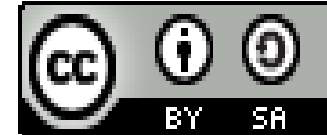


Von Spulen und Kondensatoren zu Filtern und Tunern

Alle Rechte an diesem Vortrag:

© 2022 Dr. Andreas Krüger, DJ3EI dj3ei@famsik.de



Dieser Vortrag ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International [Lizenz](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

Diese Folien gibt es bei
[https://dj3ei.famsik.de/
2022-vortrag-hamradio](https://dj3ei.famsik.de/2022-vortrag-hamradio)



Version vom 25.10.2022,
geringfügig verbessert gegenüber HamRadio 2022

Von Spulen und Kondensatoren zu Tunern und Filtern

Ankündigungstext vor HamRadio, von DARC+Messe gut versteckt

Am Ziel dieses Vortrags erwartet uns das Verständnis, wie Antennentuner eigentlich Impedanzen transformieren und wie sich die frequenzabhängige Dämpfung eines gegebenen LC-Filters berechnen lässt. Dieses Ziel erreichen wir zweimal, auf zwei Wegen: Aus einem grundsätzlichen, einfachen Erklärungsansatz ergibt sich eine (oft recht genaue) Näherungsregel. Wer mathematisch interessiert ist, geht einen zusätzlichen, zweiten Weg mit, der zu präzisen Formeln führt. Beide Wege starten gemeinsam bei Grundsätzlichem: Wie verhalten sich Spulen, wie Kondensatoren? Was messen die Maßeinheiten Henry und Farad? Als prominente Gäste, die uns auf unserer Wanderung hilfsbereit begleiten, begrüßen wir die freundliche Güte und den zunächst geheimnisvollen, aber dann doch recht zugängliche Buchstaben "j".

Umfrage:

Folgen des Mathe-Schulunterrichts

- Wer hat seit dem Mathe-Schulunterricht Lust darauf, dem damals Gelernten oder Ähnlichem wieder zu begegnen?
- Wer hat seit dem Mathe-Schulunterricht eher Angst, Missmut oder jedenfalls keine Lust, dem damals Gelernten oder Ähnlichem wieder zu begegnen?

Andreas, DJ3EI

- Lizenz seit 2001
- Kleine Amateurfunkstation
(Mietwohnung, miese Antenne, QRP)
- CW, JS8, Ragchew, immer mal was Neues
- Mache ganz gerne AJW, am liebsten W
- Mein W-Vorgehen heute und auch sonst gerne:
"Aller Anfang ist schwer" –
also anderen den Anfang leicht machen
(Grundlagen gründlich gründen).

Ich mag Kalauer.

Inhaltsverzeichnis

- Spule
- Kondensator
- Schwingkreise
- Ein Filter
- Eine Impedanz-Anpassschaltungen ("Tuner")

Fragen? Fragen!

BK

Die Spule

Die Spule: Ein Energiespeicher

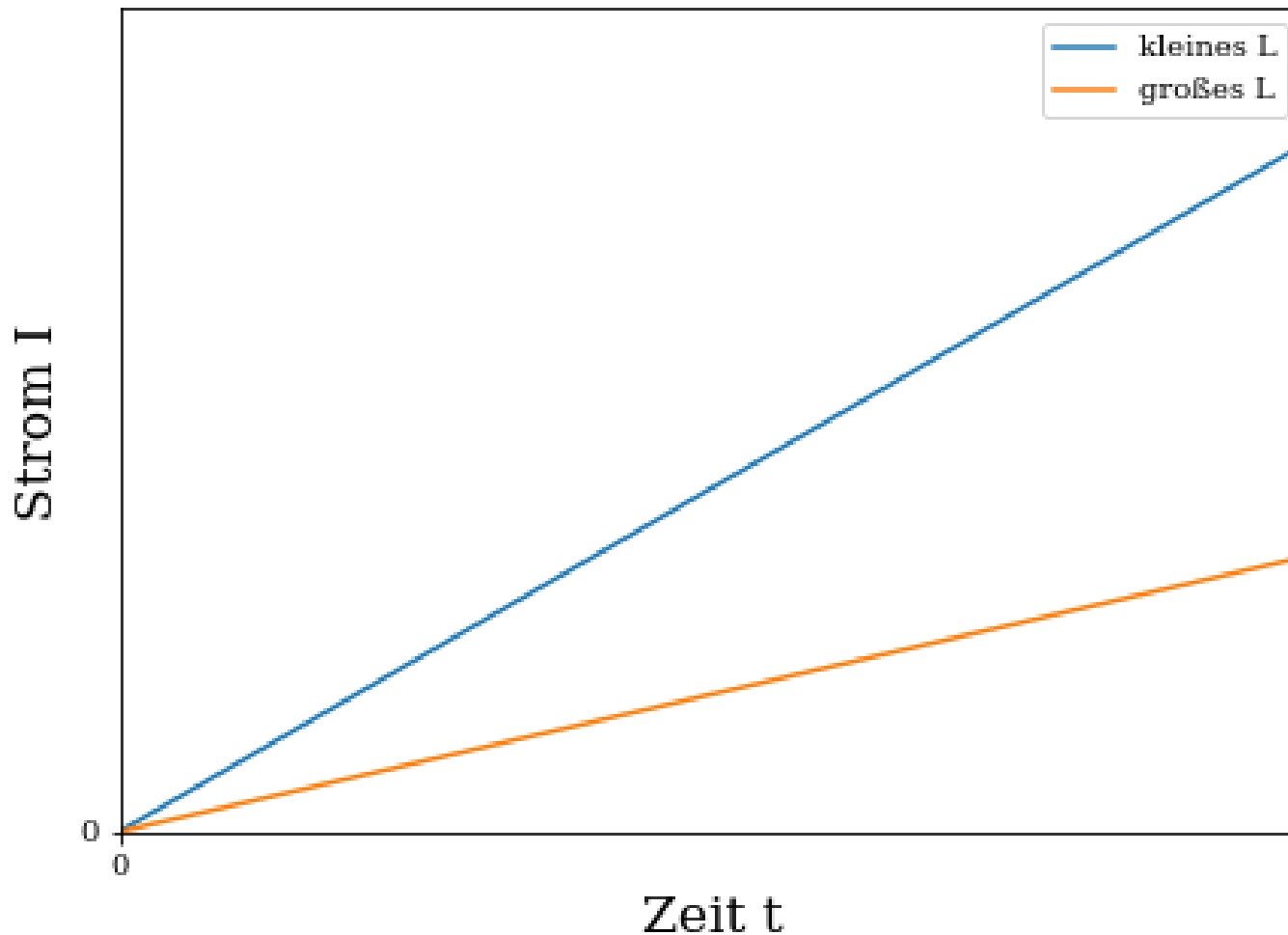
Die Energie wird *in einem Magnetfeld* gespeichert, aber das ist für das Folgende nicht wichtig.

- Die Energie, die gerade in einer Spule gespeichert ist, kann berechnet werden aus dem Strom, der gerade durch die Spule fließt.
- Qualitativ:
Viel Strom = viel Energie,
wenig Strom = wenig Energie.

Energieänderung durch Spannung

Der Strom, der durch eine Spule fließt,
ändert sich,
wenn an den Spulenanschlüssen
eine Spannung anliegt.

"Aufladen" von Spulen bei konstanter Spannung



*Analogie: Kraft,
um Schwungrad
zu drehen.*

Große und kleine Induktivitäten

- Große Induktivität:
Hohe Spannung wirkt lange ein,
allmählich fließt Strom.
- Kleine Induktivität:
Kleine Spannung wirkt kurz ein,
bald fließt Strom.

Maßeinheit Henry

Voltsekunden pro Ampere

$$H = V \cdot s / A$$

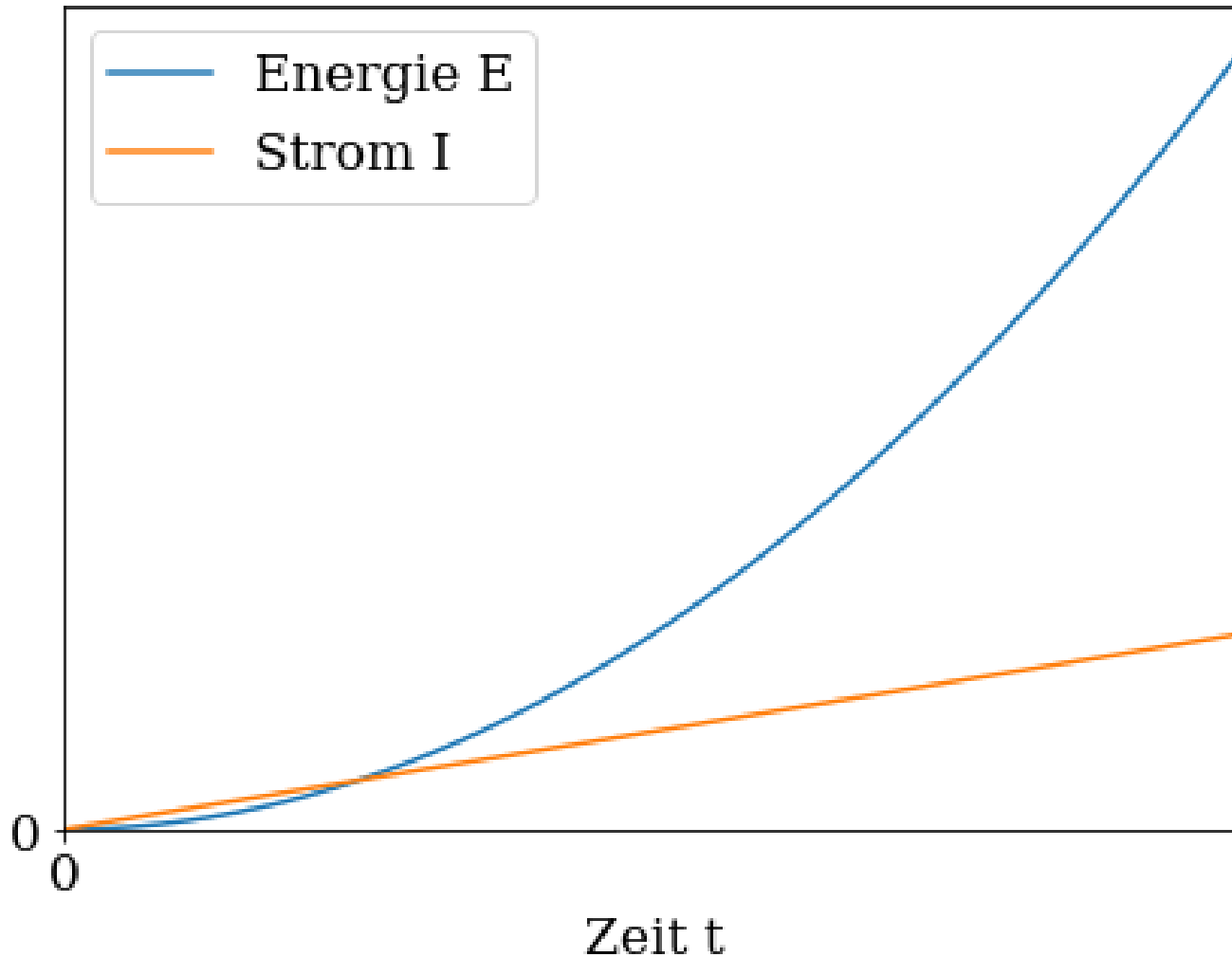
Willkürliches Zahlenbeispiel:

Bei 3 V fließt nach 2 μ s ein Strom von 30 mA:

$$3 \cdot 2E-6 / 30E-3 = 200E-6$$

Die Spule hat eine Induktivität von 200 μ H.

Energie steigt zunehmend schnell



$$E = \frac{1}{2} L I^2$$

Strom bleibt konstant ohne Spannung

- Keine Spannung: Keine **Stromänderung**.
- Bei einer idealen Spule und einem idealen Kurzschluss fließt der Strom unendlich lange weiter.
- Bei realen dicken "Eisenklotz"-Spulen vielleicht einige Sekunden, bei kleinen HF-Spulen sehr viel kürzer.
- Sehr lange Zeiten (Stunden und Tage?) bei Supraleitern.

Spulengleichung

$$U = L \dot{i}$$

Spannung U

Induktivität L

Änderung $\dot{i}$ des Stroms i

Zahlenbeispiel von eben:

Bei 3 V fließt nach 2 μ s ein Strom von 30 mA
durch eine Induktivität von 200 μ H :

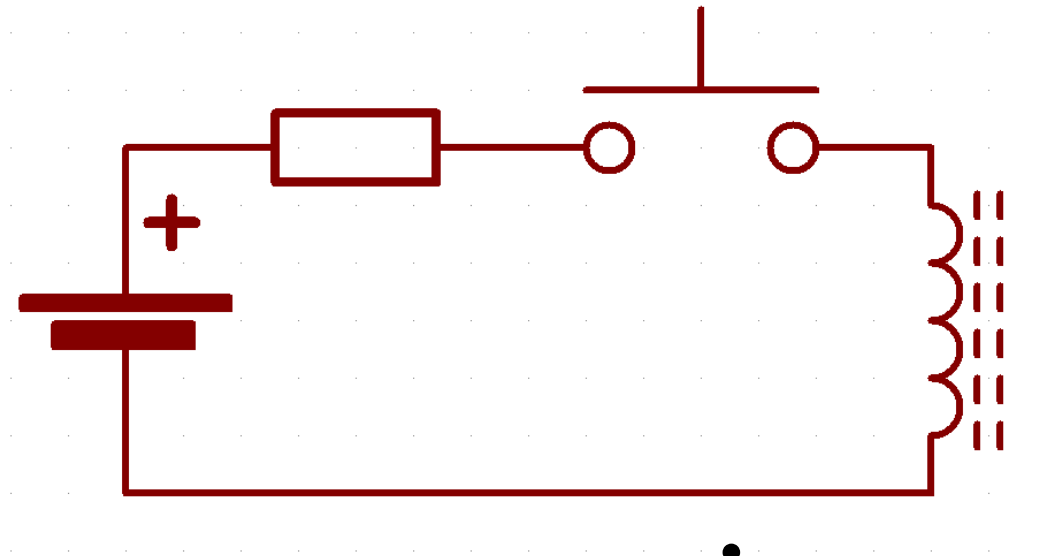
$\dot{i}$ ist 30 mA / 2 μ s = 15 kA/s

3 = 200E-6 · 15E3 (passt)

(Zu) schneller Energietransfer

Wer einem Energiespeicher
sehr schnell viel Energie
entziehen will
oder viel hinein pumpen,
sollte mit **erheblichen** Effekten
rechnen.

Spannungsspitzen beim Abschalten



$$U = L \dot{i}$$

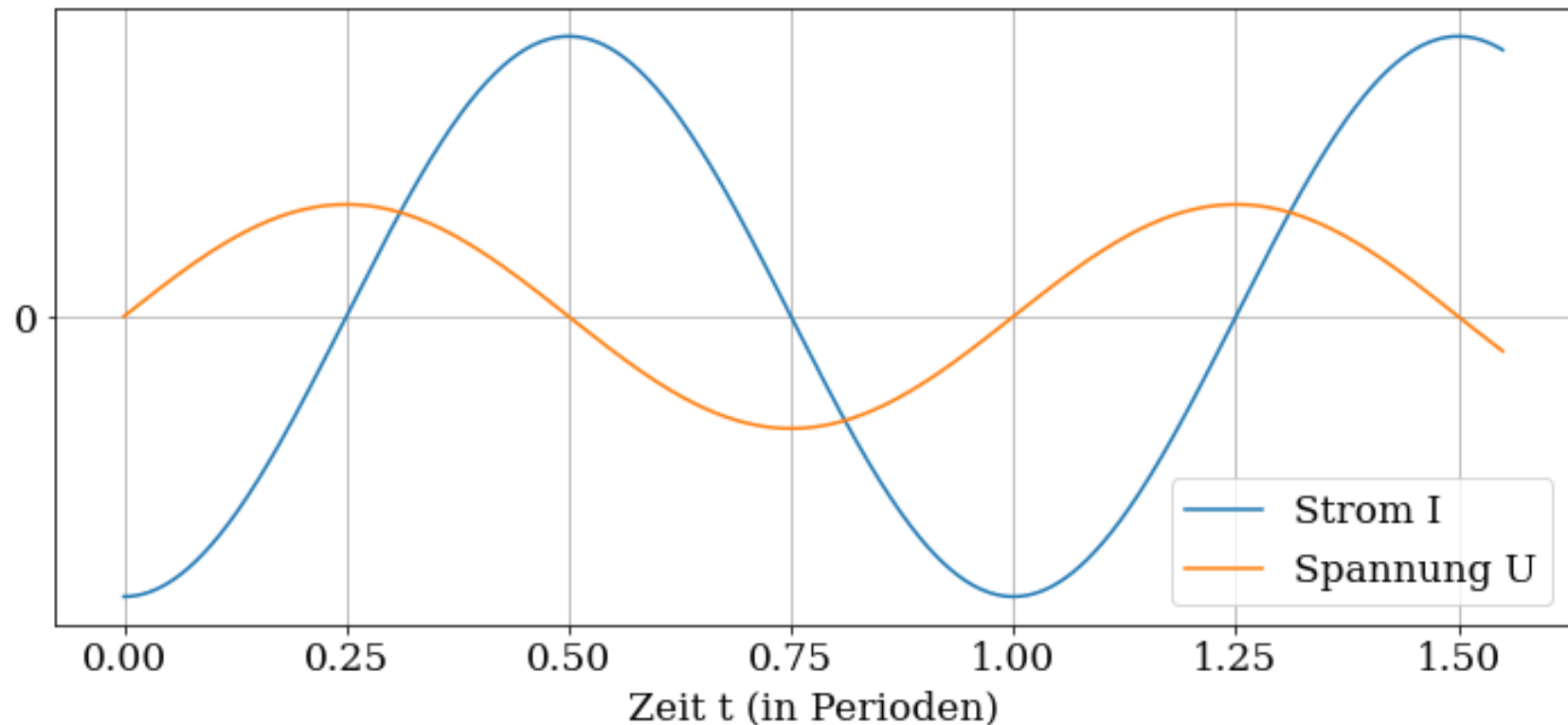
Ein idealer Schalter würde schlagartig abschalten.
Damit wäre $\dot{i}$ unendlich hoch.

Eine ideale Induktivität antwortet darauf
mit einer unendlich hohen Spannungsspitze.

Sinussignale

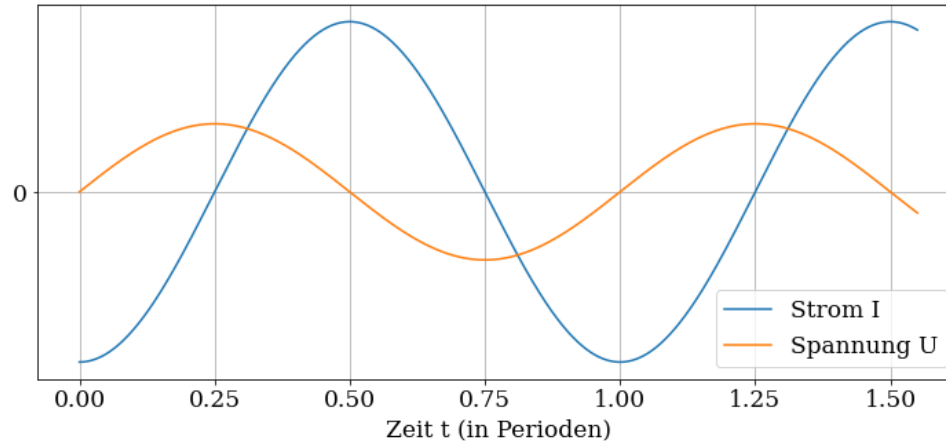
- Wir interessieren uns für Signale mit nur einer Frequenz: Sinussignale.
- Andere periodische, stetige Signale können aus Sinussignalen aufgebaut werden bzw. in Sinussignale zerlegt werden. ("Fourier-Analyse.")
- Deshalb können wir zum Beispiel von Oberwellen, Frequenzen und Bandbreiten von Signalen reden.
- Auch Cosinussignale oder Signale anderer Phasen sind hier mit gemeint; wenn von "Sinussignalen" gesprochen wird.

Sinussignal an einer Spule



"In Induktivitäten Ströme sich verspäten."

Sinussignal an einer Spule



Spule L , Frequenz f

- Größe des Stroms: $U / (2 \pi f L)$
- Insofern ähnlich, als würde die Spule durch einen Widerstand $R = 2 \pi f L$ ersetzt, dem sog. "Scheinwiderstand".
- Aber: Um eine Viertelperiode verzögert!

Scheinwiderstand

- Widerstand, durch den genau so viel Strom fließen würde wie durch eine Spule.
- Voraussetzung: Ich hab ein Sinussignal einer bestimmten Frequenz, sonst macht das keinen Sinn.
- Gemessen in Ω .
- Formelzeichen nicht ganz einheitlich, bei mir X_L
- Wert $X_L = 2 \pi f L$
- Aber: Bei einer Spule verschiebt sich die Phase des Stroms um eine Viertelperiode nach hinten gegenüber der Phase der Spannung, bei einem Widerstand nicht.

Scheinwiderstand

- Wert $X_L = 2 \pi f L$
- Beispiel: 23,08 μH bei 7,05 MHz
 $2 * \pi * 7.05\text{E}6 * 23.08\text{E}-6 = 1022,4 \Omega$
- Frequenz doppelt, Scheinwiderstand doppelt

Eine griffige Abkürzung

- Wir brauchen eine griffige Abkürzung für:
"Hier verschiebt sich die Phase um eine Viertelperiode."
- Dazu nehmen wir den Buchstaben: j
- Beispiel:

$$100 \, j \, \Omega$$

bedeutet: Die Impedanz einer Spule mit einem Scheinwiderstand von $100 \, \Omega$.

Impedanz vs. Scheinwiderstand

$$X_L = 100 \, \Omega$$

Einer Angabe $100 \, \Omega$ sehe ich nicht unmittelbar an, ob der Scheinwiderstand einer Spule oder ein "normaler" Ohmscher Widerstand gemeint ist.

$$Z_L = 100 \, j \, \Omega$$

Der Impedanzangabe ist sofort anzusehen, dass eine Spule gemeint ist.

Für Impedanzen wird oft der Buchstabe Z genutzt.

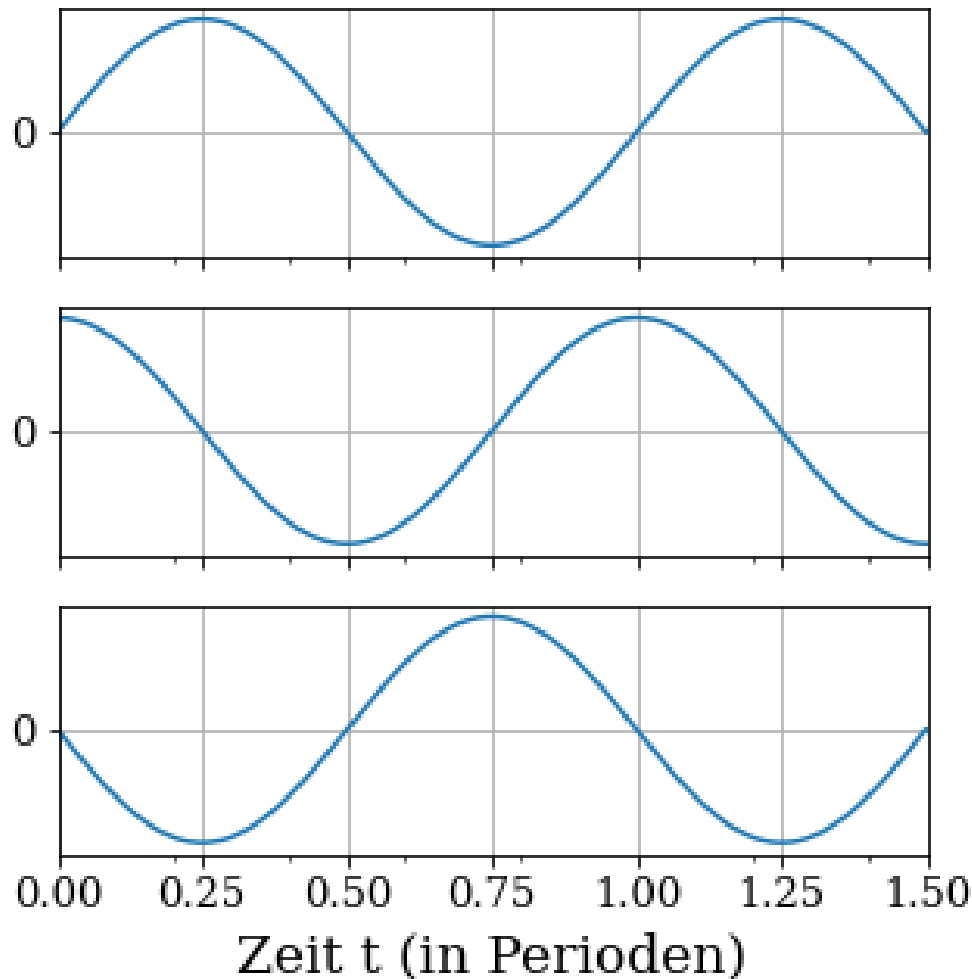
$100 \, j \, \Omega$

Von rechts nach links:

- Das Zeichen Ω sagt uns:
"Diese Zahl ist eine Impedanz. Sie kann nach dem Ohmschen Gesetz mit einem Strom multipliziert werden, um eine Spannung zu erhalten."
- Das Zeichen j sagt uns:
"Der Strom muss ein Sinussignal sein. Um auf die Spannung zu kommen, muss zusätzlich noch um eine Viertelperiode verschoben werden."
- In welche Richtung wird verschoben?
Da die Spannung eine Viertelperiode früher als der Strom kommt, verschiebt j um eine Viertelperiode **nach früher (=links)**.

Nochmal langsam...

- j ist eine Aufschreibekonvention für:
"Phase um eine Viertelperiode
nach früher verschoben."
- Das j wird multipliziert,
"100 j " heißt " $100 \cdot j$ ".
- "100 j " oder " j 100" ist egal.



• **j**

• **j**

Ein Sinussignal
zweimal um eine
Viertelperiode
verschieben
bedeutet,
es um eine halbe
Periode
verschoben zu
haben, und das ist
dasselbe wie
Multiplikation
mit -1.

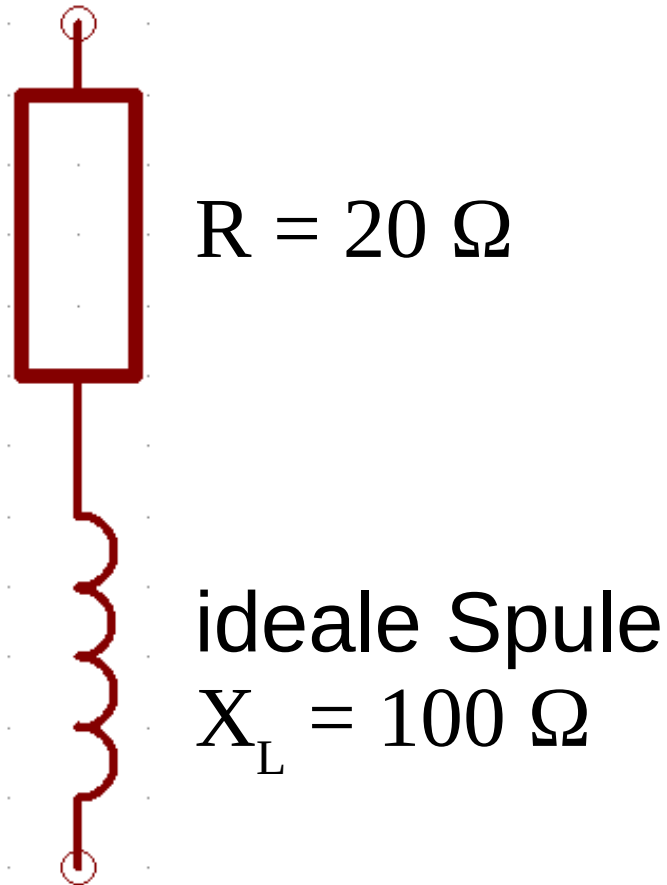
$$\mathbf{j} \cdot \mathbf{j} = \mathbf{j}^2 = -1$$

Ach Du liebe Güte!

Kurzumfrage:
Wem schwirrt inzwischen der Kopf?

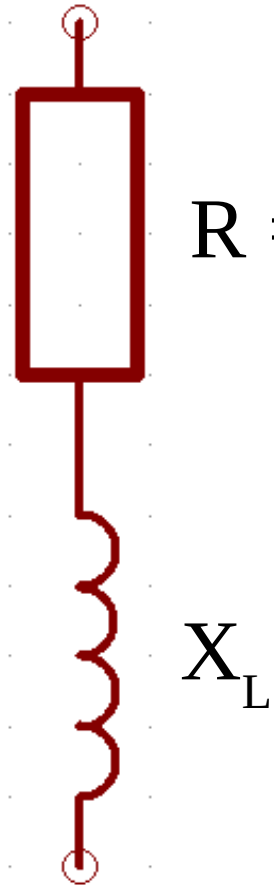
Reale Spulen

Eine reale Spule



- Eine reale Spule hat Verluste.
- Die Verluste können modelliert werden als (kleiner) Serienwiderstand.
- Praxiswerte: R im Bereich $X_L / 50$ bis $X_L / 1000$.
- Im Beispiel $R = X_L / 5$
Das wäre in der HF-Praxis eine ausnehmend schlechte Spule.

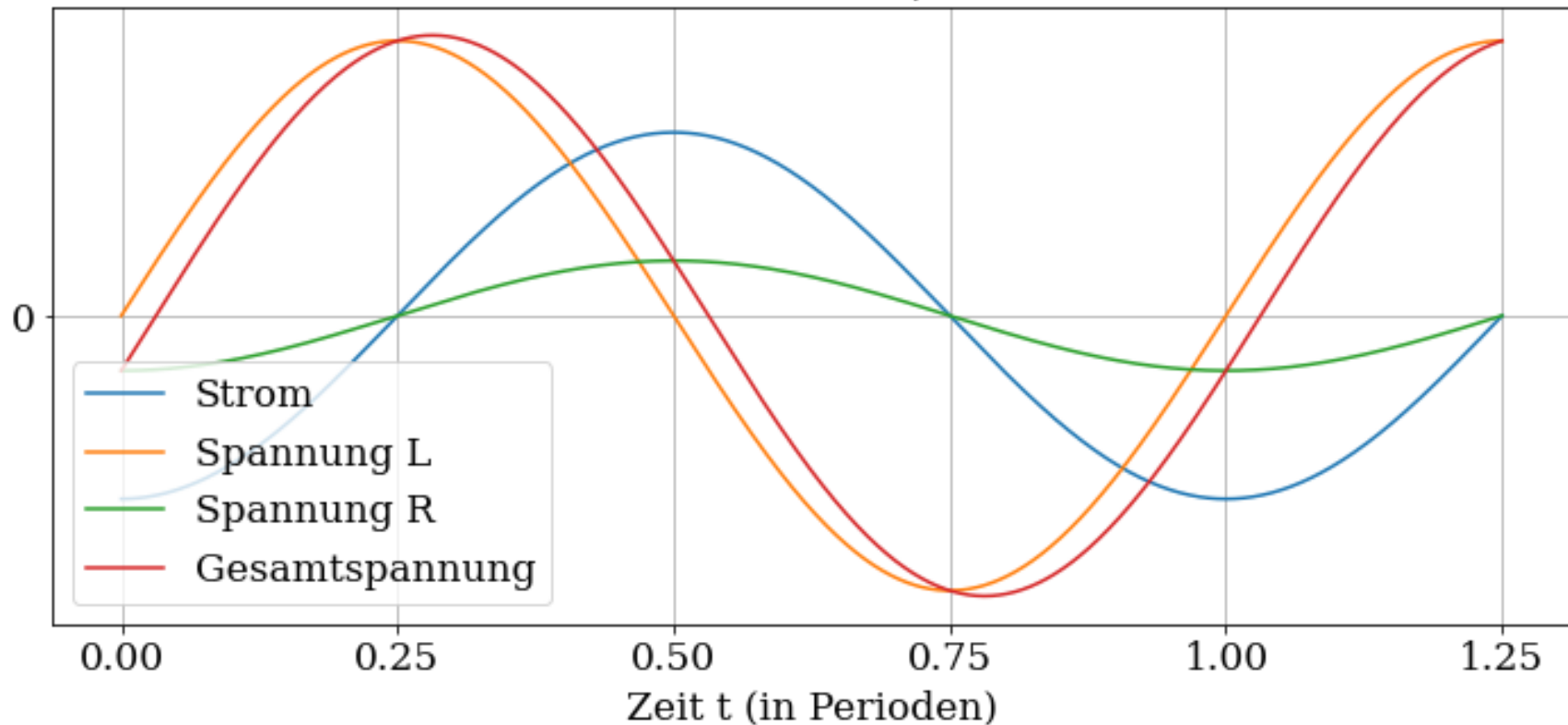
Die Güte Q einer Spule



- Güte $Q = X_L / R$
- Englisch "quality factor", daher Q .
- Übliche HF-Spulen haben Werte 50 bis 1000
- Spulen im VHF / UHF – Bereich manchmal noch mehr.

Beispielspule

R und L in Serie, Güte 5

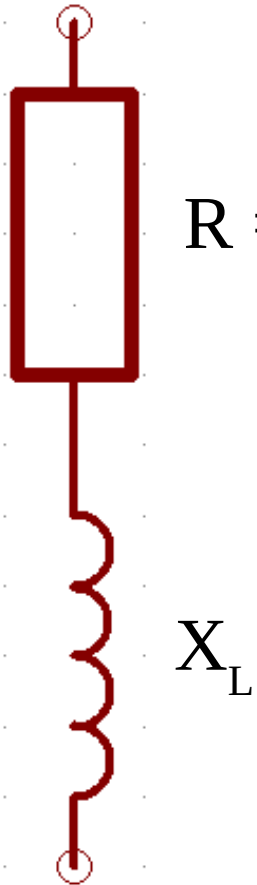


Phasenverschiebung:

Strom nicht mehr 90° hinter Spannung, sondern nur noch $78,7^\circ$.

Spitzenwerte fast gleich geblieben: $U_{\text{ges}} / I = 102 \, \Omega$ statt $100 \, \Omega$

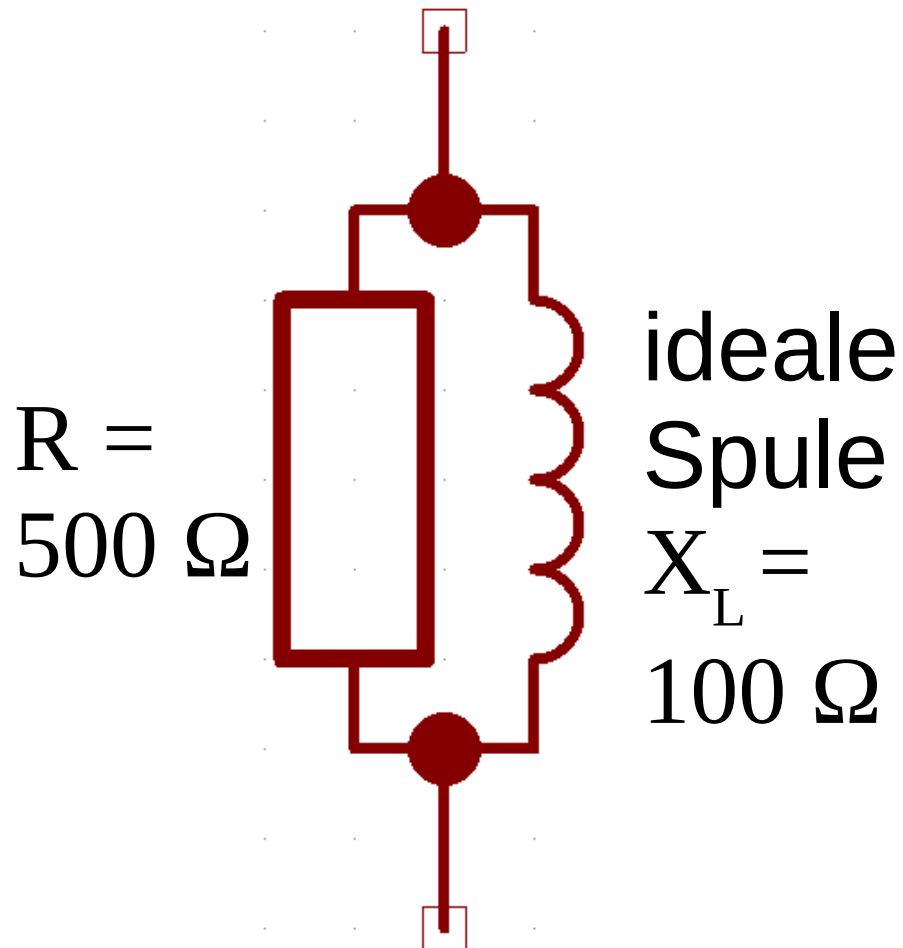
Spulen normaler Güte



- Der Phasenunterschied beträgt nicht mehr 90° , sondern weniger.
(Wie viel genau, ist uns egal.)
- Für einigermaßen große Q ändert sich der Gesamt-Scheinwiderstand (fast) nicht.
(Hier: Scheinwiderstand = Spitzenspannung / Spitzenstrom, ohne Rücksicht auf Phasenlage).

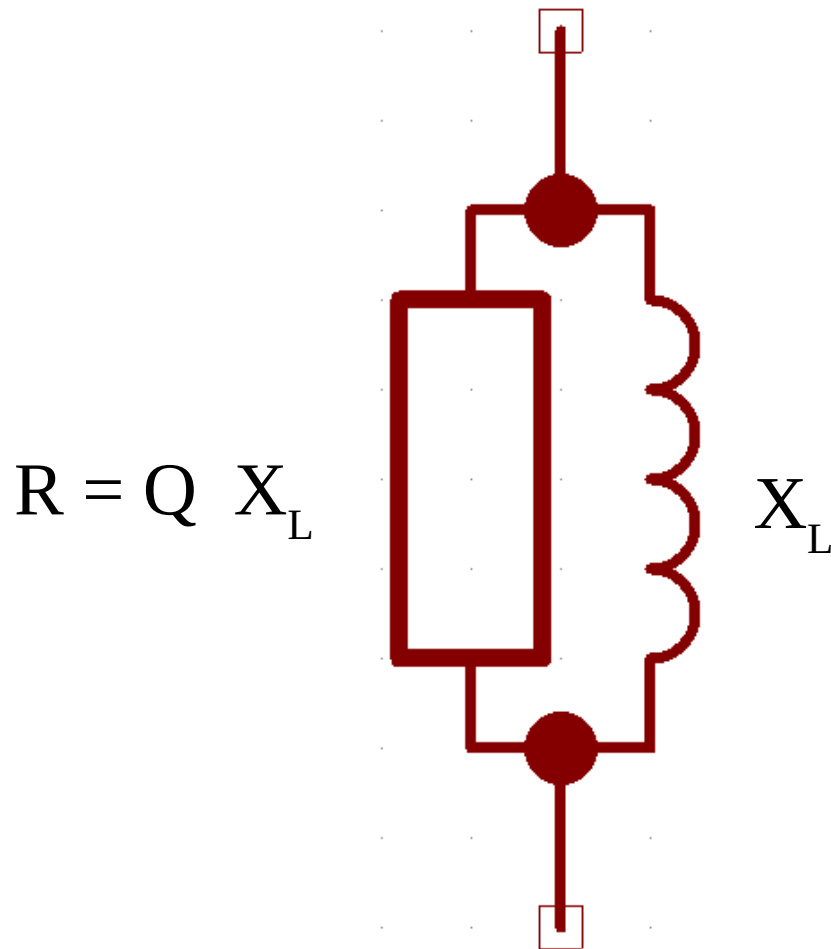
Jetzt Spulengüte nochmal,
aber anders.

Eine reale Spule, parallele Möglichkeit



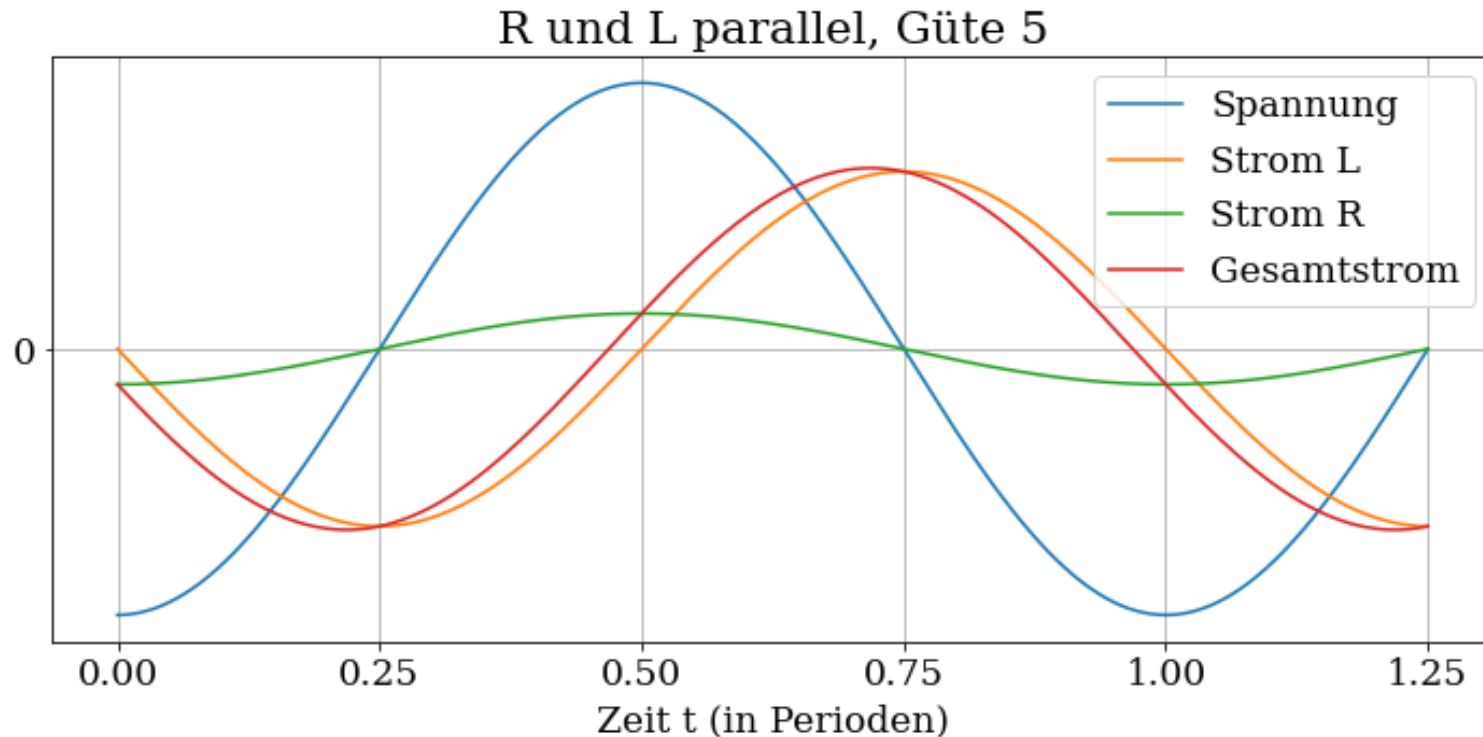
- Eine reale Spule hat Verluste.
- Die Verluste können auch modelliert werden als (ziemlich großer) Parallelwiderstand.

Die Güte Q einer Spule, parallele Möglichkeit



- Güte $Q = R / X_L$
- Im Zahlenbeispiel
 $R = 500 \Omega$
 $X_T = 100 \Omega$
 $Q = 5$

Beispielspule

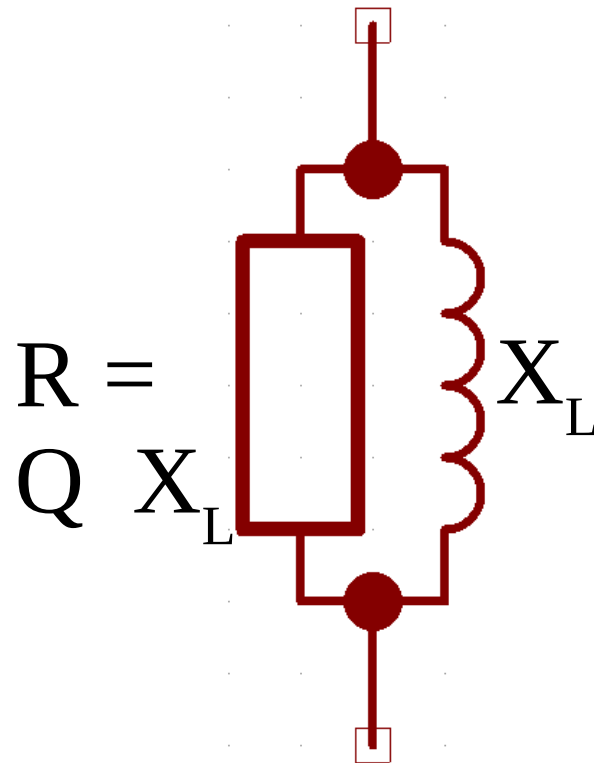
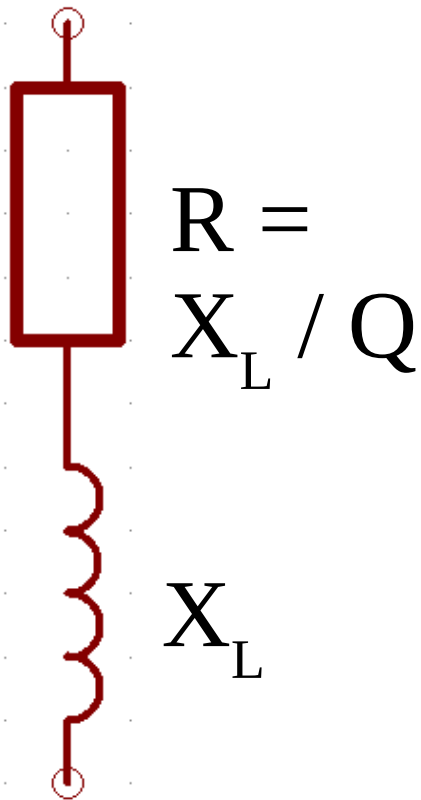


Phasenverschiebung:

Strom nicht mehr 90° hinter Spannung, sondern nur noch $78,7^\circ$.

Spitzenwert fast gleich geblieben: $U / I_{\text{ges}} = 98 \, \Omega$ statt $100 \, \Omega$

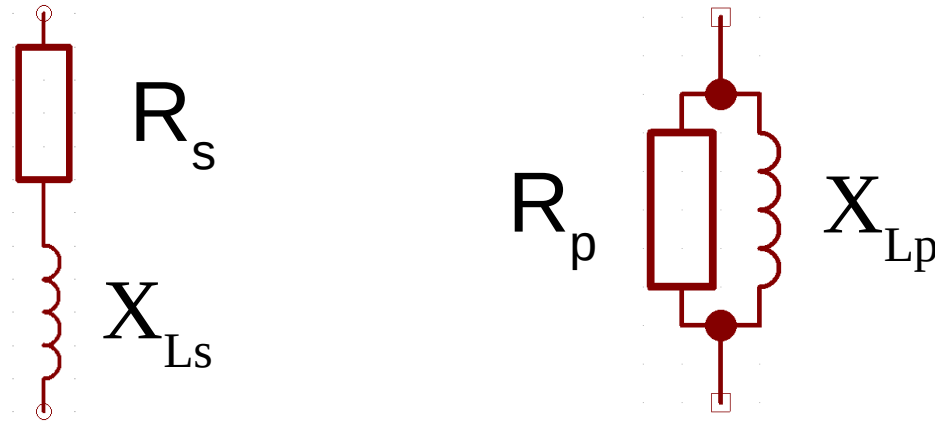
Wichtige Faustregel für hohes Q



Die beiden
verhalten sich
fast gleich!

- Phase ist identisch.
- Abweichung Größe Scheinwiderstand bei hohem Q vernachlässigbar.

Die Güte ist dieselbe



Man kann die eine Schaltung nehmen und entsprechende Werte der anderen Schaltung passend justieren, damit bei beiden **genau** dieselbe Phase und **genau** derselbe Scheinwiderstand herauskommt.

Dann ist der Q-Wert beider gleich.

Extrembeispiel: $Q = 1$



$$R_s = 10 \, \Omega$$

$$X_{Ls} = 10 \, \Omega$$

$$R_p = 20 \, \Omega$$



$$X_{Lp} = 20 \, \Omega$$

verhalten sich gleich.

War das zu trocken,
oder "nass" genug?

Genug von Spulen!

Auf zum Kondensator.

Manches in den folgenden Folien
mag Euch bekannt vorkommen.

Der Kondensator: Ein Energiespeicher

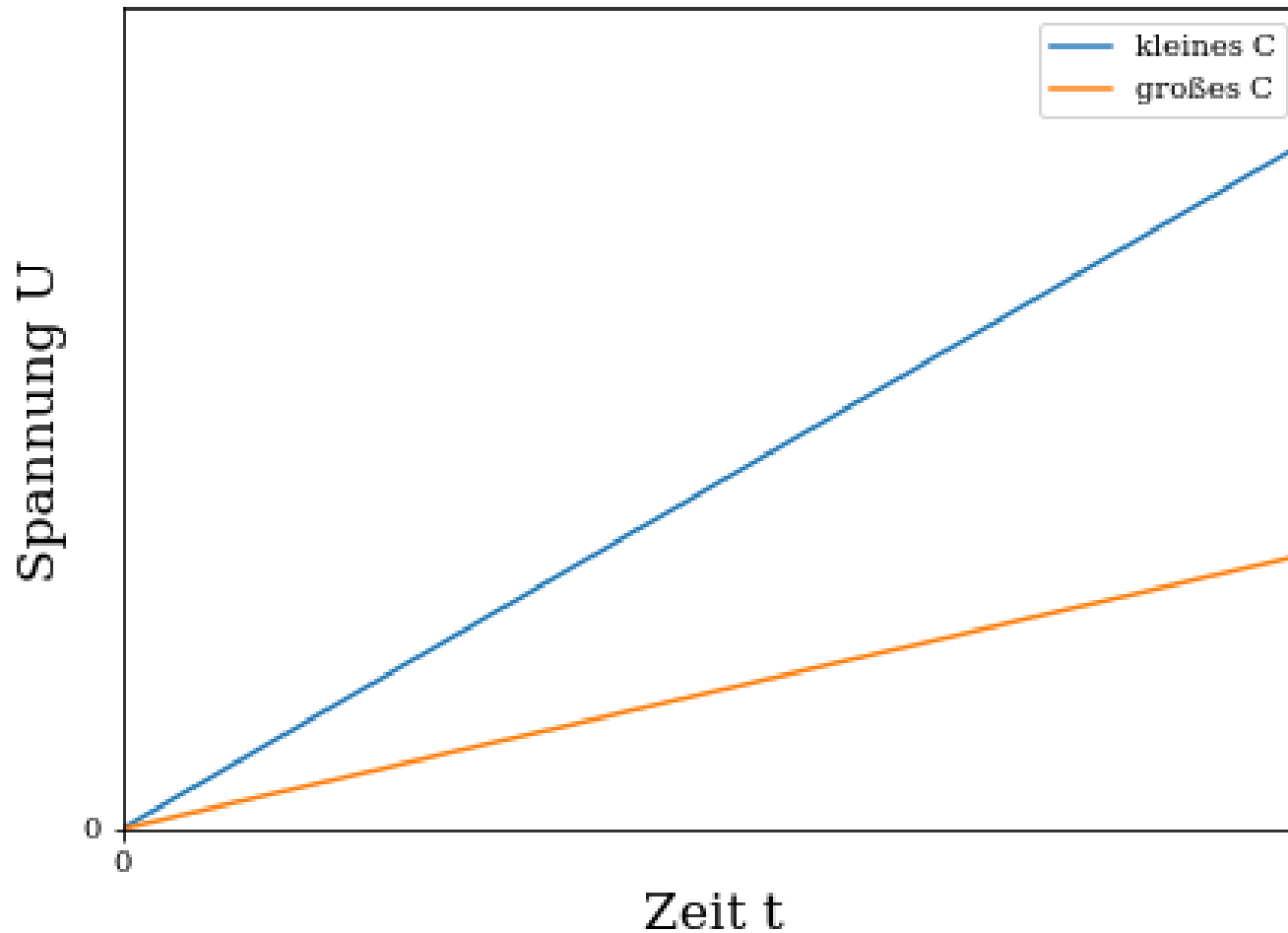
Die Energie wird in einem elektrischen Feld gespeichert, aber das ist für das Folgende nicht wichtig.

- Die Energie, die gerade in einem Kondensator gespeichert ist, kann berechnet werden aus der Spannung, die gerade über dem Kondensator anliegt.
- Qualitativ:
Viel Spannung = viel Energie,
wenig Spannung = wenig Energie.

Energieänderung durch Strom

Die Spannung über einem Kondensator
ändert sich,
wenn in den Kondensator
ein Strom hineinfließt oder heraus.

"Aufladen" von Kondensatoren bei konstantem Strom



*Analogie:
Drucklufttank
aufpumpen.*

Große und kleine Kondensatoren

- Große Kapazität:
Hoher Strom fließt lange,
allmählich ändert sich die
Spannung.
- Kleine Kapazität:
Kleiner Strom fließt kurz,
bald ändert sich die Spannung.

Maßeinheit Farad

Amperesekunden pro Volt

$$F = A s / V$$

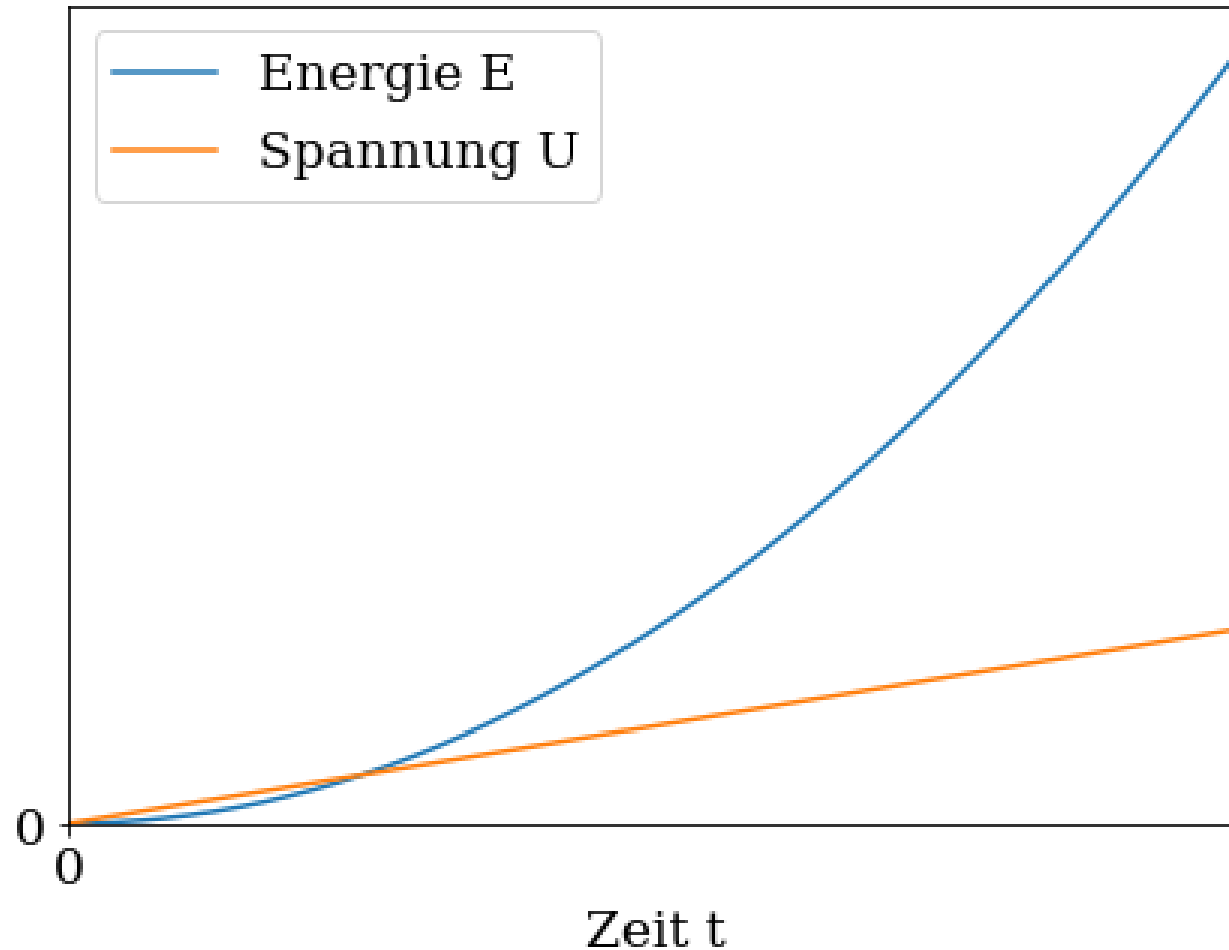
Willkürliches Zahlenbeispiel:

Bei 30 mA ergibt sich nach 2 μ s
eine Spannung von 3 V:

$$30E-3 \cdot 2E-6 / 3 = 20E-9$$

Der Kondensator hat eine Kapazität von 20 nF.

Energie steigt zunehmend schnell



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

Spannung bleibt konstant ohne Strom

- Kein Strom: Keine **Spannungsänderung**.
- Bei einem idealen Kondensator der an nichts angeschlossen ist (ideale Isolatoren an beiden Polen) bleibt die Spannung unendlich lange erhalten.
- Bei realen "dicken" Kondensatoren in trockener Luft: Tage.

Kondensatorgleichung

$$I = C \dot{U}$$

Strom I

Kapazität C

Änderung $\dot{U}$ der Spannung U

Zahlenbeispiel von eben:

Bei 30 mA ergibt sich bei einer Kapazität von 20 nF
nach 2 μ s eine Spannung von 3 V:

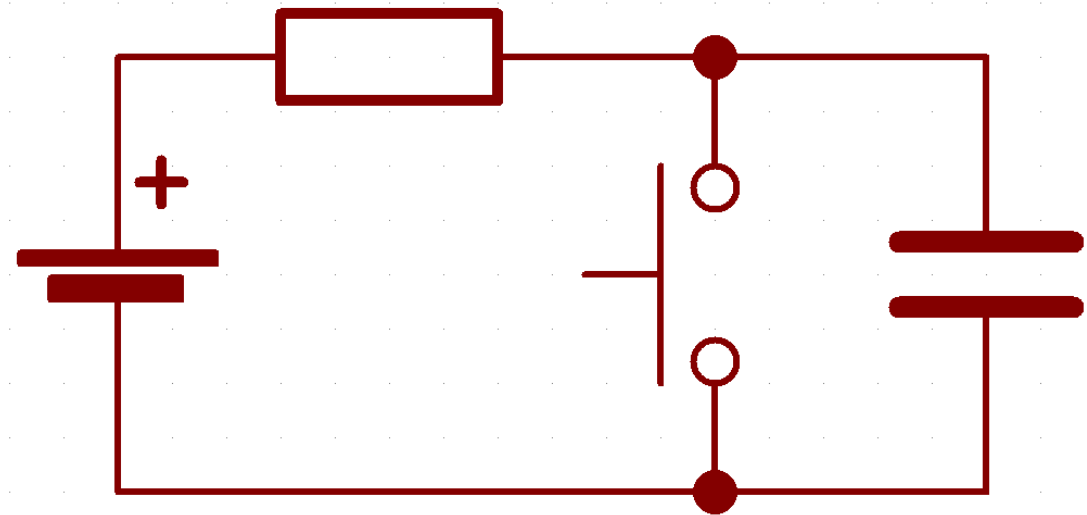
$\dot{U}$ ist 3 V / 2E-6 s = 1500 kV / s

30E-3 = 20E-9 · 1500E3 passt.

(Zu) schneller Energietransfer

Wer einem Energiespeicher
sehr schnell viel Energie
entziehen will
oder viel hinein pumpen,
sollte mit erheblichen Effekten
rechnen.

Stromspitzen beim Kurzschließen



$$I = C \dot{U}$$

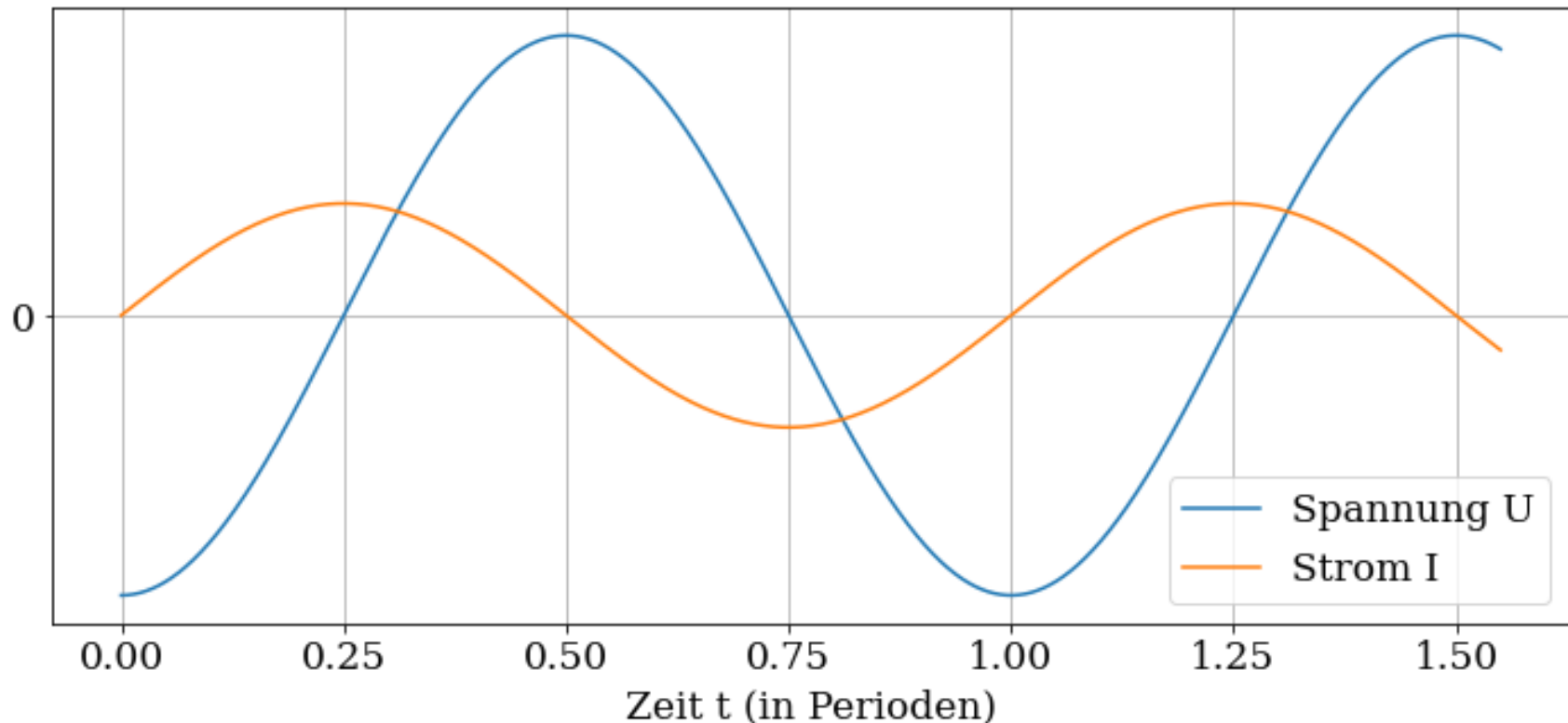
Ein idealer Schalter würde schlagartig kurzschließen.
Damit wäre $\dot{U}$ unendlich hoch.

Ein idealer Kondensator antwortet darauf
mit einer unendlich starken Stromstoß.

Sinussignale

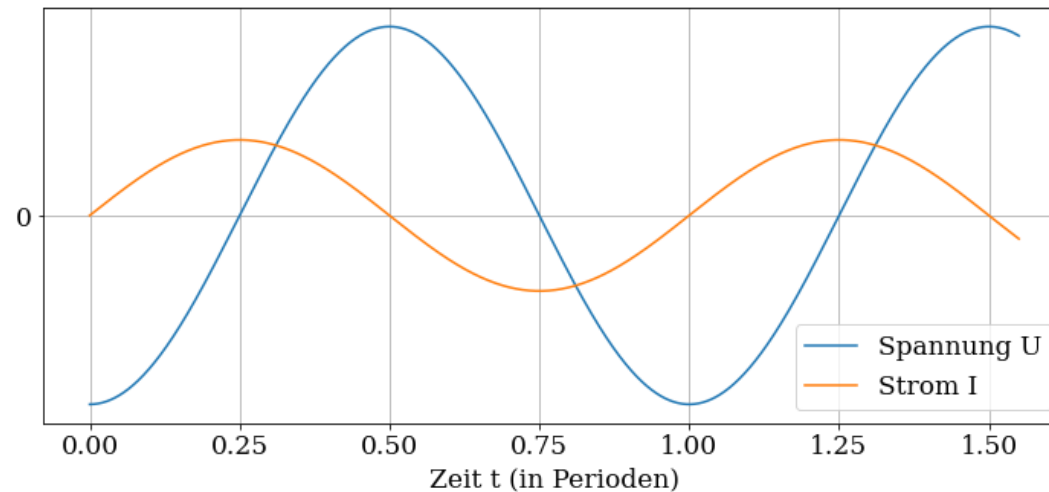
- Wir interessieren uns für Signale mit nur einer Frequenz: Sinussignale.
- Andere periodische, stetige Signale können aus Sinussignalen aufgebaut werden bzw. in Sinussignale zerlegt werden. ("Fourier-Analyse.")
- Deshalb können wir zum Beispiel von Oberwellen, Frequenzen und Bandbreiten von Signalen reden.
- Auch Cosinussignale oder Signale anderer Phasen sind hier mit gemeint.

Sinussignal an einem Kondensator



"Im Kondensator eilt der Strom vor."

Sinussignal an einem Kondensator



Kondensator C, Frequenz f

- Größe der Spannung: $I / (2 \pi f C)$
- Insofern ähnlich, als würde der Kondensator durch einen Widerstand $R = 1 / (2 \pi f C)$ ersetzt, dem sog. "Scheinwiderstand".
- Aber: Spannung um eine Viertelperiode verzögert!

Scheinwiderstand

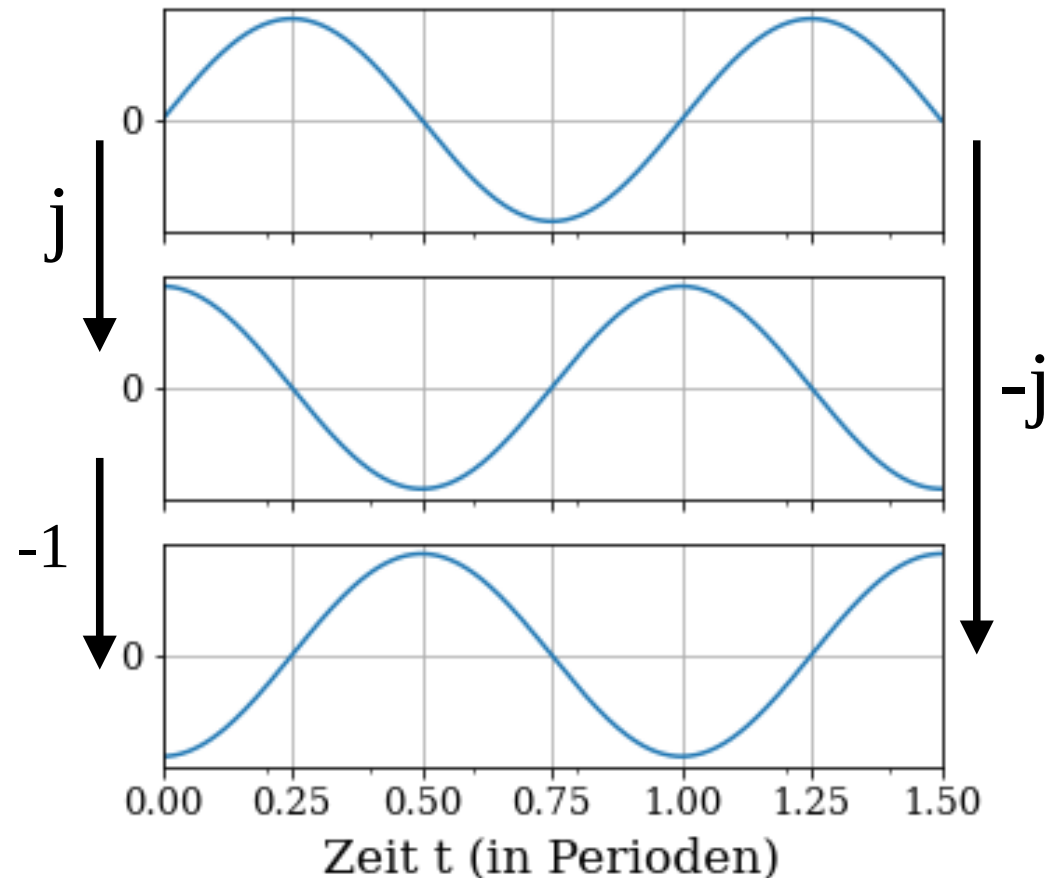
- Widerstand, durch den genau so viel Strom fließen würde wie durch einen Kondensator.
- Voraussetzung: Ich hab ein Sinussignal einer bestimmten Frequenz, sonst macht das keinen Sinn.
- Gemessen in Ω .
- Formelzeichen nicht ganz einheitlich, bei mir X_C
- Wert $X_C = 1 / (2 \pi f C)$
- Aber: Bei einem Kondensator verschiebt sich die Phase des Stroms um eine Viertelperiode nach vorne gegenüber der Phase der Spannung.

Scheinwiderstand

- Wert $X_C = 1 / (2 \pi f C)$
- Beispiel: 726 pF bei 7,05 MHz
 $1 / (2 * \pi * 7.05E6 * 726E-12) = 1 / 0.03216 = 31,1$
also 31,1 Ω
- Frequenz doppelt, Scheinwiderstand halbiert

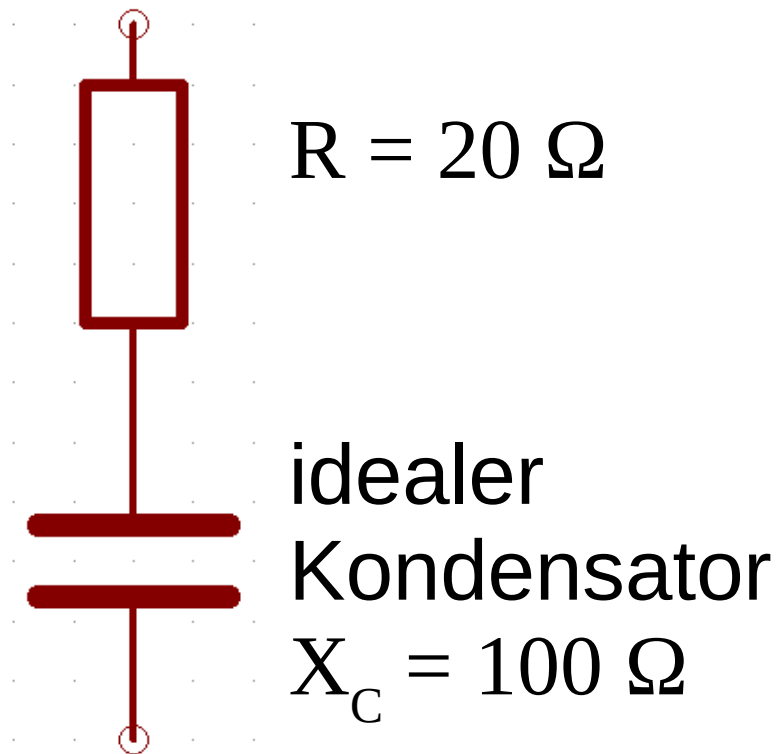
-j für Kondensatorimpedanz

- Bei der Spulenimpedanz benutzen wir den Buchstaben j als Notationshilfe für "Spannung kommt eine Viertelperiode früher".
- Beim Kondensator brauchen wir "Spannung kommt eine Viertelperiode später".
- Das entspricht "eine Viertelperiode früher" und anschließend "minus".
- Also können wir für Impedanzen von Kondensatoren bequem $-j$ als Notationshilfe nutzen.



Reale Kondensatoren

Ein realer Kondensator



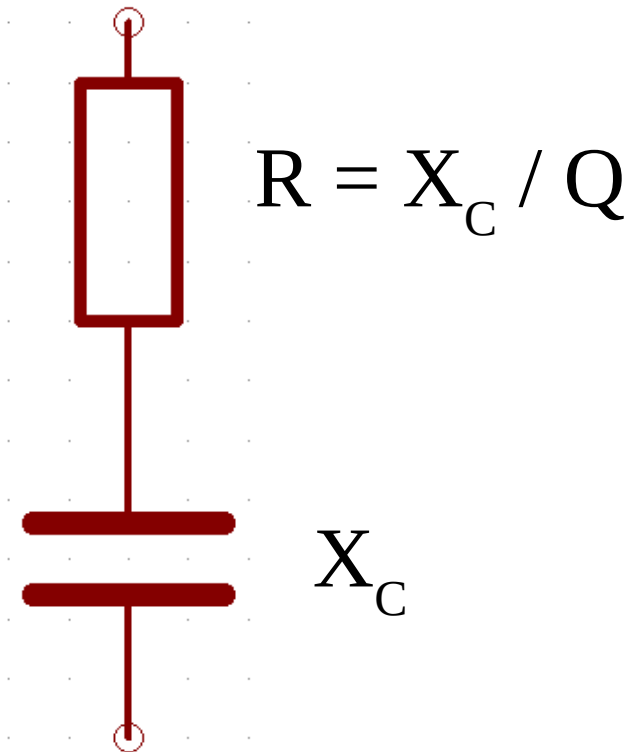
- Eine realer Kondensator hat Verluste, wenn auch meist deutlich weniger als eine Spule.
- Die Verluste können modelliert werden als (kleiner) Serienwiderstand.
- Im Beispiel $R = X_C / 5$
Zu groß! Das wäre in der HF-Praxis ein extrem schlechter Kondensator.

Die Güte Q eines Kondensators

$$\text{Güte } Q = X_C / R$$

Bei unserem
Beispielkondensator $Q = 5$.

Billige keramische
Kondensatoren ("Klasse 1")
mindestens $Q = 667$ bei 1 MHz
It Wikipedia.



Warnung vor Hochleistungs-Cs!

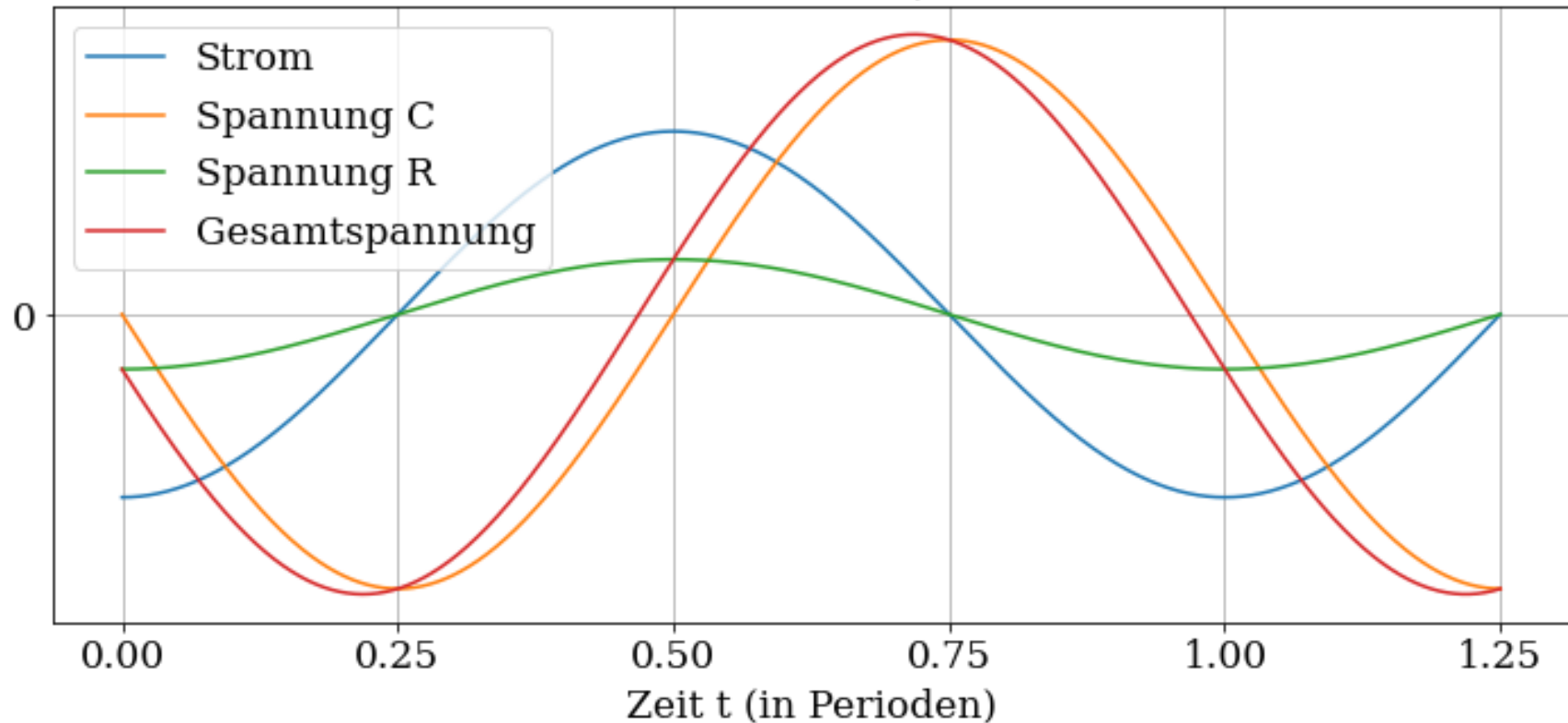
Mit Tricks werden
hohe, aber schwankende Kapazitäten erreicht
bei schlechter Güte.

Wer über die Güte eines Kondensators
nachdenkt, bleibt bei
Glimmer, Folien, NP0 keramischen u.ä.

und lässt die Finger von (Elkos und)
"Klasse 2" keramischen Kondensatoren aus
Materialien wie X7R oder gar Z5U.

Beispielkondensator

R und C in Serie, Güte 5

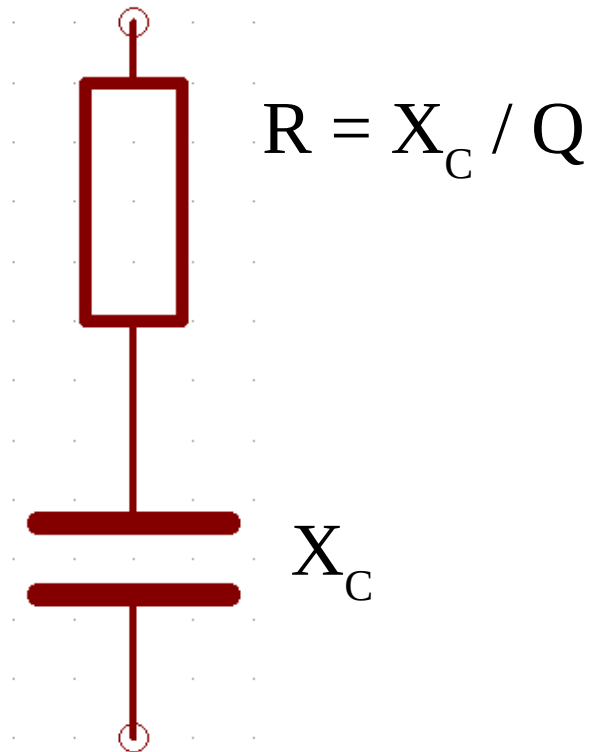


Phasenverschiebung:

Strom nicht mehr 90° vor Spannung, sondern nur noch $78,7^\circ$.

Spitzenwerte fast gleich geblieben: $U_{\text{ges}} / I = 102 \, \Omega$ statt $100 \, \Omega$

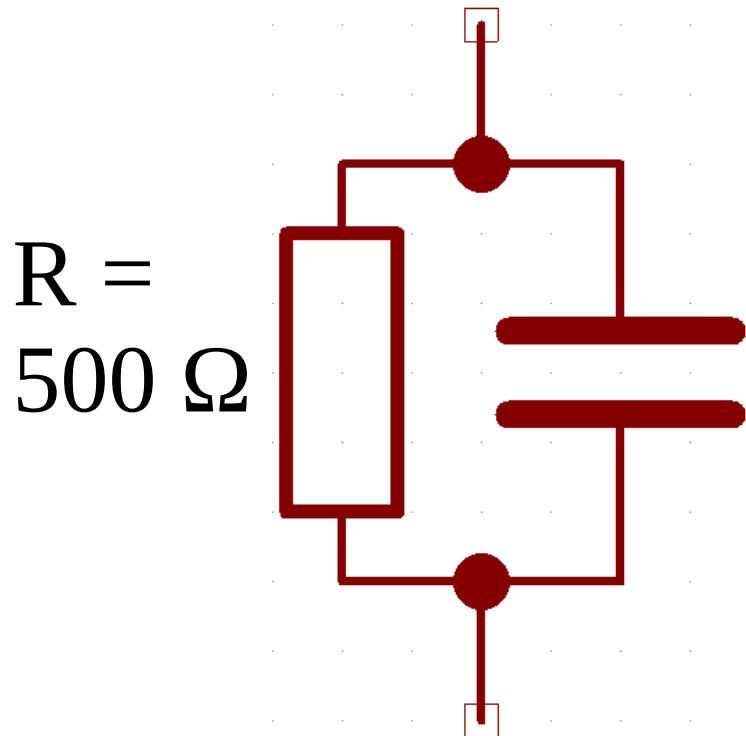
Kondensatoren normaler Güte



- Der Phasenunterschied beträgt nicht mehr 90° , sondern weniger.
(Wie viel genau, ist uns egal.)
- Für einigermaßen große Q ändert sich der Gesamt-Scheinwiderstand (fast) nicht.

Jetzt Kondensatorgüte nochmal,
aber anders.

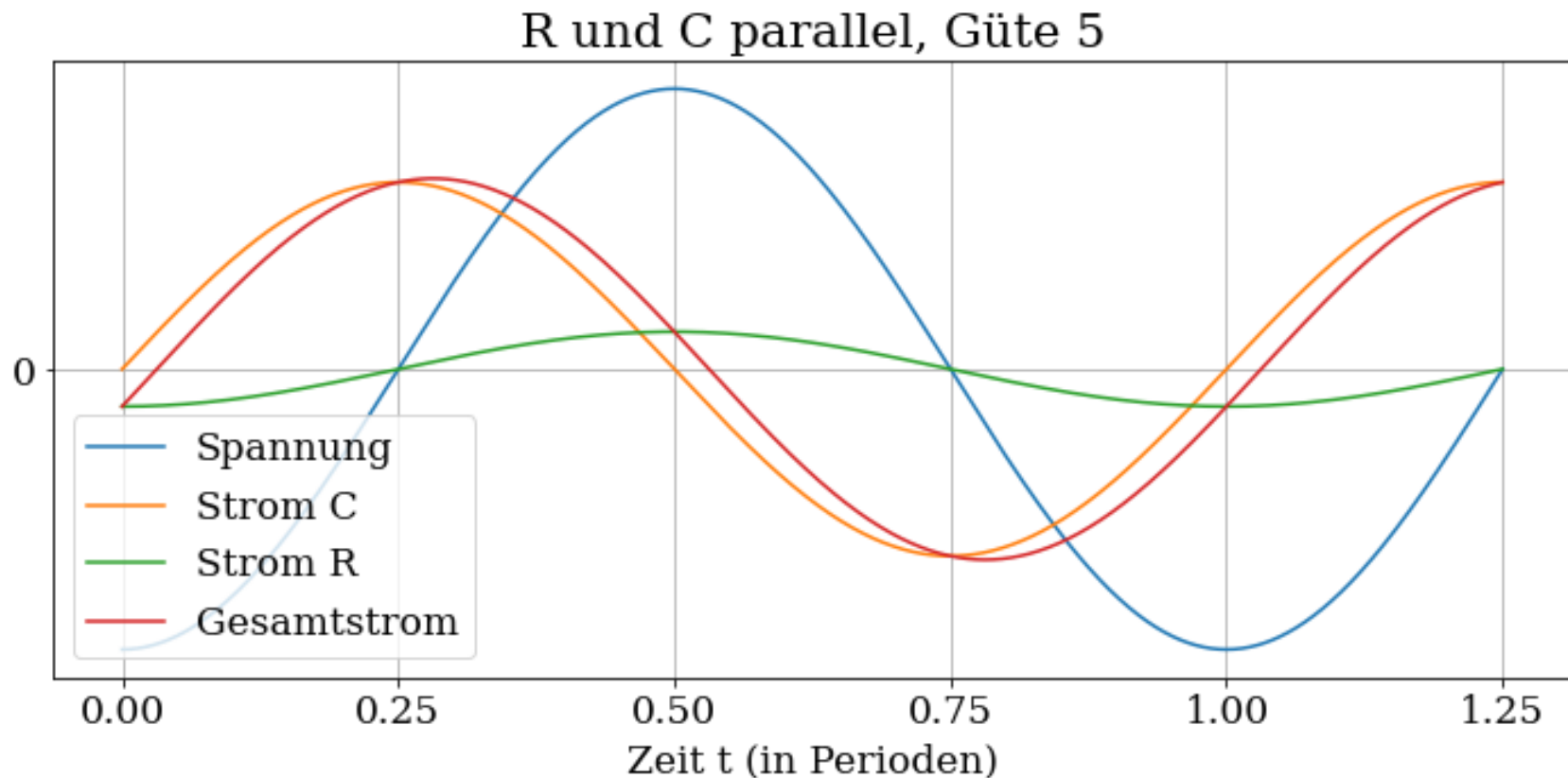
Ein realer Kondensator, parallele Möglichkeit



idealer Kondensator
 $X_C = 100 \, \Omega$

- Die Verluste können auch modelliert werden als (möglichst großer) Parallelwiderstand.
- $Q = R / X_C$

Beispielkondensator

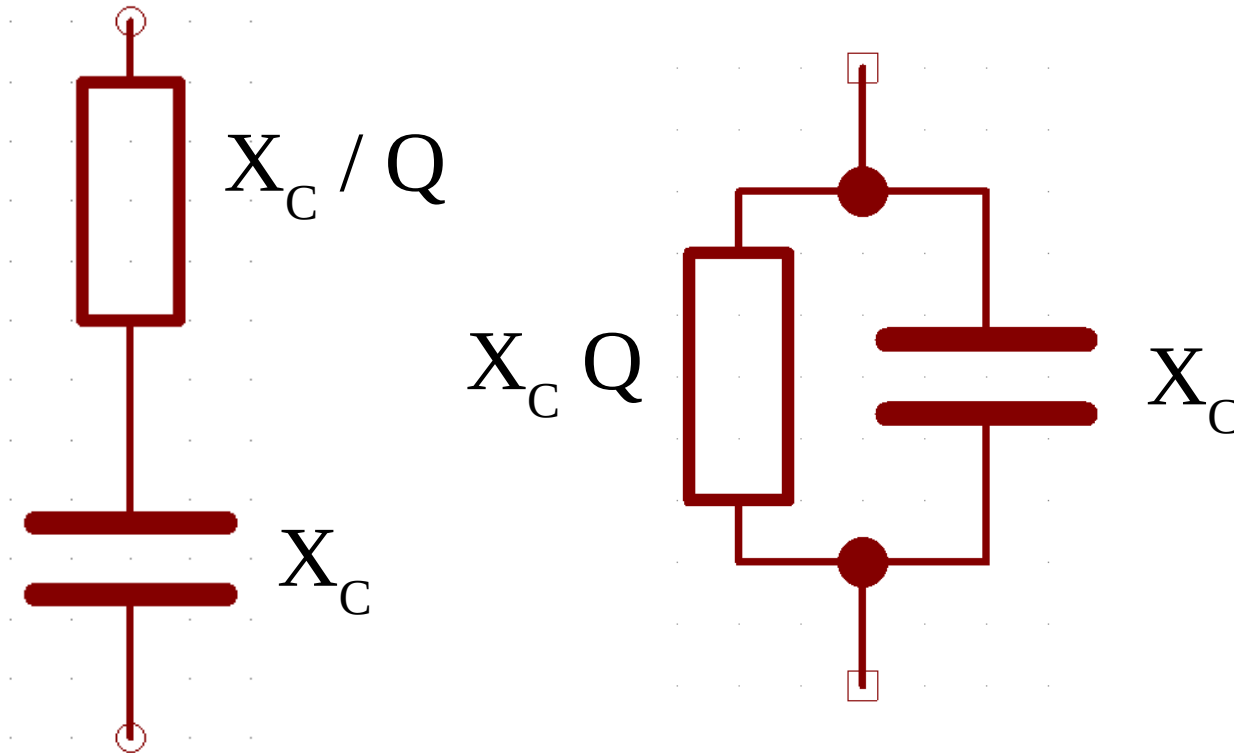


Phasenverschiebung:

Strom nicht mehr 90° hinter Spannung, sondern nur noch $78,7^\circ$.

Spitzenwert fast gleich geblieben: $U / I_{\text{ges}} = 98 \, \Omega$ statt $100 \, \Omega$

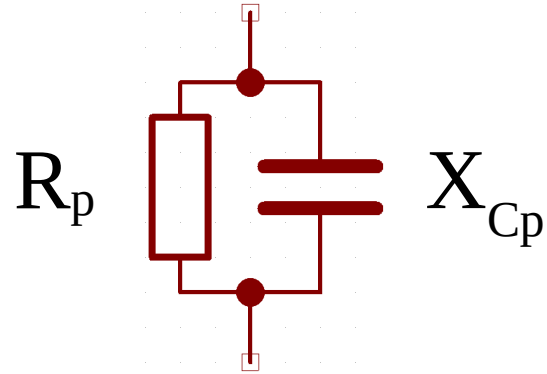
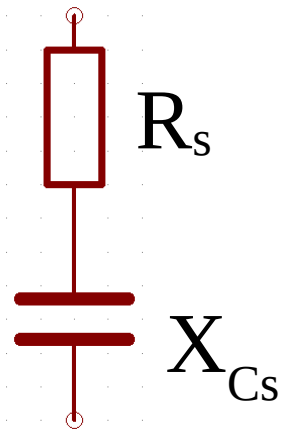
Wichtige Faustregel



Die beiden
verhalten sich
fast gleich!

- Phase ist identisch.
- Abweichung Größe Scheinwiderstand bei hohem Q vernachlässigbar.

Die Güte ist dieselbe



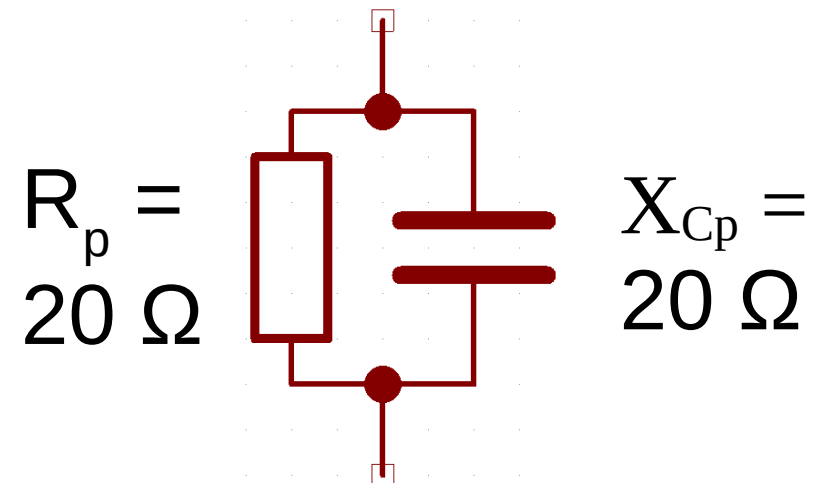
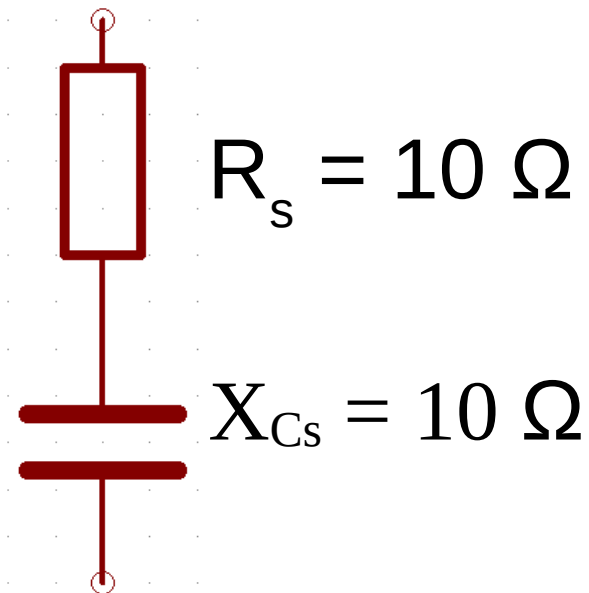
Man kann die eine Schaltung nehmen und entsprechende Werte der anderen Schaltung passend justieren, damit bei beiden **genau** dieselbe Phase und **genau** derselbe Scheinwiderstand herauskommt.

Dann ist der Q-Wert beider gleich.

Extrembeispiel: Zu $R_s = X_{Cs} = 10 \, \Omega$ gehört und $R_p = X_{Cs} = 20 \, \Omega$; bei beiden $Q = 1$.

*Vergl.
Wien-Brücke.*

Extrembeispiel: $Q = 1$



verhalten sich gleich.

Können Ihr noch?

Dann geht es
beschwingt weiter!

Aber vorher eine Klarstellung bezüglich der Spielregeln

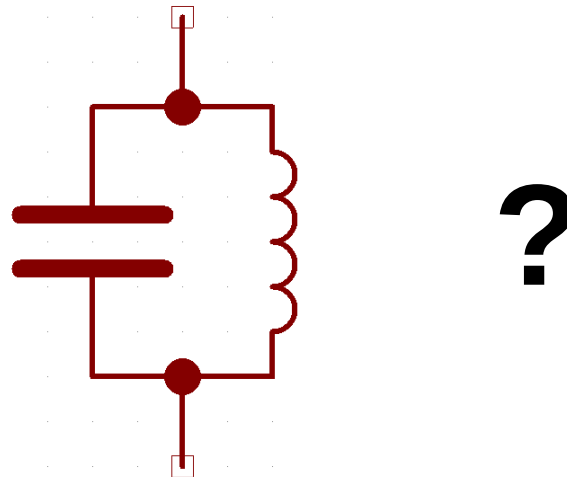
- Wir betrachten immer nur **eine** feste Frequenz...
- ... und den eingeschwungenen Zustand.

Ein interessantes Experiment...

 Strom
Viertelperiode
hinter
Spannung

 Strom
Viertelperiode
vor
Spannung

was passiert eigentlich bei:



Am interessantesten ist das Experiment bei welcher Frequenz?

Die Thomson-Formel (1853)

$$X_C = X_L$$

Das eine Frage der Frequenz!

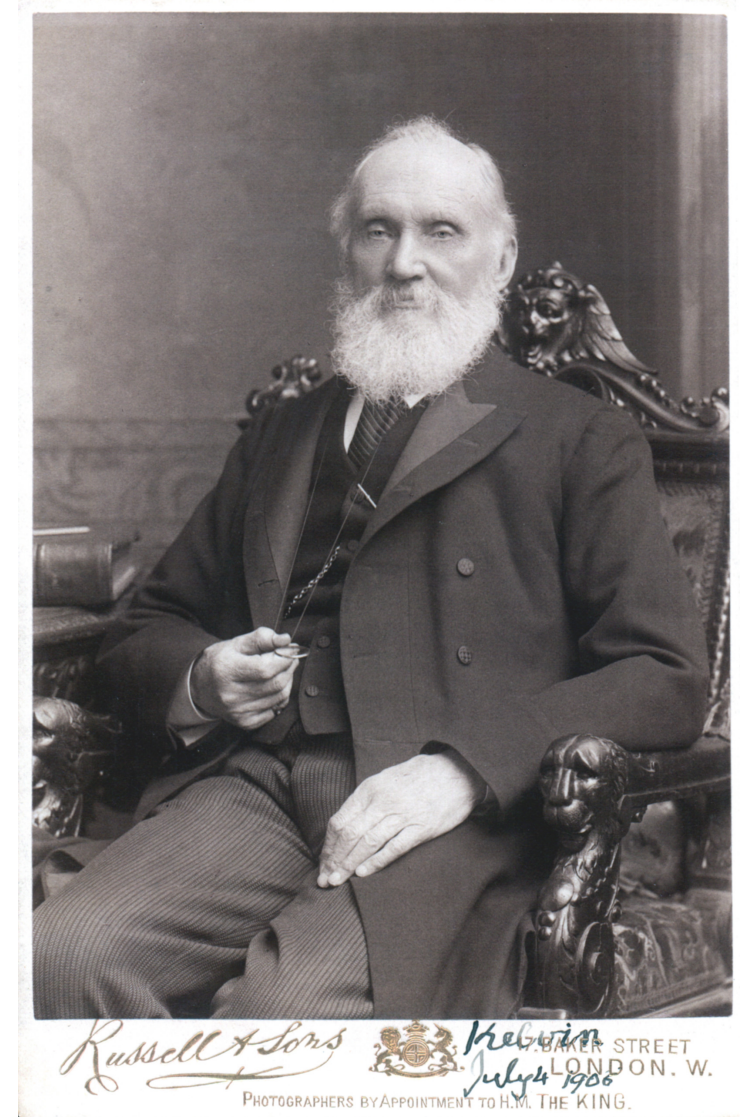
X_C hoch bei niedrigen Frequenzen,
sinkt mit steigender Frequenz

X_L niedrig bei niedrigen Frequenzen
steigt mit steigender Frequenz

$$1 / (2 \pi f C) = 2 \pi f L$$

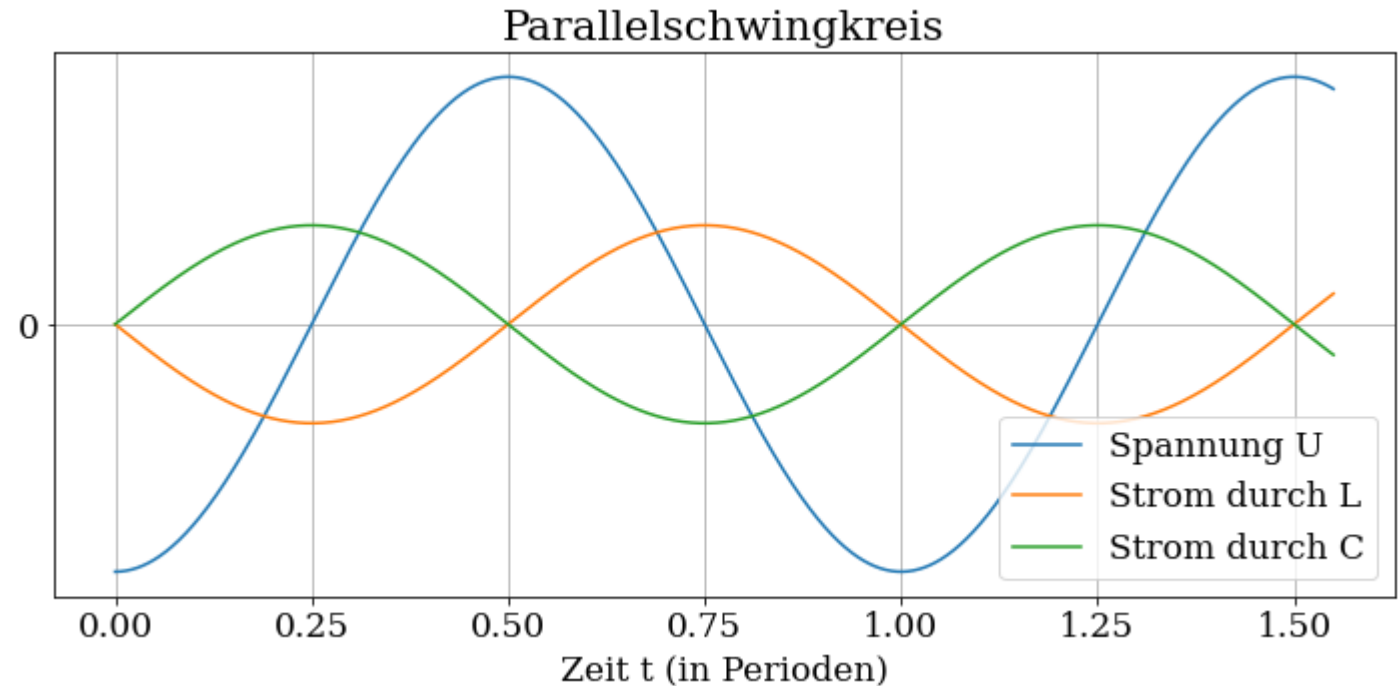
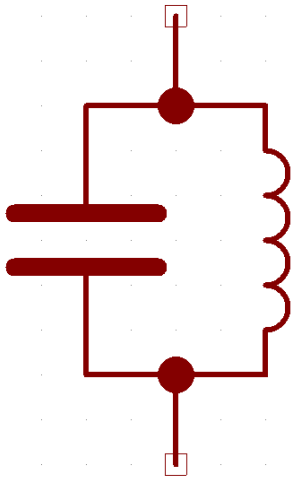
$$f = 1 / (2 \pi \sqrt{L C})$$

William Thomson, 1. Baron Kelvin
(der mit der absoluten Temperaturskala)



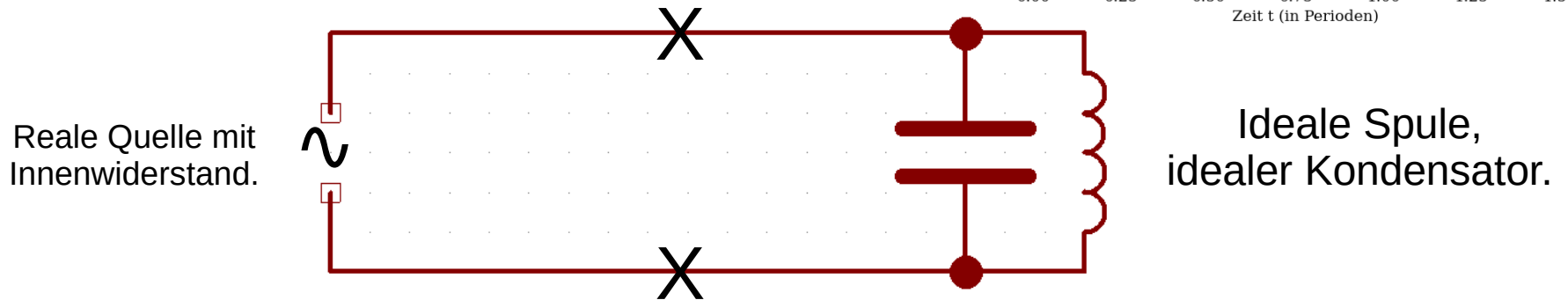
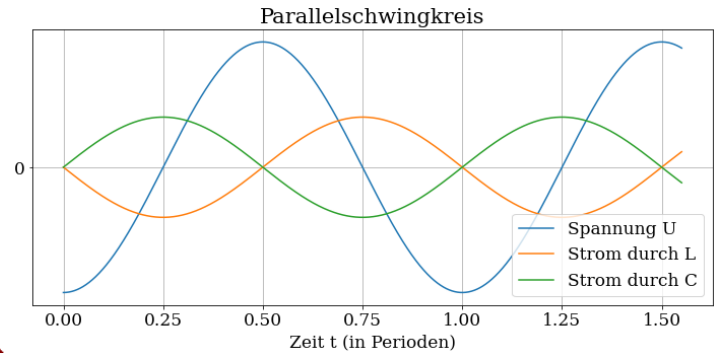
Der Parallelschwingkreis

bei seiner Resonanzfrequenz nach dem Einschwingen



- Die Ströme heben sich genau auf.
- Von außen fließt kein Strom mehr in den Schwingkreis hinein oder heraus.

Ersatzschaltbild Parallelschwingkreis

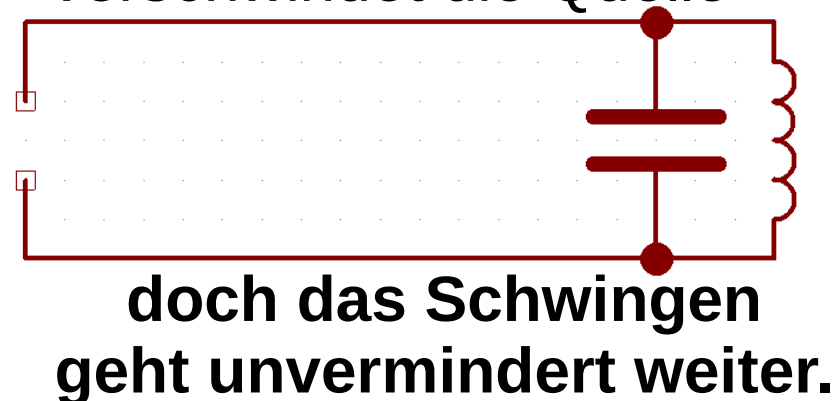


An den markierten Stellen fließt nach dem Einschwingen kein Strom, dort könnte auch getrennt werden.

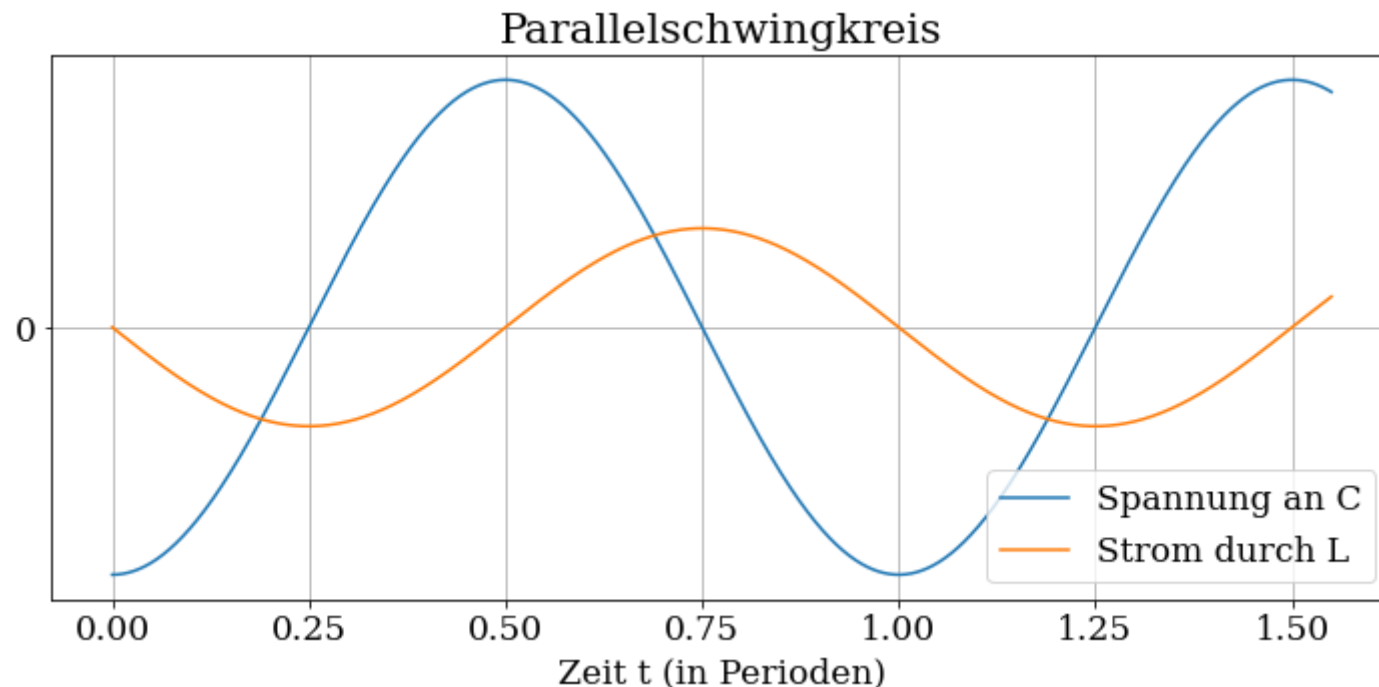
Aus Sicht der Quelle



Aus Sicht des Schwingkreises
verschwindet die Quelle



Ein schwingender Schwingkreis



... speichert Energie,
die zwischen Spule und Kondensator
hin und her geschoben wird.

So weit, so gut.

Als nächstes in dieser Serie
ein sozusagen paralleles Experiment.

Ein interessantes Experiment...

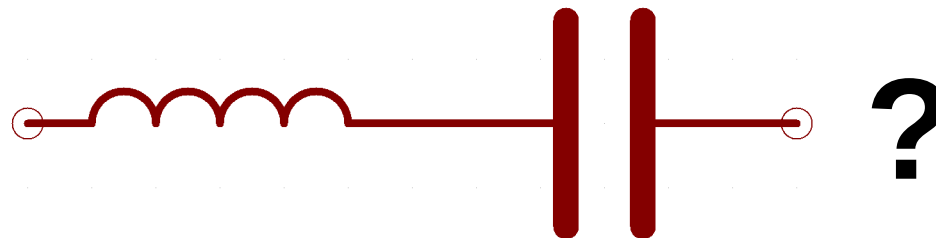
Spannung
Viertelperiode
vor Strom



Spannung
Viertelperiode
nach Strom



was passiert eigentlich bei:



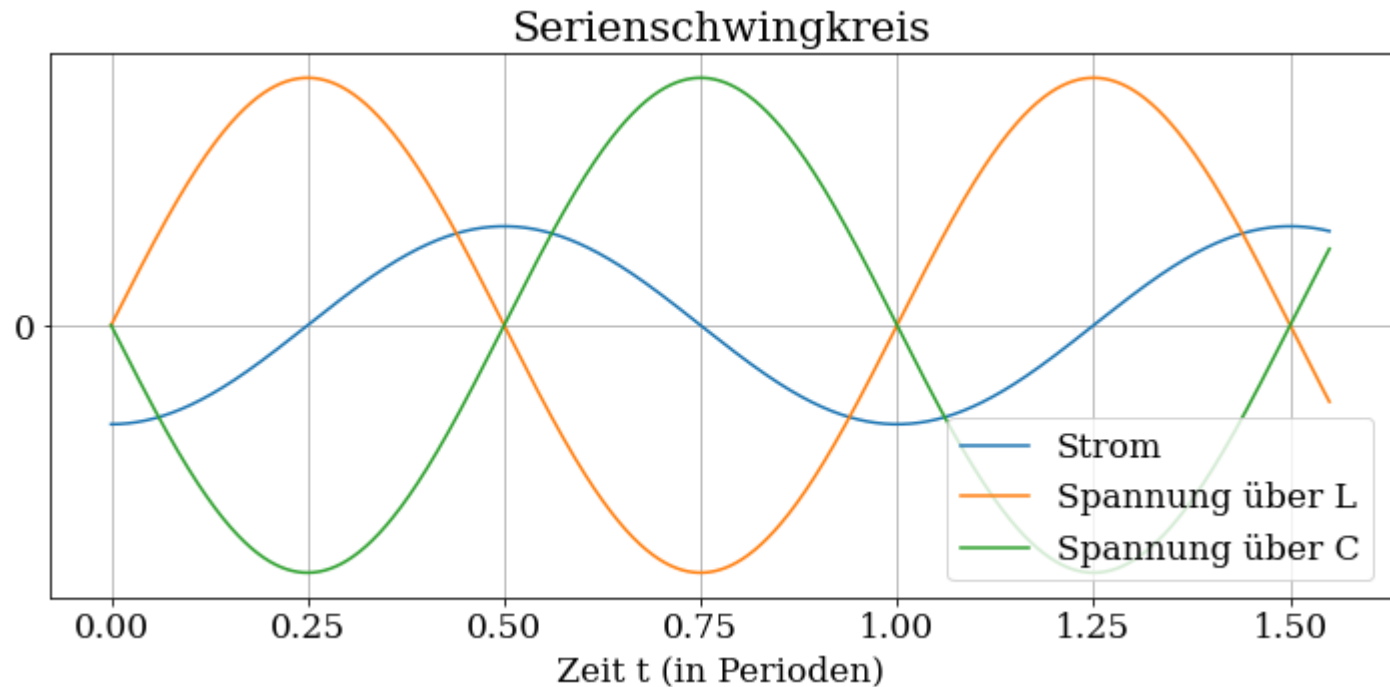
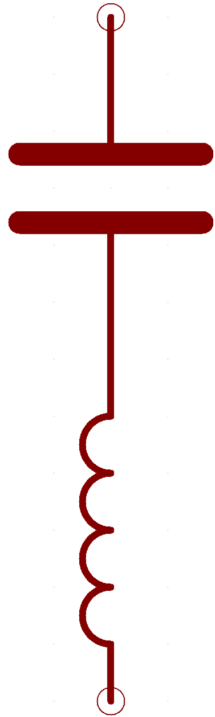
Interessante Frequenz

$$X_C = X_L$$

dann sind beide Spannungen gleich groß.

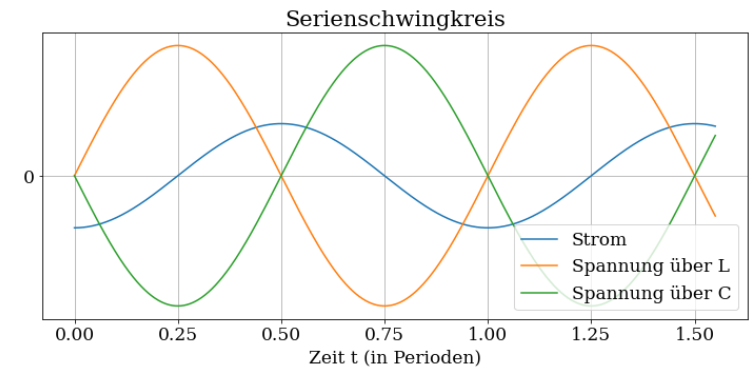
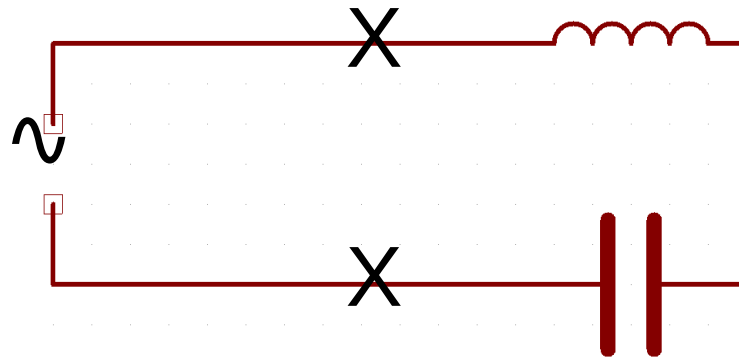
Der Serienschwingkreis

bei seiner Resonanzfrequenz



- Die Spannungen heben sich genau auf.
- Es tritt nach dem Einschwingen keine Spannung mehr über dem Schwingkreis in Erscheinung.

Ersatzschaltbild SerienSchwingkreis



Zwischen den markierten Stellen gibt es keinen Spannungsunterschied. Dort könnte kurzgeschlossen werden.

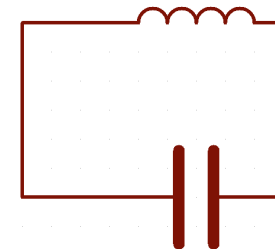
Aus Sicht der Quelle



verschwindet der Schwingkreis
(als Kurzschluss).

DJ3EI: Von Spulen und Kondensatoren zu Filtern und Tunern

Aus Sicht des Schwingkreises
verschwindet die Quelle



**und das Schwingen
geht unvermindert weiter.**

82 / 125

Soweit die Grundlagen,
nun zu den Anwendungen.

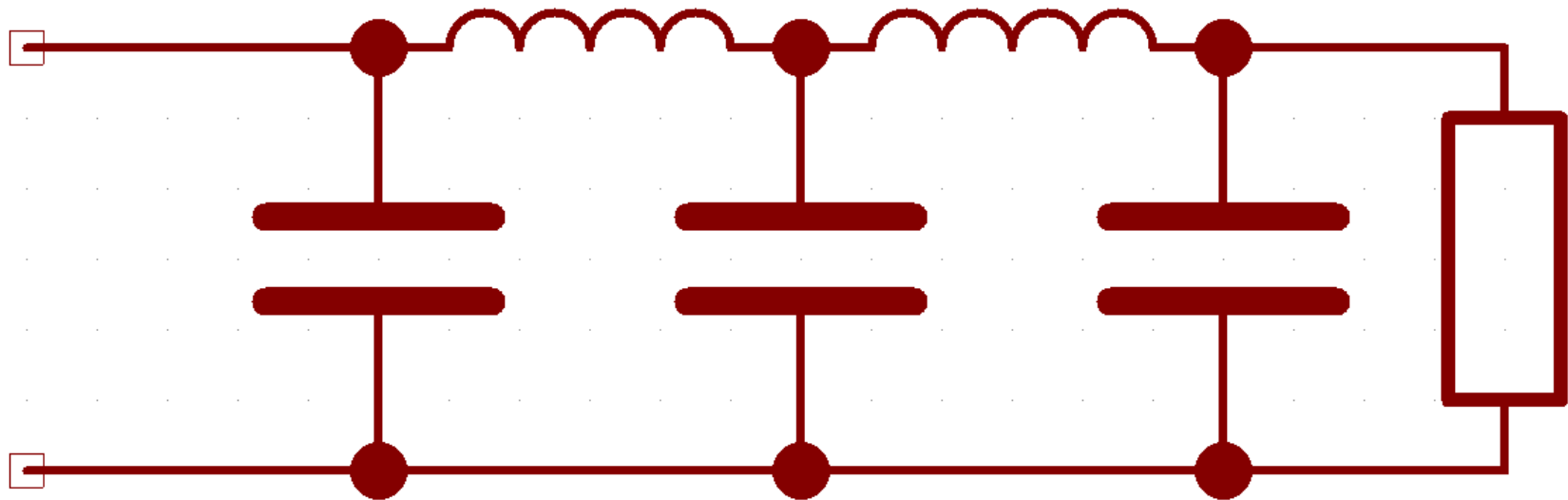
Mit j ganz normal rechnen!

- Es gibt Taschenrechner, die komplexe Zahlen können.
- Schöner: Python (Version 3) auf dem PC installieren und nutzen:

```
python3  
from math import *
```

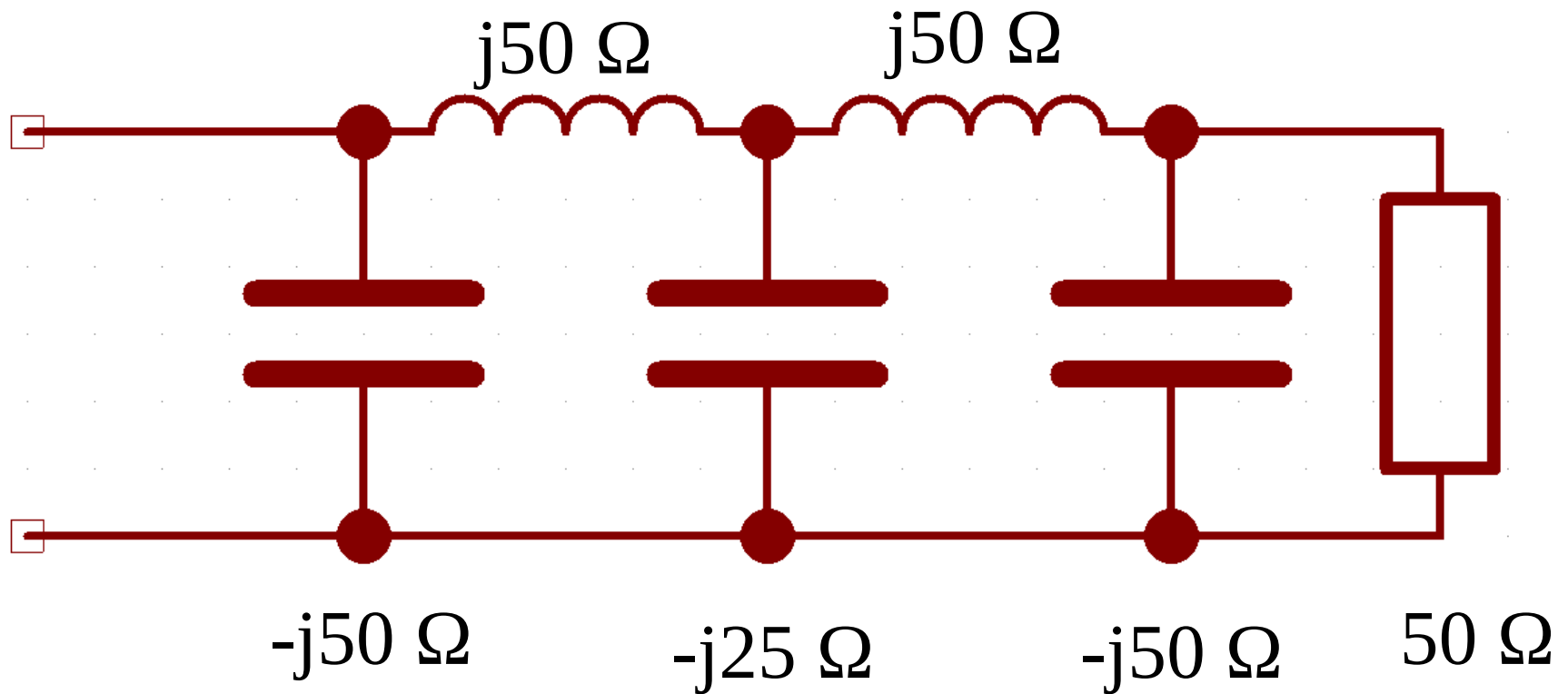
- [Python als Taschenrechner](#) in der Doku
- Hilfe zu Python im [DARC-Matrix-Chat Python](#)

Erste Anwendung: "Halbwellenfilter"

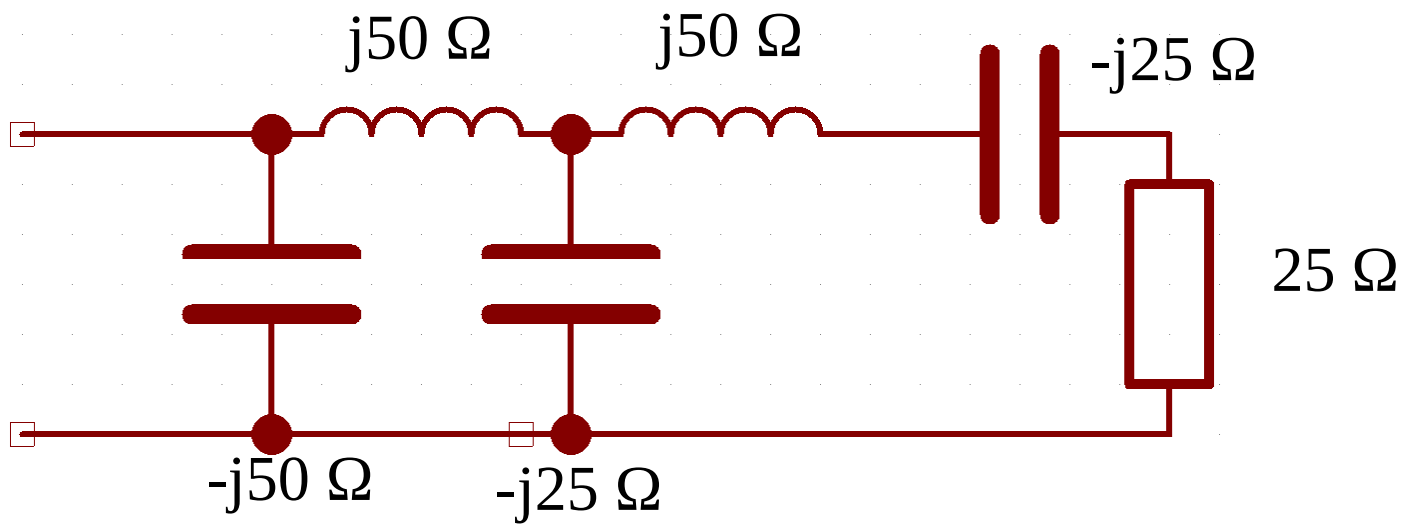
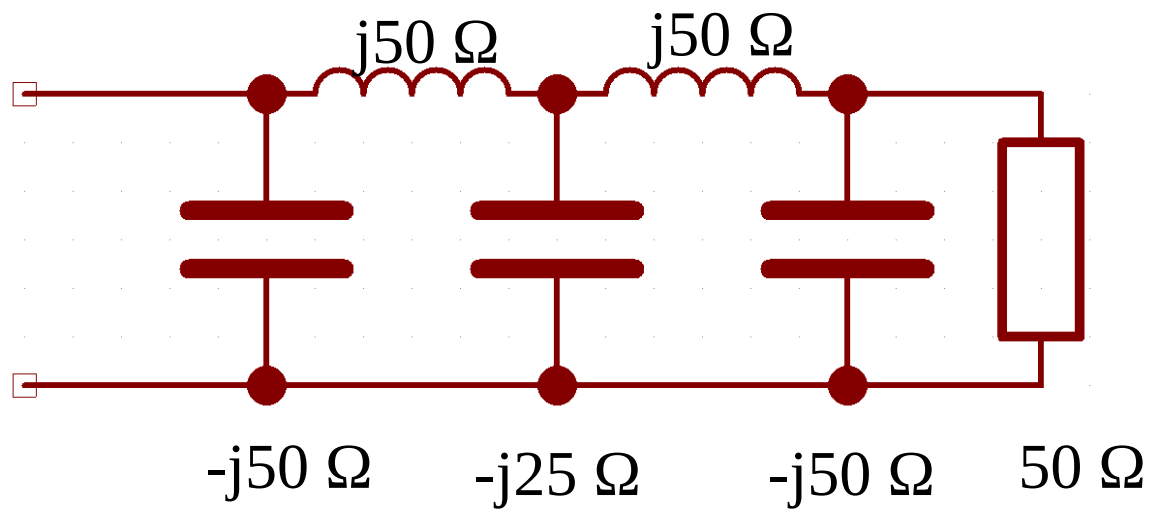


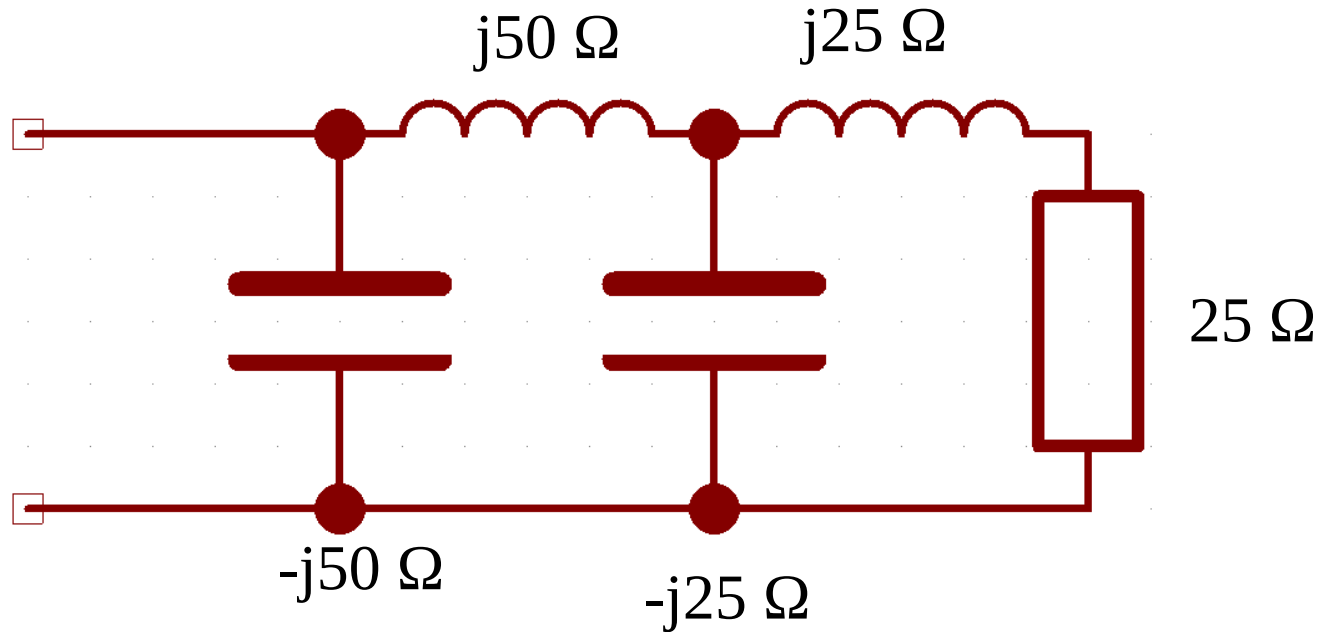
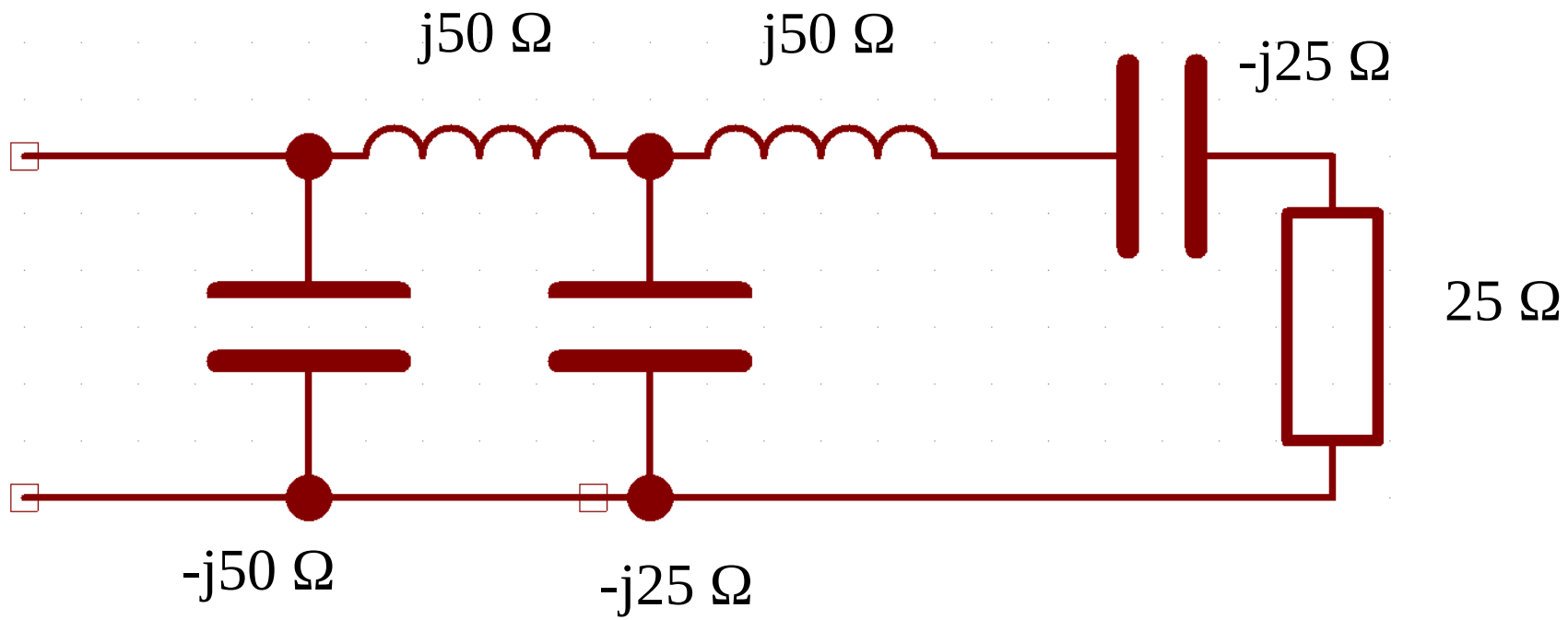
Oberwellenfilter für Selbstbau-Rigs.

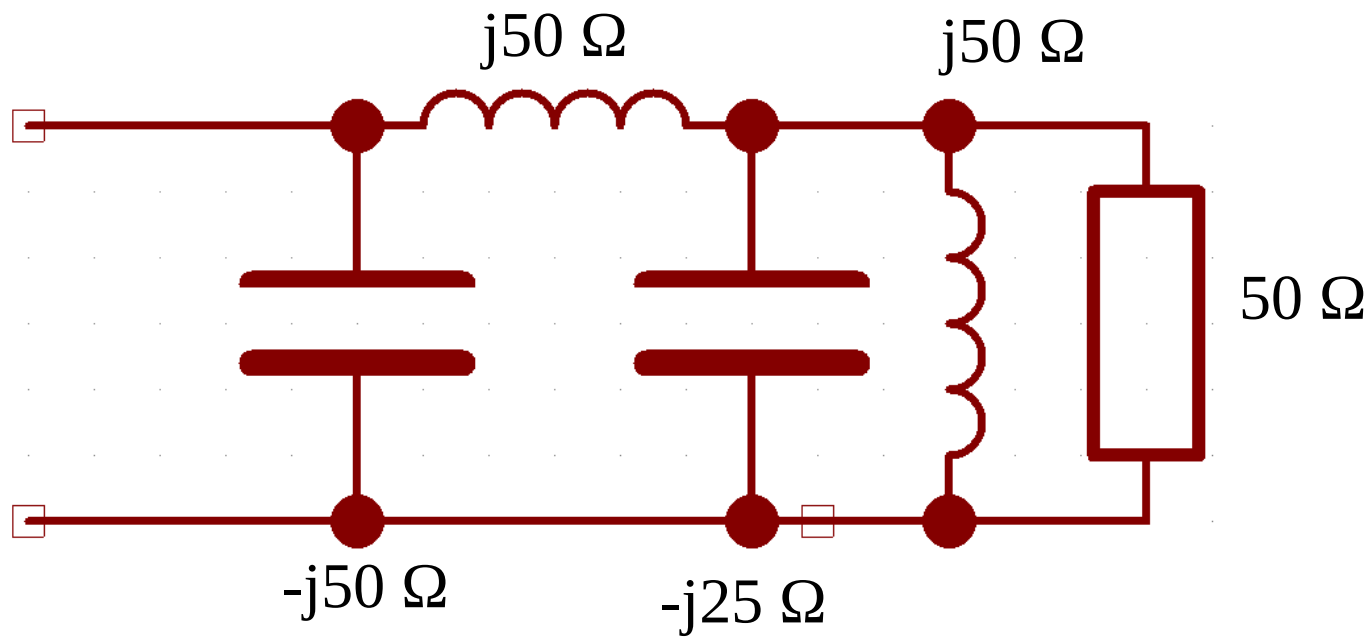
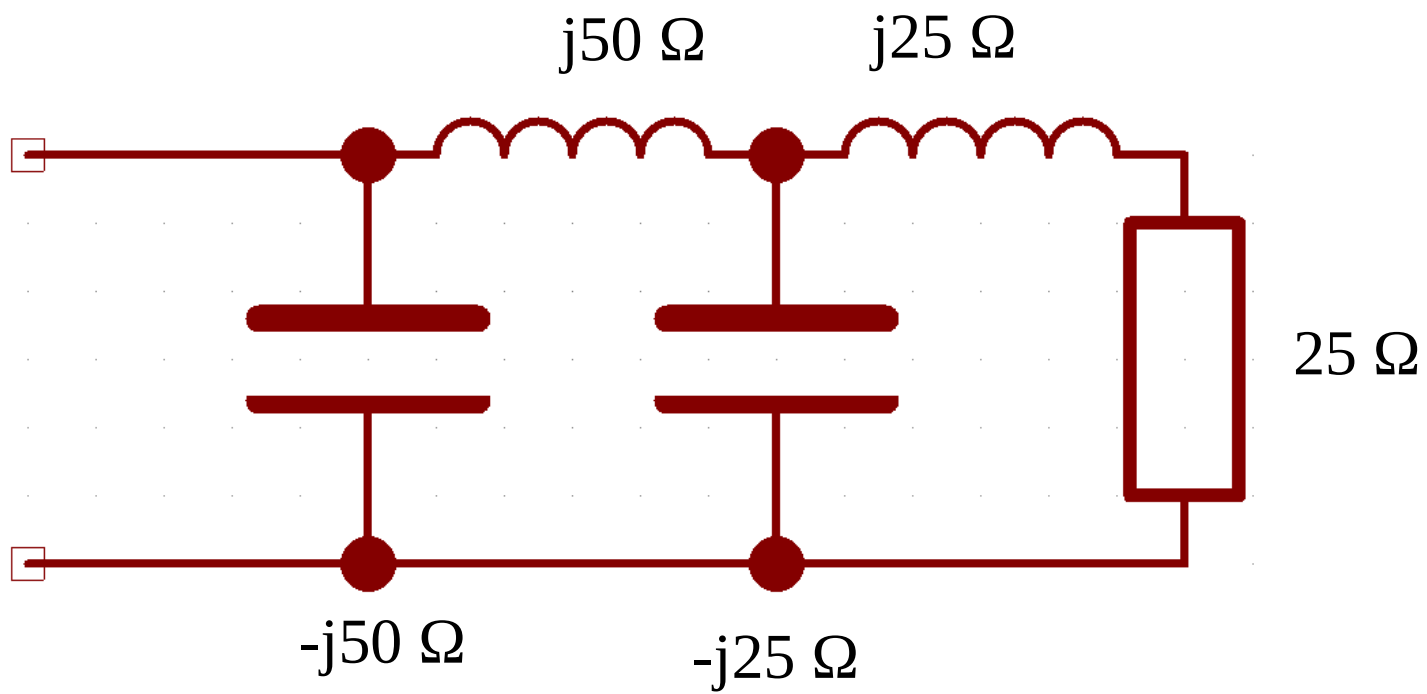
Zahlenbeispiel

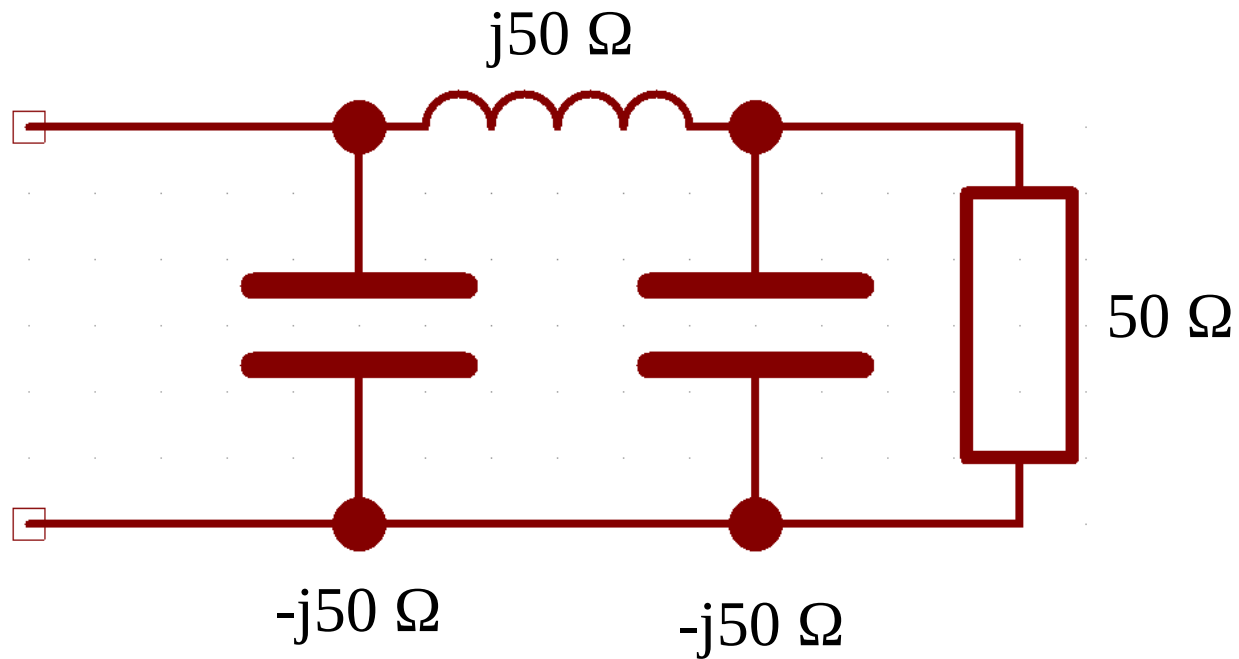
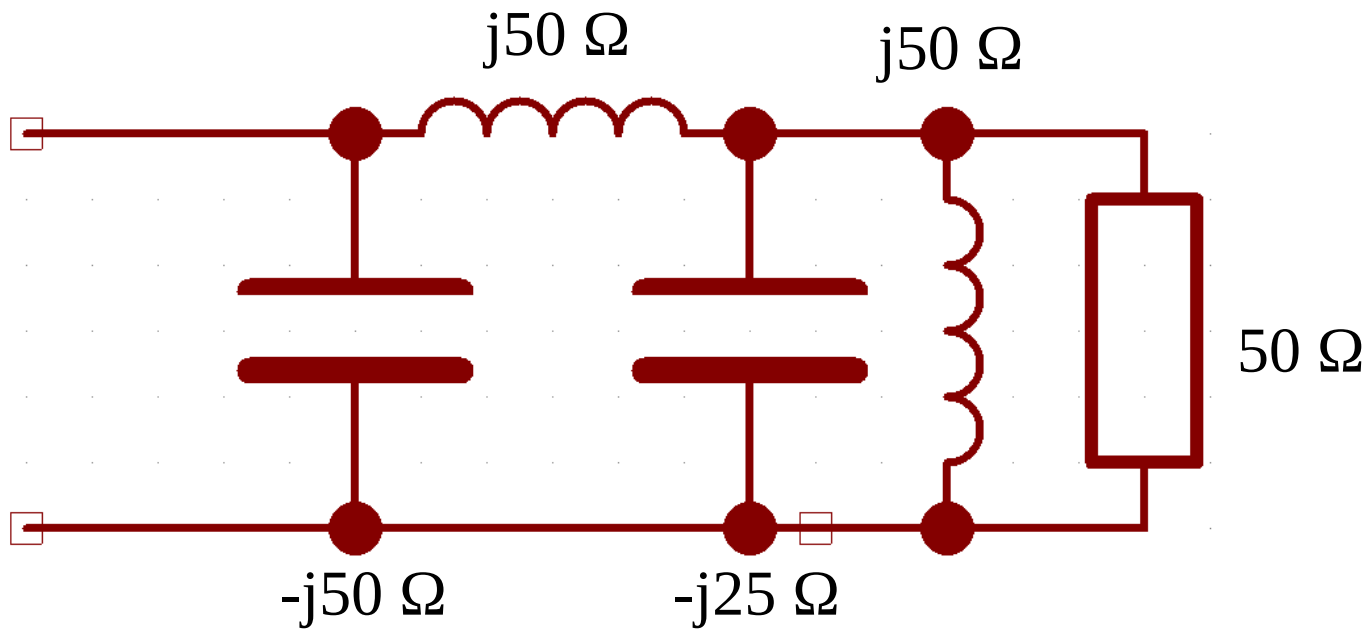


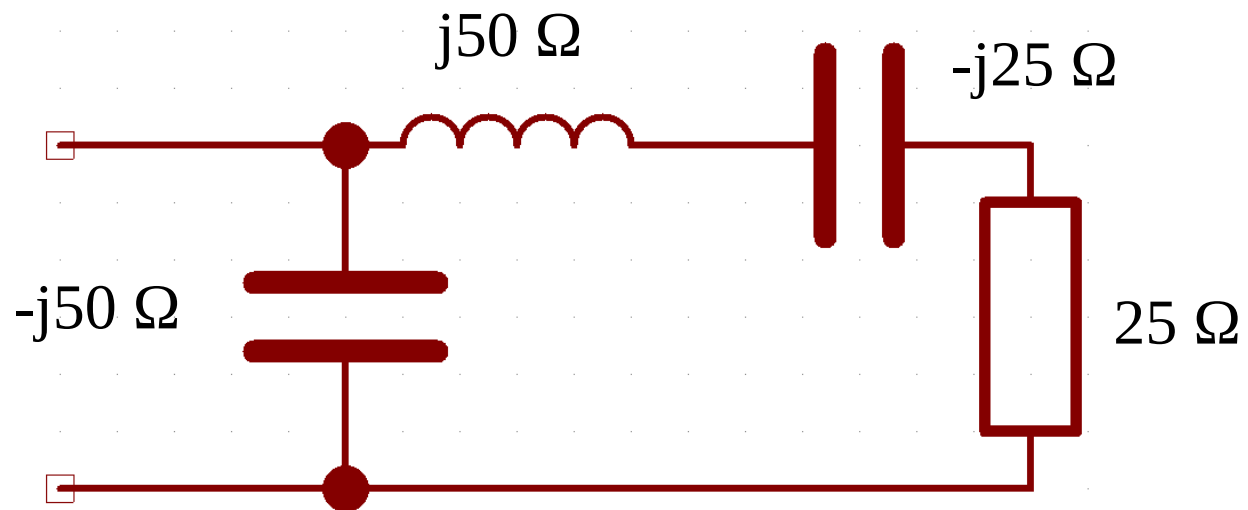
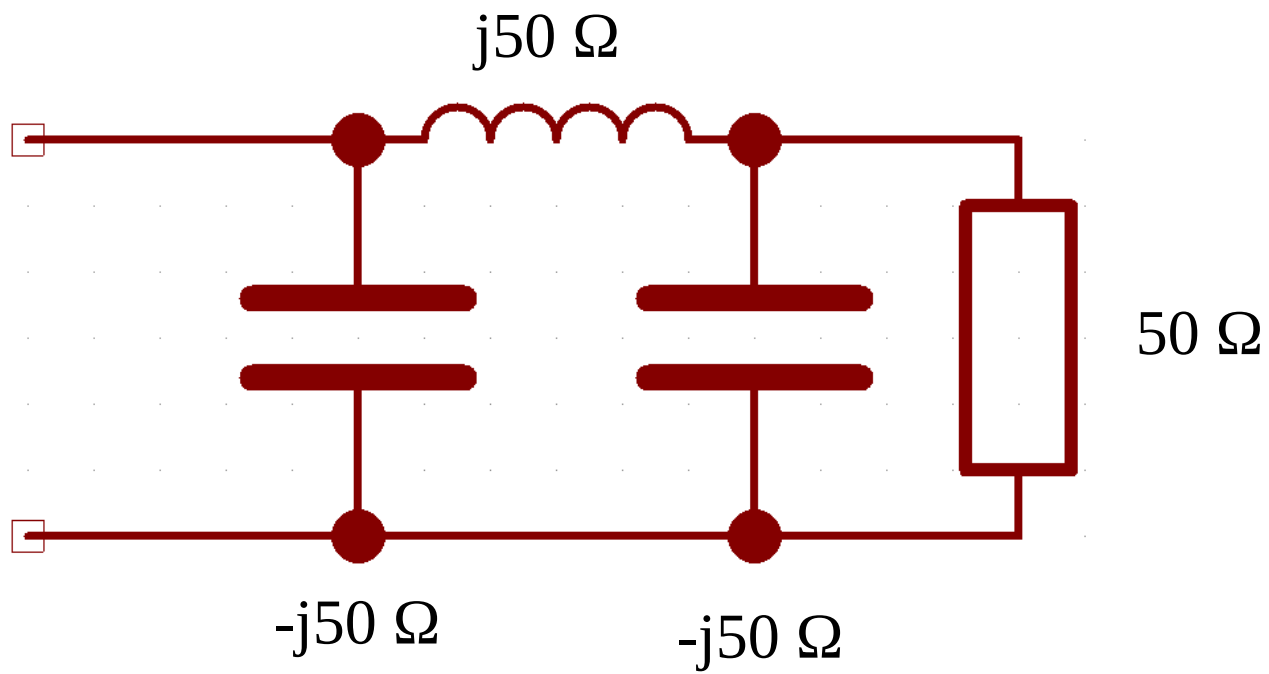
Es folgt ein "lustiges Leiterspiel"

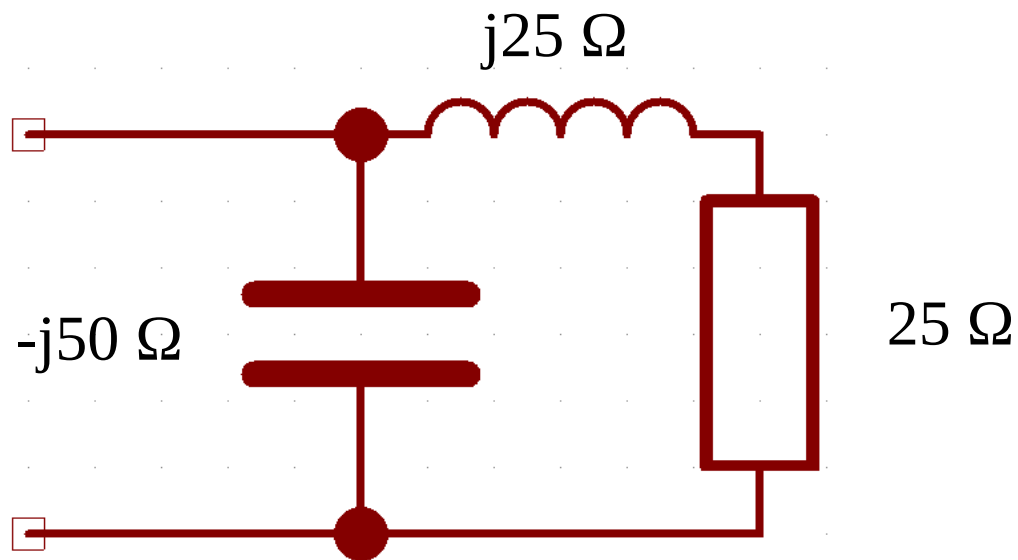
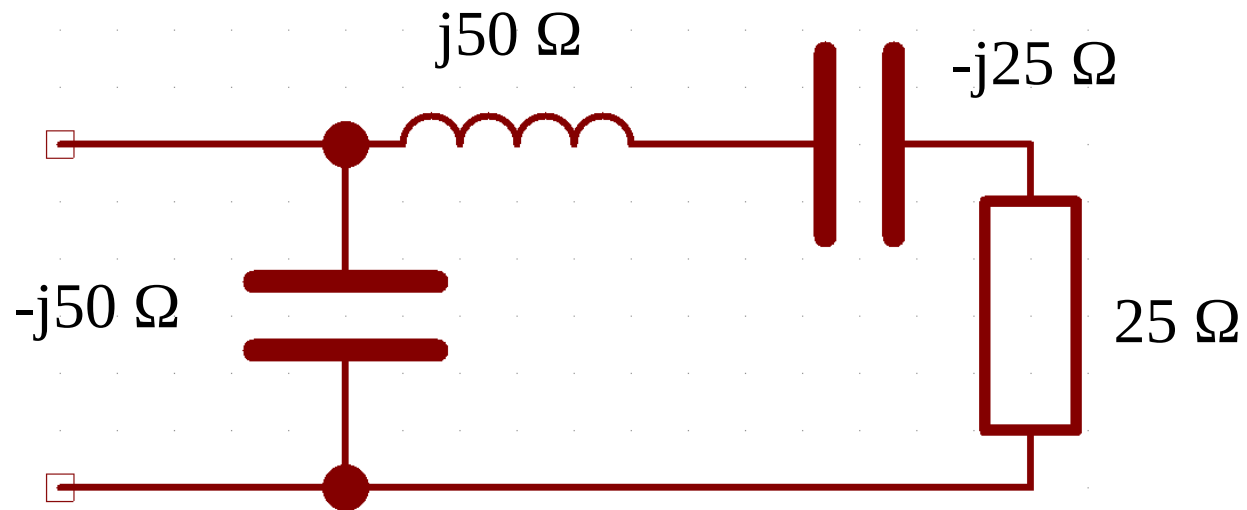


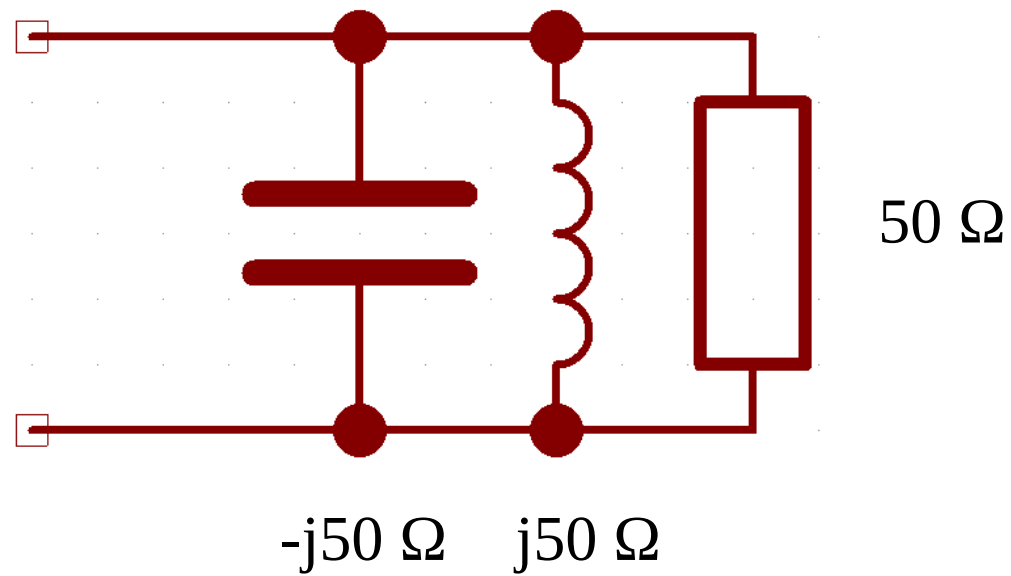
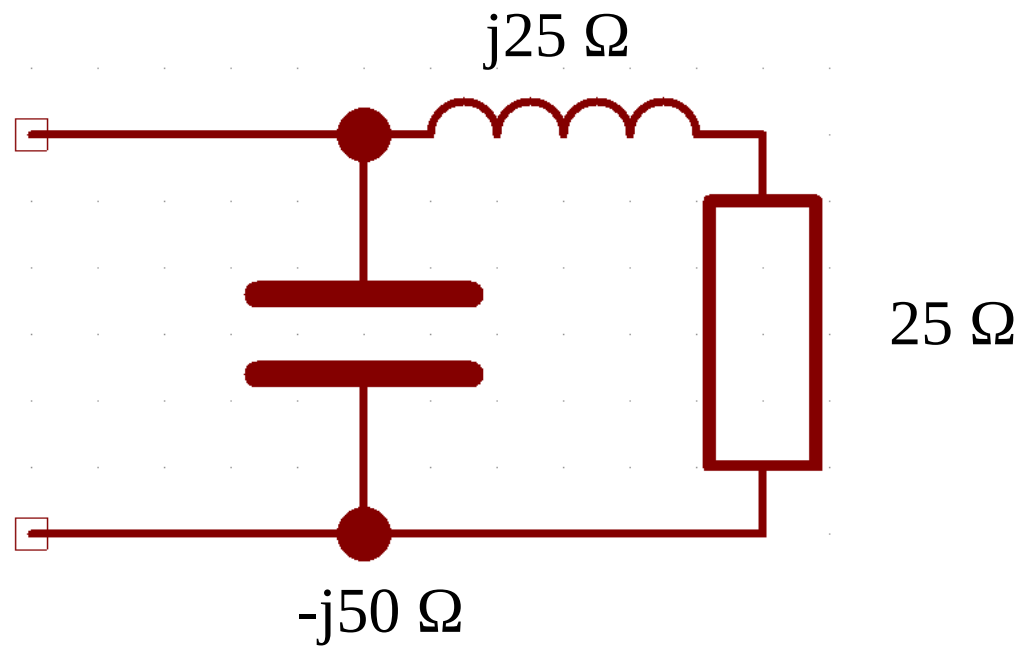


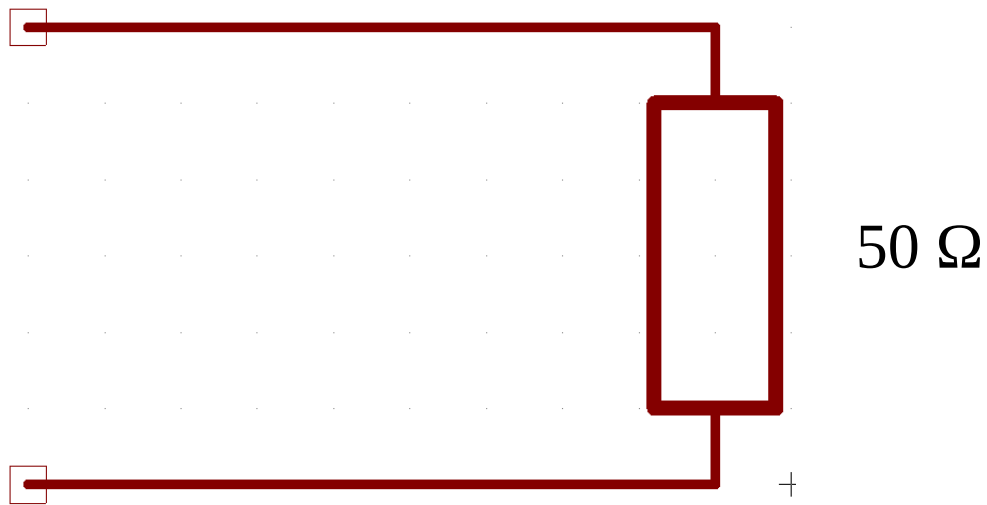
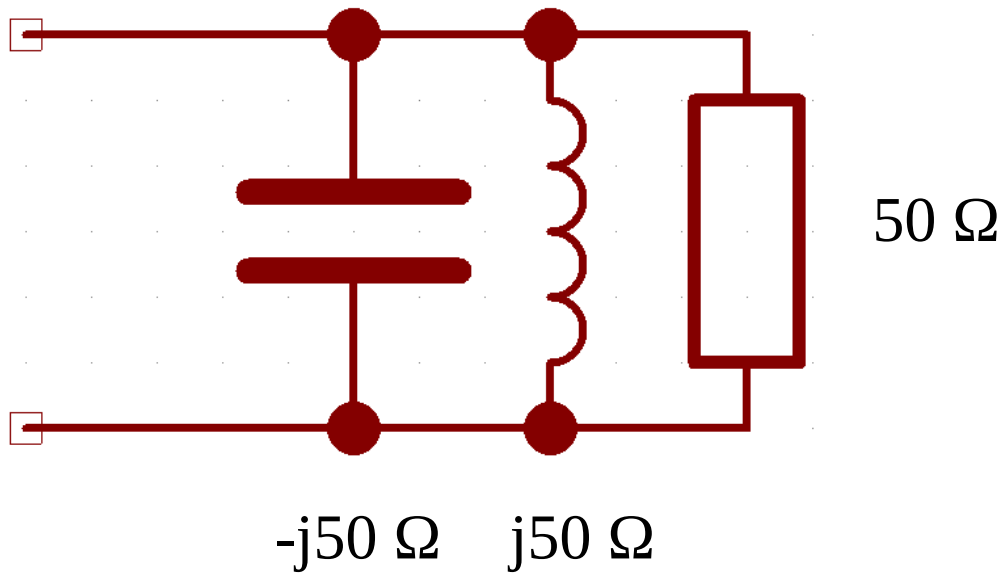




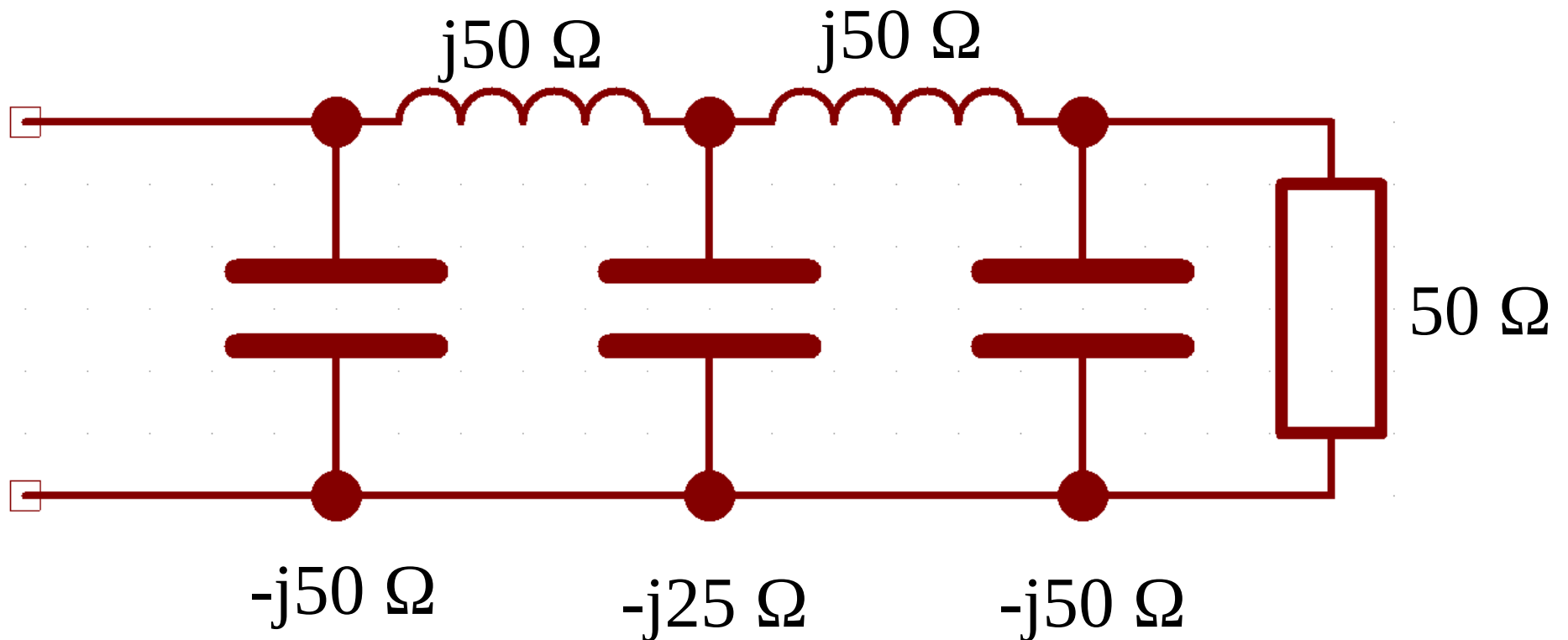






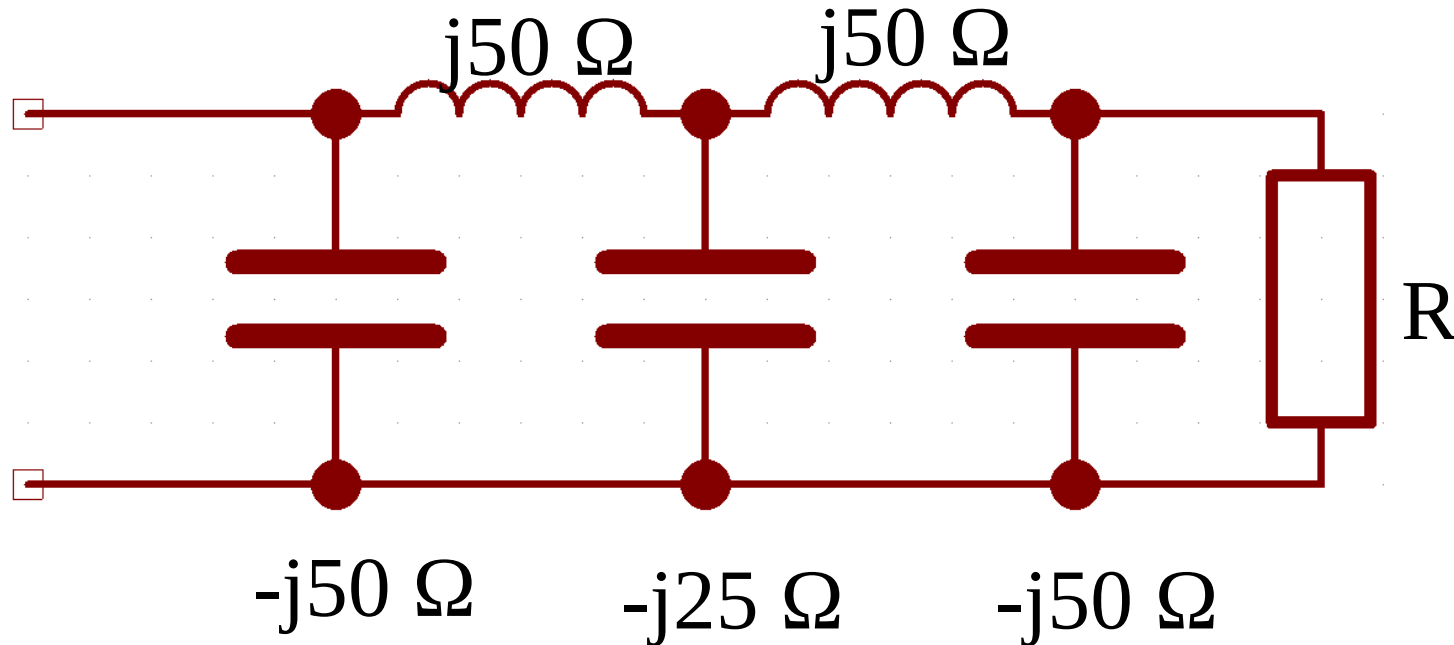


Also...



... verhält sich im eingeschwungenen Zustand
wie ein Widerstand von $50\ \Omega$.

Warum heißt das Ding "Halbwellenfilter"?



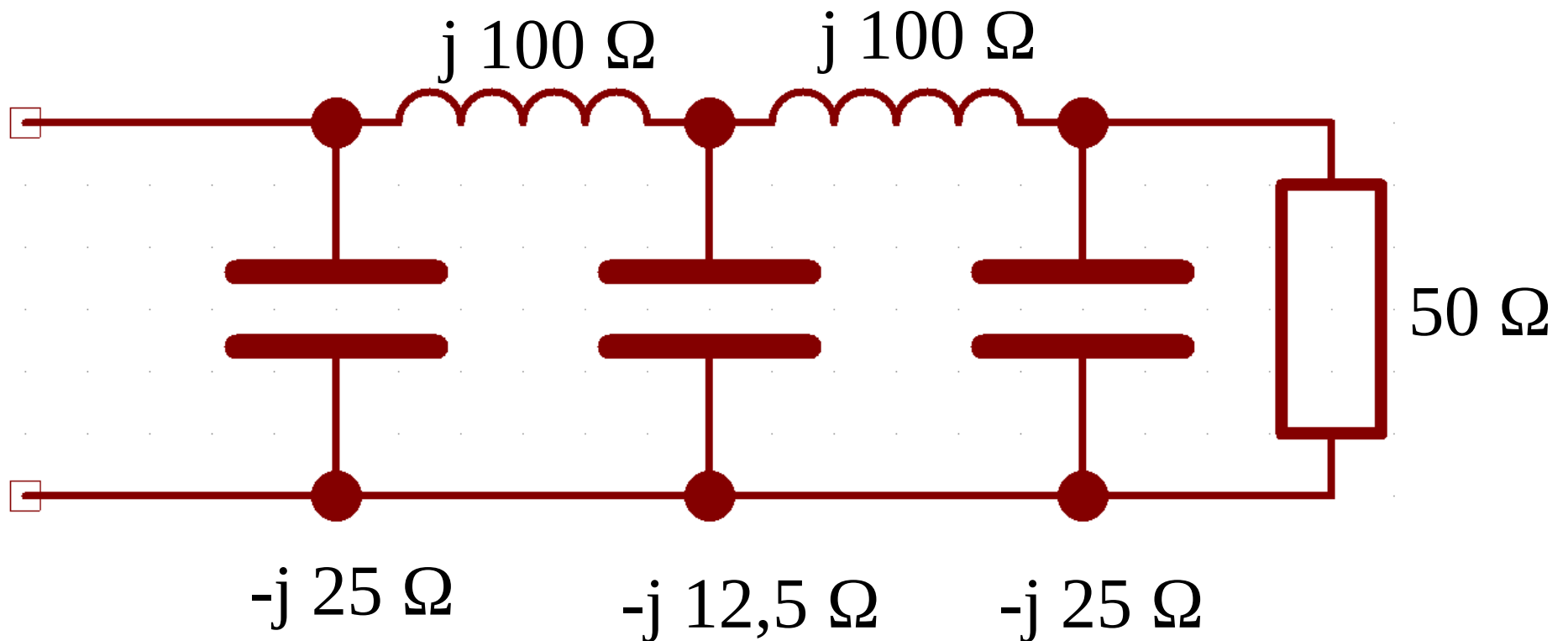
Der Fall $R = 50\ \Omega$ ist besonders bequem zu rechnen.

Auch bei jedem anderen R -Wert bleibt *derselbe* R -Wert übrig.

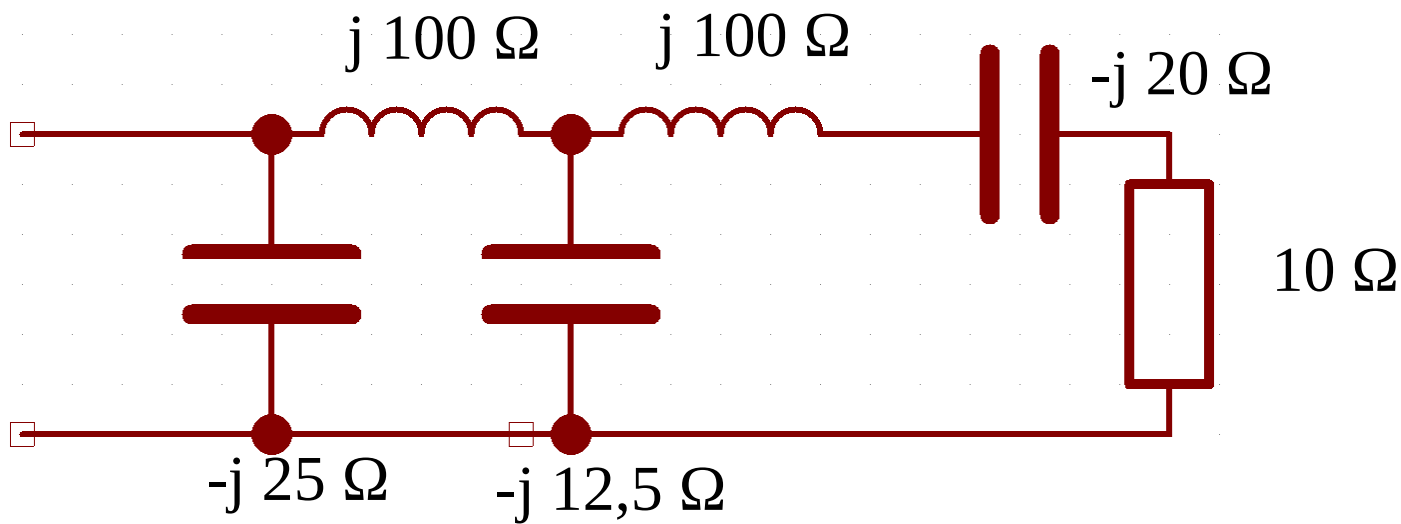
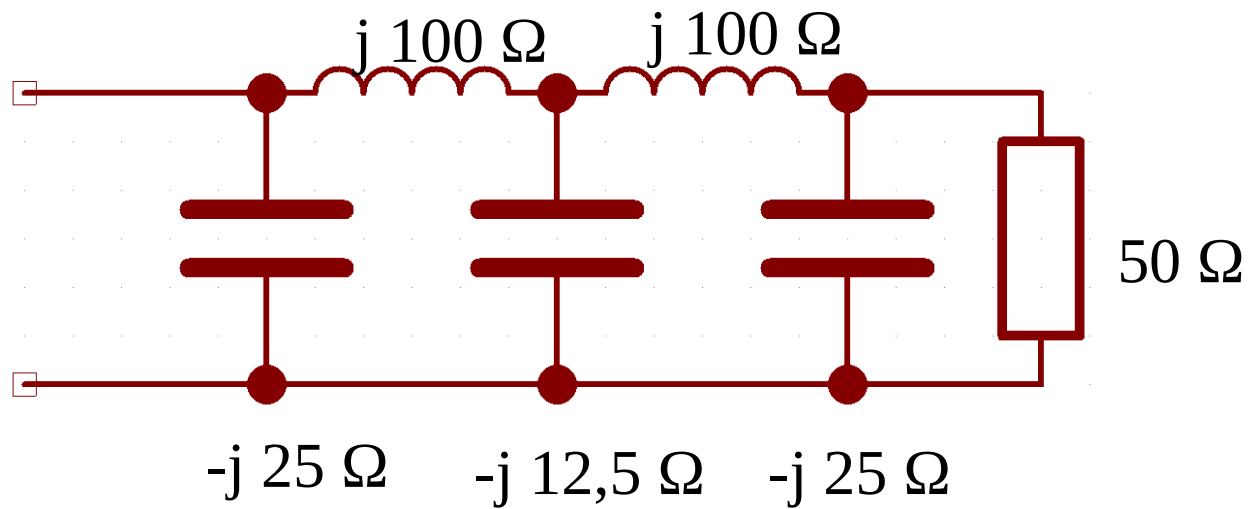
Diese Filter transformieren bei der Entwurfsfrequenz
keine Impedanzen:

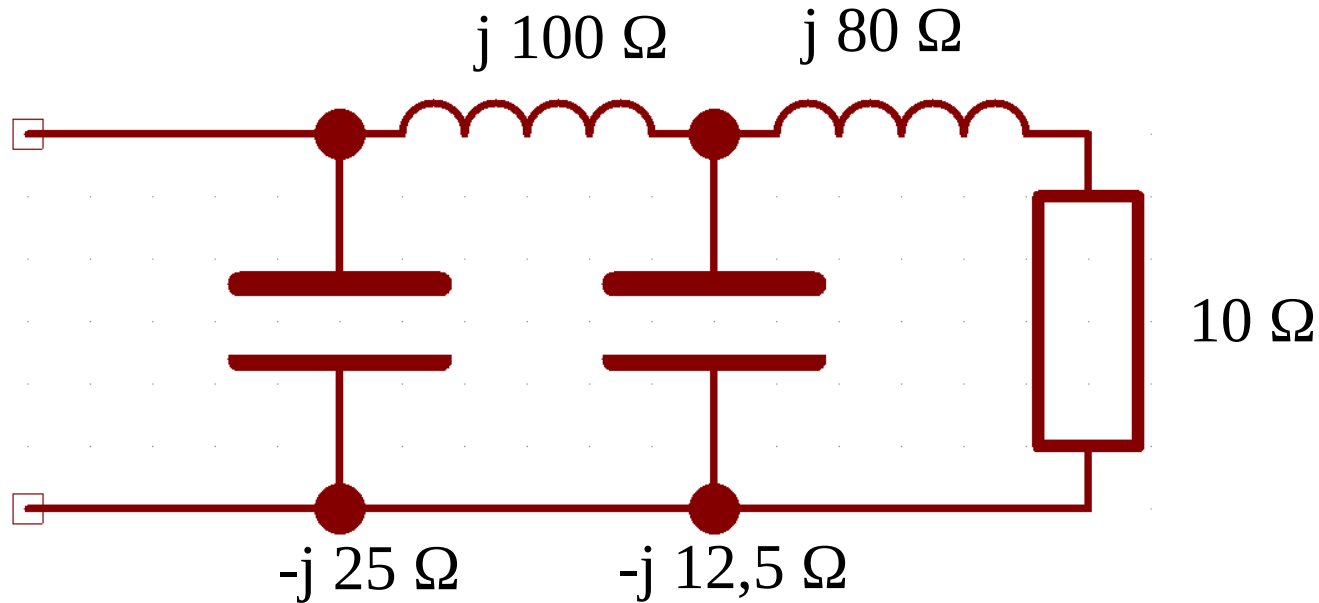
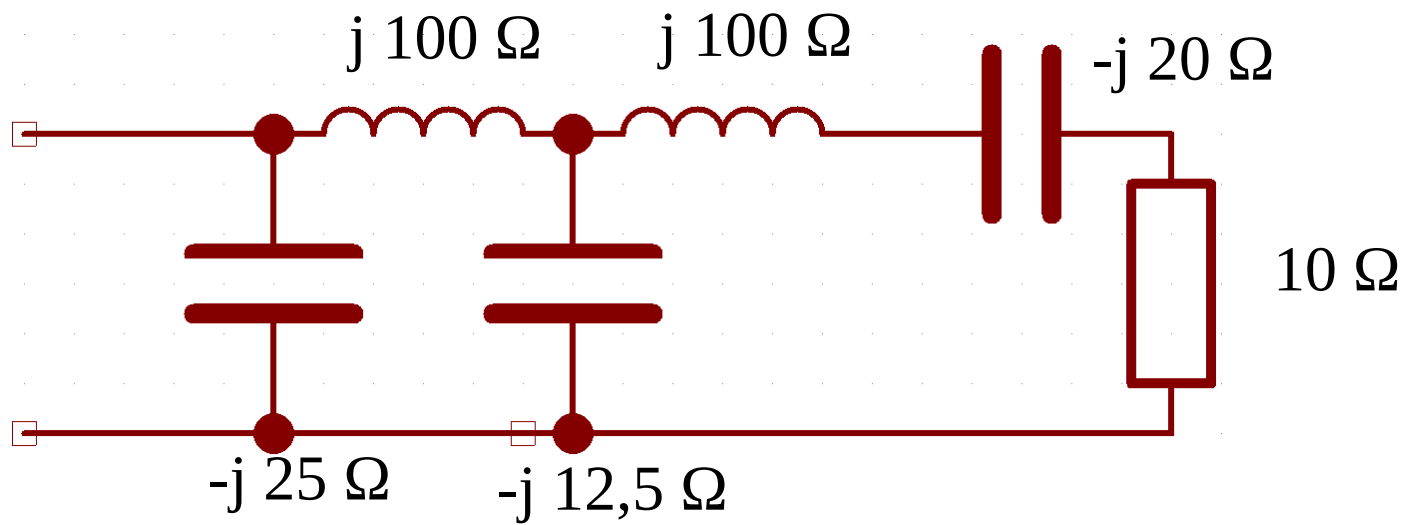
Analog zu einer Halbwellen-Speiseleitung.

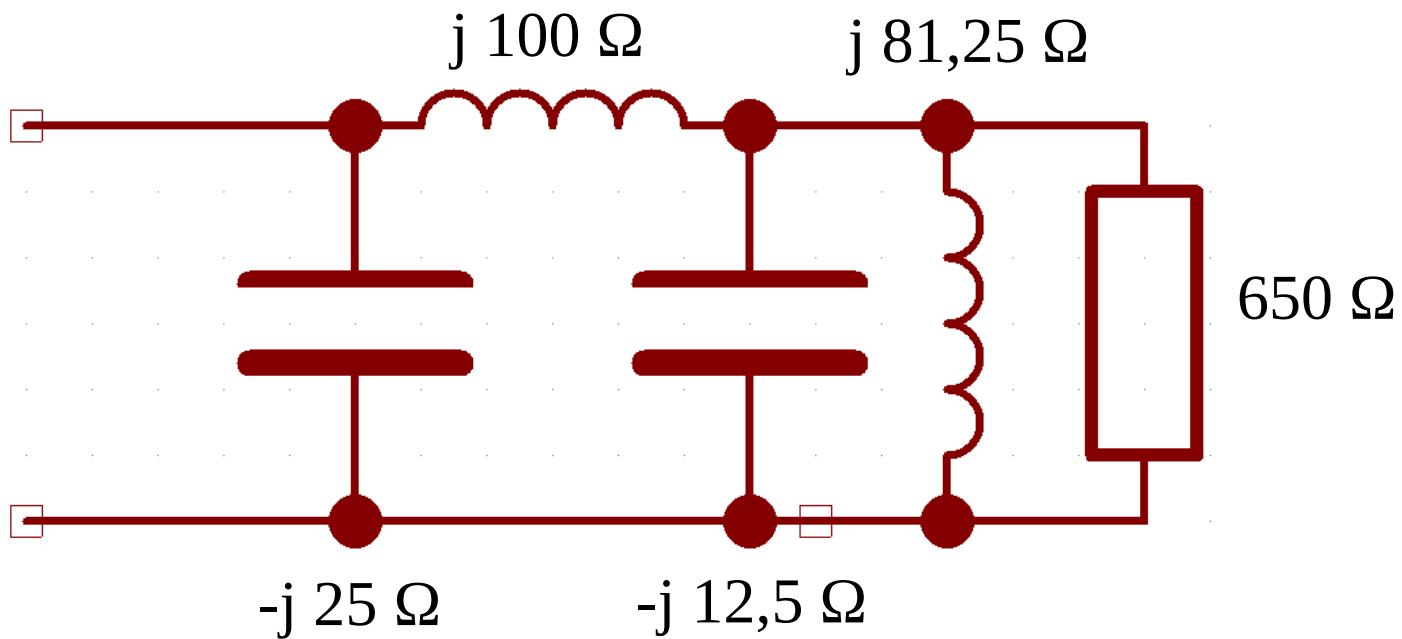
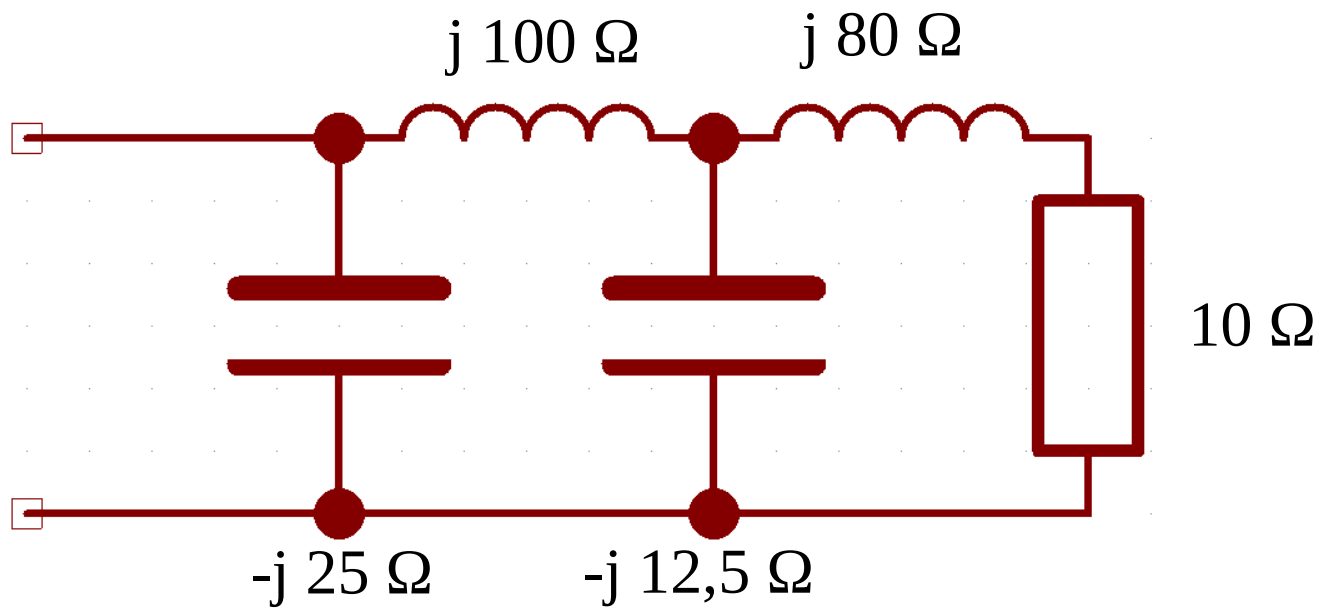
QSY doppelte Frequenz

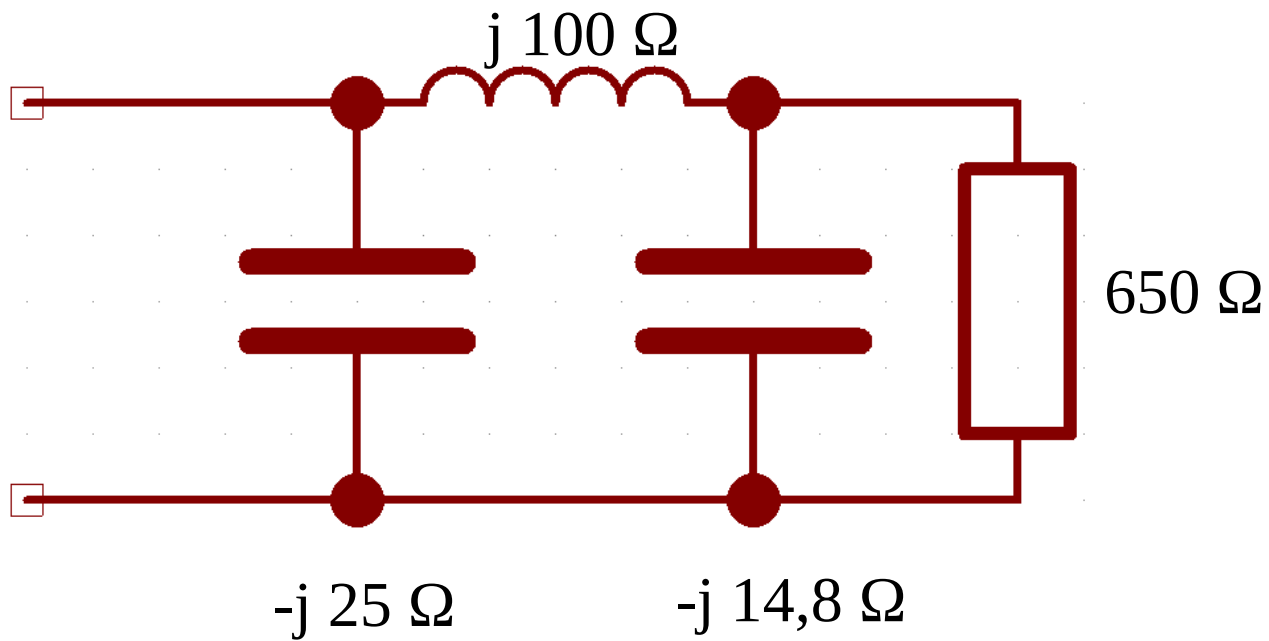
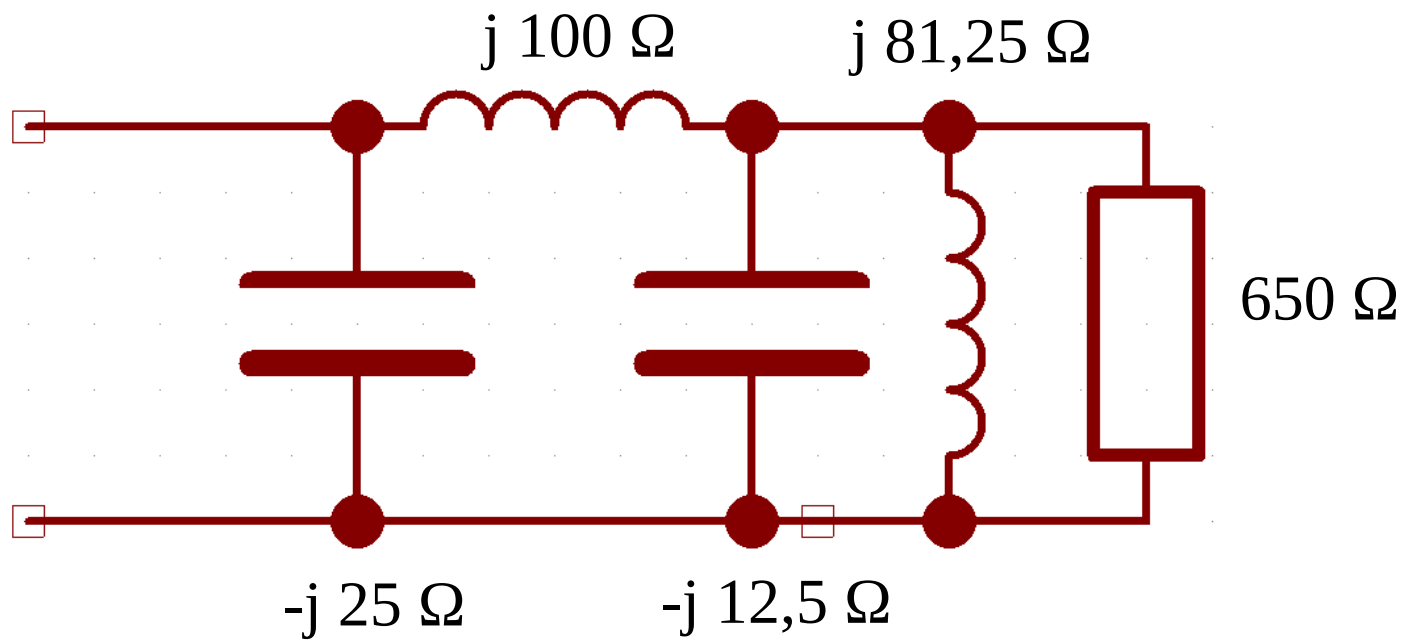


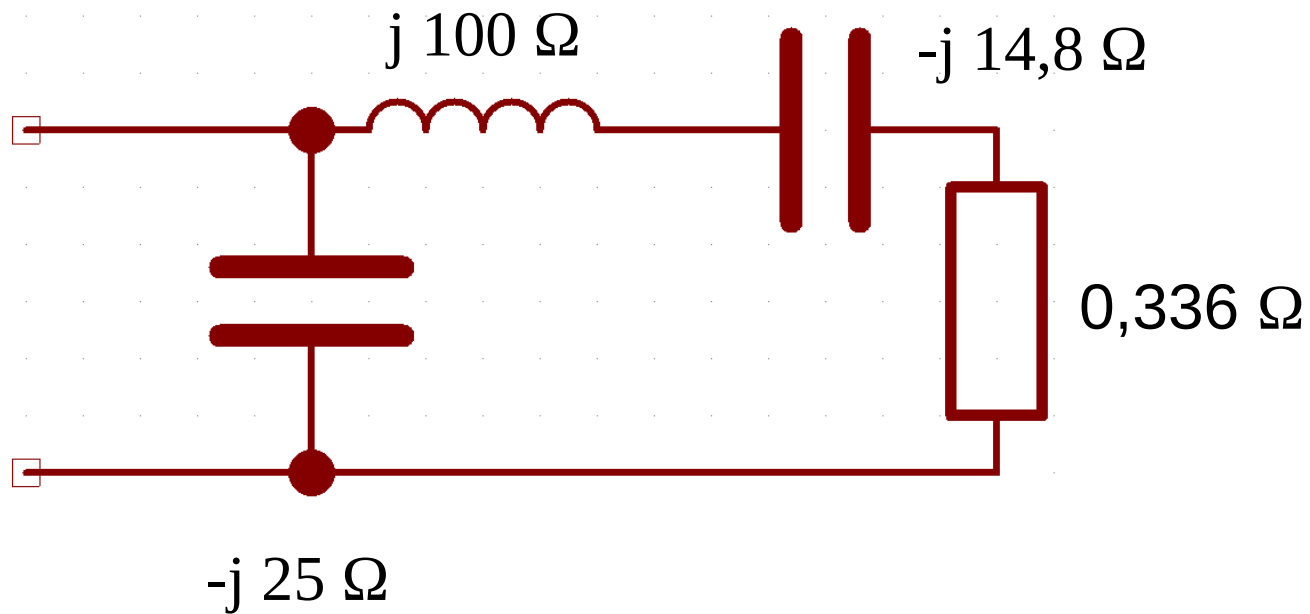
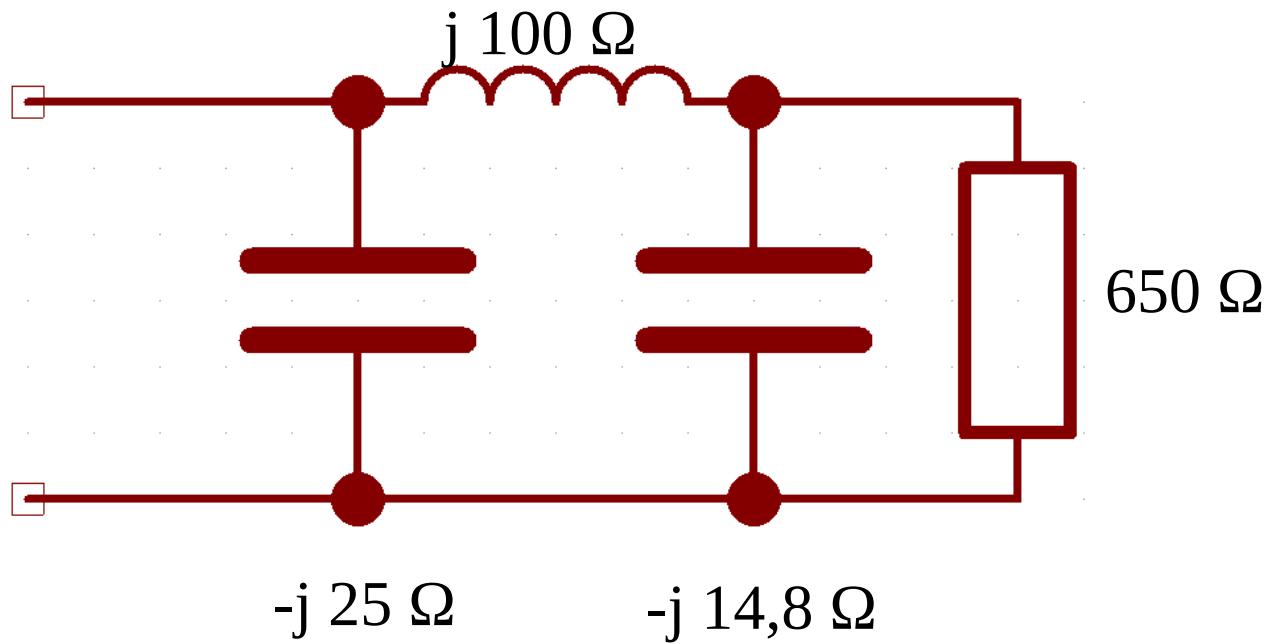
"Lustiges Leiterspiel"...

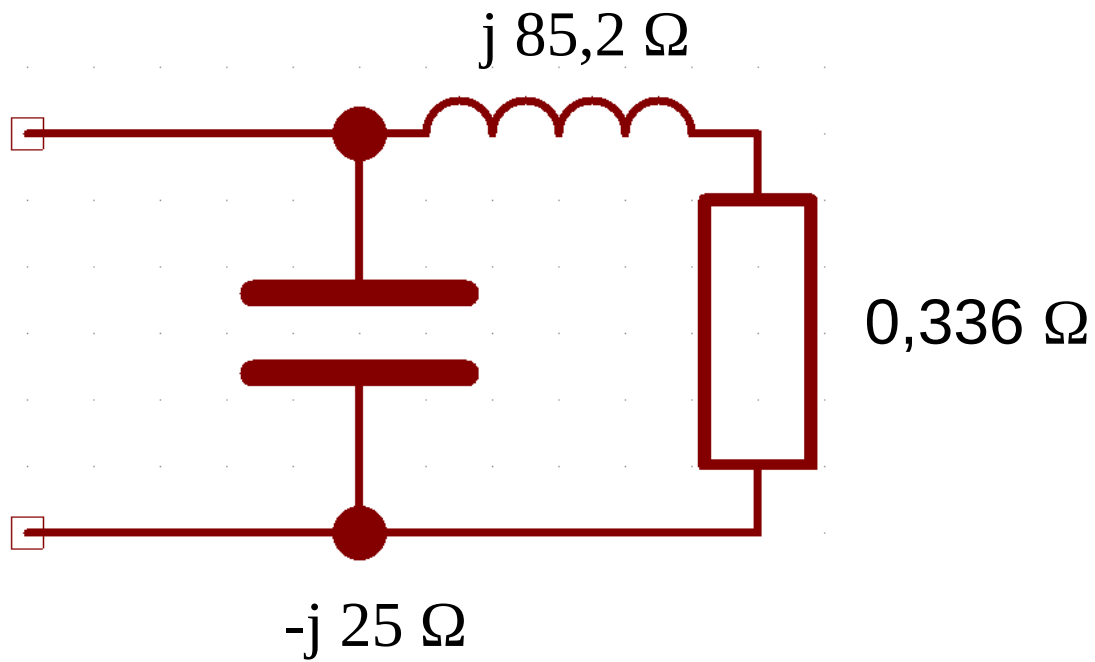
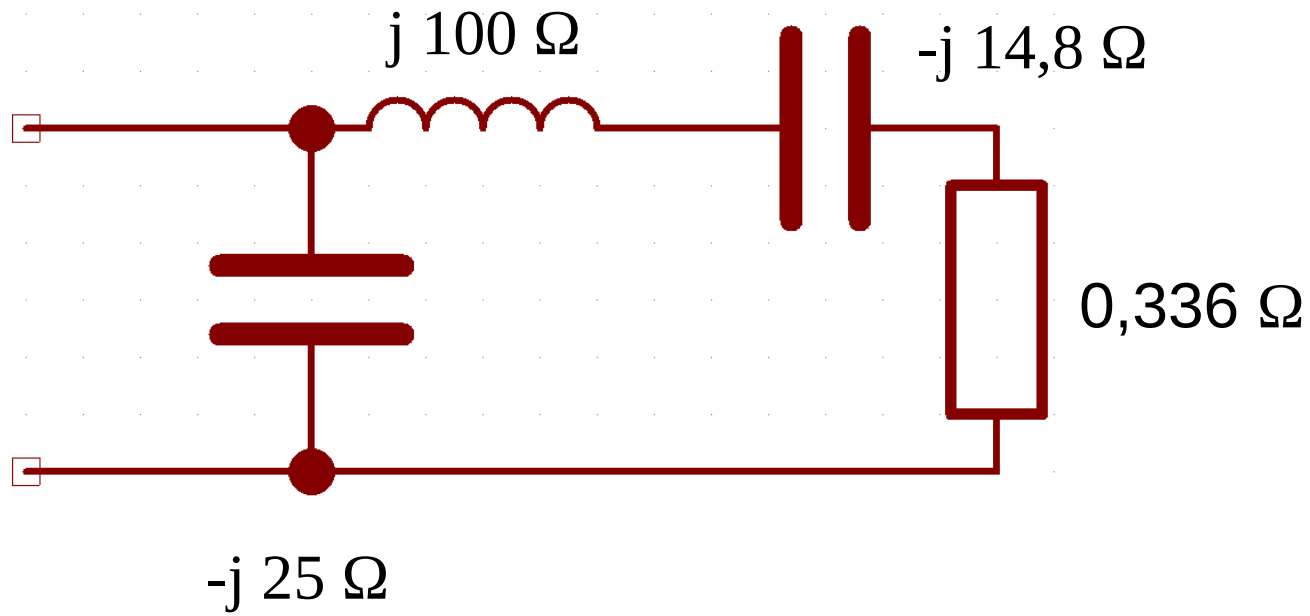


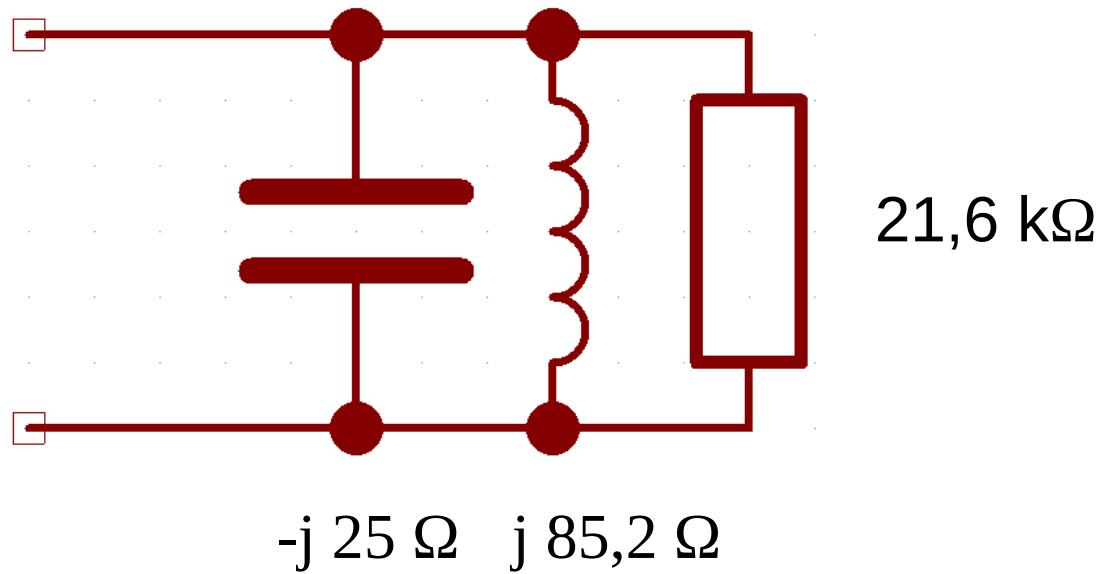
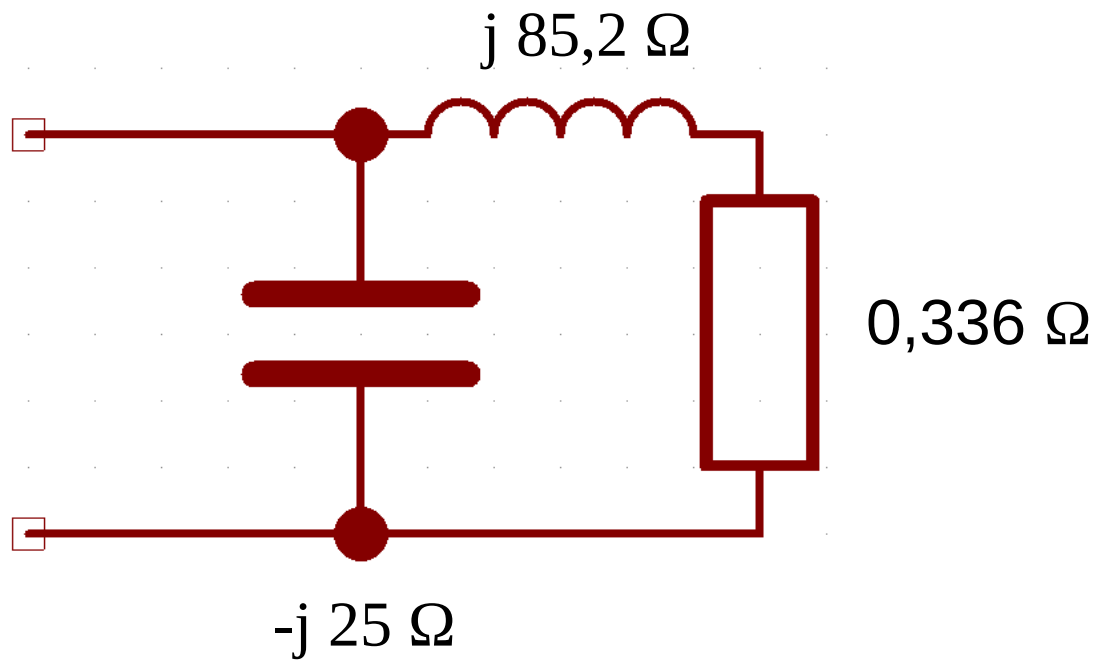


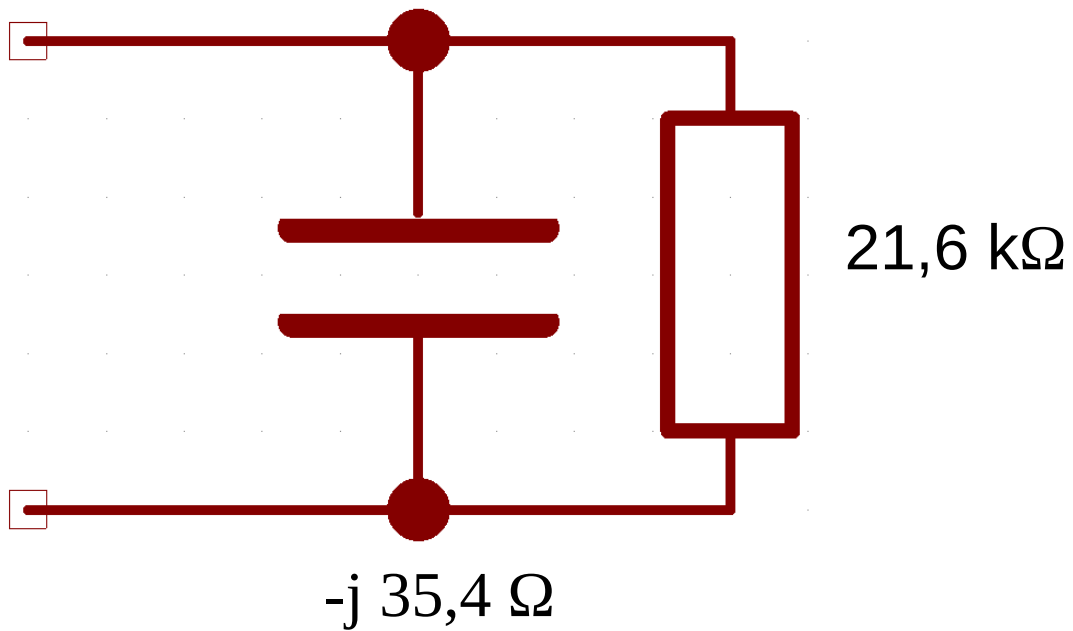
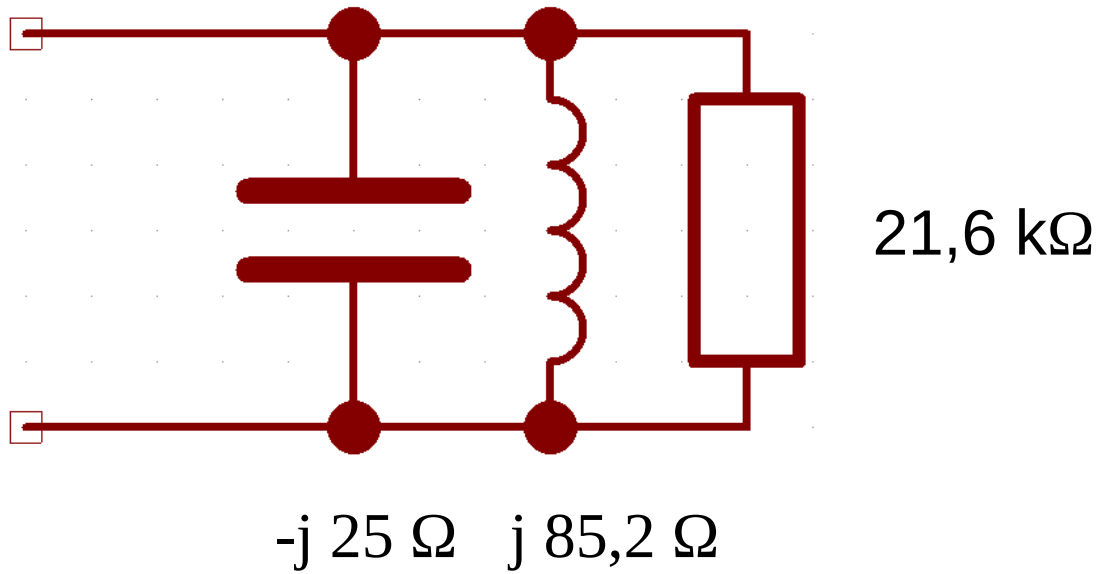












Was kommt an?

- Man kann nun von einer Einspeisung ausgehend ein fröhliches Leiterspiel in der Gegenrichtung veranstalten, um die einzelnen Ströme und Spannungen zu berechnen.
- Einfacher ist die Überlegung, dass Spulen und Kondensatoren keine Leistung verbrauchen. Also ist die Leistung, die durch $21,6 \text{ k}\Omega$ verbraucht wird, dieselbe, die durch die $50 \text{ }\Omega$ am Ende verbraucht wird.

Wie viel Dämpfung?

- Speise ich mit einer **Spannungsquelle**, so ergibt sich $50 / 21,6 \text{ k} = 1 / 433$ der Leistung (die ein 50Ω Widerstand direkt aufnehmen würde), das entspricht 26,4 dB Dämpfung.

Es gibt die Konvention, die Speisung nicht als Spannungsquelle zu denken, sondern mit einem Innenwiderstand von 50Ω .

- Rechne ich es so, komme ich auf $1 / 325$ der Leistung, das entspricht 25,1 dB Dämpfung.

Zweite Anwendung

Wir basteln uns
einen Antennentuner

Die Beispielantenne

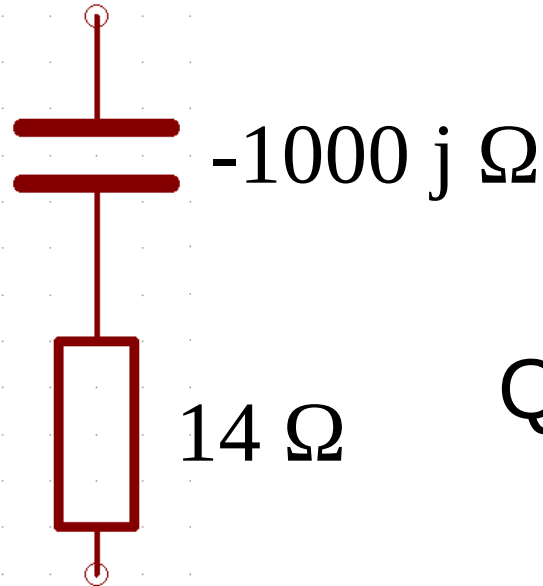
Dipole der Gesamtlänge $\lambda / 4$
markieren nach meiner Erfahrung ungefähr
die Grenze des zumutbar kurzen
für übliche Tuner.

Beispielantenne für 7050 kHz:

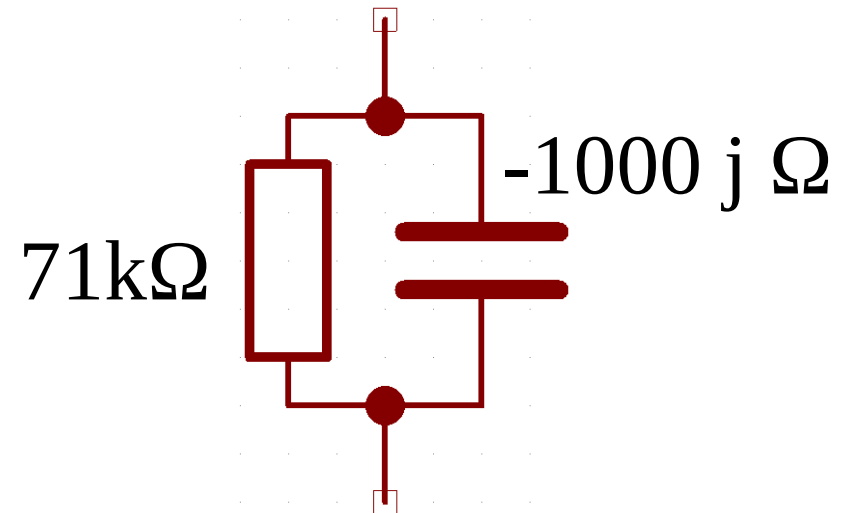
Dipol 2x5m in 10 m Höhe, 1,6 mm Drahtdurchmesser,
Cu, über Normalboden (Diel.: 13, Leitfähigkeit 5 mS/m):
Impedanz / $\Omega = 14,04 - 1001j$

Dank an Wolfgang DK2FQ für das MMANA Simulationsergebnis!

Wir basteln einen Antennentuner



$$Q = 1000 / 14 \\ = 71$$



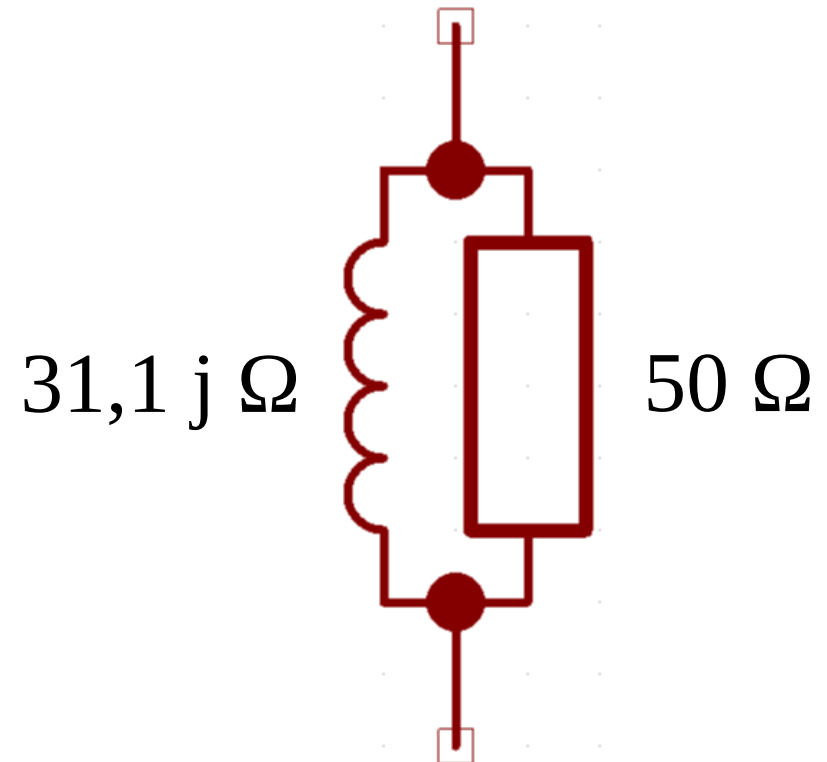
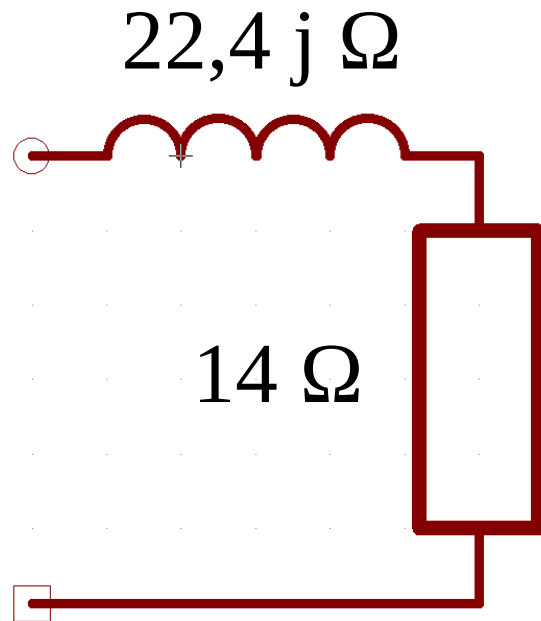
100 W für 14Ω : 2,7 A

100 W für $71 \text{ k}\Omega$: 2,7 kV

Antenne braucht 2,7 kV und 2,7 A für 100 W!

Strom ist $38 \text{ mA} + 2,7 \text{ j A}$

Von $14\ \Omega$ auf $50\ \Omega$



Probe in Python:

```
>>> 1 / (1 / (31.1 * j) + 1 / 50)
(13.947958156558157+22.424370026620824j)
```


Wie rechnen bei Güte in der Nähe von 1?

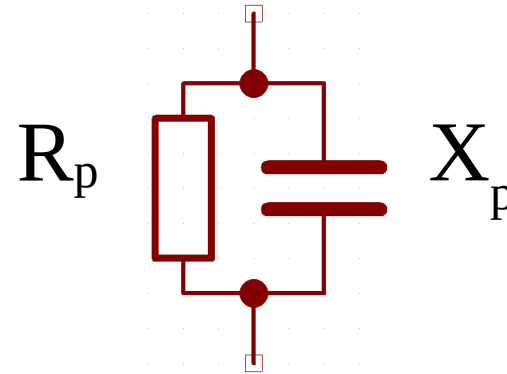
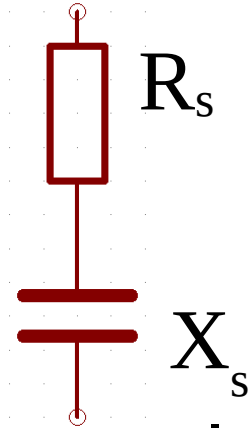
Harte Methode:

Rumprobieren, bis die passenden Werte
gefunden sind.

Angenehmer:

Die nächsten beiden Folie nutzen

Eine Leiterspasse (sowohl mit L wie mit C)



Ich habe R_p und X_p :

$$R_s + j X_s =$$

$$1 / (1 / R_p + 1 / (j * X_p))$$

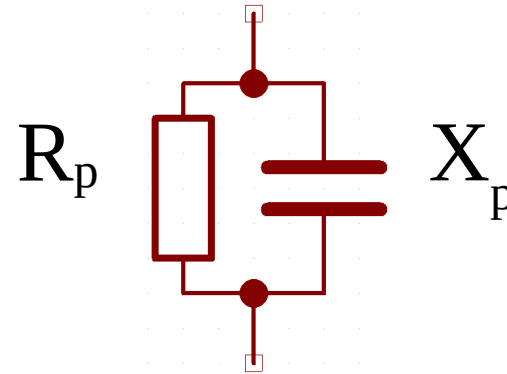
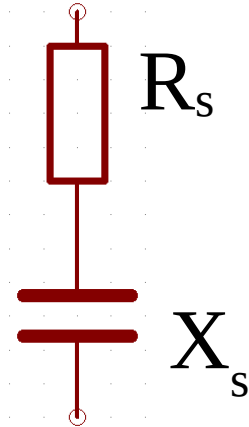
Ich habe R_s und X_s :

$$R_p = 1 / ((1 / (R_s + (j * X_s))).\text{real})$$

$$X_p = 1 / ((1 / (R_s - (j * X_s))).\text{imag})$$

Antennentuner-Formeln,

gehen sowohl mit L wie mit C



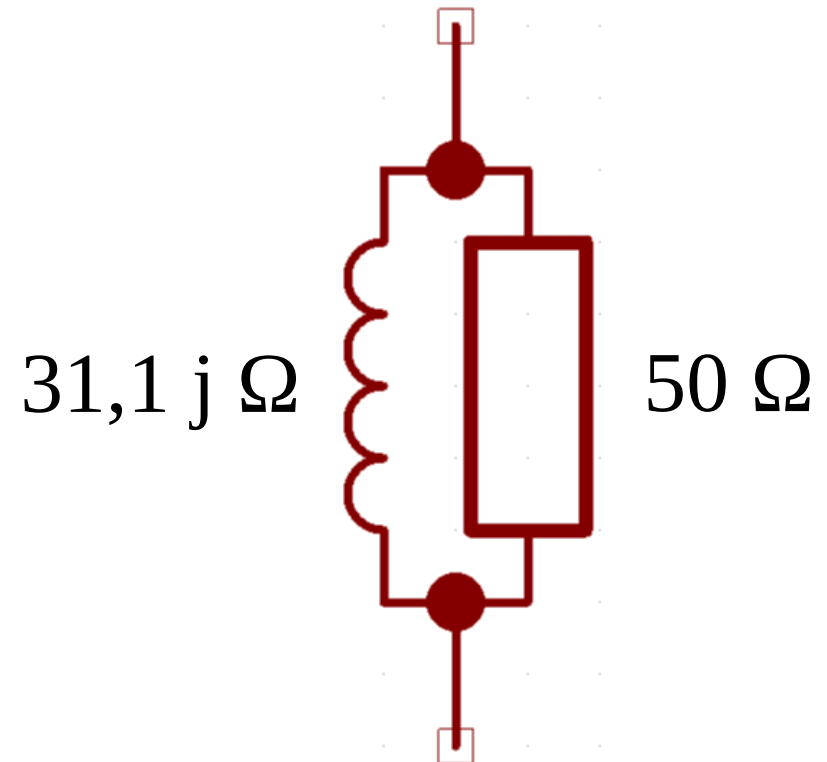
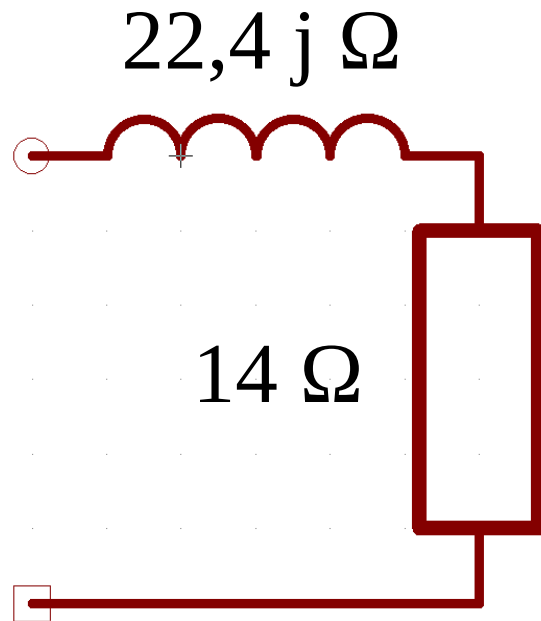
Ich habe R_s und wünsche mir ein R_p :

$$X_s = \sqrt{(R_p - R_s)R_s}$$

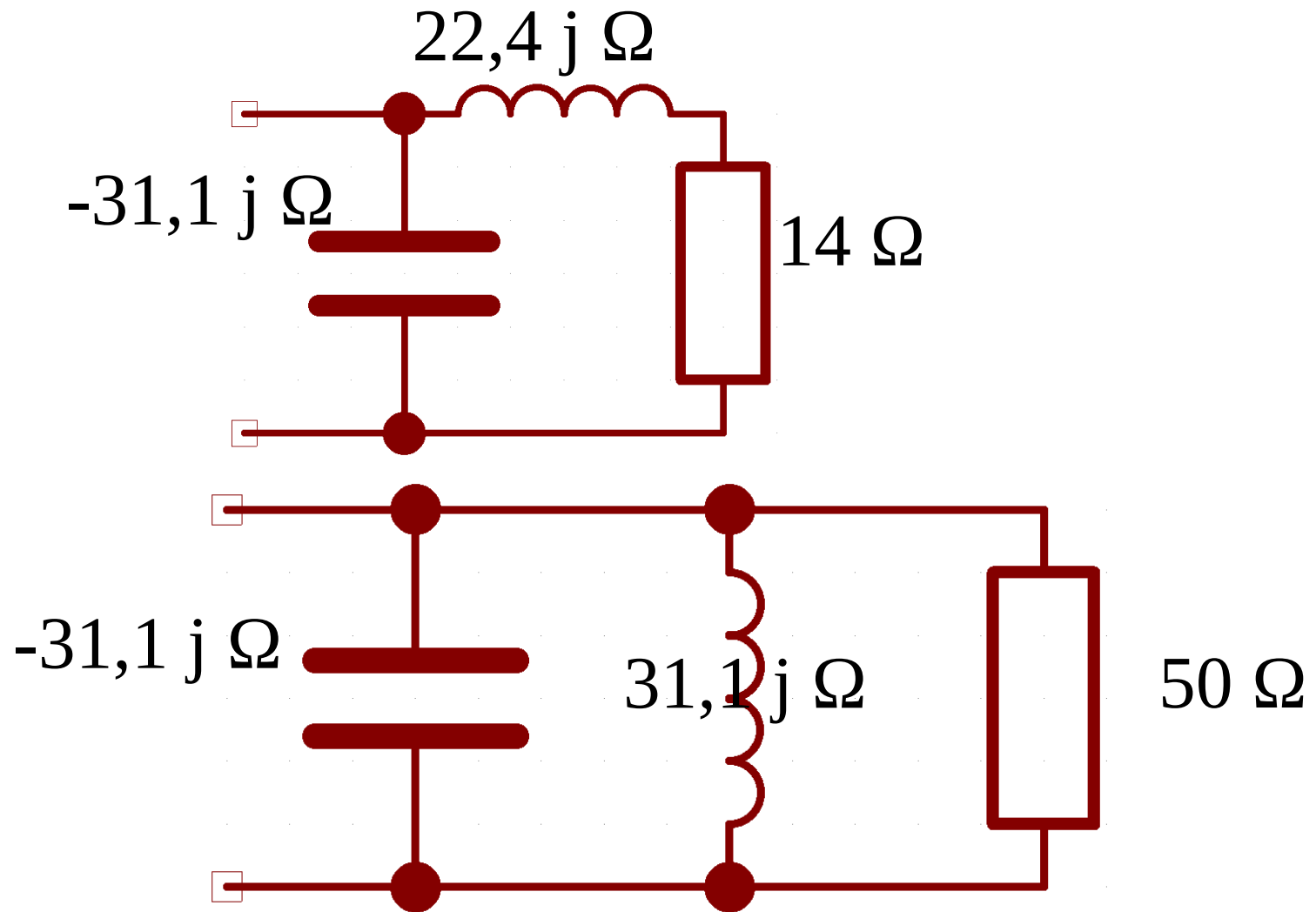
Ich habe R_p und wünsche mir R_s :

$$X_p = \sqrt{R_s R_p^2 / (R_p - R_s)}$$

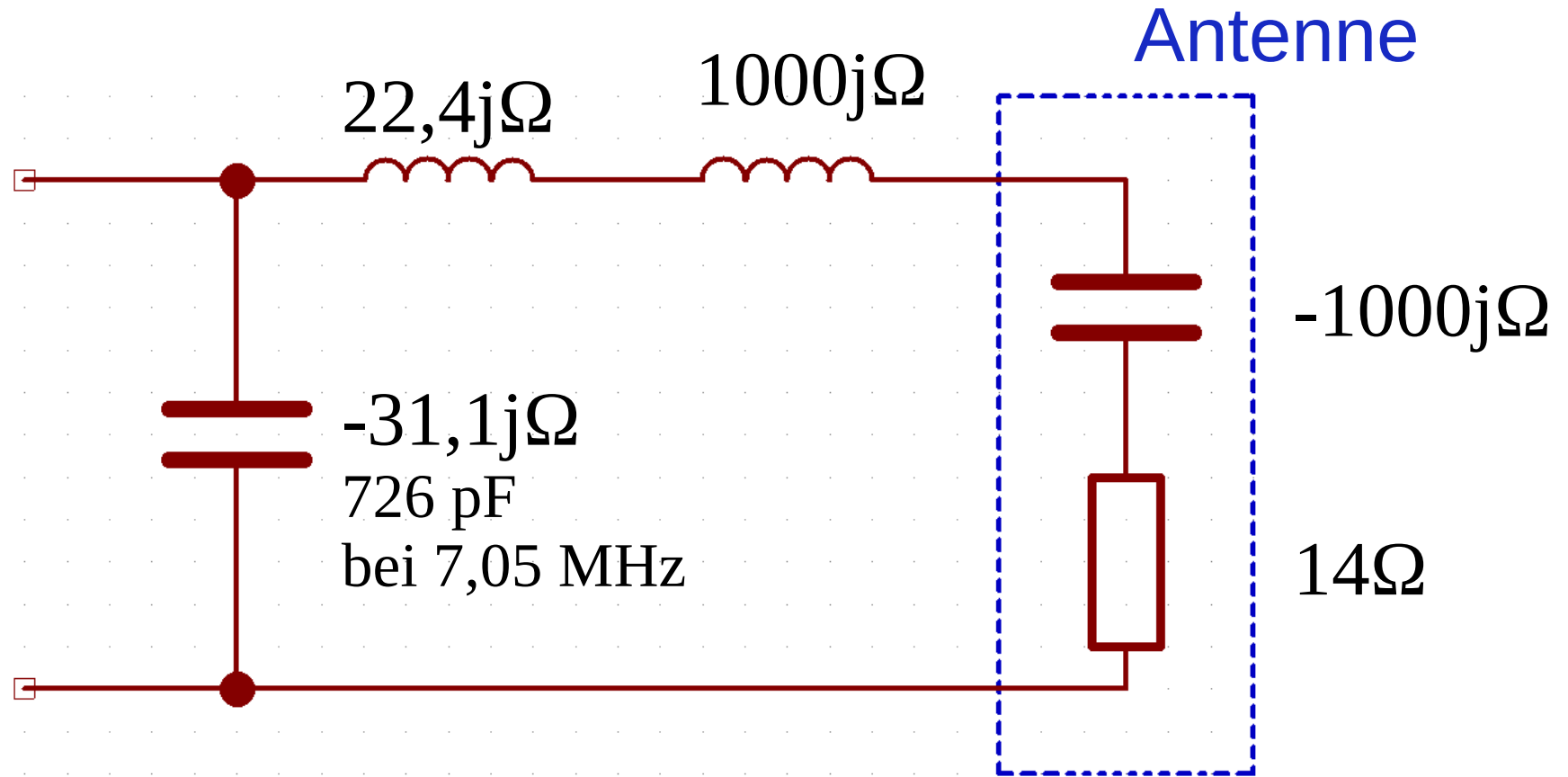
Wo waren wir stehengeblieben?



Von $14\ \Omega$ auf $50\ \Omega$



Und nun der wirkliche Tuner



Die beiden Spulen zusammengefasst zu einer
von 1022,4 j Ω, bei 7,05 MHz: 23,08 μH

Danke für die Aufmerksamkeit!

Alle Rechte an diesem Vortrag:

© 2022 Dr. Andreas Krüger, DJ3EI dj3ei@famsik.de



Dieser Vortrag ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International [Lizenz](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

Diese Folien gibt es
von

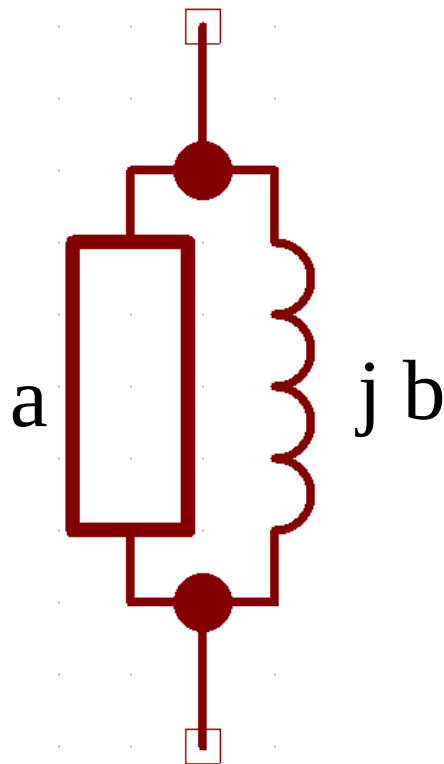
[https://dj3ei.famsik.de/
2022-vortrag-hamradio](https://dj3ei.famsik.de/2022-vortrag-hamradio)



Bonusmaterial

Folien, die ich rausgeworfen habe, weil ich Angst hatte, mit der Vortragszeit nicht hin zu kommen und mit der Eurer Aufnahmefähigkeit.

Wer es genau wissen will...



$$\begin{aligned} Z_{\text{ges}} &= 1 / (1 / a + 1 / j b) \\ &= 1 / (j b / j a b + a / j a b) \\ &= 1 / ((a + j b) / j a b) \\ &= j a b / (a + j b) \\ &= j a b (a - j b) / ((a + j b) (a - j b)) \\ &= (j a^2 b - j^2 a b^2) / (a^2 - j^2 b^2) \\ &= (j a^2 b + a b^2) / (a^2 + b^2) \\ &= a b^2 / (a^2 + b^2) + j a^2 b / (a^2 + b^2) \end{aligned}$$

Um Produkte in den Nennern habe ich einige () weggelassen.

Spulen normaler Güte



$$R = X_L / Q$$

$$X_L$$

- Der Phasenunterschied beträgt nicht mehr 90° , sondern weniger.
- Wen's interessiert:

$$\varphi = \arcsin(Q / \sqrt{Q^2 + 1})$$

- Für einigermaßen große Q ändert sich der Gesamt-Scheinwiderstand fast nicht.
- Wen's interessiert:

$$U_{\text{peak}} / I_{\text{peak}} = \sqrt{Q^2 + 1} / Q X_L$$

Kondensator vs. Spule

$$\mathbf{I} = \mathbf{C} \dot{\mathbf{U}}$$

$$\mathbf{U} = \mathbf{L} \dot{\mathbf{i}}$$

Aus einem Vortrag über L entsteht einer über C durch systematischen Tausch:

- Kondensator gegen Spule
- Strom gegen Spannung
- also auch Widerstand U / I gegen Leitwert I / U
- und Kurzschluss ($U = 0$) gegen offen ($I = 0$).

Für Mathematikinteressierte

mit Vorkenntnissen Differentialrechnung / Ableiten

- Ansatz: Strom als Sinussignal der Frequenz f

$$I(t) = I_0 \sin(2 \pi f t)$$

- Änderung

(durch Ableiten)

$$\dot{I}(t) = 2 \pi f I_0 \cos(2 \pi f t)$$

- Spulengleichung

$$U(t) = L \dot{I}(t)$$

- Spannung

$$U(t) = 2 \pi f L I_0 \cos(2 \pi f t)$$

Fazit: Spitzenstrom I_0 gehört zu einer

Spitzenspannung $2 \pi f L I_0$,

wie bei einem Widerstand von $R = 2 \pi f L$

aber mit Phasendrehung Strom $\rightarrow$ Spannung $\sin \rightarrow \cos$.

Für Mathematikinteressierte

mit Vorkenntnissen Differentialrechnung / Ableiten

- Ansatz: Spannung als Sinussignal der Frequenz f

$$U(t) = U_0 \sin(2 \pi f t)$$

- Änderung der Spannung

(durch Ableiten) $\dot{U}(t) = 2 \pi f U_0 \cos(2 \pi f t)$

- Kondensatorgleichung $I(t) = C \dot{U}(t)$

- Strom $I(t) = 2 \pi f C U_0 \cos(2 \pi f t)$

Fazit: Spitzenspannung U_0 gehört zu einer

Spitzentrom $2 \pi f C U_0$,

wie bei einem Widerstand von $R = 1 / (2 \pi f C)$

aber mit Phasendrehung Spannung $\rightarrow$ Strom $\sin \rightarrow \cos$.