

Physik II für Nebenfächler - SS 02

Kapitel 19

Ian C. Brock

27. August 2002 – 10:50

Inhaltsverzeichnis

19 Kondensatoren	1
19.1 Der Plattenkondensator	1
19.2 Der Zylinderkondensator	4
19.3 Dielektrika	4
19.4 Speicherung elektrischer Energie	7
19.5 Zusammenschaltung von Kondensatoren	8

19 Kondensatoren

In diesem Kapitel beschäftigen wir uns mit *Kondensatoren*. Sie sind elektrische Bauelemente, die zur Speicherung elektrischer Ladung dienen. Die Ladung befindet sich auf zwei einander gegenüberliegenden, leitfähigen Platten. Es gibt viele Anwendungen für Kondensatoren. In der Elektronik werden sie vor allem zur Glättung von Spannungen angewendet, sei es eine Gleichspannung konstant zu halten oder Wechselstrom in Gleichstrom umzuwandeln.

19.1 Der Plattenkondensator

Die einfachste Bauform für einen Kondensator ist der *Plattenkondensator*. Er besteht aus zwei großen, parallel zueinander angeordneten leitfähigen Platten. Schließt man die beiden Platten an eine Spannungsquelle, fließen so lange positive Ladungen auf die eine und negative Ladungen auf die andere Platte, bis die Potentialdifferenz zwischen den Platten gleich der angelegten Spannung ist. Die Ladung, die der Kondensator speichert, ist proportional zur angelegten Spannung. Sie ist auch von der Bauform des Kondensators abhängig. Die Ladung ist Q und die angelegte Spannung bzw. Potentialdifferenz ist U . Der Quotient Q/U heißt *Kapazität* C :

$$C = \frac{Q}{U}$$

Die Kapazität ist daher ein Maß dafür, wieviel Ladung bei vorgegebener Spannung im Kondensator gespeichert wird. Die SI-Einheit der Kapazität ist das *Farad* F, benannt nach dem englischen Experimentator Michael Faraday:

$$1 \text{ F} = 1 \text{ C V}^{-1}$$

Wie wir sehen werden, ist eine Kapazität von 1 F kaum realisierbar. Typische Kapazitäten liegen zwischen 1 pF und 1 mF.

⇒ *Experiment 308: Kondensator Abstand bzw. Fläche ändern*

Einige Eigenschaften können wir mit ein paar Experimenten demonstrieren. Wenn wir die Kondensatorfläche erhöhen, sinkt die Spannung bei konstanter Ladung. Vergrößern wir den Abstand zwischen den Platten bei konstanter Ladung sinkt die Spannung auch. Die Flächenabhängigkeit können wir auch sehen, wenn wir eine Rolle aus Aluminium auf oder abwickeln.

⇒ *Experiment 306: Aufgeladenes Rollo*

Die Ladung bringen wir mit einem Stab auf und sie bleibt konstant. Die Spannung wird niedriger, wenn die Fläche größer wird und umgekehrt. Mit Hilfe des elektrischen Feldes können wir die Kapazität eines Plattenkondensators berechnen. Bringen wir eine Ladung $+Q$ auf eine Platte und $-Q$ auf der anderen Platte. Wir berechnen das elektrische Feld.

⇒ *Transparency Ein Plattenkondensator (plattenkond.jpg)*

Durch Integration des Feldes von einer Platte bis zur anderen, bekommen wir die Potentialdifferenz zwischen den Platten. Der Kondensator besteht aus zwei Platten jeweils mit Fläche A und Abstand d . Der Abstand ist klein im Verhältnis zur Kantenlänge. Deshalb ist das elektrische Feld in guter Näherung homogen (wir vernachlässigen Randeffekte). Jeder der beiden Platten erzeugt ein Feld der Stärke $E = \sigma/\epsilon_0$. Da das Feld homogen ist, ist die Integration einfach:

$$U = - \int \vec{E} \cdot d\vec{l} = -(-E) \int dl = Es = \frac{\sigma}{\epsilon_0} s = \frac{Qs}{\epsilon_0 A}$$

Die Kapazität eines Plattenkondensators ist daher:

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{\epsilon_0 A}{s}$$

Aus dieser Gleichung sehen wir, dass die Einheiten für die elektrische Feldkonstante ε_0 F m^{-1} sind. Diese Einheit ist viel einfacher als die $\text{C}^2 \text{J}^{-1} \text{m}^{-1} = \text{N}^{-1} \text{m}^{-2}$, die ich im Kapitel 17 eingeführt habe.

Wir können die Kirchhoffsche Potentialwaage verwenden, um die Abhängigkeit mit der Entfernung nicht nur qualitativ sondern auch quantitativ zu demonstrieren.

⇒ *Experiment 313: Kirchhoffsche Potentialwaage*

Betrachten wir ein kleines Element auf einer Oberfläche. Die Ladung ist:

$$dq = \frac{Q}{A} dA$$

Das Gesamtfeld zwischen den Platten ist σ/ε_0 . Es wird zur Hälfte von jeder Ladung erzeugt. Damit ist das Feld, das auf das Ladungselement wirkt:

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$$

Die Kraft, die auf das kleine Ladungselement wirkt ist:

$$dF = dq E = \frac{-Q}{2A\varepsilon_0} \frac{Q}{A} dA$$

und die Gesamtkraft ist:

$$F = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{\varepsilon_0 A}$$

Mit $Q = (\varepsilon_0 A/s)U$ haben wir:

$$F = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_0 A}{s^2} U^2$$

Setzen wir die Zahlen ein bekommen wir:

$$F = \frac{1}{2} \frac{8,854 \times 10^{-12} \cdot 0,071}{0,02^2} (14,8 \times 10^3)^2 = 0,172 \text{ N}$$

in gute Übereinstimmung mit der Messung von 0,160 N.

Die Kapazität des Kondensators bei einem Abstand von 2 cm ist:

$$C = \frac{8,854 \times 10^{-12} \cdot 0,071}{0,02} = 31 \text{ pF}$$

Wenn man die Platten auf 10kV auflädt, fließt eine Ladung von:

$$Q = CU = 31 \times 10^{-12} \cdot 10 \times 10^3 = 310 \text{ nC}$$

von eine Platte zur anderen.

Die Proportionalität zwischen Kapazität, Fläche und Abstand gilt auch für andere Geometrien. Die Oberfläche einer Kugel ist proportional zum Radius quadrat. Der Abstand wächst mit Radius. Daher sollte die Kapazität proportional zum Radius sein:

⇒ *Experiment 305: Kapazität ist proportional zum Radius*

19.2 Der Zylinderkondensator

Ein Zylinderkondensator besteht aus einem leitfähigen Draht oder Zylinder mit Außenradius a und einem zweiten, konzentrischen Zylinder mit einem größeren Innenradius b . Antennenkabel (oder andere Koaxialkabel) sind Beispiele für diese Geometrie. Die Länge des Zylinderkondensators ist l . Die Ladung auf dem inneren Zylinder ist $+Q$ und $-Q$ auf dem äußeren.

Das Feld außerhalb eines zylindrischen Leiters ist:

$$E_r = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\lambda}{r} = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 l r}$$

Das Feld, das durch die Ladung $-Q$ auf dem äußeren Zylinder erzeugt wird, ist im Inneren dieses Zylinders gleich Null. Die Potentialdifferenz zwischen den Zylindern ist dann:

$$\varphi_b - \varphi_a = - \int_a^b E dr = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 l} \int_a^b \frac{1}{r} dr = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 l} \ln \frac{b}{a}$$

Damit ist die Kapazität:

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{2\pi\epsilon_0 l}{\ln \frac{b}{a}}$$

Als Beispiel nehmen wir ein Kabel, wo der Innenleiter einen Radius von 0,5 mm und die Abschirmung 1,5 mm hat. Wir berechnen die Kapazität pro Meter Kabellänge:

$$\frac{C}{l} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{b}{a}} = \frac{2\pi \cdot 8,85 \text{ pF m}^{-1}}{\ln(1,5/0,50)} = 50,6 \text{ pF m}^{-1}$$

19.3 Dielektrika

Was passiert, wenn wir zwischen die Platten eines Kondensators verschiedene Materialien einsetzen. Probieren wir es erstmal.

\Rightarrow *Experiment 380: Verschiedene Materialien zwischen Kondensatorplatten*

Da die Materialien die Platten nicht berühren, muss die Ladung konstant bleiben. Wir sehen aber, dass das Potential kleiner wird. Damit muss das elektrische Feld im Kondensator schwächer sein. Der Quotient Q/U wird größer und damit auch die Kapazität. Dieser Effekt wurde zuerst im 18. Jahrhundert von Michael Faraday entdeckt. Ein anderer Name für einen Isolator ist *Dielektrikum*. Der Faktor ϵ_r , um den sich die Kapazität erhöht, nennt man die *Dielektrizitätszahl*.

Woher kommt die Schwächung des elektrischen Feldes? Das Feld des Kondensators muss ein entgegengesetzt gerichtetes Feld im Dielektrikum hervorrufen. Besteht ein Dielektrikum aus polaren Molekülen – Moleküle mit einem permanenten Dipolmoment – so sind die Dipole normalerweise zufällig orientiert.

⇒ Transparency Elektrische Dipole mit und ohne äußeres Feld (dipol1.jpg)

Das äußere Feld übt auf die Dipole ein Drehmoment aus und sie richten sich parallel zu den Feldlinien aus (wie wir schon gesehen haben). Man nennt dies *Orientierungspolarisation*. In welchem Maße sich die Dipole ausrichten hängt von Feldstärke und Temperatur ab, da die thermische Bewegung die Orientierung aufzuheben versucht. Auch, wenn die Moleküle kein permanentes Dipolmoment aufweisen, wird ihnen durch das elektrische Feld ein Dipolmoment induziert. Die Schwerpunkte der positiven und negativen Ladungen in den Molekülen werden gegeneinander verschoben. Diese Art der Polarisation von Molekülen nennt man *Verschiebungspolarisation*. Verschiebungspolarisation tritt in allen Materialien auf. Das erzeugte Dipolmoment ist proportional zum äußeren Feld:

$$\vec{p} = \alpha \vec{E}$$

Die Proportionalitätskonstante α wird *Polarisierbarkeit* genannt.

⇒ Transparency Ausgerichtete elektrische Dipole (dipol2.jpg)

Wieso entsteht ein entgegen gerichtetes Feld. Im Inneren des Dielektrikums kompensieren sich alle induzierten Dipolmomente. An den Oberflächen klappt dies aber nicht. Dicht bei den Kondensatorplatten wird eine entgegengesetzte Ladung induziert. Das elektrische Feld wird dadurch geschwächt. Man kann dies in einem Bild veranschaulichen:

⇒ Transparency Elektrisches Feld in einem Kondensator mit und ohne Dielektrikum (dielektrikum1.jpg)

Wenn das Feld im Kondensator ohne Dielektrikum E_0 ist, so entsteht im Dielektrikum ein Feld der Stärke:

$$E = \frac{E_0}{\epsilon_r}$$

Für einen Plattenkondensator gilt dann für die Potentialdifferenz:

$$U = Es = \frac{E_0 s}{\epsilon_r} = \frac{U_0}{\epsilon_r}$$

Die Kapazität im Dielektrikum ist damit:

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{Q}{U_0/\epsilon_r} = \epsilon_r \frac{Q}{U_0}$$

oder

$$\boxed{C = \epsilon_r C_0}$$

wobei $C_0 = Q/U_0$ die Kapazität ohne Dielektrikum ist.

Wenn die Platte des Kondensators eine Fläche A hat, ist die Kapazität mit Dielektrikum:

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{s} = \frac{\epsilon A}{s}$$

Die Größe

$$\boxed{\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0}$$

wird *Dielektrizitätskonstante* oder *Permittivität* der Materie genannt.

Man lädt zwei kleine Kugeln auf, bis ihre Spannung kurz vor dem dielektrischen Durchschlag sind.

⇒ *Experiment 382: Erhöhung der Feldstärke durch Dielektrikum*

Bringt man jetzt ein Dielektrikum langsam dazwischen, wird das elektrische Feld im Dielektrikum schwächer. Am Rand des Dielektrikums laufen die Feldlinien enger zusammen und das Feld da wird stärker. Es kann dann stark genug sein, um einen Durchschlag zu erzeugen, wenn wir das Dielektrikum einschieben oder wenn wir es wieder herausziehen.

Man muss etwas aufpassen. Die Ladungsdichten, die an den Endflächen des Dielektrikums entstehen, sind nicht freie Ladungen, wie wir aus Leitern kennen. Man kann sie nicht aus dem Dielektrikum entfernen.

Die Ladung auf der Oberfläche kann aber eine Weile bleiben, da das Dielektrikum ein Isolator ist. Wir betrachten eine so genannte Leydener Flasche. Sie wurde im 18. Jahrhundert in Leyden (Niederlande) entwickelt, als man versuchte elektrische Ladung zu speichern.

⇒ *Experiment 381: Leydener Flasche zerlegen*

Man lädt die Flasche auf und dann zerlegt man sie in Teile. Alle Teile können auf eine geerdete leitende Platte gelegt werden. Baut man die Flasche wieder zusammen stellt man fest, dass Spannung wieder zwischen zwischen den Leitern existiert. Offensichtlich behält die Glasflasche die Ladungen auf der Oberfläche.

Man kann ein Plattenkondensator mit einem Dielektrikum als 4 Ladungsoberflächen betrachten.

⇒ *Transparency Ein Plattenkondensator mit Dielektrikum (kondensator.fig)*

Man berechnet die Feldstärke der leitenden Platten und das induzierte Feld aus den Oberflächenladungsdichten. Die Ladungsdichte der gebundenen Ladungen ist:

$$\sigma_g = \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r} \sigma_f$$

Eine zusätzliche Größe, die man häufig in Tabellen findet, ist die *dielektrische Suszeptibilität* von Materialien. Sie ist definiert als:

$$\chi_e = \varepsilon_r - 1$$

Damit gilt auch:

$$\sigma_g = \frac{\chi_e}{\chi_e + 1} \sigma_f$$

In Vakuum ist $\chi_e = 0$.

Ich habe bis jetzt angenommen, dass die elektrische Ladung auf den Platten konstant bleibt. Das ist aber nur der Fall, wenn der Kondensator nach dem Aufladen von der Spannungsquelle entfernt wird. Bleibt die Spannungsquelle angeschlossen, liefert sie Ladungen so lange nach, bis die Schwächung der Feldstärke durch das Dielektrikum kompensiert ist und sich die ursprüngliche Potentialdifferenz wieder eingestellt hat. Die Gesamtladung auf den Platten beträgt dann $Q = \varepsilon_r Q_0$. Damit erhöht sich die Kapazität auch um den Faktor ε_r .

Wird ein Dielektrikum mit $\varepsilon_r = 2$ zwischen den Platten des Kirchhoffschen Potentialwaage geschoben, wird die Kapazität von 31 auf 62 pF erhöht.

Das Dielektrikum hat auch weitere Funktionen beim Bau von realistischen Kondensatoren. Es ist nicht nötig, ein Kondensator wirklich als Ebene zu bauen. Man kann als Leiter eine Folie und als Dielektrikum ein Papier nehmen. Statt sie als Ebene zu lassen, wickelt man sie auf. Das Dielektrikum dient dann als mechanischer Abstandhalter. Es erhöht auch die Durchschlagsfestigkeit eines Kondensators. Die Zahlen für einige Materialien sind in einer Tabelle zusammengefasst:

⇒ *Transparency Dielektrizitätszahlen und Durchschlagfestigkeit (permittivitaet.tex)*

Wir können überlegen, wie lang ein Kondensator aus Folie und Papier sein muss, um eine Kapazität von 1 nF zu erreichen, wenn die Folie rechteckig ist und eine Höhe von 1 cm hat. Das Papier hat eine Dicke von 0,1 mm.

$$C = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 h l}{s}$$

$$l = \frac{1 \times 10^{-9} \cdot 0,1 \times 10^{-3}}{3,7 \cdot 8,854 \times 10^{-12} \cdot 0,01} = 0,03 \text{ m}$$

Man sieht damit, dass Kondensatoren sehr schnell groß werden, wenn man Kapazitäten in der Gegend von 1 μF erreichen will.

19.4 Speicherung elektrischer Energie

Verbinden wir die beiden Platten eines Kondensators, so verteilen sich die Ladungen auf beiden Platten gleichmäßig, bis die Platten auf gleichem Potential liegen. In diesem Fall ist die potentielle Energie des Systems minimal (Null). Die Energie, die dabei frei wird, wird zum größten Teil in Wärme konvertiert.

Beim Aufladen eines Kondensators wird eine Potentialdifferenz aufgebaut, oder falls eine Potentialdifferenz so besteht, wird sie erhöht. Im Bild des Ladungsflusses fließen positive Ladungen von einer Platte (die negative) auf die andere. Hierbei muss Energie zugeführt werden. Für den Fluss einer kleinen Ladung dq bei der Potentialdifferenz U die Energie $U dq$. Die Energie wird in Form von elektrostatischer potentieller Energie im System gespeichert. Am Ende des Vorgangs ist die Ladung Q transportiert und es hat sich eine Potentialdifferenz $U = Q/C$ aufgebaut.

Betrachten wir den Ladevorgang zu einem beliebigen Zeitpunkt, wo die Potentialdifferenz $U = q/C$ ist. Wenn wir jetzt eine infinitesimale Ladung dq dazuführen, erhöht sich die potentielle Energie um

$$W = U dq = \frac{q}{C} dq$$

Wir integrieren um den Gesamtbetrag an potentieller Energie zu berechnen, von einer Ladung $q = 0$ bis $q = Q$:

$$W = \int dW = \int_0^Q \frac{q}{C} dq = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}$$

Setzen wir $C = Q/U$ bekommen wir folgende nützliche Gleichungen:

$$W = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} QU = \frac{1}{2} CU^2$$

Beim Aufladen eines Kondensators wird zwischen den Platten ein elektrisches Feld aufgebaut. Die Arbeit, die zum Laden des Kondensators nötig ist, wird im elektrischen Feld gespeichert. Man spricht von *elektrostatischer Energie* des Feldes. Betrachten wir einen Plattenkondensator, der mit Dielektrikum gefüllt ist. Das elektrische Feld ist:

$$E = \frac{E_0}{\varepsilon_r} = \frac{\sigma}{\varepsilon_r \varepsilon_0} = \frac{Q}{\varepsilon A}$$

Ersetzen wir die Ladung und das Potential als Funktion des Feldes in der Gleichung für die potentielle Energie, bekommen wir:

$$\begin{aligned} W &= \frac{1}{2} QU = \frac{1}{2} (\varepsilon AE)(Es) \\ &= \frac{1}{2} \varepsilon E^2 (As) \end{aligned}$$

Das Volumen des Kondensators ist As . Die *Energiedichte* im Feld ist damit:

$$w_{\text{el}} = \frac{\text{Energie}}{\text{Volumen}} = \frac{1}{2} \varepsilon E^2$$

Die Energiedichte im elektrischen Feld ist also proportional zum Quadrat der Feldstärke. Obwohl ich das Ergebnis für einen Plattenkondensator hergeleitet habe, gilt es für jedes beliebige elektrische Feld.

19.5 Zusammenschaltung von Kondensatoren

Kondensatoren werden häufig miteinander geschaltet. Wir betrachten eine *Parallelschaltung* und eine *Reihenschaltung*.

⇒ Transparency Zwei parallelgeschaltete Kondensatoren (*parallel.fig*)

Die Punkte a und b sind mit einer Spannungsquelle verbunden, die die Spannung $U = \varphi_b - \varphi_a$ konstant hält. Wir sehen, dass bei dieser Art der Zusammenschaltung die Flächen und damit die Kapazitäten addieren. Die Kapazitäten der Kondensatoren sind C_1 und C_2 . Die Ladungen auf den Platten sind dann:

$$\begin{aligned} Q_1 &= C_1 U \\ Q_2 &= C_2 U \end{aligned}$$

Die gespeicherte Gesamtladung ist damit:

$$Q = Q_1 + Q_2 = C_1 U + C_2 U = (C_1 + C_2) U$$

Wir nennen die *Ersatzkapazität* die Kapazität eines einzelnen Kondensators, der die Kombination mehrere Kondensatoren eines Schaltkreises ersetzt und bei gegebener Potentialdifferenz dieselbe Ladung speichern kann. Die Ersatzkapazität für zwei parallelgeschaltete Kondensatoren ist gegeben durch:

$$C_{\text{ers}} = \frac{Q}{U} = C_1 + C_2$$

Wir können dieses Verhalten verallgemeinern und zeigen, dass die Kapazität einer Parallelschaltung von Kapazitäten gleich der Summe der einzelnen Kapazitäten ist:

$$\boxed{C_{\text{ers}} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots}$$

Bei einer Reihenschaltung muss man anders rechnen. Betrachten wir das Bild:

⇒ *Transparency Zwei Kondensatoren geschaltet in Reihe (series.fig)*

Die Punkte a und b sind wieder mit einer Spannungsquelle verbunden. Die Potentialdifferenz ist wieder $U = \varphi_b - \varphi_a$. Eine Ladung $+Q$ befindet sich auf der oberen Platte des Kondensators C_1 . Das Potential der Platte ist φ_a . Sie induziert auf der gegenüberliegenden unteren Platte eine Ladung $-Q$. Die Ladung rührt von Elektronen her, die von der oberen Platte des Kondensators C_2 abgefließen sind. Diese Platte hat daher die Ladung $+Q$. Das Potential der beiden Platten ist φ_c . Auf der unteren Platte wird schließlich wieder eine Ladung $-Q$ induziert. Das Potential ist φ_b .

Für die Spannung am ersten Kondensator gilt:

$$U_1 = \varphi_a - \varphi_c = \frac{Q}{C_1}$$

Für den zweiten Kondensator gilt:

$$U_2 = \varphi_c - \varphi_b = \frac{Q}{C_2}$$

Die Summe dieser beiden Spannung ist die Gesamtspannung:

$$\begin{aligned} U = \varphi_a - \varphi_b &= (\varphi_a - \varphi_c) + (\varphi_c - \varphi_b) \\ &= U_1 + U_2 = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} \\ U &= Q \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) \end{aligned}$$

Die Ersatzkapazität ist definiert durch:

$$C_{\text{ers}} = \frac{Q}{U}$$

Vergleichen wir die beiden Gleichungen gilt:

$$\frac{1}{C_{\text{ers}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

Wir können das Ergebnis wieder verallgemeinern, für den Fall, dass wir mehrere Kondensatoren in Serie schalten:

$$\boxed{\frac{1}{C_{\text{ers}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots}$$

Also bei einer Serienschaltung von Kondensatoren wird die Gesamtkapazität erniedrigt und nicht erhöht.

Wir können diese Effekte auch demonstrieren mit einem Versuch.

⇒ *Experiment 309: Parallel und Serienschaltung von Kondensatoren*

Ein Beispiel werde ich durchrechnen. Wir werden weitere Gelegenheiten mit Widerständen haben und Sie können selber einige Schaltungen aufstellen und ausrechnen.

Betrachten wir zwei parallelgeschaltete Kondensatoren mit einem dritten in Reihe geschaltet.

*End of
Lecture
17*

⇒ *Transparency Eine Schaltung mit Kondensatoren (circuit.fig)*

Die Ersatzkapazität der beiden parallelgeschaltete Kondensatoren ist:

$$C_{\text{ers},1} = C_1 + C_2 = (2 + 3) \text{ nF} = 5 \text{ nF}$$

Wir können jetzt die Schaltung als eine Reihenschaltung von einem Kondensator mit Kapazität 5 nF und einem zweitem mit 4 nF.

Damit ist die Kapazität:

$$\frac{1}{C_{\text{ers}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{1}{5 \text{ nF}} + \frac{1}{4 \text{ nF}} = \frac{9}{20 \text{ nF}}$$

Die Ersatzkapazität der gesamten Schaltung ist daher:

$$C_{\text{ers}} = \frac{20 \text{ nF}}{9} = 2,22 \text{ nF}$$

Eine nette Kombination aus Parallel- und Serienschaltung zeigt der Stoßfunkengenerator.

⇒ *Experiment 310: Stoßfunkengenerator*

Man lädt 4 Kondensatoren parallel auf. Mit der Ladung steigt auch die Spannung. Irgendwann kommt es zu einem elektrischen Durchschlag. Der Generator ist jetzt so geschaltet, dass die 4 Kondensatoren in Reihe sind. Das Potential am Ende ist damit um einen Faktor vier höher und wir bekommen einen weiteren Durchschlag bei einem deutlich größeren Abstand.