

Block 03 — Der reale Kondensator

Student Group

First Name	Surname	Matrikel Nr.

Table of Contents

Block 03 — Der reale Kondensator	2
3.0 Einführung	2
3.0.1 Lernziele	2
3.0.2 Vorbereitung zu Hause	2
3.0.3 90-Minuten-Plan	3
3.0.4 Konzeptübersicht	3
3.1 Kerninhalt	3
3.1.1 Vom idealen zum realen Kondensator	3
3.1.2 Bauarten von Kondensatoren	4
Keramikkondensatoren	4
Folienkondensatoren	4
Elektrolytkondensatoren	4
3.1.3 Das Ersatzschaltbild des realen Kondensators	4
ESR	4
ESL	5
3.1.4 Eigenresonanzfrequenz	5
Praktische Falstad-Untersuchung	5
3.1.5 Kapazität ist nicht immer der aufgedruckte Wert	6
Toleranz	6
Temperatur	6
DC-Bias	6
3.1.6 Abblocken und Puffern	6
3.1.7 Datenblatt eines realen Kondensators lesen	7
3.2 Häufige Fehler	7
3.3 Übungen	7
3.4 Zusammenfassung	8
3.5 Ausblick	8

Block 03 — Der reale Kondensator

3.0 Einführung

Aus den bisherigen Lehrveranstaltungen ist der Kondensator zunächst als ideales Bauteil bekannt:

$$Q = C \cdot U$$

und im Frequenzbereich

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

Nach diesem Modell wird der Betrag der Impedanz mit steigender Frequenz immer kleiner.

Ein idealer Kondensator müsste bei sehr hohen Frequenzen also nahezu wie ein Kurzschluss wirken.

Reale Kondensatoren tun das jedoch nicht.

In der Leit-Schaltung befinden sich Kondensatoren an verschiedenen Stellen:

- als Abblockkondensatoren an Versorgungsspannungen,
- als Energiespeicher,
- in RC-Gliedern,
- später im Bootstrap-Netzwerk und
- in der Hilfsversorgung.

Dabei kann ein Kondensator mit demselben aufgedruckten Kapazitätswert je nach Bauart, Spannung und Frequenz sehr unterschiedlich wirken.

Die zentrale Frage dieses Blocks lautet daher:

Wann ist ein Kondensator tatsächlich noch ein Kondensator?

3.0.1 Lernziele

Nach diesem 90-minütigen Block können Sie

- das ideale Kondensatormodell von einem realen Kondensator unterscheiden,
- typische Kondensatortechnologien hinsichtlich ihrer Eigenschaften einordnen,
- ESR und ESL qualitativ erklären,
- die Eigenresonanzfrequenz eines realen Kondensators im Impedanzverlauf erkennen,
- erklären, warum ein Kondensator oberhalb seiner Eigenresonanz induktives Verhalten zeigt,
- den Einfluss von Gleichspannung auf die Kapazität keramischer Kondensatoren beschreiben,
- Polarität und zulässige Spannung bei Elektrolytkondensatoren berücksichtigen,
- Impedanzdiagramme aus Datenblättern lesen,
- geeignete Kondensatoren für Abblock- und Pufferaufgaben auswählen.

3.0.2 Vorbereitung zu Hause

Wiederholen Sie:

- $Q = C \cdot U$

- $i = C \cdot \frac{du}{dt}$
- $Z_C = \frac{1}{j\omega C}$
- $|Z_C| = \frac{1}{\omega C}$
- Frequenzgang und Bode-Diagramm aus Block 02.

Überlegen Sie:

- Was sagt das ideale Modell für $\rightarrow 0$ voraus?
- Was sagt es für $\rightarrow \infty$ voraus?
- Warum befinden sich in realen Schaltungen häufig mehrere unterschiedlich große Kondensatoren parallel an einer Versorgungsspannung?

3.0.3 90-Minuten-Plan

1. **Einstieg (10 min):** idealer Kondensator und gemessener Impedanzverlauf eines realen Kondensators.
2. **Bauarten (15 min):** Keramik, Folie, Aluminium-Elektrolyt; typische Einsatzgebiete.
3. **Ersatzschaltbild (20 min):** idealer Kondensator, ESR, ESL und Leckstrom.
4. **Impedanz über der Frequenz (20 min):** Eigenresonanz, kapazitiver und induktiver Bereich.
5. **Kapazität ist nicht konstant (15 min):** Toleranz, Temperatur, DC-Bias und Alterung.
6. **Praktische Auswahl (5-7 min):** Abblockkondensator in der Leit-Schaltung.
7. **Abschluss (3-5 min):** Übergang zum gezielten RC-Filterentwurf.

3.0.4 Konzeptübersicht

1. Der Kapazitätswert C allein beschreibt einen realen Kondensator nicht vollständig.
2. Reale Kondensatoren besitzen unter anderem ESR, ESL und Leckstrom.
3. Dadurch besitzt die Impedanz ein Minimum bei der Eigenresonanzfrequenz.
4. Unterhalb der Eigenresonanz dominiert das kapazitive Verhalten.
5. Oberhalb der Eigenresonanz dominiert die parasitäre Induktivität.
6. Bei keramischen Kondensatoren kann die wirksame Kapazität durch eine angelegte Gleichspannung deutlich sinken.
7. Bauart und Baugröße bestimmen, für welche Aufgabe ein Kondensator geeignet ist.

3.1 Kerninhalt

3.1.1 Vom idealen zum realen Kondensator

Kurze Wiederholung des idealen Modells.

Falstad oder Bode-Darstellung:

- idealer Kondensator,
- $|Z_C|$ fällt mit -20 dB/dec ,
- Phase ideal -90° .

Danach Konfrontation mit einem realen Impedanzdiagramm:

- zunächst fallende Impedanz,
- Minimum,
- danach wieder steigende Impedanz.

Leitfrage:

Warum wird die Impedanz eines Kondensators bei hohen Frequenzen wieder größer?

3.1.2 Bauarten von Kondensatoren

Keramikkondensatoren

- MLCC
- kleine Bauform
- geringe parasitäre Induktivität
- gut für hohe Frequenzen
- verschiedene Keramikklassen
- C0G/NP0 gegenüber X7R/X5R
- DC-Bias insbesondere bei Klasse-II-Keramik

Folienkondensatoren

- gute Stabilität
- geringe Verluste
- häufig größere Bauform
- Anwendungen beispielsweise Signalverarbeitung, Resonanzkreise, Leistungselektronik

Elektrolytkondensatoren

- große Kapazitäten
- Polarität beachten
- höhere ESR/ESL
- gut als Energiespeicher bzw. Bulk-Kondensator
- begrenzte Lebensdauer und Ripple-Strom

3.1.3 Das Ersatzschaltbild des realen Kondensators

Ein einfaches Ersatzschaltbild enthält:

- die ideale Kapazität C ,
- einen Serienwiderstand R_{ESR} ,
- eine Serieninduktivität L_{ESL} ,
- gegebenenfalls einen parallelen Leckwiderstand.

[draw.io: Ersatzschaltbild eines realen Kondensators]

Bedeutung:

- C : gewünschte Speicherwirkung
- ESR: Verluste und Erwärmung
- ESL: Anschluss-, Gehäuse- und Leiterbahninduktivität
- Leckwiderstand: Gleichstromverlust

ESR

Der Equivalent Series Resistance verursacht Verlustleistung.

Bei einem Wechsel- bzw. Ripple-Strom gilt näherungsweise:

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

Damit kann ein Kondensator thermisch belastet werden, obwohl die mittlere Gleichstromaufnahme idealerweise null ist.

ESL

Jeder reale Strompfad besitzt eine Induktivität.

Bei hohen Frequenzen wächst der induktive Blindwiderstand:

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

Damit wird bei ausreichend hoher Frequenz schließlich die parasitäre Induktivität wichtiger als die Kapazität.

3.1.4 Eigenresonanzfrequenz

Im vereinfachten Serienmodell aus C , ESR und ESL gilt:

- bei niedrigen Frequenzen dominiert C ,
- bei der Eigenresonanz gleichen sich kapazitiver und induktiver Blindanteil aus,
- bei hohen Frequenzen dominiert ESL.

Für die Resonanzfrequenz gilt näherungsweise:

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

Bei $f = f_{\text{SRF}}$ erreicht die Impedanz näherungsweise ihr Minimum und wird wesentlich durch den ESR bestimmt.

[Grafik: $|Z|$ über f mit kapazitivem Bereich, SRF, induktivem Bereich]



Ein realer Kondensator wirkt nur **unterhalb seiner Eigenresonanzfrequenz überwiegend kapazitiv**.

Oberhalb der Eigenresonanzfrequenz verhält er sich zunehmend wie eine Induktivität.

Praktische Falstad-Untersuchung

Modellieren Sie einen Kondensator aus

- idealem C ,
- kleinem Serienwiderstand,
- kleiner Serieninduktivität.

Variieren Sie die Frequenz über mehrere Dekaden.

Beobachten Sie:

- den zunächst fallenden Betrag der Impedanz,
- das Impedanzminimum,
- den anschließenden Anstieg.

3.1.5 Kapazität ist nicht immer der aufgedruckte Wert

Toleranz

Der Nennwert besitzt wie beim Widerstand eine Toleranz.

Temperatur

Die Änderung hängt stark von der verwendeten Kondensatortechnologie ab.

DC-Bias

Insbesondere bei keramischen Kondensatoren der Klasse II kann die wirksame Kapazität mit steigender Gleichspannung deutlich abnehmen.

Beispiel:

Ein Bauteil ist mit $10\ \mu\text{F}$ und $25\ \text{V}$ beschriftet.

Bei einer angelegten Gleichspannung von $20\ \text{V}$ können tatsächlich deutlich weniger als $10\ \mu\text{F}$ wirksam sein.



Nennkapazität und wirksame Kapazität sind nicht zwangsläufig identisch.

Für die reale Auswahl müssen Spannung, Temperatur und Frequenz berücksichtigt werden.

3.1.6 Abblocken und Puffern

In einer Versorgung treten sowohl

- langsame Änderungen des Strombedarfs als auch
- sehr schnelle Stromänderungen durch Schaltvorgänge

auf.

Ein einzelner Kondensator kann nicht in allen Frequenzbereichen gleich gut wirken.

Daher werden häufig unterschiedliche Kondensatoren kombiniert:

- großer Elektrolytkondensator für langsamere Laständerungen und Energiespeicherung,
- keramischer Kondensator für schnelle Stromänderungen,
- kleine Bauform und kurze Leiterbahnen für geringe ESL.

[Leit-Schaltung: Versorgungskondensatoren hervorheben]

Wichtig:

Nicht nur der Kondensator selbst, sondern auch seine Verbindung zur Schaltung besitzt parasitäre Induktivität.

Ein guter Abblockkondensator muss daher **nah am zu versorgenden Bauteil** platziert werden.

3.1.7 Datenblatt eines realen Kondensators lesen

Konkretes Datenblattbeispiel eines MLCC, z.B. $10\mu\text{F}$.

Zu untersuchen:

- Nennkapazität
- Toleranz
- Spannungsfestigkeit
- Dielektrikum
- Baugröße
- Temperaturbereich
- DC-Bias-Kennlinie
- Impedanz über Frequenz
- Eigenresonanzfrequenz

Praktische Frage:

Ist ein mit $10\mu\text{F}$ beschrifteter Kondensator bei der vorgesehenen Betriebsspannung tatsächlich noch ein $10\mu\text{F}$ -Kondensator?

3.2 Häufige Fehler

- Einen Kondensator ausschließlich anhand seiner Kapazität auswählen.
- Annehmen, dass $|Z_C|$ bei steigender Frequenz immer weiter fällt.
- ESR und ESL vernachlässigen.
- Nennkapazität und wirksame Kapazität gleichsetzen.
- Spannungsfestigkeit mit „Kapazität bleibt bis zu dieser Spannung konstant“ verwechseln.
- Polarität eines Elektrolytkondensators ignorieren.
- Abblockkondensatoren weit vom Verbraucher entfernt platzieren.
- Einen großen Kondensator automatisch für alle Frequenzen für besser halten.

3.3 Übungen

Aufgabenideen:

1. Idealer Kondensator:

- $|Z_C|$ für mehrere Frequenzen bestimmen.
- Bode-Steigung erkennen.

2. Reales Ersatzschaltbild:

- aus C und ESL die Eigenresonanzfrequenz berechnen.
- Bereiche unterhalb/oberhalb der SRF interpretieren.

3. ESR:

- Ripple-Strom gegeben.
- Verlustleistung und Erwärmung abschätzen.

4. Datenblattaufgabe:

- MLCC auswählen.
- DC-Bias-Kurve auswerten.
- tatsächliche Kapazität bei Betriebsspannung bestimmen.

5. Praktische Falstad-Aufgabe:

- idealen und realen Kondensator vergleichen.
- ESR bzw. ESL verändern.
- Auswirkungen im Impedanzgang beobachten.

6. Leit-Schaltung:

- geeignete Kondensatortypen für Bulk- und HF-Abblockung begründen.

3.4 Zusammenfassung

- Ein realer Kondensator besitzt neben C parasitäre Widerstände und Induktivitäten.
- ESR erzeugt Verluste und begrenzt die minimale Impedanz.
- ESL bestimmt das Verhalten bei hohen Frequenzen.
- Bei der Eigenresonanzfrequenz besitzt der Kondensator seine kleinste Impedanz.
- Oberhalb der Eigenresonanz wirkt der Kondensator zunehmend induktiv.
- Die wirksame Kapazität kann von Spannung, Temperatur und Frequenz abhängen.
- Für die Bauteilauswahl müssen Datenblatt und konkreter Einsatzbereich gemeinsam betrachtet werden.

3.5 Ausblick

Widerstand und Kondensator sind nun als reale Bauteile bekannt.

Im nächsten Block werden beide gezielt miteinander kombiniert.

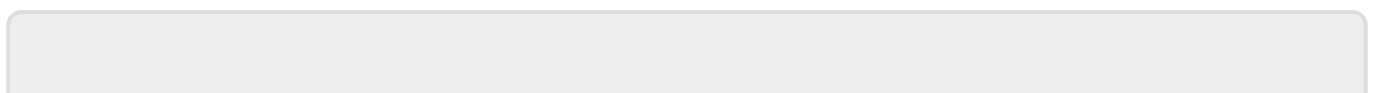
Die Frage lautet dann nicht mehr:

„Wie verhält sich dieses Bauteil?“

sondern:

„Wie dimensionieren wir eine Schaltung so, dass bestimmte Frequenzen übertragen und andere abgeschwächt werden?“

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



From:

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

Permanent link:

https://wiki.mexle.org/elektronische_schaltungstechnik/block03

Last update: **2026/09/28 00:25**

