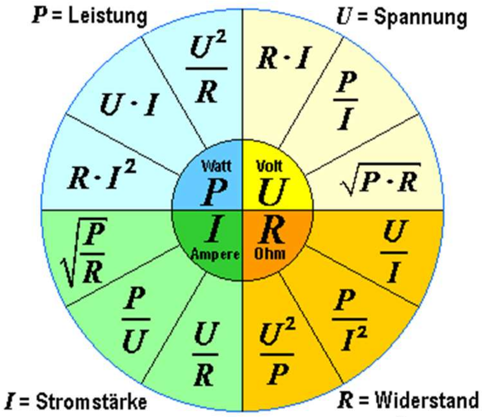
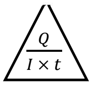
-15			-12			-9			-6			-3	-2	-1	0	1	2	3			6			9			12			15
Femto			Piko			Nano			Mikro			Milli	Zenti	Dezi		Deka	Hekto	Kilo			Mega			Giga			Tera			Peta
f			p			n			µ			m	c	d		da	h	k			M			G			T			P



Ladung Q, Stromstärke I, Zeit t 

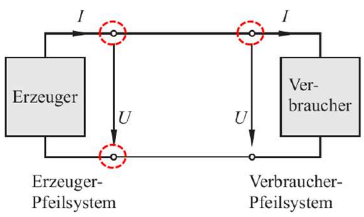
In einem **unverzweigten Stromkreis** herrscht überall die **gleiche Stromstärke**.

Stromdichte J, Stromstärke I, Querschnittsfläche A 

Driftgeschwindigkeit $v_n = \frac{J}{e \cdot n} = \frac{I}{A \cdot e \cdot n}$ e = 1.602 · 10^{-19} As, n = freie El. /Volumen [m^{-3}]

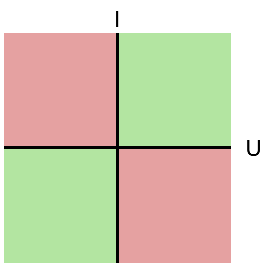
Ein im **Stromkreis fliessender Strom** erfordert dauernde **Zufuhr elektrischer Energie**.

Energie/ Arbeit W [J] $W = P * t \Leftrightarrow W = U * I * t$ Leistung P, Zeit t



Die Leistung P ist positiv im jeweiligen Pfeilsystem für «was im Namen steht».

Strom-Spannungskennlinien:



Leistung positiv, Leistung negativ

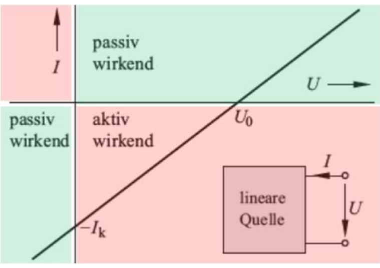
Steigung der Kurve = Leitwert = Widerstand^{-1}

Widerstand Geometrie:

$R \propto \frac{l}{A} = \rho \cdot \frac{l}{A}$, Länge l, Querschnittsfläche A, spez. Widerstand ρ

Temperaturabhängigkeit:
Metallische Leiter: Temperatur ↑ = Widerstand ↑
Berechnung Widerstand: $R_\vartheta = R_{20} \cdot [1 + \alpha_{20} * \Delta\vartheta + \beta_{20} \cdot (\Delta\vartheta)^2]$

Aktive Eintore (Quellen)
Leerlaufspannung U_0: Stromkreis offen, I =0, Nullstelle
Kurzschlussstrom I_k: Kein Verbraucher, U =0, y-Achsenabschnitt



Bestimmung Arbeitspunkt / Leistungsanpassung
Schnittpunkt Kennlinie aktives und passives Eintor
Maximale Leistung, wenn $R_i = R_v$
Arbeitspunkt berechnen: $I_A = \frac{U_0}{R_i + R_v}$; $U_A = I_A \cdot R_V = \frac{U_0 \cdot R_v}{R_i + R_v}$

Knotensatz (1. Kirchhoffscher Satz)

An einem Knoten ist die Summe aller Ströme gleich Null. Bezugspfeile müssen einheitlich sein.

Der Gesamtstrom einer Parallelschaltung ist die Summe der Teilströme.

Maschensatz (2. Kirchhoffscher Satz)

In jeder Masche ist die Summe sämtlicher Spannungen gleich null.

Der Gesamtspannung einer Serieschaltung ist die Summe der Teilspannungen.

Ersatz-Eintore

Ersatzeintor verhält sich nach aussen gleich wie die entsprechende reale Schaltung.

Serieschaltung von Widerständen: $R_e = R_1 + R_2 + \cdots + R_n$

Serieschaltung von nichtlineare Eintoren: Punktweise Addition Spannung bei gl. Strom

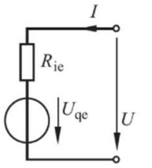
Parallelschaltung von Widerständen:

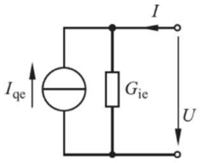
$$R_e = \frac{1}{G_e} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n}}$$

Spezialfall 2 Widerstände:

$$R_e = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Parallelschaltung von nichtlineare Eintoren: Punktweise Addition Ströme bei gl. Spannung





Innenwiderstand bestimmen:
Spannungquelle kurzschliessen, Stromquelle trennen
Widerstand «ohne Quelle» berechnen

Spannungsquelle → Stromquelle	Stromquelle → Spannungsquelle
gegeben: R_{ie}, U_{qe}	gegeben: G_{ie}, I_{qe}
$G_{ie} = \frac{1}{R_{ie}}$ $I_{qe} = G_{ie} \cdot U_{qe} = \frac{U_{qe}}{R_{ie}}$	$R_{ie} = \frac{1}{G_{ie}}$ $U_{qe} = I_{qe} \cdot R_{ie} = \frac{I_{qe}}{G_{ie}}$

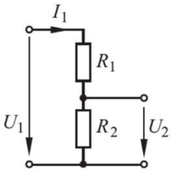
Überlagerungssatz

In einem linearen Netz kann jeder Strom und jede Spannung als Summe von Teilströmen bzw. Teilspannungen angegeben werden. Dabei stellt jeder Summand den Beitrag jeweils einer unabhängigen Quelle zum Gesamtwert dar.

Teilspannung/strom wird mit jeweils einer Quelle berechnet, die restlichen werden «entfernt»(Spannungquelle kurzschliessen, Stromquelle trennen)

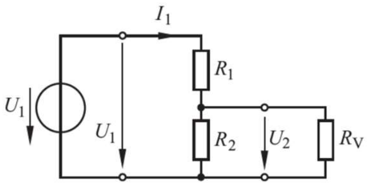
Anwendungen

Spannungsteiler



unbelasteter Spannungsteiler

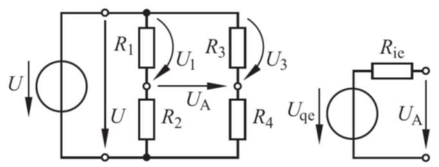
$$U_{2L} = \frac{U_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$



belasteter Spannungsteiler

$$U_2 = \frac{U_1 \cdot R_2 \parallel R_v}{R_1 + R_2 \parallel R_v} = \frac{U_1 \cdot R_2 \cdot R_v}{R_1(R_2 + R_v) + R_2 \cdot R_v}$$

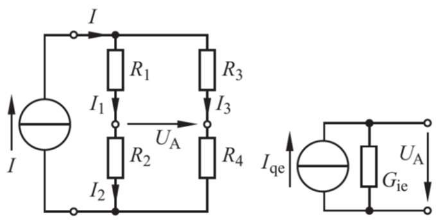
Brückenschaltungen



Spannungsgespeiste Brückenschaltung

$$U_A = U_{qe} = U \cdot \frac{R_2R_3 - R_1R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} = U \cdot \left(\frac{R_3}{(R_3 + R_4)} - \frac{R_1}{(R_1 + R_2)}\right)$$

$$R_{ie} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)^{-1} + \left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}\right)^{-1} = \frac{1}{G_1 + G_2} + \frac{1}{G_3 + G_4}$$



Stromgespeiste Brückenschaltung

$$I_{qe} = I \cdot \frac{R_2R_3 - R_1R_4}{(R_1 + R_3)(R_2 + R_4)} = I \cdot \left(\frac{G_1}{G_1 + G_3} - \frac{G_2}{G_2 + G_4}\right)$$

$$G_{ie} = \frac{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}{(R_1 + R_3)(R_2 + R_4)} = \frac{1}{(R_1 + R_3)} + \frac{1}{(R_2 + R_4)}$$

Abgeglichene Brückenschaltung ➔ $U_A = 0$ ➔ $R_2R_3 = R_1R_4$

Nicht abgeglichene Brückenschaltungen / Ausschlagbrücke

Halbbrücken: 2 fixe, 2 veränderliche Widerstände (z.B. Dehnmesstreifen) (alle gleich)

Ausgangsspannung UA linear abhängig von ΔR

$$U_A = \frac{\Delta R \cdot I}{2} = \frac{\Delta R \cdot U}{2R}$$

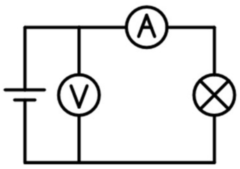
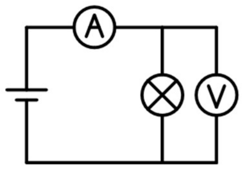
R1	R2	R3	R4	Speisung
R	**R+ΔR**	**R**	**R-ΔR**	**I**
R-ΔR	R	R+ΔR	R	I
R	**R+ΔR**	**R+ΔR**	**R**	**I**
R-ΔR	R	R	R-ΔR	I
R-ΔR	**R+ΔR**	**R**	**R**	**I; U**
R	R	R+ΔR	R-ΔR	I; U

Vollbrücken: 4 veränderliche Widerstände (alle gleich)

$$U_A = \Delta R \cdot I = \frac{\Delta R \cdot U}{R}$$

R1	R2	R3	R4
R-ΔR	**R+ΔR**	**R+ΔR**	**R-ΔR**
R+ΔR	**R-ΔR**	**R-ΔR**	**R+ΔR**

Strom- und Spannungsmessung

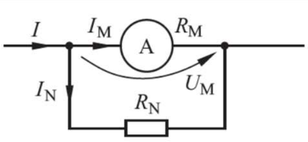
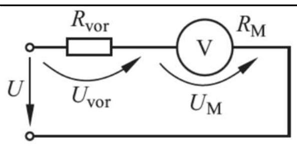
	
Stromrichtige Messung	Spannungsrichtige Messung
$R_M^2 > (R_M + R_V) \cdot R_A$	$R_M^2 < (R_M + R_V) \cdot R_A$
$U_{gem} = U_{Verbr.} + U_A > U_{Verbr.}$	$I_{gem} = I_{Verbr.} + I_V > I_{Verbr.}$

Widerstand R_A Strommesser Ⓐsoll klein sein

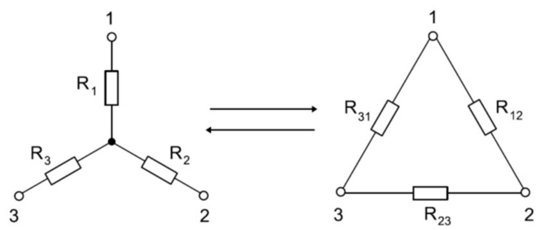
Widerstand R_V Spannungsmesser Ⓥsoll klein sein

Bei kleinem Widerstand vom Verbraucher R_M

Messbereichserweiterung bei Strom- und Spannungsmessung

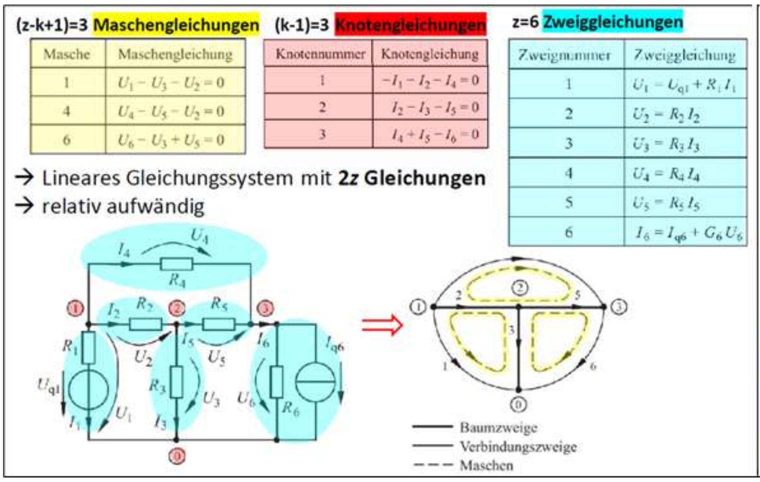
	
$R_N = \frac{R_M}{I/I_M - 1}$	$R_{vor} = \frac{R_M}{U/U_M - 1}$

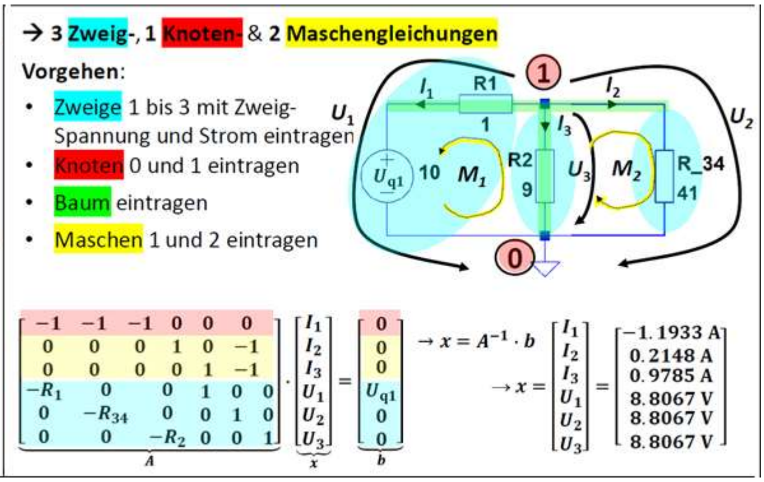
Stern-Dreieck-Umrechnung



$R_1 = \frac{R_{31}R_{12}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}$	$R_{23} = R_2 + R_3 + \frac{R_2 R_3}{R_1}$
$R_2 = \frac{R_{23}R_{12}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}$	$R_{31} = R_1 + R_3 + \frac{R_1 R_3}{R_2}$
$R_3 = \frac{R_{23}R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}$	$R_{12} = R_1 + R_2 + \frac{R_1 R_1}{R_3}$

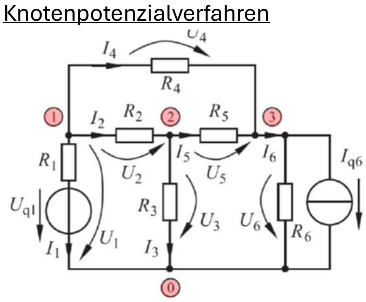
Netzwerkanalyse





Mit linearem Gleichungssystem

Knotenpotenzialverfahren



$$U_{1,0} = \varphi_1 - \varphi_0$$
$$U_{2,0} = \varphi_2 - \varphi_0$$
$$U_{3,0} = \varphi_3 - \varphi_0$$

Spannungsquellen in equivalente Stromquellen umrechnen: $I_{qe} = \frac{U_{q1}}{R_1}$

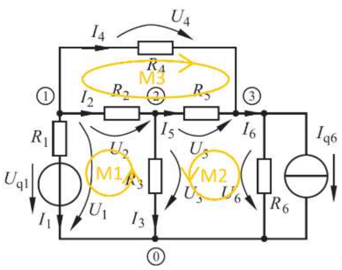
Knoten-Leitwertmatrix aufstellen

$$\begin{pmatrix} G_1 + G_2 + G_4 & -G_2 & -G_4 \\ -G_2 & G_2 + G_3 + G_5 & -G_5 \\ -G_4 & -G_5 & G_4 + G_5 + G_6 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_{1,0} \\ U_{2,0} \\ U_{3,0} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{q1} \\ 0 \\ -I_{q6} \end{pmatrix}$$

Diagonalelemente: Summe der Leitwerte am Knoten
Element 12 = Element 21 = Leitwert zwischen Knoten 1 + 2
Lösungsvektor b: Quellenströme, Vorzeichen entsprechend Bezugspfeil: In Knoten hinein = Positiv

$U_1 = U_{1,0} \quad U_2 = U_{1,0} - U_{2,0} \quad U_3 = U_{2,0} \quad U_4 = U_{1,0} - U_{3,0} \quad U_5 = U_{2,0} - U_{3,0} \quad U_6 = U_{3,0}$

Maschenstromanalyse



Stromquellen in equivalente Spannungsquellen umrechnen: $U_{qe} = I_{qe} \cdot R_{ie}$

Maschengleichungen in Matrixform aufstellen

$$\begin{pmatrix} R_1 + R_2 + R_3 & -R_3 & R_2 \\ -R_3 & R_3 + R_5 + R_6 & R_5 \\ R_2 & R_5 & R_2 + R_4 + R_5 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_{M1} \\ I_{M2} \\ I_{M3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -U_{q1} \\ I_{q6} \cdot R_6 \\ 0 \end{pmatrix}$$

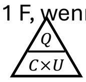
Diagonalelemente: Summe der Widerstände in der Masche
Element 12 = Element 21 = Gemeinsamer Widerstand zwischen Masche 1 + 2,
Wenn gleicher Umlauf der Maschen: Vorzeichen negativ
Lösungsvektor b: Quellenströme, Vorzeichen entsprechend Maschenstrom, in Quellenspannung hinein = negativ

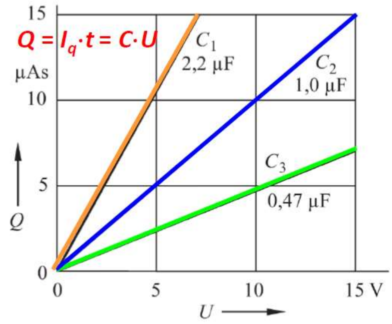
$I_1 = I_{M1} \quad I_2 = -I_{M1} - I_{M3} \quad I_3 = -I_{M1} + I_{M2} \quad I_4 = I_{M3} \quad I_5 = -I_{M2} - I_{M3} \quad I_6 = -I_{M2}$

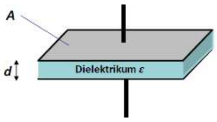
Methodenvergleich: Knotenpotentialanalyse ⇔ Maschenstromverfahren

Gegeben: Netzwerk mit k Knoten und z Zweigen und somit mit m=2z-(k-1)=z+1-k unabhängigen Maschen

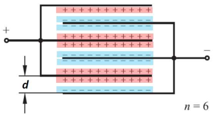
Knotenpotentialanalyse einfacher	Maschenstromverfahren einfacher
k -1< m	k -1> m
Ideale & reale **Strom**quellen Reale **Spannung**squellen	Ideale & reale **Spannung**quellen Reale **Strom**squellen

Kapazitive Eintore
Kapazität
Ein Kondensator hat die Kapazität 1 F, wenn er an 1 V Spannung die Ladung 1 C enthält.
$\boldsymbol{C}$=$\boldsymbol{Q/U}$ [**1 Farad=1F=1 As/V**]


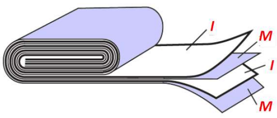
gespeicherter Ladungsmenge Q [1 As = 1 Coulomb]; anliegenden Spannung U [V]; Kapazität C[1 Farad = 1F]
Kennlinien kapazitiver Eintore
Ein kapazitives Eintor besitzt keine I-U-Kennlinie und es wird stattdessen die Funktion Q = f (U) angegeben.


Kapazitäten spezifischer geometrischer Anordnungen
Plattenkondensator


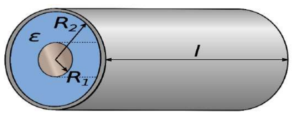
$C = \varepsilon \frac{A}{d} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d}$
ε Permittivität des Dielektrikum-Materials zwischen den Platten [$\boldsymbol{\varepsilon}$]=F/m
d Abstand der Platten
A Fläche der Platten
ε_0 Elektrische Feldkonstante = Permittivität des Vakuums $\varepsilon_0 \approx 8.8541878128 \cdot 10^{-12}\ F/m$
ε_r relative Permittivität (Dielektrizitäts- oder Permittivitätszahl) $\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$

Scheibenkondensator


$C = (n-1)\varepsilon \frac{A}{d} = (n-1)\varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d}$
n Anzahl Scheiben

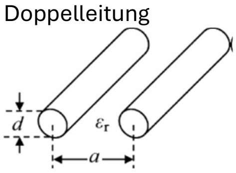
Wickelkondensator


Ein Wickelkondensator enthält zwei durch **Isolierstofffolien I** getrennte **Metallfolien M** der Fläche A, die aufgewickelt werden.
$C \approx 2\varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d}$

Zylinderkondensator


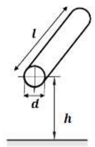
$C = \frac{2\pi \varepsilon_0 \varepsilon_r \cdot l}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}$

Doppelleitung



$$C = \frac{\pi \varepsilon_0 \varepsilon_r \cdot l}{\ln\left(\frac{2a}{d}\right)}$$

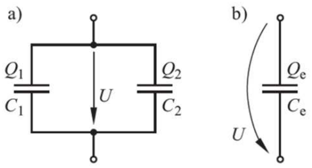
Einfachleitung



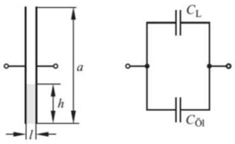
$$C = \frac{2\pi \varepsilon_0 \varepsilon_r \cdot l}{\ln\left(\frac{2h}{d}\right)}$$

Kondensatorschaltungen

Parallelschaltung

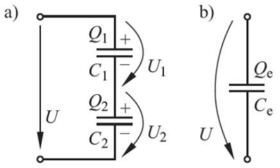


$$C_e = C_1 + C_2$$
$$Q_e = Q_1 + Q_2$$



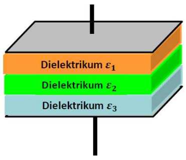
Plattenkondensator zu 1/3 in Öl getaucht

Serieschaltung

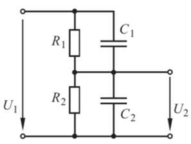


$$Q_e = Q_1 = Q_2$$
$$\frac{1}{C_e} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \Rightarrow C_e = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}}$$

$$Q_e = U \cdot C_e$$



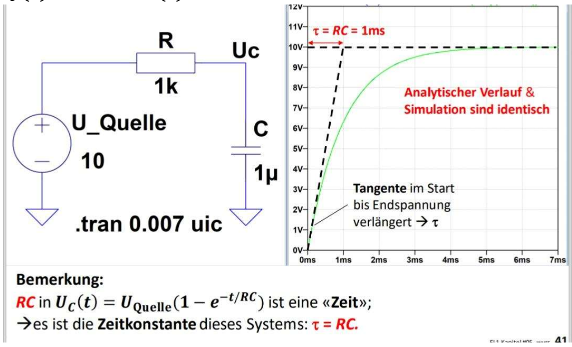
Kondensators aus verschiedenen Stoffen



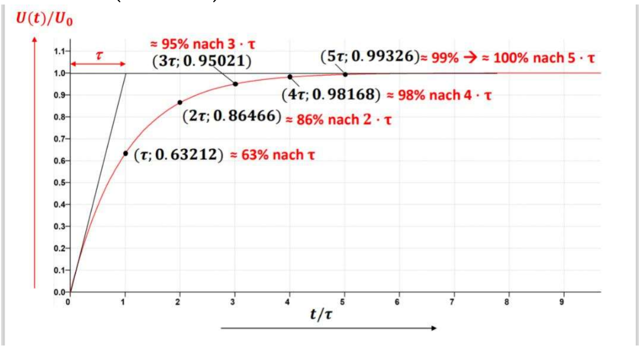
Ein kapazitiver Spannungsteiler ist eineSerieschaltung von Kondensatoren.
Am Kondensator mit der kleinsten Kapazität fällt dabei der grösste Teil der Gesamtspannung ab.

Laden des Kondensators

$Q(t) = C \cdot U\_c\ (t)$



$U(t) = U_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right) \quad Ladekurve$



$U(t) = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \quad Entladekurve$