrm{V}$

angehoben.

Der Kondensator „erzeugt“ dabei keine Energie.

Vielmehr wird

- Ladung zunächst gespeichert,
- anschließend durch Umschalten auf ein anderes Potential verschoben und
- dort wieder abgegeben.

Dieses Prinzip wird als **Charge Pump** bzw. Ladungspumpe bezeichnet.

Praktische Untersuchung

Untersuchen Sie die Simulation.

1. In welchem Schaltzustand wird C_1 geladen?
2. Welche Spannung liegt anschließend über C_1 ?
3. Was geschieht mit beiden Anschlüssen von C_1 , wenn die Schalter umgeschaltet werden?
4. Warum kann dadurch an einem Knoten eine Spannung oberhalb der ursprünglichen Versorgung entstehen?
5. Welche Funktion besitzt C_2 ?
6. Was würde geschehen, wenn eine Last am Ausgang Ladung aus C_2 entnimmt?

3.1.7 Von der Ladungspumpe zum Bootstrap-Kondensator

Dieses Prinzip begegnet uns später erneut in der Leit-Schaltung.

Dort werden ausschließlich N-Kanal-MOSFETs eingesetzt.

Beim Low-Side-MOSFET ist die Ansteuerung zunächst einfach:

Der Source-Anschluss befindet sich in der Nähe von GND.

Um den MOSFET einzuschalten, muss das Gate lediglich einige Volt über dieses Potential angehoben werden.

Beim High-Side-MOSFET ist die Situation schwieriger.

Wenn dieser MOSFET eingeschaltet ist, liegt sein Source-Anschluss ungefähr auf der Motorspannung V_{M} .

Damit muss auch sein Gate auf ein Potential **oberhalb von V_{M}** angehoben werden.

Eine normale auf Masse bezogene Logikversorgung reicht dafür nicht aus.

Hier kommt ein Kondensator ins Spiel:

der **Bootstrap-Kondensator**.

[Leit-Schaltung: Bootstrap-Kondensator markieren]

Das Grundprinzip ähnelt der zuvor betrachteten Ladungspumpe:

1. Der Bootstrap-Kondensator wird in einer geeigneten Schaltphase geladen.
2. Seine gespeicherte Spannung bleibt beim Umschalten zunächst erhalten.
3. Wird sein Bezugspotential angehoben, wird auch sein oberes Potential mit angehoben.
4. Damit kann kurzzeitig eine Gate-Spannung erzeugt werden, die oberhalb der Motorspannung liegt.



Der Bootstrap-Kondensator ist kein „magischer Spannungsverstärker“.

Er nutzt dieselbe grundlegende Eigenschaft wie die Ladungspumpe:

Ein geladener Kondensator behält seine Spannung zunächst bei, auch wenn sein Bezugspotential verschoben wird.

Die genaue Bootstrap-Schaltung und die Dimensionierung werden später bei der High-Side-Ansteuerung behandelt.

Für diesen Block ist zunächst wichtig:

Der Kondensator wird hier nicht als Filter verwendet, sondern als **temporärer Ladungs- und Energiespeicher auf einem beweglichen Potential**.

3.1.8 Welche Kondensatorbauart eignet sich wofür?

Nachdem die wichtigsten realen Eigenschaften bekannt sind, können unterschiedliche Kondensatortechnologien sinnvoll verglichen werden.

Nicht jede Technologie optimiert dieselben Eigenschaften.

Keramikkondensator / MLCC

Typische Stärken

- kleine Bauform
- geringe ESL
- häufig geringer ESR
- sehr gut für hohe Frequenzen
- keine Polarität

Zu beachten

- Kapazitätsänderung durch DC-Bias
- Toleranz und Temperaturabhängigkeit abhängig vom Dielektrikum
- mechanisch empfindlich

Typische Anwendungen

- Abblockung
- lokale Versorgung
- Filter
- Bootstrap

Folienkondensator

Typische Stärken

- stabile Kapazität
- geringe Verluste
- gutes Frequenzverhalten
- geringe Alterung
- hohe Spannungen möglich

Zu beachten

- größere Bauform
- größere Kapazitäten benötigen viel Platz

Typische Anwendungen

- präzise Filter
- Signalverarbeitung
- Resonanzkreise
- Leistungselektronik

Aluminium-Elektrolytkondensator

Typische Stärken

- hohe Kapazität
- relativ kompakt bei großen Kapazitätswerten
- gut zur Energiespeicherung

Zu beachten

- Polarität
- höherer ESR
- größere ESL
- begrenzte Lebensdauer
- Ripple-Strom beachten

Typische Anwendungen

- Bulk-Kapazität
- Zwischenkreise
- Pufferung von Versorgungsspannungen

Diese Gegenüberstellung zeigt:

Die Frage

„Welcher Kondensatortyp ist der beste?“

ist nicht sinnvoll.

Entscheidend ist immer die konkrete Aufgabe.

Für schnelle Schaltvorgänge kann ein kleiner MLCC hervorragend geeignet sein.

Für die Speicherung größerer Energiemengen kann dagegen ein Elektrolytkondensator deutlich sinnvoller sein.

3.1.9 Auch die Kapazität selbst ist nicht konstant

Bisher wurde stillschweigend angenommen, dass ein Kondensator mit der Beschriftung

$$C = 10 \cdot 10^{-6} \text{ F}$$

auch tatsächlich immer eine Kapazität von $10\,\mu\text{F}$ besitzt.

Bei einem realen Kondensator hängt die wirksame Kapazität jedoch von verschiedenen Einflüssen ab.

Toleranz

Wie beim Widerstand besitzt auch die Kapazität eine Fertigungstoleranz.

Ein nomineller Wert von beispielsweise

$10\,\mu\text{F} \pm 20\%$

kann bereits bei Referenzbedingungen deutlich vom Nennwert abweichen.

Temperatur

Die Temperaturabhängigkeit hängt stark von der verwendeten Technologie und insbesondere vom Dielektrikum ab.

Bei keramischen Kondensatoren sind beispielsweise Bezeichnungen wie

- C0G / NP0
- X7R
- X5R

zu finden.

Sie beschreiben unter anderem das Temperaturverhalten und die verwendete Materialklasse.

DC-Bias

Besonders wichtig ist bei keramischen Mehrschichtkondensatoren der sogenannte **DC-Bias-Effekt**.

Bei angelegter Gleichspannung kann die wirksame Kapazität deutlich unter den Nennwert sinken.

Ein Kondensator mit der Beschriftung

$10\,\mu\text{F}, 25\,\text{V}$

muss bei

$20\,\text{V}$

also keineswegs noch $10\,\mu\text{F}$ besitzen.

Die Spannungsangabe von $25\,\text{V}$ bedeutet zunächst nur, dass der Kondensator für diese Spannung spezifiziert ist.

Sie garantiert nicht, dass die Nennkapazität bis zu dieser Spannung konstant bleibt.



Spannungsfestigkeit und wirksame Kapazität sind zwei unterschiedliche Datenblattangaben.

3.1.10 Baugröße und parasitäre Induktivität

Bei Kondensatoren beeinflusst die Baugröße nicht nur die mechanische Verarbeitung.

Eine kleinere Bauform kann gleichzeitig bedeuten:

- kürzere interne Strompfade,
- kleinere Anschlussinduktivität,
- höhere Eigenresonanzfrequenz.

Deshalb werden für hochfrequente Abblockung häufig kleine SMD-Kondensatoren eingesetzt.

Allerdings entsteht erneut ein Zielkonflikt:

Kleinere keramische Bauformen können bei gleicher Nennkapazität und Spannung einen stärkeren DC-Bias-Effekt besitzen.

Die kleinste Bauform ist daher nicht automatisch die beste Wahl.

3.1.11 Kondensatoren an der Versorgung der Leit-Schaltung

Betrachten wir nun die Kondensatoren an der Versorgung der Motortreiberschaltung.

Die Leistungsstufe schaltet den Motorstrom mit hoher Geschwindigkeit.

Dadurch entstehen schnelle Änderungen des Strombedarfs.

Die Versorgung muss deshalb Strom über unterschiedliche Zeitskalen bereitstellen.

Ein großer Kondensator kann vergleichsweise viel Energie speichern:

$$E = \frac{1}{2} C U^2$$

Er eignet sich daher gut, um langsamere Änderungen des Strombedarfs zu puffern.

Für sehr schnelle Stromänderungen werden dagegen

- geringe ESL,
- geringe Leiterbahninduktivität und
- kurze Wege

wichtiger.

Deshalb findet man häufig mehrere Kondensatoren parallel:

- **Bulk-Kondensator:** größere Kapazität für Energiepufferung,
- **kleiner keramischer Kondensator:** schnelle lokale Strombereitstellung.



Mehrere parallele Kondensatoren werden nicht einfach eingesetzt, weil „mehr Kapazität besser ist“.

Sie können unterschiedliche Frequenzbereiche und unterschiedliche Aufgaben abdecken.

3.1.12 Datenblatt eines realen Kondensators lesen

Für die Auswahl eines realen Kondensators sollten mindestens folgende Punkte geprüft werden:

- Nennkapazität
- Toleranz
- Nennspannung
- Technologie bzw. Dielektrikum
- Baugröße
- Temperaturbereich
- Kapazität über Temperatur
- Kapazität über DC-Bias
- ESR bzw. Verlustfaktor
- Impedanz über Frequenz
- Eigenresonanzfrequenz
- zulässiger Ripple-Strom, falls relevant

Wie bereits beim Widerstand aus Block 01 gilt:



Datenblattstrategie: Nicht das gesamte Datenblatt lesen.

Zuerst die Anforderungen der Anwendung formulieren und anschließend gezielt prüfen, ob der konkrete Kondensator diese erfüllt.

3.2 Häufige Fehler

- **Den Kondensator nur durch C beschreiben:** ESR und ESL können das Verhalten wesentlich verändern.
- **Annehmen, dass die Impedanz mit der Frequenz immer weiter fällt:** Oberhalb der Eigenresonanz wird der Kondensator zunehmend induktiv.
- **Nennkapazität mit wirksamer Kapazität gleichsetzen:** Besonders DC-Bias kann die Kapazität keramischer Kondensatoren deutlich reduzieren.
- **Spannungsfestigkeit als Kapazitätsgarantie interpretieren:** Ein 25~V -Kondensator besitzt bei 20~V nicht automatisch noch seine Nennkapazität.
- **ESR als reinen Messfehler betrachten:** Durch Ripple-Ströme kann reale Verlustleistung und Erwärmung entstehen.
- **Nur das Bauteil, nicht aber das Layout betrachten:** Leiterbahnen und Vias erhöhen die wirksame ESL.
- **Große Kapazität automatisch mit gutem Hochfrequenzverhalten gleichsetzen:** Ein großer Elektrolytkondensator kann bei hohen Frequenzen schlechter wirken als ein kleiner MLCC.
- **Bootstrap-Kondensator als zusätzliche Spannungsquelle interpretieren:** Er speichert Ladung und verschiebt sein Potential; er erzeugt keine Energie.
- **Elektrolytkondensatoren ohne Beachtung der Polarität einsetzen.**

3.3 Übungen

Exercise E03.1 Vom idealen zum realen Kondensator

Ein Kondensator besitzt die Kapazität $C = 100 \text{ nF}$. Zeichnen Sie sein Impedanzdiagramm?

1. Bestimmen Sie den Betrag der idealen Kondensatorimpedanz bei $f = 1 \text{ kHz}$.
Solution

Solution

Die Frequenzachse der Impedanzachse ist um den Faktor 10 erhöht. Die Impedanz auf ein Zehntel.

Der Betrag $|Z_C| = 0.1 \text{ }\Omega$ entspricht -20 dB (falls um den Faktor 10).

Der Betrag $|Z_C| = 0.1 \text{ }\Omega$ entspricht -20 dB (falls um den Faktor 10).

Der Betrag $|Z_C| = 0.1 \text{ }\Omega$ entspricht -20 dB (falls um den Faktor 10).

$$|Z_C| = \frac{1}{2\pi \cdot 1 \text{ kHz} \cdot 100 \text{ nF}} \approx 1.59 \text{ k}\Omega$$

Exercise E03.2 Eigenresonanz eines realen Kondensators

Ein realer Kondensator hat die Kapazität $C = 100 \text{ nF}$ und die Eigenresonanzfrequenz $f_{\text{SRF}} = 5 \text{ MHz}$. Zeichnen Sie sein Impedanzdiagramm?

- $C = 100 \text{ nF}$,

Solution $L_{\text{ESL}} = 10 \text{ nH}$ und

- $R_{\text{ESR}} = 100 \text{ m}\Omega$.

.. Bestimmen Sie näherungsweise die Eigenresonanzfrequenz.

Die Eigenresonanzfrequenz ist die Frequenz, bei der die Induktivität und die Kapazität sich aufheben.

Solution näherungsweise auf.

Die Induktivität L_{ESL} dominiert.

Damit bleibt im vereinfachten Serienmodell hauptsächlich der ESR übrig.

Der kapazitive Anteil dominiert zunehmend wie eine Induktivität.

Er bestimmt daher wesentlich das Impedanzminimum.

Der reale Kondensator verhält sich dort näherungsweise wie ein Kondensator.

$$f_{\text{SRF}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{\text{ESL}} C}}$$

Damit:

$$f_{\text{SRF}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{10 \text{ nH} \cdot 100 \text{ nF}}} \approx 5.0 \text{ MHz}$$

Exercise E03.3 ESR und Ripple-Strom

Warum ist der ESR eines Kondensators für die Leistungsfähigkeit eines Bauteils relevant sein?

$$I_{\text{RMS}} = 1.5 \text{ A}.$$

Solution

Der ESR des Kondensators beträgt

$$R_{\text{ESR}} = 80 \text{ m}\Omega.$$

Bestimmen Sie die Verlustleistung im ESR.

Dadurch steigt die Bauteiltemperatur.

Solution

Insbesondere bei Elektrolytkondensatoren kann eine erhöhte Temperatur die Lebensdauer deutlich reduzieren.

Deshalb wird in Datenblättern häufig ein maximal zulässiger Ripple-Strom angegeben. Es gilt

$$P_{\text{ESR}} = I_{\text{RMS}}^2 R_{\text{ESR}}.$$

Damit:

$$P_{\text{ESR}} = (1.5 \text{ A})^2 \cdot 80 \text{ m}\Omega = 0.18 \text{ W}.$$

Exercise E03.4 Ladungspumpe und Bootstrap-Prinzip

Ein Kondensator wird primär für die spätere Ansteuerung eines N-Kanal-High-Side-MOSFETs

benutzt. Er erzeugt?

$$U_C = 5 \text{ V}$$

Solution.

Sein unterer Anschluss liegt dabei auf

$$0 \text{ V}.$$

Beim High-Side-MOSFET eingeschaltet, liegt sein Source-Anschluss ungefähr auf der Motorspannung. Anschließend wird der untere Anschluss ideal und sehr schnell auf

Der Kondensator hat zuvor Ladung bzw. Energie gespeichert.

$$20 \text{ V}$$

Damit der MOSFET leitend bleibt, muss das Gate nochmals einige Volt oberhalb des

ang. Durch das Potentialabheben wurde sein Bezugspotential verschoben.

.. Wird der obere Kondensatoranschluss durch das abgeleitete System bei einem Anheben des Bezugs-Potentials angehoben“.

Da gleichzeitig die Gate-Spannung bereitgestellt wird, eine Spannung erzeugt werden.

Die Kondensatorspannung kann sich nicht sprunghaft ändern.

Vor dem Umschalten gilt:

$$U_C = 5 \text{ V}.$$

Wird der untere Anschluss von 0 V auf 20 V angehoben, muss der obere Anschluss unmittelbar danach näherungsweise bei

$$20 \text{ V} + 5 \text{ V} = 25 \text{ V}$$

liegen.

Exercise E03.5 Welcher Kondensator für welche Aufgabe?

Für eine Schaltung werden drei unterschiedliche Kondensatoraufgaben betrachtet:
Solution

1. A: lokale Abblockung eines digitalen ICs bei schnellen Schaltflanken,
2. B: Pufferung einer Versorgung mit mehreren Ampere Laststrom,
3. C: Bootstrap-Kondensator eines Gate-Treibers.

Ordnen Sie die Kondensatortypen den Kondensatoraufgaben zu und begründen Sie Ihre Entscheidung.

Für die Aufgabe B ist eine große, beispielsweise ein Aluminium-Elektrolytkondensator geeignet.

Für die Aufgabe C soll schnell geladen und entladen werden und dabei eine möglichst stabile Spannung bereitstellen.

Für die Aufgabe A sind kleine, häufige zusätzliche große Elektrolytkondensatoren parallel ein geschaltete Spannung.

A: lokale HF-Abblockung

Typischerweise ist ein kleiner keramischer MLCC geeignet.

Wichtig sind insbesondere geringe ESL, geringe Anschlussinduktivität und kurze Leiterbahnen.

3.4 Zusammenfassung

- Das ideale Kondensatormodell beschreibt die gewünschte Speicherwirkung, aber nicht das vollständige Verhalten eines realen Bauteils.
- ESR verursacht Verluste und Erwärmung.
- ESL führt dazu, dass ein realer Kondensator bei hohen Frequenzen zunehmend induktiv wirkt.
- Die Eigenresonanzfrequenz trennt näherungsweise den kapazitiven vom induktiven Bereich.
- Layout und Anschlussgeometrie beeinflussen die wirksame parasitäre Induktivität.
- Ein Kondensator kann nicht nur filtern, sondern auch Ladung speichern und zwischen unterschiedlichen Potentialen transportieren.
- Ladungspumpen und Bootstrap-Schaltungen nutzen genau diese Eigenschaft.
- Keramik-, Folien- und Elektrolytkondensatoren besitzen unterschiedliche Stärken und Grenzen.
- Nennkapazität und wirksame Kapazität können insbesondere bei keramischen Kondensatoren durch DC-Bias deutlich voneinander abweichen.
- Der geeignete Kondensator ergibt sich aus Anwendung, Frequenz, Spannung, Strom und Layout.

3.5 Ausblick

In diesem Block wurde untersucht, wie sich ein Kondensator selbst verhält.

Nun kennen wir

- seine frequenzabhängige Impedanz,
- seine realen parasitären Eigenschaften und
- wichtige Grenzen des Bauteils.

Im nächsten Block wird der Blick wieder auf die **Schaltung** gerichtet.

Widerstand und Kondensator werden gezielt miteinander kombiniert, um einen gewünschten Frequenzgang zu erzeugen.

Die zentrale Frage lautet dann:

Wie wählen wir R und C so, dass gewünschte Frequenzen übertragen und unerwünschte Frequenzen ausreichend gedämpft werden?

Damit folgt der Übergang zum **passiven Filterentwurf**.

From:

<https://wiki.mexle.org/> - MEXLE Wiki

Permanent link:

https://wiki.mexle.org/elektronische_schaltungstechnik/block03?rev=1790559787

Last update: 2026/09/28 03:43

