

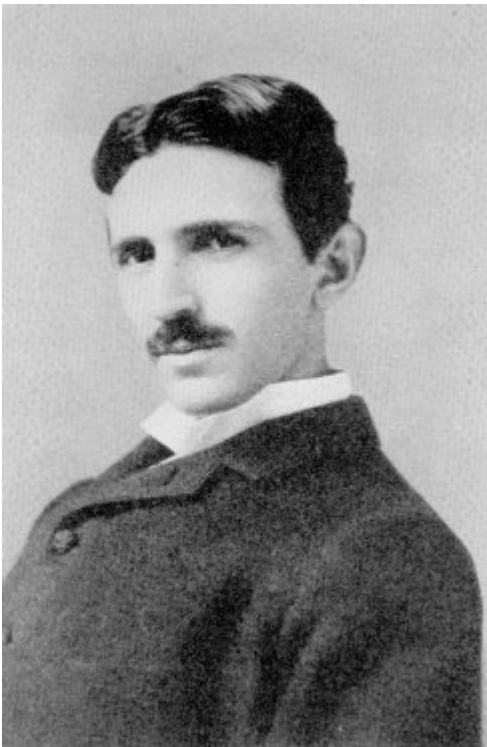
Stefan Binder

# Der Tesla-Generator in Theorie und Praxis

## 1. Einleitung

Schon in der Antike wirkten Blitze auf den Menschen sowohl furchteinflößend als auch faszinierend. Nicht umsonst besitzen die mächtigsten Götter der Mythologie die Macht über Blitz und Donner. Daher wirkt der Wunsch, Blitze selbst zu erzeugen, nicht verwunderlich. Ein Tesla-Generator gibt seinem Benutzer die Möglichkeit - quasi im Wohnzimmer - gewaltige Blitzgewitter zu erzeugen - auf relativ ungefährliche Weise.

### 1.1. Nikola Teslas Biographie



"Frag' einen Schüler: "Wer hat das Radio erfunden?" Wenn du überhaupt eine Antwort bekommst, wird sie "Marconi" lauten. Eine Antwort, mit der alle Enzyklopädien und Lehrbücher übereinstimmen. Oder frag' jemanden: "Wer hat das Zeug erfunden, das den Toaster, die Stereoanlage, die Straßenbeleuchtung, Fabriken und Büros zum Funktionieren bringt?" Die Antwort wird "Thomas Edison" lauten, oder? Beide Male falsch. Die korrekte Antwort ist Nikola Tesla, eine Person, von der du wahrscheinlich auch noch nie gehört hast. Aber es kommt noch mehr: Es scheint, als hätte er die Röntgenstrahlung ein Jahr vor Wilhelm Röntgen entdeckt, er hat einen Röhrenverstärker gebaut, Jahre vor Lee de Forest, er setzte in seinem Labor Leuchtstoffröhren ein, 40 Jahre, bevor sie die Industrie "erfunden" hat, und er demonstrierte die Prinzipien von Mikrowellenherden und RADAR, Jahrzehnte, bevor sie ein fester Bestandteil unserer Gesellschaft wurden. Trotzdem verbindet man seinen Namen mit keinem von diesen. [...] Eine andere Erfindung Teslas, die jeder kennt, der jemals ein Auto besaß, wurde 1898 unter dem Namen "electrical ignitor for gas engines" patentiert, besser bekannt als die Zündanlage eines Autos. Ihre

Hauptkomponente, die Zündspule, wurde seit ihrer Einführung praktisch nicht verändert. Nikola Tesla plante und baute auch Prototypen einer einzigartigen Rotationsverbrennungsmaschine, die auf

einem seiner früheren Designs einer Rotationspumpe basierte."

[Zitat aus [I]/Übersetzung aus dem Englischen]

"Der kroatisch-amerikanische Elektrotechniker und Erfinder Nikola Tesla, geboren am 9. Juli 1856, gestorben am 7. Januar 1943, machte den Wechselstrom praktisch nutzbar. Nach dem er 1884 in die USA emigriert war, arbeitete er kurzzeitig für Thomas Edison. 1888 demonstrierte er, wie ein magnetisches Feld zur Rotation gebracht werden konnte, wenn zwei im richtigen Winkel zueinander angeordnete Spulen mit zwei um 90° phasenverschobenen Wechselströmen versorgt wurden. Tesla ließ sich diesen Wechselstrommotor patentieren, der von Georg Westinghouse gekauft wurde, und die Basis für das Westinghouse Energieversorgungssystem bildete. Nach 1903 leistete Tesla beachtenswerte Forschungsarbeit, die Hochspannung, Transformatoren, Telefon- und Telegraphensysteme, sowie drahtlose Energieübertragung umfaßte."

[Zitat aus [II]/Übersetzung aus dem Englischen]

Trotz all dieser Erfindungen, die aus unserer heutigen Gesellschaft kaum mehr wegzudenken sind, ist Teslas berühmteste Erfindung der nach ihm benannte Tesla-Generator. Mit einem dieser Apparaturen stellte er 1899 in Colorado Springs einen Rekord für künstlich erzeugte Blitze auf: Indem er die gesamte Erde als Energiespeicher benutzte, erzeugte er Entladungen von 42m Länge (dabei wurde jedoch ein Generator des Kraftwerks, das den Tesla-Generator mit Strom versorgte, überlastet und in Brand gesetzt, deshalb mußte das Experiment vorzeitig abgebrochen werden).

[Sinngemäß nach [XI]]

## **2. Funktionsweise des Tesla-Generators**

### **2.1. Grundlegender Aufbau und Funktionsweise eines Tesla-Generators**

Ein Tesla-Generator ist ein impulsbetriebener Transformator mit Luftkern im Resonanzmodus. Der Primärkreis wird gebildet aus einem Kondensator, einer Primärspule und einer Funkenstrecke. Mit Hilfe einer Hochspannungsversorgung wird der Kondensator, der mit der Spule in Reihe geschaltet ist, geladen. Wenn die Überschlagspannung der Funkenstrecke, die parallel zu Kondensator und Spule liegt, erreicht ist, zündet diese und bildet ein niederohmiges Plasma – der Schwingkreis ist geschlossen und schwingt mit seiner Resonanzfrequenz. Der Sekundärkreis besteht aus einer länglichen Luftspule, deren unteres Ende geerdet ist, und deren oberes Ende mit einem Entladungsterminal, einer metallischen Kugel oder einem Torus abgeschlossen ist. Diese Sekundärspule wird auch als Tesla-Spule bezeichnet. Die Induktivität der Tesla-Spule erzeugt in Verbindung der Kapazität, die durch die benachbarten Windungen und dem Entladungsterminal gebildet wird, ebenfalls einen Schwingkreis, der dieselbe Resonanzfrequenz wie der Primärkreis besitzt. Die Primärspule gibt nun die Energie des Schwingkreises an die in ihrer Mitte stehenden Sekundärspule weiter, wo Spannungen von bis zu mehreren Millionen Volt entstehen, die zu spektakulären elektrischen Entladungen führen.

Alternativ zu dem in Abb. 2 gezeigten Design ist auch eine Schaltung wie in Abb. 3 möglich, diese wirkt sich zwar nicht auf die Leistung des Tesla-Generators aus, jedoch gelangen wesentlich mehr Hochfrequenzschwingungen in die Hochspannungsversorgung.

[VIII]

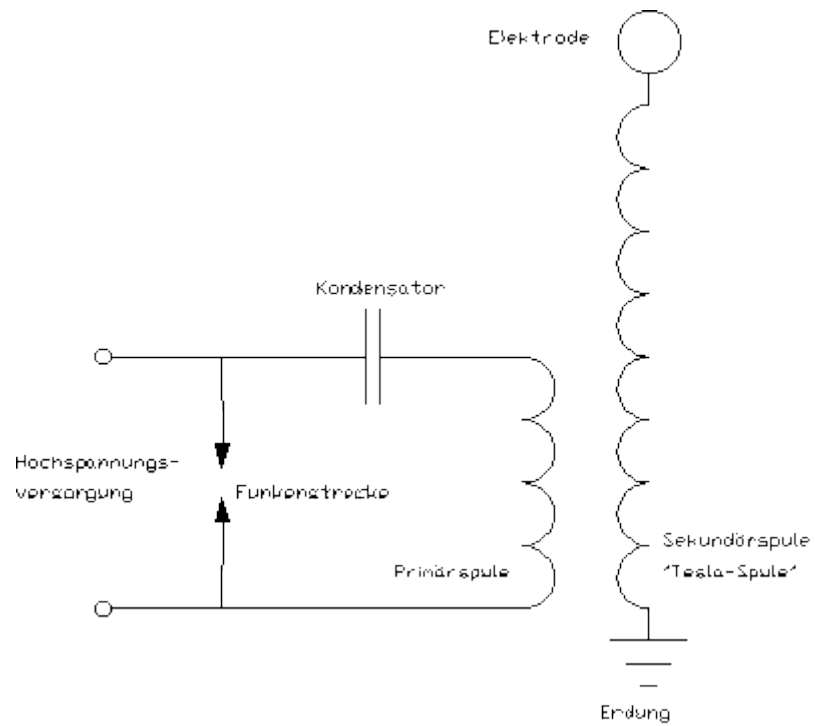


Abb. 2: Schaltplan eines Tesla-Generators

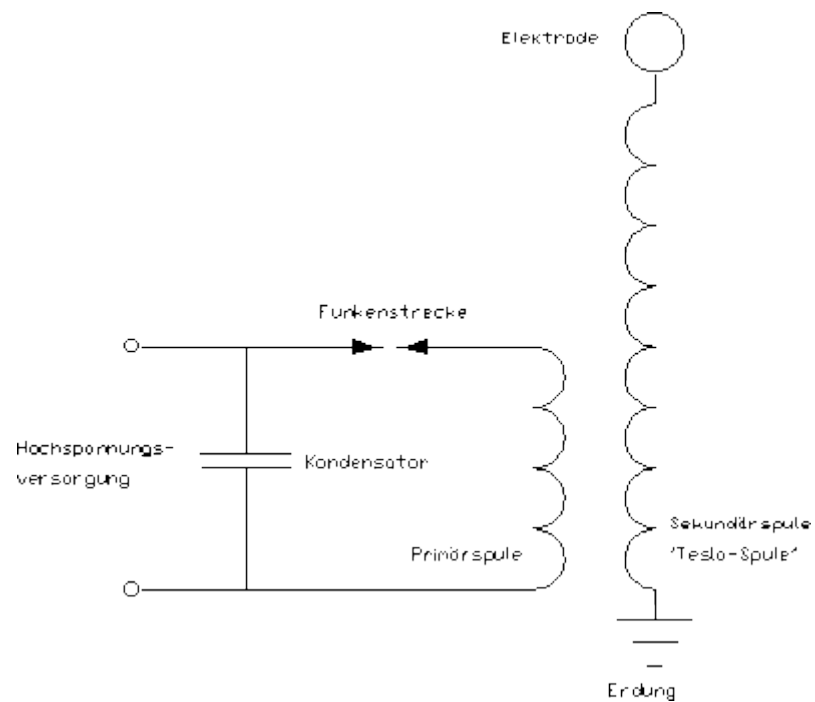


Abb. 3: Alternativer Schaltplan

## 2.2. Theorie der elektrischen Entladung

Um die Entladung eines Tesla-Generators besser verstehen zu können, soll zunächst das Entstehen eines natürlichen Blitzes betrachtet werden.

### 2.2.1. Natürlicher Blitz



Wenn eine Gewitterwolke eine genügend hohe, meist negative Ladung akkumuliert hat, entsteht an ihrem unteren Ende bei einer Feldstärke von 3-4 kV/cm eine Koronaentladung. Die negativen Ionen bilden einen schmalen, leitfähigen Kanal, an dessen Spitze eine hohe Feldstärke herrscht, wodurch sich die Ionisation fortsetzt. Die Plasmadichte in diesem sogenannten Stepped Leader ist relativ gering, so daß nur wenige Atome zur Aussendung von Licht angeregt werden, deshalb ist er mit dem bloßen Auge nicht erkennbar. Während einer Zeit von mehreren ms wandert der Stepped Leader einige Meter, und verweilt dann für etwa 50ms, pflanzt sich dann weiter fort, usw.

Während der Stepped Leader wächst, bildet er bevorzugt an Verunreinigungen in der Luft (Staub,...) Knicken, wodurch das typische Aussehen eines Blitzes bestimmt wird. Da an diesen Knicken hohe Feldstärken herrschen, bilden sich dort eventuell weitere Stepped Leader, also Verzweigungen, wie sie bei vielen Blitzen beobachtet werden können. Nähert sich dieser stark negativ geladene Stepped Leader dem Erdboden, entstehen hier durch Influenz positiv geladene Stepped Leader, die dem negativen entgegenstreben. Treffen nun zwei dieser "Vorblitze" aufeinander, so ist der Kontakt

zwischen Wolke und Erde geschlossen, eine gewaltige Energiemenge entlädt sich durch den Plasmakanal. Durch die hohe Plasmadichte werden viele Atome zum Leuchten angeregt, der Blitz wird sichtbar. In Verzweigungen des Stepped Leaders, die nicht die Erde erreicht haben, findet wegen ihrer Kapazität eine Ladungsverschiebung statt, deshalb sind diese ebenfalls sichtbar - wenn auch deutlich schwächer als der eigentliche Blitz.

[Sinngemäß nach [III] und [IV]]

*Abb.4: Natürlicher Blitz*

### 2.2.2. Entladung eines Tesla-Generators

Ähnlich wie natürliche Blitze weisen die von Tesla-Generatoren erzeugten Entladungen ein dendritenartiges Aussehen auf, jedoch "hängen" diese in der Luft und benötigen keine geerdete Elektrode. Wie kommt es zu dieser merkwürdigen Erscheinung, die als Streamer bezeichnet wird? Im günstigsten Fall wird die gesamte Energie, die anfangs im Primärkondensator gespeichert ist, in die Tesla-Spule übertragen. Da für die in einem Kondensator gespeicherte Energie gilt:

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

ist wegen der Energieerhaltung

$$U_{prim}^2 \cdot C_{prim} = U_{sec}^2 \cdot C_{sec}$$

$$\Rightarrow U_{sec}^2 = \frac{U_{prim}^2 \cdot C_{prim}}{C_{sec}}$$

Da die Sekundärkapazität wesentlich geringer ist als die Primärkapazität, entsteht in der Tesla-Spule eine sehr hohe Spannung, die jedoch bei der Durchbruchspannung von Luft (10-30kV/cm) zu gering wäre um die für Tesla-Generatoren typischen, extrem langen Streamer zu erzeugen<sup>1</sup>.

Die Entladung eines Tesla-Generators muß also einem anderen Muster folgen als ein natürlicher Blitz. In der Praxis hat sich gezeigt, daß nicht nur die Primärspannung und –kapazität (also die im Primärkondensator gespeicherte Energiemenge) für die Blitzlänge verantwortlich sind, sondern auch die Entladungsfrequenz des Primärkondensators. Die Blitzlänge ist also abhängig von Energiemenge x Entladungsfrequenz, also von der zugeführten Leistung.

Daraus wurde eine Theorie entwickelt: Nach der Entladung des Primärkondensators entsteht im Primärkreis eine gedämpfte Schwingung, die Energie in die Sekundärspule überträgt, wo sich die Amplitude der Schwingung aufschaukelt. Wenn diese Amplitude hoch genug ist, entsteht an einer Stelle des Entladungsterminals eine Koronaentladung, die sich ähnlich einem Stepped Leader fortpflanzt. Da der Tesla-Generator, im Gegensatz zu einer Gewitterwolke, eine Wechselspannung mit einer Frequenz von einigen hundert kHz erzeugt, fließt in dem Streamer, der eine gewisse Kapazität besitzt, ständig ein Strom, wodurch die Plasmadichte erhöht wird, und eine sichtbare Entladung entsteht. Durch eine einzige, gedämpfte Schwingung im Tesla-Generator ist nun ein relativ kleiner Streamer entstanden, der bei der nächsten Kondensatorentladung wieder mit Energie versorgt wird, und weiterwachsen kann. Dieses Wachstum endet, wenn sich zugeführte Energie und Verluste ausgleichen. Verluste entstehen dadurch, daß zwischen zwei Kondensatorentladungen relativ viel Zeit vergeht, in der die Ionen des Plasmas wieder neutral werden. Wenn die Zündfrequenz der Funkenstrecke zu gering ist, wird das gesamte Plasma nach jeder Entladung wieder neutral, es entstehen nur sehr kurze Streamer.

[VIII]

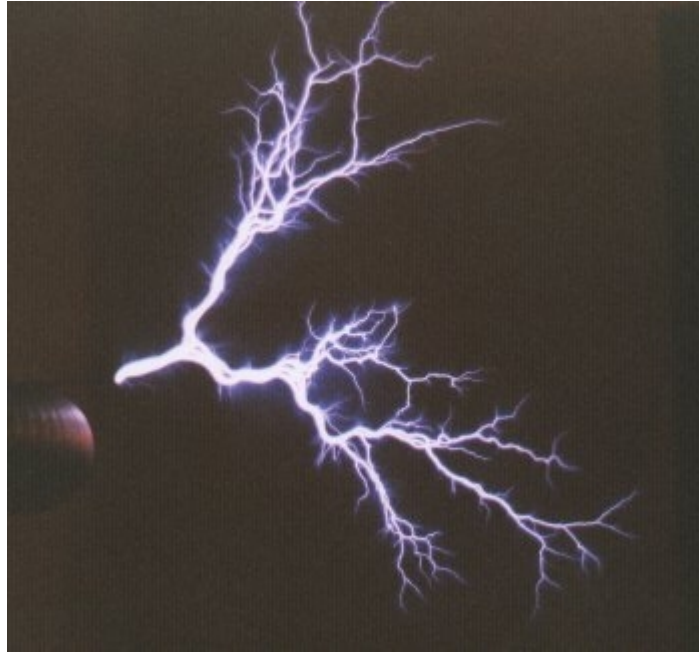


Abb. 5: Etwa 55cm lange, dentritenartig verzweigte Streamer

### **3. Komponenten eines Tesla-Generators**

#### **3.1. Die Hochspannungsversorgung**

Die Streamerlänge eines Tesla-Generators hängt hauptsächlich von der Ausgangsleistung der Hochspannungsversorgung ab. Diese sollte mindestens eine Spannung von 5 kV und einen Strom von 20 mA (100 W) liefern. Spannungen von bis zu 15kV und Leistungen von 5 kW und mehr sind jedoch keine Seltenheit. Als Hochspannungsquellen werden meist Hochspannungstransformatoren für Neonreklame (NSTs) verwendet. Eine weitere Möglichkeit sind Zündtransformatoren aus Ölheizungen (OBITs), die jedoch im Allgemeinen nur 3 Minuten ununterbrochen betrieben werden dürfen, und 50% ED besitzen. Für kleine Tesla-Generatoren eignen sich auch Kfz-Zündspulen oder Zeilentrafos aus Fernsehern. Für große Tesla-Generatoren werden in Amerika Einphasen-Umspanntransformatoren mit einer Leistung zwischen 1kW und 10kW verwendet, die jedoch im deutschen Drehstromnetz nicht gebräuchlich sind. [VIII]

#### **3.2. Der Kondensator**

Kondensatoren in Tesla-Generatoren haben – je nach Ausgangsleistung der Hochspannungsversorgung und Resonanzfrequenz der Tesla-Spule – eine Kapazität von 1 nF bis etwa 100 nF. Wegen der hohen Spitzenspannung im Resonanzkreis und der hohen Frequenz sollte der Kondensator eine Spannungsfestigkeit von einem Vierfachen der Eingangsspannung aufweisen, außerdem muß der Kondensator gut gegen Koronaentladungen, die durch die hohe Frequenz auftreten, isoliert sein, da sonst das Dielektrikum Schaden nehmen kann, wodurch der Kondensator zerstört wird. In vielen Tesla-Generatoren wird die Kapazität des Kondensators so auf die sekundärseitige Induktivität des Hochspannungstransformators abgestimmt, daß beide bei Netzfrequenz dieselbe Reaktanz besitzen. So wird eine sog. Resonanzladung erreicht, wodurch eine maximale Leistungszufuhr erreicht wird. Weil Kondensatoren mit diesen Anforderungen entweder gar nicht oder nur zu sehr hohen Preisen käuflich zu erwerben sind, bauen die meisten Tesla-Enthusiasten ihre Kondensatoren selbst. Dabei werden zwei Typen bevorzugt: Erstens ölgetränkte Wickel- oder Schichtkondensatoren mit Polyäthylen als Dielektrikum und Belägen aus Aluminiumfolie, zweitens sogenannte Salzwasserkondensatoren, dabei handelt es sich um salzwassergefüllte Glasflaschen, die in ebenfalls salzwassergefüllten Bottichen stehen. Die Salzlösungen in den einzelnen Flaschen werden dabei mit Drähten verbunden und bilden die erste Platte, die Glasflaschen bilden das Dielektrikum und das Salzwasser im Bottich die zweite Platte.

Wegen der hohen Spannungen ist der Ohm'sche Widerstand der Salzlösung zu vernachlässigen.

Salzwasserkondensatoren wurden schon von Nikola Tesla selbst verwendet. Vergleicht man die elektrischen Eigenschaften von Glas und Polyäthylen, so zeigt sich, daß Polyäthylen einen sehr viel geringeren dielektrischen Verlustfaktor besitzt und Durchschlagsspannung und Dielektrizitätszahl wesentlich berechenbarer sind. Des Weiteren ist Glas schwer und zerbrechlich, außerdem benötigen Salzwasserkondensatoren sehr viel Platz und sind umständlich zu transportieren.

Trotz dieser negativen Eigenschaften sind Salzwasserkondensatoren billig und einfach herzustellen, was sie für den Einsatz in Tesla-Generatoren attraktiv macht.

[VIII]

Stoff	Dielektr. Verlust-Faktor		Durch-Schlags-Festigkeit $E_d$ kV/mm	Dielektrizitäts-konstante $\epsilon_r$		Dichte g/cm <sup>3</sup>
	$10^{-3} \tan d$ bei $f=$			50 Hz	1 MHz	
	50 Hz	1 MHz		50 Hz	1 MHz	
Glas	5	8	20...50	3...14	6...16	2,5
Polyäthylen	0,2	0,2	50	2,3	2,2	0,92

Tab. 1: Elektrische Eigenschaften von Glas und Polyäthylen [Entnommen aus [VII] Tabelle 3.10]

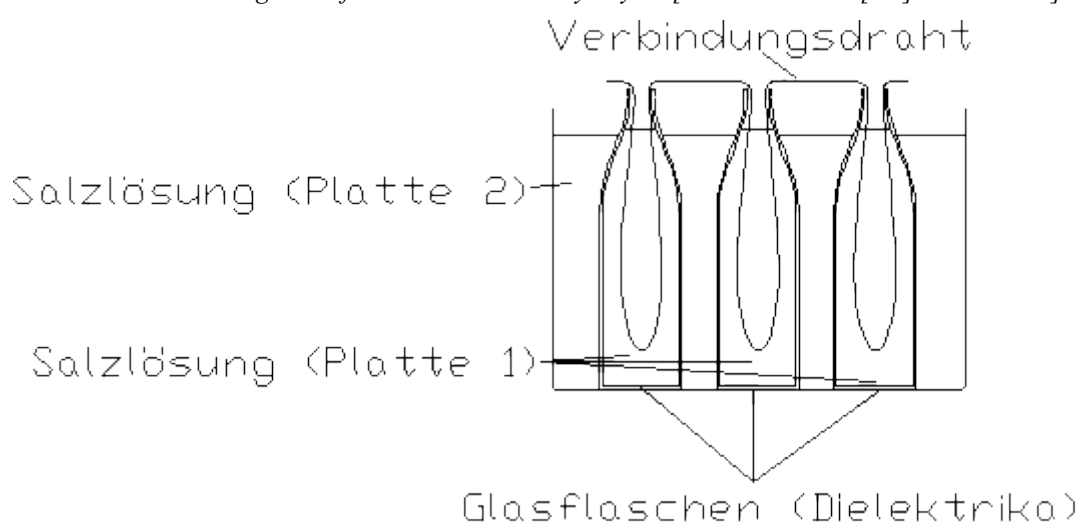


Abb. 6: Salzwasserkondensatoren

### 3.3. Die Primärspule

Die Primärspule eines Tesla-Generators ist eine Luftspule in Form einer flachen Spirale, einer vertikal steigenden Helix oder einer Mischung aus beiden, einem umgedrehten Kegelstumpf. Die vertikal steigende Helix besitzt das ungünstigste elektromagnetische Feld, da nur der untere Teil der Tesla-Spule erregt wird, besser ist die Spiralform. Am besten jedoch ist die Form des umgedrehten Kegelstumpfes bei einem Steigungswinkel von etwa 30°. Die einzelnen Windungen haben einen Abstand von etwa einem Zentimeter, um ein räumlich ausgedehntes Magnetfeld zu erzeugen, das die gesamte Sekundärspule erregt. Da bei den hohen Frequenzen im Resonanzkreis der Skineneffekt einsetzt und die Eindringtiefe des Stromes in den Leiter nur Bruchteile eines Millimeters beträgt, eignet für die Primärspule ein Kupferrohr am besten. Die Primärspule befindet sich am unteren Ende der Tesla-Spule, das geerdet ist, würde die Primärspule zu hoch montiert, käme es zu

Überschlägen zwischen Tesla-Spule und Primärspule. Wichtig ist die richtige Kopplung zwischen Primär- und Sekundärspule: Ist sie zu lose, wird zu wenig Energie in die Tesla-Spule übertragen, bei zu fester Kopplung entstehen in der Tesla-Spule Oberwellen, die schlimmstenfalls zum Überschlag zwischen benachbarten Windungen führen können. Die Primärspule sollte etwa 5-15 Windungen besitzen. Da die Spannungssteigerung in der Sekundärspule nicht durch das Windungsverhältnis, sondern durch Resonanz zustande kommt, ist eine hohe Windungszahl keineswegs ungünstig, sondern sorgt durch ihr räumlich ausgedehntes Magnetfeld für eine effektive Energieübertragung zwischen Primär- und Sekundärkreis.

[Sinngemäß nach [V]]

### 3.4. Die Funkenstrecke

Die Funkenstrecke ist das kritischste Bauelement eines Tesla-Generators, da sie, wenn sie schlecht konstruiert ist, dessen Leistung mehr als jedes andere Bauteil einschränken kann. Die Funkenstrecke besteht im einfachsten Fall aus zwei Elektroden, die so weit voneinander entfernt sind, daß noch regelmäßig Funken überspringen (beim deutschen 50Hz-Stromnetz 100 mal pro Sekunde). Dieses Design hat allerdings den Nachteil, daß der Funke relativ langlebig ist, und noch leitet, wenn der Primärkreis keine Energie mehr besitzt, die Energie der Sekundärspule wird wieder in den Primärkreis übertragen, was die Ausgangsspannung des Tesla-Generators drastisch reduziert.

Bei großer Transformatorleistung und kleiner Kapazität des Primärkondensators kann es schlimmstenfalls zur Ausbildung eines Lichtbogens kommen – der Tesla-Generator arbeitet überhaupt nicht mehr.

Um nun der Funken möglichst schnell zu löschen, zu "quenchen", muß die Hitze des Plasmas effektiv abgeführt werden. Dies geschieht, indem mehrere Funkenstrecken in Serie geschaltet werden, dadurch wird ein langer Funke in mehrere kurze Funken "zerlegt", von jedem dieser kurzen Funken wird nun von zwei Seiten durch die Elektroden Hitze abgeführt.

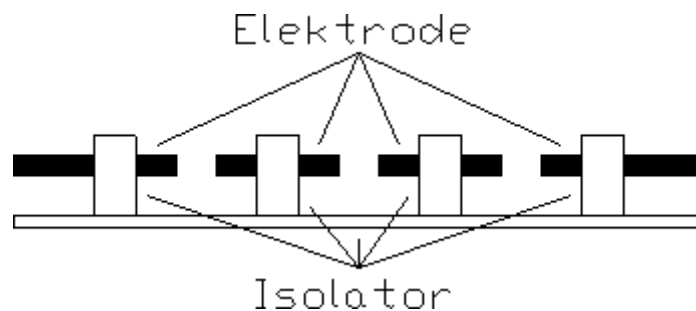


Abb. 7: Serienfunkenstrecke

Am effektivsten sind allerdings sog. rotierende Funkenstrecken, bei denen Elektroden, die kreisförmig auf einer rotierenden Isolatorscheibe montiert sind, zwischen zwei feststehenden Elektroden rotieren, und so mit definierter Frequenz die Funkenstrecke zünden und wieder löschen. Ein weiterer Vorteil dieses Systems ist, daß ein "Ventilatoreffekt" eintritt, wodurch die Elektroden luftgekühlt werden, was auch den Verschleiß reduziert.

Als Elektrodenmaterialien eignen sich am besten Wolfram oder Stahl, da wegen ihrer hohen Siedepunkte höhere Standzeiten aufweisen. Aluminium, Kupfer und Messing sind aber auch gängig.



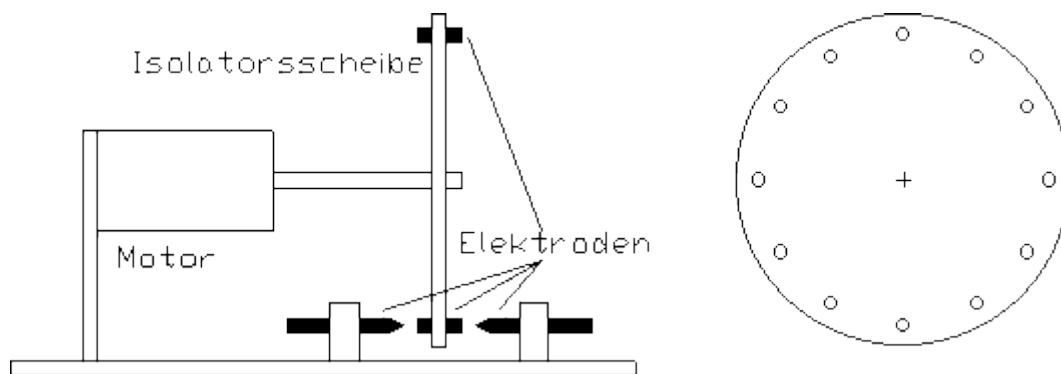


Abb. 8: Rotierende Funkenstrecke

### 3.5. Der Entladungsterminal

Ein Entladungsterminal hat verschiedene Vorteile:

- Er besitzt eine große Oberfläche und einen hohen Krümmungsradius, dadurch kann eine wesentlich höhere Spannung aufgebaut werden, bis eine Koronaentladung entsteht => längere Streamer
- Er erniedrigt die Resonanzfrequenz der Tesla-Spule, somit wird die im Resonanzkreis gespeicherte Energie bei gleicher Spannung größer & längere Streamer

Da der Hochspannungsterminal keine Spitzen oder Kanten aufweisen darf, an denen Koronaentladungen stattfinden könnten, kommen nur zwei Formen in Frage: Eine Kugel oder ein Torus. Der Torus wird jedoch aus folgenden Gründen meist der Kugel vorgezogen:

- Der Torus erzeugt im Gegensatz zur Kugel ein elektrisches Feld, das Koronaentladungen, die von den oberen Windungen der Sekundärspule ausgehen, unterdrückt
- Ein Torus erzeugt ein wesentlich günstigeres elektrisches Feld als eine Kugel (=> höhere Durchbruchspannung), und produziert bei gleicher Kapazität 20-30% längere Streamer als eine Kugel.

[sinngemäß nach [VI]]

### 3.6. Die Tesla-Spule

Die Tesla-Spule besteht im allgemeinen aus ca. 1000 Windungen Kupferlackdraht, die auf ein Kunststoffrohr gewickelt sind. Die Windungen werden parallel aufgebracht und sollten sich nicht überlappen, da es sonst zu Leistungseinbußen, schlimmstenfalls zu Überschlägen zwischen einzelnen Windungen kommen kann. Als Material für den Spulenkörper eignet sich am besten Kunststoff, da es einen hohen Widerstand besitzt und geringe Hochfrequenzverluste aufweist. Die Spule wird schließlich noch mit einer Schicht Epoxidharz oder flüssigem Kunststoff überzogen, um sie vor mechanischen Beschädigungen zu schützen und Koronaentladungen zu unterdrücken. Tesla-Spulen haben im allgemeinen eine Resonanzfrequenz zwischen 50 kHz und 1 MHz. Um eine maximale Amplitude der Ausgangsspannung zu erreichen, wird eine Spulendrahtlänge von  $\frac{1}{4} \lambda$  angestrebt, so daß eine stehende Welle in der Sekundärspule entsteht (Spannungsknoten am unteren Ende, Wellenberg am Entladungsterminal).

VIII]

### 3.7. Die Erdung

Um mit einem Tesla-Generator möglichst spektakuläre Streamer und lange Blitze auf benachbarte Gegenstände zu erzeugen, ist eine gute Erdung unumgänglich (da bei einer  $\frac{1}{4} \lambda$ -Konfiguration der maximale Stromfluß am Fußpunkt der Spule herrscht). Dabei sollte allerdings nicht die Hauserdung

benutzt werden, da sonst Video- oder HiFi- Geräte und Computer die abgestrahlten Radiowellen wesentlich besser aufnehmen würden, und es zur Funktionsbeeinträchtigung kommen könnte, außerdem treten bei größeren Tesla-Generatoren derartig hohe Ströme auf, daß es bei schlechten Erdverbindungen zu einer Überhitzung von Leitungen, schlimmstenfalls zum Brand kommen kann. Als Erdung dienen meist lange Metallstäbe oder -rohre, die mehrere Meter vom Haus entfernt in die Erde getrieben werden.

[VIII]

## 4. Bau eines Tesla-Generators

### 4.1. Vorwort

Da der Bau von Tesla-Generatoren ein relativ seltenes Hobby ist, sind Bauteile für Tesla-Generatoren entweder gar nicht oder nur zu extrem hohen Preisen erhältlich. Deshalb müssen die meisten Bauelemente, z.B. der Entladungsterminal, Kondensatoren, Funkenstrecke selbst gebaut werden. Die Hochspannungsversorgungen werden, wie bereits erwähnt, aus anderen Bereichen zweckentfremdet, obwohl sie unter Umständen nicht sonderlich gut für den Einsatz in Tesla-Generatoren geeignet sind.

All diese Herausforderungen machen einen Tesla-Generator zu einem hochinteressanten Bauprojekt.

### 4.2. Die Hochspannungsversorgung

Da die bereits erwähnten Hochspannungsquellen in Europa entweder schwer zu beschaffen sind, oder nur eine geringe Ausgangsleistung besitzen, bin ich auf ein günstiges Angebot für Mikrowellentransformatoren eingegangen.

Ein Mikrowellentransformator (MOT) besitzt eine Ausgangsspannung von 2kV bei 0,3A P 600W. Einer der beiden Hochspannungsausgänge eines Transformators ist mit dem Gehäuse verbunden, das aus Isolationsgründen geerdet werden muß. Da 2kV für den Betrieb eines Tesla-Generators nicht ausreichen (es ist fast unmöglich eine Funkenstrecke für eine derart niedrige Spannung bei der relativ hohen Leistung zu bauen, außerdem wäre die Ausgangsspannung des Tesla-Generators sehr gering), wurden die Kerne zweier Transformatoren miteinander verbunden, und die Primäranschlüsse antiparallel mit dem Stromnetz verschaltet. So ergibt sich eine Ausgangsspannung von 4kV AC (Spitzenspannung: ca. 5,6kV).

Um die Ausgangsspannung weiter zu erhöhen, wurde später ein Levelshifter, eine Art Spannungsverdoppler, angeschlossen, wie er auch in Mikrowellenherden zum Einsatz kommt (jedoch mit der doppelten Eingangsspannung).

Während der positiven Halbwelle wird der Kondensator über die Diode geladen. Bei der negativen Halbwelle liegt dann der geladene Kondensator in Serie mit den Transformatoren, und es entsteht eine Ausgangsspannung von bis zu 11,3kV. Allerdings wird diese Spannung nur 50 mal pro Sekunde erreicht.

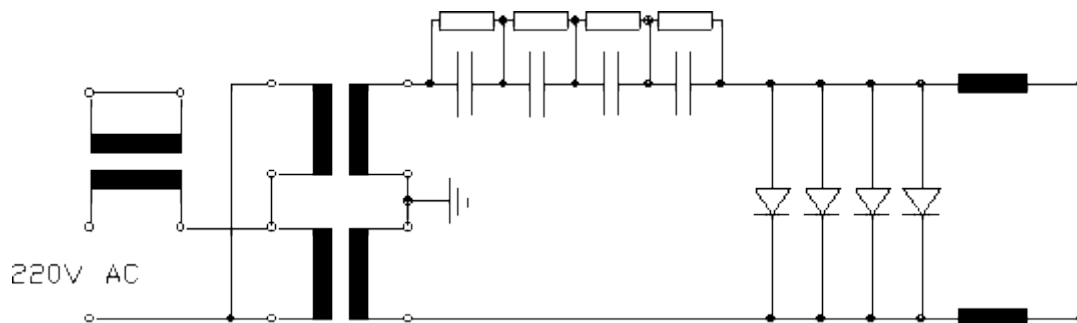


Abb.9: Schaltplan der MOT-Hochspannungsversorgung

Damit der Kondensator während der positiven Halbwelle die maximale Energie aufnehmen kann, muß er den selben Blindwiderstand wie die Sekundärwicklungen der Transformatoren besitzen

(Resonanzzustand). In Mikrowellenherden kommt ein Kondensator mit einer Kapazität von 1m F zum Einsatz. Da sich durch die Zusammenschaltung der Transformatoren die Induktivität verdoppelt, wird also ein Kondensator mit einer Kapazität von 0,5m F benötigt.

In meiner Levelshifter-Schaltung wurden vier Kondensatoren mit einer Spannungsfestigkeit von je 2kV und einer Kapazität von je 2m F in Serie geschaltet. Jeder Kondensator wurde außerdem mit einem 1MW /1W Widerstand überbrückt, um zu gewährleisten, daß alle Kondensatoren gleichmäßig geladen werden und, nachdem der Tesla-Generator ausgeschaltet wurde, wieder entladen werden, um Unfälle zu vermeiden. Für den Gleichrichter wurden vier Dioden mit einer Belastbarkeit von je 100mA und 100kV parallelgeschaltet.

Da MOTs im Gegensatz zu Neontransformatoren oder Zündtransformatoren für Ölheizungen nicht kurzschlußfest sind, muß zur Strombegrenzung eine ohmsche und/oder induktive Last in Serie mit den Primärspulen der Transformatoren geschaltet werden. Meine Wahl fiel auf einen ausrangierten 2kW-Heizlüfter. Dieser mußte für den Einsatz als Strombegrenzer etwas modifiziert werden: Der Temperaturregler wurde durch einen Schalter überbrückt, um den Tesla-Generator auch bei Temperaturen betreiben zu können, die über dem Regelbereich des Temperaturreglers liegen. Außerdem wurde am Lüftermotor ein separater Netzanschluß angebracht, da er wegen der relativ geringen Spannung am Heizlüfter die Wärme, die durch das Heizelement erzeugt wird, nicht abführen konnte, und eine im Heizlüfter integrierte Temperatursicherung den Stromkreis unterbrach.

Da sich die Transformatoren nach längerem Betrieb nur mäßig erwärmten, lag die Leistung vermutlich im vorgeschriebenen Bereich.

Diese Art der Strombegrenzung lieferte nur sehr unbefriedigende Ergebnisse, deswegen wurde der Heizlüfter später durch einen dritten Mikrowellentransformator ersetzt, dessen Sekundärwicklung kurzgeschlossen wurde. Die Primärwicklung liegt in Reihe mit den Primärwicklungen der beiden anderen Mikrowellentransformatoren. Auf diese Weise werden die Trafos induktiv strombegrenzt, was sich in einer wesentlich höheren Ausgangsspannung äußert. Die Erwärmung blieb gegenüber der ohmschen Strombegrenzung unverändert.

In Reihe mit den beiden Hochspannungsausgängen wurde je eine Drossel geschaltet, um aus dem Resonanzkreis stammende Hochfrequenzschwingungen vom Levelshifterkondensator und aus dem Netz fernzuhalten. Diese Drosseln wurden hergestellt, indem eine dicke Kupferlitze um Zeilentrakkerne gewickelt wurde. Induktivität: ca. 3,2mH. Außerdem wurde eine Sicherheitsfunkenstrecke installiert, um Spannungsspitzen abzufangen.

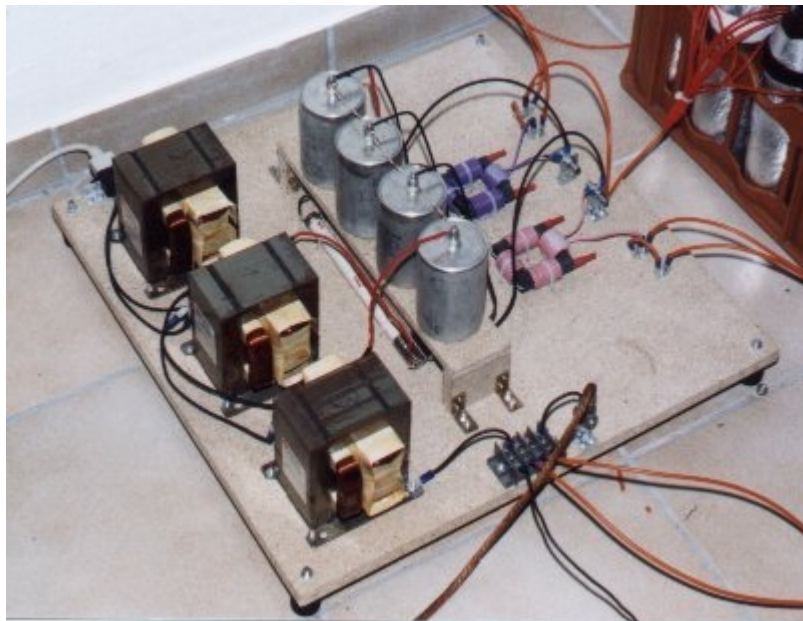


Abb. 10: Fertig aufgebaute MOT-Hochspannungsversorgung

### 4.3. Der Kondensator

#### 4.3.1. Der Salzwasserkondensator

Da die im Handel angebotenen Kondensatoren, die für den Einsatz in einem Tesla-Generator geeignet sind, meinen finanziellen Rahmen sprengen würden, war der Eigenbau eines Primärkondensators unumgänglich.

Aus Kostengründen und wegen der einfachen Konstruktion habe ich mich zunächst für Salzwasserkondensatoren entschieden. Um die Salzwasserkondensatoren transportieren zu können, zog ich eine "geschlossene" Version vor: Die Funktion der Salzlösung im Bottich übernimmt hier Aluminiumfolie, die auf die Flasche geklebt wird. Zur Kontaktierung der Salzlösung in der Flasche dient eine Gewindestange, die durch zwei Muttern am Schraubverschluß (vorzugsweise Kunststoff, da es an Metallverschlüssen zu Koronaentladungen kommt) befestigt wird.

Diese Konstruktion ist wasserdicht und kann im Schadensfall leicht ausgetauscht werden. Die Kondensatoren können in Getränkekästen untergebracht werden, wobei ein Kasten (12 Flaschen) eine Kapazität von etwa 10nF aufweist.

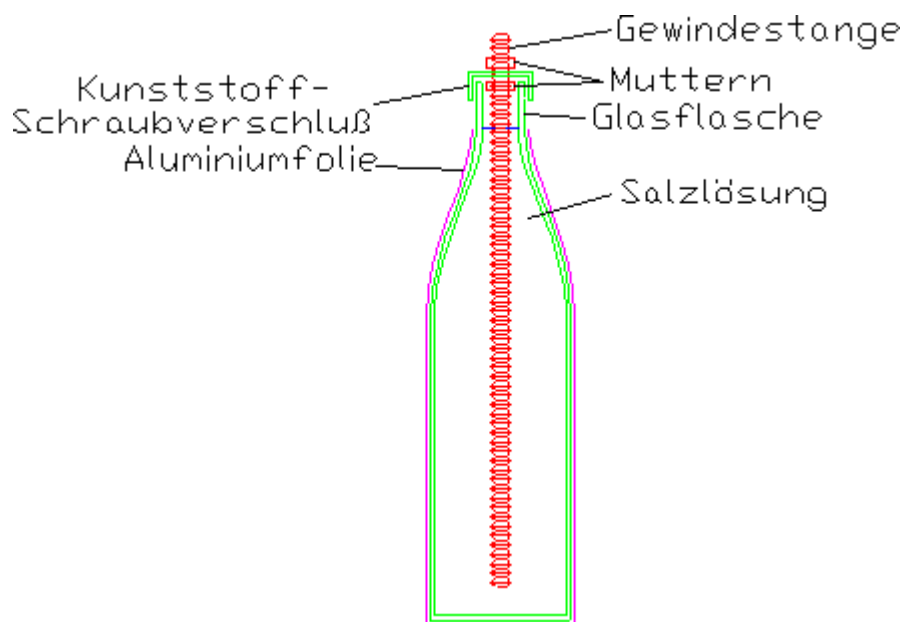


Abb. 11: Aufbau eines geschlossenen Salzwasserkondensators



*Abb.12: 10nF-Salzwasserkondensator*

Dieses Design hatte jedoch zwei Nachteile: Erstens erwiesen sich die Flaschenwände als viel zu dick, was sich negativ auf die Kapazität auswirkt. Zweitens wurde die Aluminiumfolie mit UHU Alleskleber aufgeklebt, es wurde aber nicht darauf geachtet, daß das Lösungsmittel praktisch keine Möglichkeit zu entweichen besitzen, dadurch "blähten" sich einige Flaschenkondensatoren auf, ein Kondensator fing schließlich sogar Feuer!

Deshalb wurde ein neuer Flaschentyp (Marke Gut & Billig/1l-Flasche) verwendet und die Aluminiumfolie mit Sprühkleber aufgeklebt. Dadurch konnte schon mit 6 Flaschen eine Kapazität von 8nF erreicht werden.

In dem hier beschriebenen Tesla-Generator kommt eine Kiste des alten und eine des neuen Designs zum Einsatz, wodurch eine Primärkreis Kapazität von 18nF entsteht



*Abb.13: 8nF-Salzwasserkondensator*

### 4.3.2. Der Folienkondensator

Da diese Salzwasserkondensatoren sehr viel Platz benötigen und unter hohen Verlusten leiden, die durch dielektrische Erwärmung des Glases hervorgerufen werden, konstruierte ich schließlich einen

Wickelkondensator mit Polyäthylen als Dielektrikum. Damit sich die Kondensatorplatten beim aufgerollten Kondensator nicht berühren, müssen zwei Dielektrika verwendet werden. Dadurch hat im aufgewickelten Kondensator jede Platte zwei benachbarte Platten, wodurch sich die wirksame Plattenfläche verdoppelt, die Kapazität kann also mit der Formel

$$C = 2,2 \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d} \cdot 2$$

berechnet werden. Polyäthylen ist als Abdeckplane mit den Abmessungen von 10m x 3m und einer Dicke von 0,2mm erhältlich. Um einen robusten Kondensator zu erhalten, der auch Materialfehler in der PE-Folie tolerieren kann, wurden pro Dielektrikum fünf Planen übereinandergelegt, so daß sich eine Foliendicke von 1mm und eine Spannungsfestigkeit von 50kV ergab. Für die Kondensatorplatten wurde Haushaltsaluminiumfolie verwendet. Die Aluminiumfolie hat eine Breite von 30cm, was als Plattenbreite beibehalten wurde. Das Dielektrikum wurde auf eine Breite von 36cm zugeschnitten, um auf jeder Seite 3cm Isolierung zu besitzen. Die Länge des Dielektrikums mußte nun so gewählt werden, daß die 10m lange Kunststoffplane ohne viel Materialverlust in gleich große Stücke aufgeteilt werden konnte, und der gewickelte Kondensator in ein Polypropylen-Abflußrohr mit einem Innendurchmesser von 10,5cm, das als Gehäuse dienen sollte, paßte. Eine Dreiteilung der Folie ergibt eine Länge von 3,3m (um eventuellen Materialtoleranzen zu begegnen, wurde auf die restlichen 30cm verzichtet), die Foliendicke ist 2mm (für zwei Dielektrika), und das Kunststoffrohr, das als Kern zum Aufrollen des Kondensators verwendet werden sollte, besitzt einen Durchmesser von 2cm. Unter Vernachlässigung der geringen Dicke der Aluminiumfolie ergibt sich eine Fläche von

$$A = 3,3m \cdot 2,0mm + (1,0cm)^2 \cdot \pi = 69cm^2$$

und somit ein Durchmesser von

$$d = 2 \cdot \sqrt{\frac{A}{\pi}} = 9,4cm$$

Der Spielraum von 1cm wird benötigt, da der Kondensator nicht völlig straff gewickelt werden kann. Bei der Konstruktion des Kondensators wurden fünf Polyäthylenfolien mit den Abmessungen 3,3m mal 36cm übereinandergelegt, darauf wurde eine Aluminiumfolie mit den Abmessungen von 3m mal 30cm so auf die Folie gelegt, daß an beiden Rändern, und an dem Ende, an dem mit dem Wickeln begonnen wird, 3cm Abstand vom Folienrand besteht. Somit ergibt sich am anderen Ende ein Abstand von ca. 27cm vom Folienrand, der aber benötigt wird, da sich beim Aufrollen Aluminium- und Polyäthylenfolien wegen des steigenden "Wickelradius" untereinander verschieben. Dann wurde am vorderen Ende ein Kabel in die Aluminiumfolie eingerollt, das den Anschluß bildet. Darüber wurde wieder eine Schicht Polyäthylenfolien und eine Alufolie gelegt, mit denen analog verfahren wurde. Als Wickelkern wurde ein 36cm langes PVC-Rohr mit einem Durchmesser von 2cm verwendet. Während des Aufrollens des Kondensators mußte darauf geachtet werden, daß sich die Aluminiumfolien nicht seitlich verschieben, da sich sonst der beidseitige Schutzrand von 3cm verkleinert hätte, was schlimmstenfalls zum Überschlag zwischen den Platten geführt hätte, der Kondensator wäre somit unbrauchbar geworden. Unter der Annahme, daß der Wickelkondensator genau in das 10,5cm-Rohr paßt, ergibt sich unter Abzug der Fläche des 2cm-Wickelkernes eine Kondensatorfläche von

$$A = \left(\frac{10,5cm}{2}\right)^2 \cdot \pi - \left(\frac{2cm}{2}\right)^2 \cdot \pi = 83,4cm^2$$

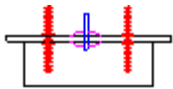


Da die im Kondensator befindliche Luft durch Öl ausgetauscht wird, das die gleiche Dielektrizitätszahl wie Polyäthylen besitzt, kann das Öl als eine Verdickung des Dielektrikums angesehen werden. Werden die beiden Dielektrika als eine Folie von 6,6m Länge angesehen, ergibt sich für das Dielektrikum eine Dicke von

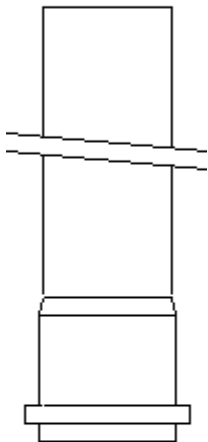
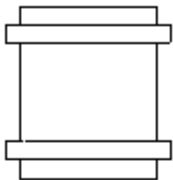
$$d = \frac{83,4\text{cm}^2}{6,6\text{m}} = 1,26\text{mm}$$

Somit läßt sich unter Vernachlässigung der Dicke der Aluminiumfolie eine zu erwartende Kapazität von

$$C = 2,2 \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d} \cdot 2 = 2,2 \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{3,3\text{m} \cdot 30\text{cm}}{1,26\text{mm}} \cdot 2 = 28\text{nF}$$



berechnen. Da der Kondensator zum Schutz vor Koronaentladung, die ihn binnen kurzer Zeit zerstören würden, in Öl gelagert werden muß, fiel meine Wahl für das Gehäuse des Kondensators auf ein Polypropylen-Abflußrohr. Da diese Abflußrohre nur mit einer einseitigen Steckmuffe ausgestattet sind, wird noch eine Überschiebemuffe benötigt, um beide Enden mit einem Deckel abzuschließen. Der Nachteil von Polypropylen ist, daß es nur mit extrem teuren Klebstoffen, die nur schwer erhältlich sind, verklebt, bzw. mit einem Heißluftgebläse verschweißt werden kann, jedoch haben meine Versuche gezeigt, daß die in den Rohren integrierten Gummidichtungen die Rohre sehr gut abschließen, und das Kondensatorgehäuse, nachdem es mit Öl gefüllt wurde, durch den Luftdruck zusammengehalten wird.

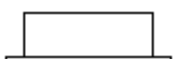


Ein Deckel wurde mit zwei 4cm langen M6-Gewindestangen versehen, die als Anschlüsse dienen, und einem Schlauch, durch den der Kondensator später evakuiert und mit Öl gefüllt wurde. Der Schlauch wurde an beiden Seiten des Deckels mit Heißkleber fixiert, wodurch eine gewisse Festigkeit der Klebestelle erreicht wurde. Das 10,5cm dicke PP-Rohr wurde nun auf eine Länge von 40cm zurechtgeschnitten, und der erstaunlich gut in das Rohr passende Kondensator wurde in das untere Ende mit den Anschlußdrähten nach oben in das Rohr gesteckt. Das untere Ende wurde nun mit einem normalen Deckel verschlossen. Über das obere Ende wurde die Überschiebemuffe geschoben, und die Anschlußdrähte wurden an die Gewindestangen, die in dem Deckel befestigt sind, angeschlossen. Danach wurde der Deckel in die Überschiebemuffe geschoben und an dem Schlauch ein Ventil befestigt. Um sämtliche Luft, die sich in dem Wickelkondensator befindet, mit Öl auszutauschen, mußte der Kondensator erst evakuiert und dann mit Öl gefüllt werden. Als Vakuumpumpe wurde ein alter Kühlschrankschrankkompressor benutzt, der ein Vakuum von etwa 80mbar erzeugt, was für diese Zwecke ausreicht. Nach dem Evakuieren wurde an dem Ventil, das sich am Kondensator befindet, ein Schlauch befestigt, mit dem Öl in den Kondensator gesaugt werden konnte. Als Öl wurde handelsübliches Motoröl verwendet. Der Kondensator sollte aufrecht gelagert werden, damit sich Luft, die sich noch im Kondensator befindet, oben ansammelt, wo sie keinen Schaden anrichten kann.



Abb.14: Explosionszeichnung des Folienkondensators

Dieses Kondensatordesign war jedoch der Belastung, denen es in Verbindung mit einer rotierenden Funkenstrecke ausgesetzt ist, nicht gewachsen, so mußte ich



wieder zum Einsatz von Salzwasserkondensatoren zurückkehren.



Abb.15: Geöffneter Folienkondensator Abb.16: Entrollter Folienkondensator

Spätere Versuche zeigten, daß es bei Verwendung einer rotierenden Funkenstrecke an den Rändern der Aluminiumfolie zu starken Koronaentladungen kam (wohlgemerkt unter Öl!), die durch starke Wärmeentwicklung die Polyäthylenfolie zerstörten. Wie ich in einer Mailinglist erfuhr (leider zu spät), muß der Kondensator bei der hohen Unterbrecherrate meiner Funkenstrecke für ein 20-faches (!) der Transformatorspannung ausgelegt sein. Deutlich wird die extreme Belastung der Kondensatoren durch die Beobachtung, daß die Ölschicht, die in den Salzwasserkondensatoren Koronaentladungen unterdrücken sollen, im Betrieb regelrecht aufgeschäumt wird. Durch die hohe Feldstärke an den oberen Rändern der Aluminiumfolie, in Verbindung mit der hohen Unterbrecherfrequenz werden also die chemischen Bindungen des Öls aufgespalten, und es bilden sich Gase (was sich auch geruchlich bemerkbar macht).



Abb.17: Blasenbildung im Öl des Salzwasserkondensators

#### 4.4. Die Primärspule

Die Primärspule wurde als Spiralspule ausgeführt. Leider mußte ich schon bei früheren Konstruktionen feststellen, daß die mit Hilfe einer für flache Spulen ausgelegten Formel berechnete Induktivität nicht annähernd mit der tatsächlichen Induktivität übereinstimmt. So wird bei einer Primärkapazität von 18nF und einer Resonanzfrequenz der Tesla-Spule von 310kHz (siehe Kapitel 4.7.) eine Induktivität von



$$L = \frac{1}{(2\pi f)^2 C} = \frac{1}{(2\pi \cdot 310\text{kHz})^2 \cdot 18\text{nF}} = 15\,\mu\text{H}$$

benötigt.

Die Primärspule wurde großzügig mit acht Windungen konstruiert, um auch mit kleineren Kondensatoren, bzw. größeren Tesla-Spulen experimentieren zu können. Der Resonanzzustand wird bei Anzapfung von 5,5 Windungen erreicht. Die Spule besitzt einen Innendurchmesser  $D_i$  von 12,5cm, und einen Windungsabstand von 1,5cm. Die Breite der Spule  $d$  beträgt bei der 5,5. Windung 7,5cm. Nach der Formel für Spiralspulen [[VII] Kapitel 3.5.2.C.] ergäbe sich eine Induktivität in nH von

$$L = \frac{21,5 \cdot n^2 \cdot (D_i + d)}{1 + 2,72 \cdot \frac{d}{(D_i + d)}} = \frac{21,5 \cdot 5,5^2 \cdot (12,5\text{cm} + 7,5\text{cm})}{1 + 2,72 \cdot \frac{7,5\text{cm}}{(12,5\text{cm} + 7,5\text{cm})}} = 6,4\,\mu\text{H}$$

Messungen ergaben jedoch tatsächlich die geforderte Induktivität von 15m H. Über dem äußeren Rand der Spule wurde noch ein geerdeter Drahring, eine sog. Strikerail, angebracht, der Überschläge von der Tesla-Spule zur Primärspule, die den Kondensator und die Transformatoren zerstören könnten, abfängt. Zur Befestigung der Tesla-Spule wurde in der Primärspule der Teil einer Steckmuffe für Abflußrohre geklebt.

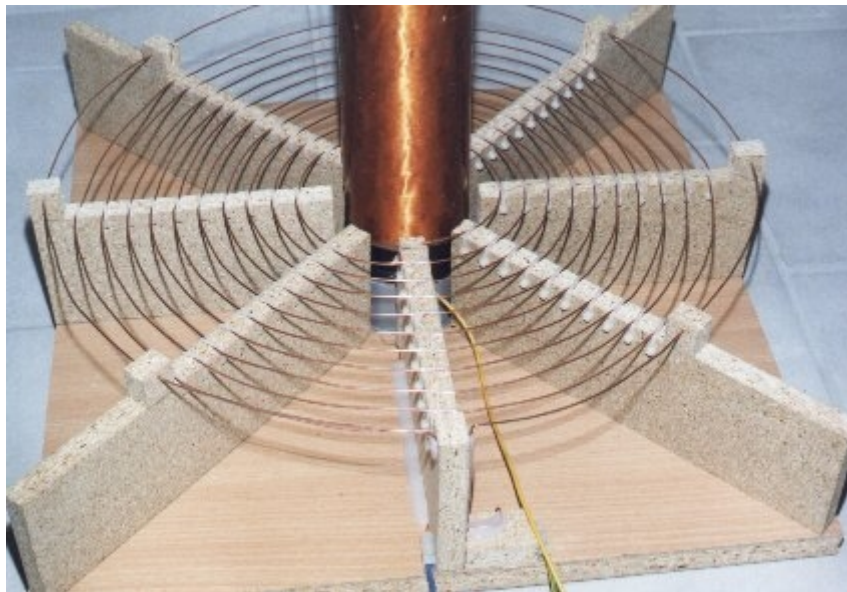


Abb.18: Primärspule

## 4.5. Die Funkenstrecke

### 4.5.1. Statische Funkenstrecke

Bei den ersten Experimenten mit dem Tesla-Generator verfügten die Mikrowellentransformatoren noch nicht über eine Levelshifterschaltung, deshalb konnte wegen der geringen Spannung nur eine einfache Funkenstrecke benutzt werden, die aus zwei parallelen Blechen bestand. Die mit dieser Funkenstrecke erzielten Ergebnisse waren jedoch wenig befriedigend, so konnten nur Überschläge zu einer geerdeten Elektrode von maximal 10cm Länge erzielt werden. Um das Quenchingverhalten zu verbessern, war der Einsatz einer rotierenden Funkenstrecke unumgänglich.

### 4.5.2. Rotierende Funkenstrecke (RSG 1)

Das größte Problem bei dem Design der rotierenden Funkenstrecke bestand in der geringen

Ausgangsspannung der MOTs (4kV), deshalb durften rotierende und statische Elektroden nur einen minimalen Abstand besitzen, und keinesfalls zu Vibrationen neigen, da es sonst unweigerlich zu einer Kollision zwischen den Elektroden gekommen wäre. Aus diesem Grund scheiterte auch der Bau einer rotierenden Funkenstrecke wie sie in Kapitel 3.4. beschrieben ist, denn eine minimale Unwucht der Isolatorscheibe, die kaum zu vermeiden ist, führt zu Schwingungen, der Abstand zwischen rotierenden und statischen Elektroden mußte deshalb so groß gewählt werden, daß die Funkenstrecke nicht mehr zünden konnte. Die erste funktionsfähige rotierende Funkenstrecke bestand aus einem Sägeblatt, das auf einem Lüftungsmotor, der aus einem Kfz-Wärmetauscher stammte, befestigt war. Zwei feststehende Elektroden wurden nun in je 0,5mm Abstand von den Sägezähnen installiert, so daß die Zähne bei Rotation den Kontakt schlossen. Die für die Achse vorgesehene Bohrung am Sägeblatt hatte dabei einen Durchmesser von 2cm, so daß es auf der Motorachse die einen Durchmesser von 0,8cm besitzt, mittels zwei Pertinaxscheiben isoliert befestigt werden konnte. Mit diesem Design konnten schon Entladungen gegen Erde von ca. 20cm Länge erzeugt werden, durch den Einsatz eines Levelshifter wuchsen diese auf 35cm Länge an.

### 4.5.3. RQ-Gap

Der rotierenden Funkenstrecke folgten nun Versuche mit einer statischen Funkenstrecke. Dies hatte mehrere Gründe:

- Die Sägezähne waren nach relativ kurzer Laufzeit der Funkenstrecke durch Verdampfen des Stahls sehr stark erodiert, es wurde ersichtlich, daß die Funkenstrecke bald unbrauchbar würde, ein ständiger Nachkauf von Sägeblättern war indiskutabel.
- Durch den Levelshifter war die Primärspannung so weit gestiegen, daß die Funkenstrecke mit dem Löschen des Plasmas überfordert war, und es regelmäßig zu "Feuerringen" kam, die sich um das gesamte Sägeblatt legten. Ungeachtet ihres interessanten Aussehens führten diese Erscheinungen zu Aussetzern des Tesla-Generators
- Die durch den Spannungsverdoppler erhöhte Primärspannung ermöglichte nun den Einsatz einer Serienfunkenstrecke
- Da der nach den Salzwasserkondensatoren entwickelte PE-Kondensator schon nach kurzer Laufzeit durchschlug, was vermutlich durch die starke elektrische Belastung ausgelöst wurde, die eine rotierende Funkenstrecke durch die hohe Unterbrecherfrequenz auf den Kondensator ausübt, wollte ich nach dem Bau eines zweiten Kondensators die Möglichkeiten einer Serienfunkenstrecke erkunden

Ein sehr effektives Design einer Serienfunkenstrecke wurde von Richard Quick erdacht, der eine Bauanleitung dieses RQ-Gaps im Internet veröffentlicht hat.

Der Aufbau ist trotz des guten Wirkungsgrades bestechend einfach: An der Innenseite eines Abflußrohres werden mehrere Kupferrohre mit einem geringen Abstand parallel zueinander angebracht. Die Befestigung erfolgt dabei mit je zwei Schrauben, die durch Bohrungen in Kupfer- und Abflußrohr geführt werden. Die Kupferrohre bieten dabei eine große Masse und eine hohe Wärmeleitfähigkeit, wodurch der Funke schnell gelöscht werden kann. Um das Quenchingverhalten weiter zu verbessern, wird an einem Ende des Abflußrohres ein Ventilator, oder sogar ein Staubsaugergebläse angebracht, das den Funken "ausbläst". Der Luftstrom sorgt nebenbei für eine Kühlung der Kupferrohre, die schon nach kurzer Betriebszeit sehr heiß werden. Die Zündspannung der Funkenstrecke kann komfortabel über das Anzapfen verschiedener Rohre verändert werden.

## Cylinder Static Gap

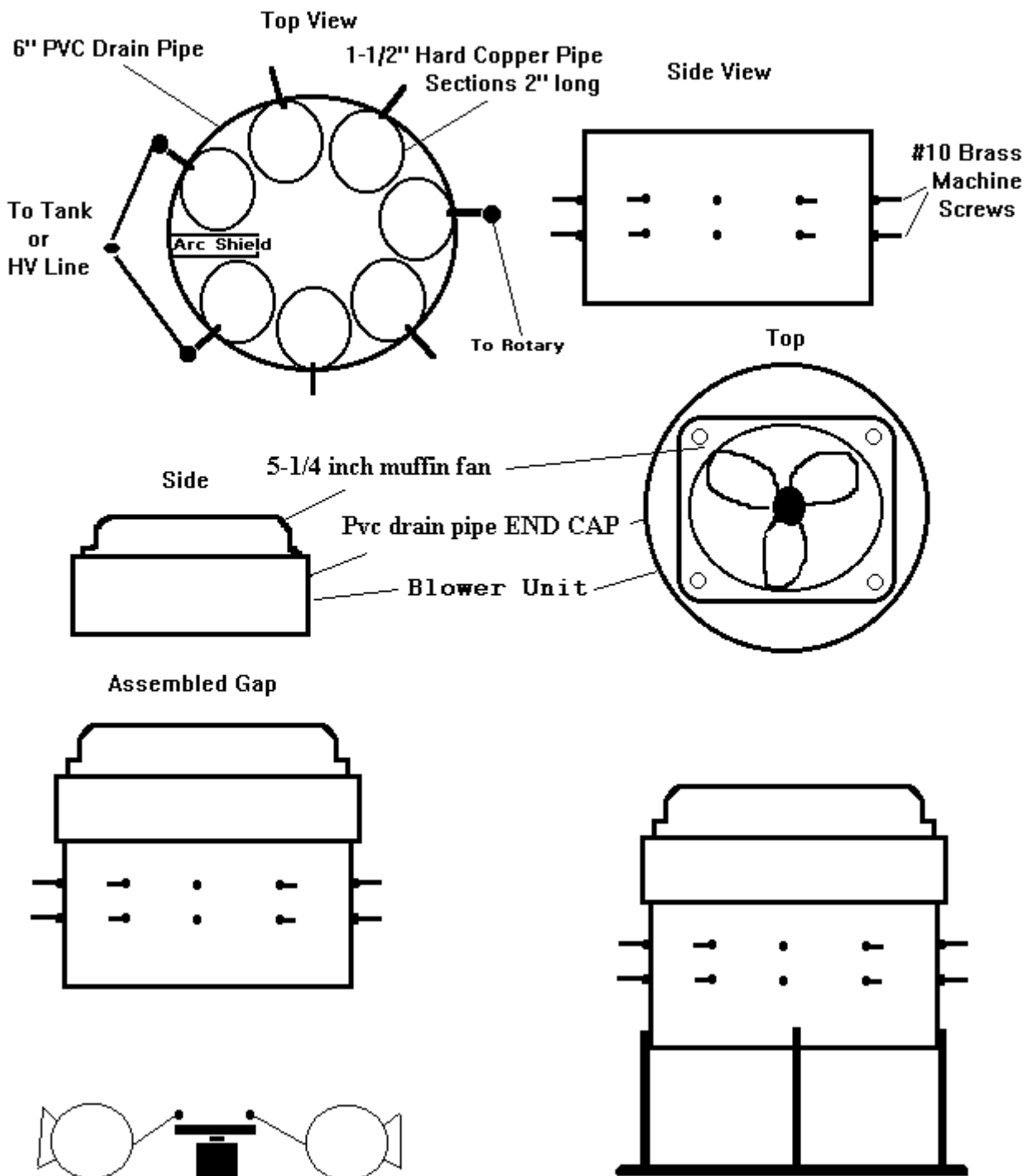


Abb.19: Aufbau eines RQ-Gaps

In meinem RQ-Gap kamen sechs Kupferrohre mit einem Durchmesser von 22mm zum Einsatz, der Rohrabstand beträgt 0,6mm. Die besten Ergebnisse wurden durch Anzapfen des fünften Rohres erzielt. Die mit dem RQ-Gap in Verbindung mit dem PE-Kondensator erzielten Ergebnisse übertrafen zwar die Streamerlängen, die mit der rotierenden Funkenstrecke in Verbindung mit den Salzwasserkondensatoren erreicht wurden, außerdem konnte der Tesla-Generator kompakter aufgebaut werden, jedoch konnten die Streamer nicht mit den spektakulären Entladungen konkurrieren, die mit der rotierenden Funkenstrecke in Verbindung mit dem PE-Kondensator erzielt wurden.

#### 4.5.4. Rotierende Funkenstrecke (Flexigap)

Der Drang nach längeren Streamern führte zu Überlegungen zum Bau einer neuen rotierenden Funkenstrecke, bei der nun die Elektroden auf einer Isolatorscheibe befestigt werden sollten. An den Antrieb wurden dabei zwei Bedingungen gestellt:

- Eine hohe Motordrehzahl, um die benötigte Unterbrechungsfrequenz zu erreichen
- Eine Möglichkeit, die Isolatorscheibe genau im rechten Winkel auf der Motorachse zu befestigen, so daß diese während des Betriebes nicht schwingt, wodurch statische und rotierende Elektroden in Berührung kommen würden.

Diese Anforderungen werden sehr gut von Einhandwinkelschleifern erfüllt: Sie besitzen im Allgemeinen eine Leerlaufdrehzahl von 11000U<sub>pm</sub> und am Spanndorn kann die Scheibe mit den rotierenden Elektroden genau im rechten Winkel zur Achse befestigt werden. Der Einsatz eines Winkelschleifers verlieh dieser Funkenstrecke den Namen Flexigap<sup>2</sup>. Die Drehzahl des Winkelschleifers und somit die Unterbrecherfrequenz wird mit einer selbstgebauten Phasenanschnittsteuerung geregelt. Die Schaltung der Phasenanschnittsteuerung ist ein Standarddesign und soll hier nicht näher diskutiert werden.

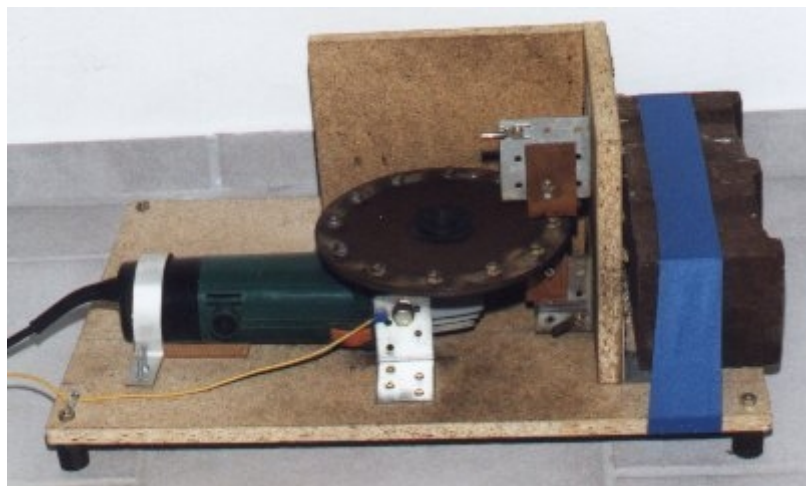
Die rotierende Scheibe muß sowohl steif sein, damit sie bei hohen Drehzahlen nicht zu Schwingen beginnt, als auch eine hohe Festigkeit besitzen, damit es bei einer eventuellen Kollision zwischen statischen und rotierenden Elektroden nicht zu einer "Explosion" kommt. Pertinax hat sich für diese Anforderungen als sehr geeignet erwiesen.

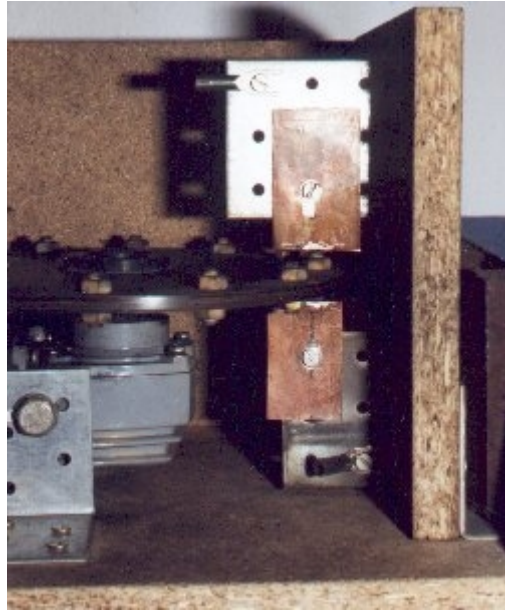
In meiner Funkenstrecke kam eine Scheibe mit 18cm Durchmesser und einer Dicke von 5mm zum Einsatz, auf der, im Abstand von 1cm vom äußeren Rand 12 Elektroden befestigt wurden. Diese bestehen aus M6-Gewindestangen, die mit jeweils zwei Muttern fixiert sind.

Als statische Elektroden dienen zwei 1mm-Kupferbleche, da Kupferelektroden – aus bisher noch ungeklärten Gründen – weniger verschleifen als Stahlelektroden. Ein weiterer Vorteil ist, daß sich die Kupferbleche im Falle eines "Gaus", also einer Kollision zwischen rotierenden und statischen Elektroden so verbiegen würden, daß kein weiterer Schaden entstehen kann.

Da die Funkenstrecke etwa bei halber Drehzahl in Resonanz gerät, was zum flattern der rotierende Scheibe führt (bei dieser Drehzahl kam es immer wieder zum Kontakt zwischen rotierenden und statischen Elektroden, jedoch ohne Folgen), wurde die Funkenstrecke mit einem Gewicht (Ziegel aus einer Speicherheizung) beschwert, wodurch die Schwingungen weitgehendst unterdrückt werden.

Die mit dieser Funkenstrecke erzielten Ergebnisse sind äußerst zufriedenstellend, so ermöglicht diese Streamerlängen von bis zu 60cm und Entladungen gegen Erde von bis zu 80cm Länge. Die Optimale Unterbrecherfrequenz beträgt 1,2kHz.





*Abb.20: Flexigap*

*Elektroden*

*Abb.21: Nahaufnahme der*



*Abb.22: Der Flexigap in Betrieb; deutlich zu erkennen ein Stroboskopeffekt*

## **4.6. Die Toruselektrode**

### **4.6.1. Styroporkern-Torus**

Als Torus-Form wurde ein Ring aus Styropor verwendet. Dieser Ring besteht aus zwei Ringhälften, sog. "Biedermeier", die in Bastelläden erhältlich sind. Die Hälften wurden mit Epoxidharz zusammengeklebt, da andere Klebstoffe Styropor angreifen. Für die leitende Oberfläche wurde Haushaltsaluminiumfolie in einen 30m langen und 4cm breiten Streifen geschnitten. Dieser Streifen wurde nun axial um den Toruskörper gewickelt, so daß sich die einzelnen Windungen um ca. 1,5cm überlappen. Dadurch wird verhindert, daß die Windungen voneinander isoliert sind, und eine Induktivität bilden. Der Rand des überlappenden Bereiches wird von unten mit Klebstoff bestrichen, so daß eine glatte Fläche ohne scharfe Kanten entsteht.



Abb.23: Styroporkern-Torus

In die Innenseite des Torus wurde eine Polystyrolscheibe geklebt, in deren Mitte sich ein ca. 4cm langes PVC-Rohr befindet, mit dem der Torus auf der Tesla-Spule angebracht werden kann. Die elektrische Verbindung zwischen Sekundärspule und Torus wird mit einem Kupferblech hergestellt, das an das Ende der Drahtwindungen gelötet wurde, und mit Klebeband am Torus fixiert wird. Für die Kapazität eines Torus sind nun zwei Faktoren ausschlaggebend: Der Außendurchmesser ( $D_o$ ) und der Durchmesser des Toruskörpers ( $D_c$ ). Dabei ist  $D_o=30\text{cm}$  und  $D_c=7\text{cm}$ . Die Formel wurde aus [[XII] Toroid Capacitance] entnommen und auf die Einheit cm angepaßt.

Die Kapazität in pF beträgt

$$C = 0,55 \cdot \left( 1,2781 - \frac{D_c}{D_o} \right) \cdot \sqrt{\pi \cdot D_c \cdot (D_o - D_c)} =$$

$$= 0,55 \cdot \left( 1,2781 - \frac{7\text{cm}}{30\text{cm}} \right) \cdot \sqrt{\pi \cdot 7\text{cm} \cdot (30\text{cm} - 7\text{cm})} = 12,9\text{pF}$$

#### 4.6.2. Aluflex-Torus

Um einen größeren Krümmungsradius des Torus zu erhalten, was zu längeren Koronaentladungen führt, wurde später ein biegsamer metallischer Abluftschlauch (Aluflex) mit einem Durchmesser von 10,5cm, wie er in Baumärkten erhältlich ist, zu einem Torus gebogen, und dessen Enden mit einem Aluminiumbeschichteten Klebeband leitend verbunden. Damit konnten geringfügig längere Streamer erzielt werden, jedoch weist der "Aluflex-Torus" eine höhere mechanische Festigkeit auf als der "Styroporkern-Torus". Diese Toruskonstruktion besitzt einen Durchmesser von 35cm und eine Kapazität von 15,3 pF.





Abb.24: Aluflex-Torus

#### 4.7. Die Tesla-Spule

Das geplante Design der Tesla-Spule sah 1000 Windungen Kupferlackdraht mit einem Durchmesser von 0,315 mm auf ein Polypropylen-Abflußrohr mit 7,5 cm Durchmesser gewickelt vor. Da die Tesla-Spule den Ausgangspunkt für die Dimensionierung von Primärkondensator und –spule bildet, wurde vor ihrem Bau die Resonanzfrequenz berechnet, um eine grobe Vorstellung über die Dimensionierung der anderen Bauelemente zu bekommen. Die Induktivität wurde mit der Formel für langgestreckte Spulen

$$L = \mu \cdot A \cdot \frac{N^2}{l}$$

berechnet (die Forderung "langgestreckt" ist in diesem Fall sehr gut erfüllt). Bei einem Rohrdurchmesser von 7,5cm beträgt der Spulenradius, unter Vernachlässigung der Drahtdicke, 3,75cm, die Länge der Spule beträgt 1000\*0,315mm, also 31,5cm. Die Induktivität ist dann

$$L = \mu \cdot (0,0375m)^2 \cdot \pi \cdot \frac{1000^2}{0,315m} = 17,6mH$$

Die Kapazität der Spule wurde mit der Medhurst-Formel [[XII] Medhurst] berechnet. Die für die Einheit Zoll ausgelegte Formel wurde auf cm adaptiert. Die Kapazität in pF beträgt

$$C = 0,144 \cdot l + 0,161 \cdot r + 0,746 \cdot \sqrt{\frac{r^3}{l}}$$

$$= 0,144 \cdot 31,5cm + 0,161 \cdot 3,75cm + 0,764 \cdot \sqrt{\frac{(3,75cm)^3}{31,5cm}} = 6,13pF$$

Nach dem Thompson-Formel ergibt sich dann eine Resonanzfrequenz von

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{16,7mH \cdot 6,13pF}} = 486kHz$$

Unter Berücksichtigung der Kapazität des Aluflex-Torus ergibt sich eine Resonanzfrequenz von

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{16,7mH \cdot (6,13pF + 15,3pF)}} = 266kHz$$

In der Praxis hat sich gezeigt, daß die Windungen eine Länge von 36,5cm bedecken. Damit ergibt sich eine theoretische Resonanzfrequenz von 275kHz.

Die Windungen wurden 8cm vom unteren Ende und 2cm vom oberen Ende des PP-Rohres aufgebracht, um die Tesla-Spule befestigen zu können. Die Tesla-Spule wurde anschließend noch mit einer Schicht Polyesterharz überzogen, außerdem wurde auf das obere Ende eine Polystyrolscheibe geklebt, auf der sich mittig eine PVC-Steckmuffe befindet, um die Toruselektrode befestigen zu können.

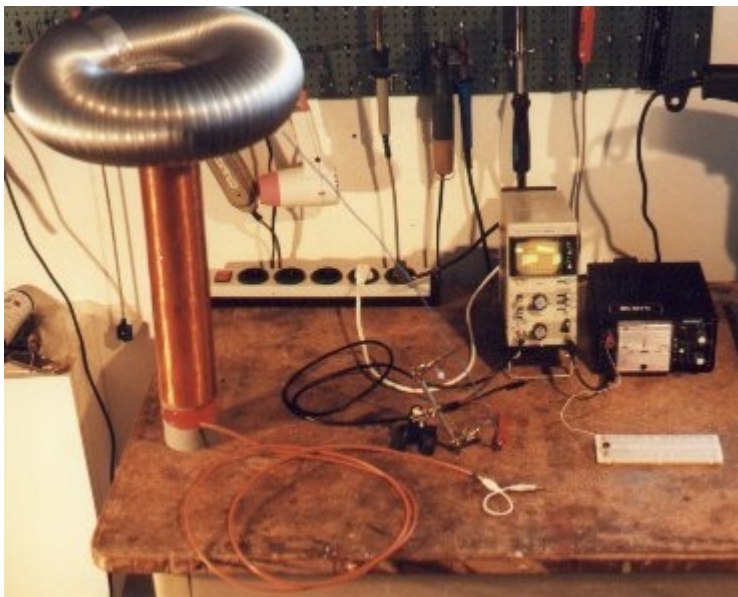


Abb.25: Versuchsaufbau zur ermittlung der Resonanzfrequenz der Tesla-Spule

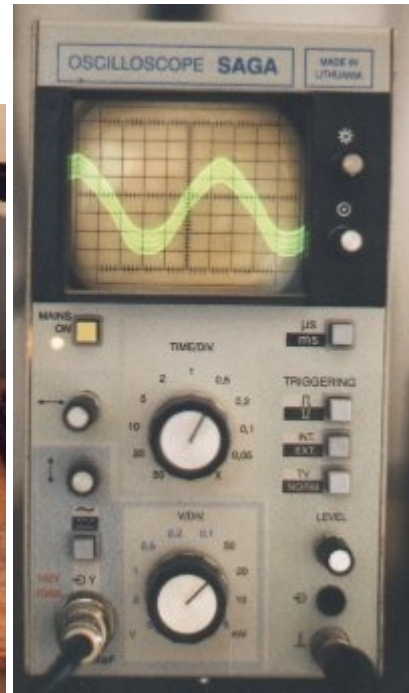


Abb.26: Nahaufnahme des Oszilloskops

Die tatsächliche Resonanzfrequenz der Tesla-Spule wurde nach ihrer Fertigstellung experimentell bestimmt. Dazu wurde mit unteren Ende der Tesla-Spule ein Oszillator mit einer Schwingungsamplitude von 10V und einer Frequenz von ca. 7kHz ( $f < f_{res}$ ) verbunden. Die Signalfanken des Rechtecksignals erregten dabei in der Tesla-Spule gedämpfte Schwingungen. Diese wurden mit einem Draht, der als Antenne diente, aufgefangen und mit einem Oszilloskop betrachtet. Der Draht durfte dabei keinen elektrischen Kontakt zur Tesla-Spule besitzen, um nicht durch die Eingangskapazität des Oszilloskops deren Resonanzfrequenz zu verändern. Die gemessene Resonanzfrequenz betrug 570kHz. Mit angeschlossenem Aluflex-Torus ergab sich eine Frequenz von 310kHz. Dieser Wert stimmt mit einer Abweichung von nur ca. 13% sehr gut mit dem berechneten Wert überein.





*Abb.27: In der Primärspule stehende Sekundärspule*

#### **4.8. Die Erdung**

Zur Erdung des Tesla-Generators wurde ein 2m langes Wasserrohr in ca. 3m Entfernung zum Haus im Boden versenkt. Dazu wurde am oberen Ende des Rohres ein Gartenschlauch befestigt, dadurch konnte dieses mit geringem Aufwand im Sandboden versenkt werden. Das untere Ende des Rohres befindet sich unter dem Grundwasserspiegel, was eine niederohmige Erdverbindung gewährleistet.

Der Tesla-Generator wird mittels eines Kupferkabels mit einem Durchmesser von 6mm über eine Klemme an das Erdungsrohr angeschlossen. Als Verbindungskabel dient eine 16mm<sup>2</sup>-Antennenleitung.



#### 4.9. Übersicht über die einzelnen Konfigurationen des Tesla-Generators

Mein Tesla-Generator wurde nach dem "Trial and Error" - Verfahren stufenweise zu einer höheren Ausgangsspannung optimiert, dabei waren z.B. mehrere Typen von Funkenstrecken und Kondensatoren im Einsatz. Die verschiedenen Konfigurationen des Tesla-Generators sollen im Folgenden zeitlich aufgelistet werden:

- Anfangs verfügten die Transformatoren noch nicht über einen Levelshifter (P Ausgangsspannung: 4kV), außerdem wurden sie über einen 2kW-Heizlüfter strombegrenzt. Als Primärkapazität dienten Salzwasserkondensatoren. Ich experimentierte mit einer Serienfunkenstrecke. **Mit dieser Konfiguration konnten Entladungen gegen Erde von etwa 10cm Länge erzeugt werden.**
- Dann folgte die Funkenstrecke, in der ein Kreissägeblatt als Unterbrecher diente. **Länge der Entladungen gegen Erde: ca. 20cm**
- Nun wurde ein Levelshifter eingesetzt, was die Ausgangsleistung drastisch erhöhte. **Länge der Entladungen gegen Erde: ca. 35cm**
- Der Heizlüfter, der als Strombegrenzung diente, wurde mit einem dritten Mikrowellentrafo vertauscht, es zeigte sich allerdings schon, daß die Funkenstrecke mit der Leistung überfordert war, und Quenchingprobleme hatte. **Streamerlänge: ca. 35cm.** Diese Konfiguration wird im Folgenden als K1 bezeichnet.
- Um den Tesla-Generator kompakter zu machen, wurden die Salzwasserkondensatoren mit einem selbstgebauten Folienkondensator vertauscht. **Streamerlänge ca. 50cm, "heißere" Blitze**
- Nach einer Betriebszeit von etwa 10 Minuten schlug der Folienkondensator durch. Auf den Verdacht hin, daß der Kondensator durch die hohe Unterbrecherfrequenz überlastet wurde, baute ich einen zweiten Kondensator und eine Serienfunkenstrecke, einen RQ-Gap. Die mit dieser Konfiguration erzielten Ergebnisse waren jedoch unbefriedigend. **Streamerlänge: ca. 35cm**
- Als Primärkapazität dienten nun wieder Salzwasserkondensatoren, und der "Flexigap" wurde konstruiert, da das Quenchingverhalten von RSG 1 zu wünschen übrig ließ. **Diese neue Funkenstrecke lieferte nun sehr energiereiche Streamer mit einer Länge von bis zu 50cm.**
  - Der Styroporkern-Torus wurde durch einen Aluflex-Torus ersetzt.

**Streamerlänge: bis zu 60cm. Entladungen gegen Erde: bis zu 80cm.** Diese Konfiguration wird im Folgenden als K2 bezeichnet.



*Abb.29: Komplettansicht des Tesla-Generators K2*

Kurzzeitig wurde mit einer Hochspannungsversorgung gearbeitet, die aus mehreren Zeilentransformatoren aus Fernsehgeräten bestand, dieses Design entpuppte sich jedoch als wenig leistungsfähig, deshalb wird hier nicht näher darauf eingegangen.

## **5. Betrieb des Tesla-Generators**

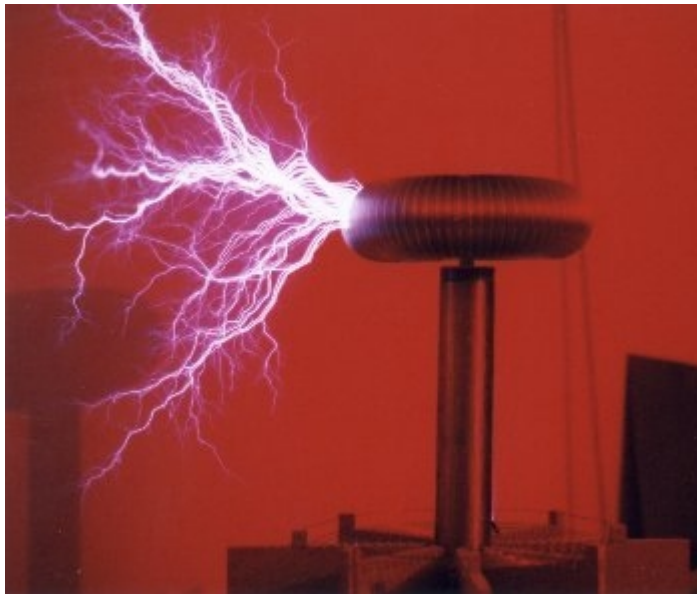
### **5.1. Abstimmung**

Damit der Tesla-Generator die maximale Ausgangsspannung erzeugt, müssen Primärkreis und Sekundärkreis dieselbe Resonanzfrequenz besitzen. Da die Resonanzfrequenz der Sekundärspule kaum noch veränderbar ist, und der Primärkondensator ebenfalls einen festen Wert besitzt, muß zur Abstimmung des Tesla-Generators die Windungszahl der Primärspule verändert werden. Während die innerste Windung üblicherweise fest mit dem Primärkondensator verdrahtet ist, kann der zweite Anzapfpunkt über eine Krokodilklemme abgegriffen werden. Zur Überwachung der Ausgangsspannung wird auf die Toruselektrode eine Nadelelektrode gelegt, dann wird der Anzapfpunkt solange variiert, bis die Streamer an der Nadelelektrode ihre maximale Länge erreichen (während die Position der Krokodilklemme verändert wird, muß der Hochspannungstransformator natürlich ausgeschaltet sein!).

### **5.2. Experimente mit den hochfrequenten Entladungen**

Mit einem Tesla-Generator lassen sich viele lehrreiche und faszinierende Versuche mit hochfrequenter Hochspannung durchführen. In diesem Kapitel sollen einige dieser Versuche beschrieben werden. Einige dieser Versuche wurden mit einer leistungsschwächeren Version des Tesla-Generators (K1) durchgeführt, da es sonst zur Zerstörung der Versuchsobjekte gekommen wäre.

#### **5.2.1. Streamer**



*Abb.30: Streamer; die Hintergrundfarbe kommt durch eine rote Glühbirne zustande (K2)*

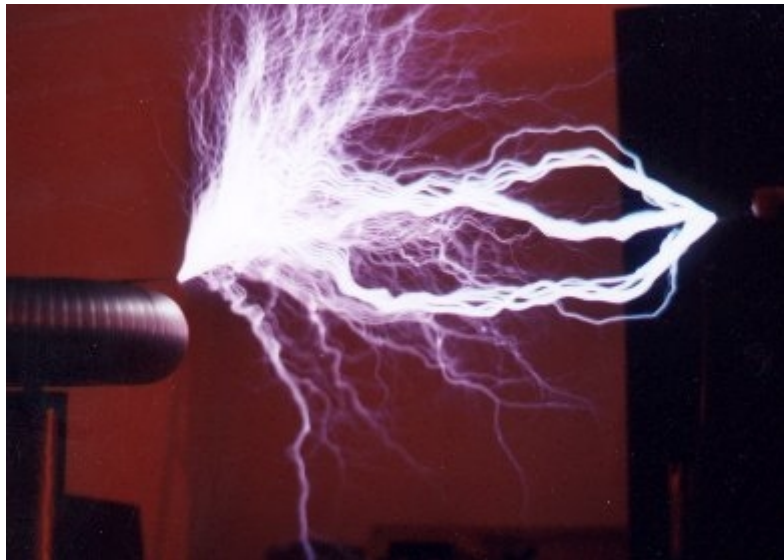
Die sowohl ästhetischsten als auch imposantesten Effekte, die mit einem Tesla-Generator erzeugt werden können, sind Streamer. Diese in Kapitel 2.2.2. näher erläuterten Koronaentladungen sind wohl der Grund für die Faszination "Eingeweihter" an Tesla-Generatoren.



*Abb.31: Hier dient der Styroporkern-Torus als Entladungs Elektrode (K2)*

### **5.2.2. Entladungen gegen Erde**

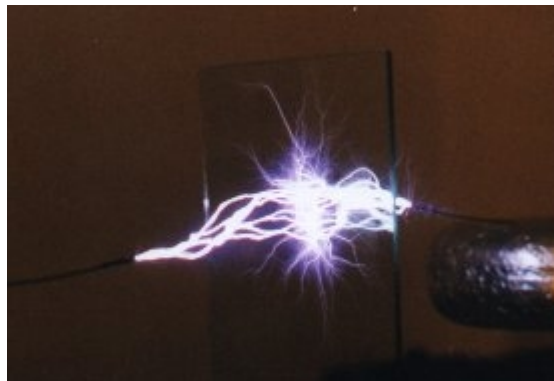
Erstaunlicherweise sind Entladungen gegen geerdete Elektroden nur ca. 20-50% länger als Streamer, jedoch wesentlich lichtstärker.



*Abb.32: Entladung gegen Erde (K2)*

### 5.2.3. Durchdringung von Isolatoren

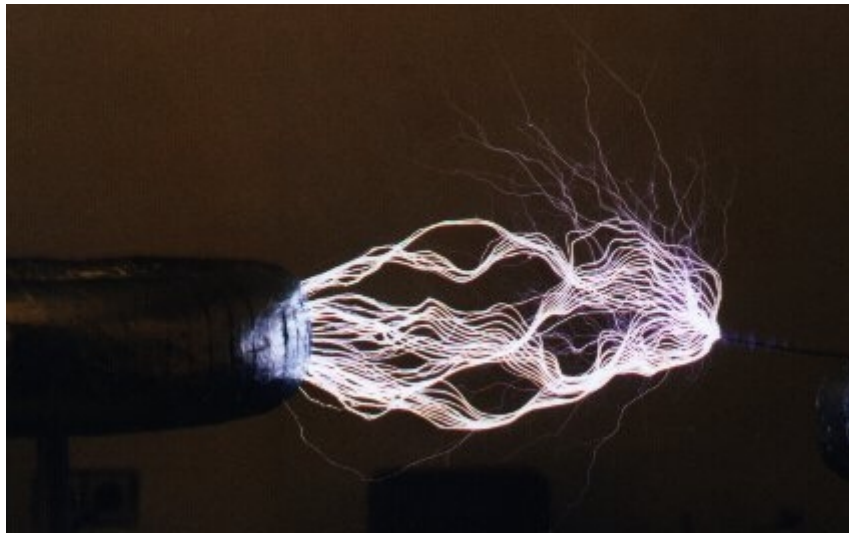
Die Hochfrequenzströme ermöglichen auch die Durchdringung von Isolatoren, es entsteht gewissermaßen ein Kondensator, bei dem der Isolator das Dielektrikum, und das sich an beide Seiten des Isolators anschmiegende Plasma die Platten bildet.



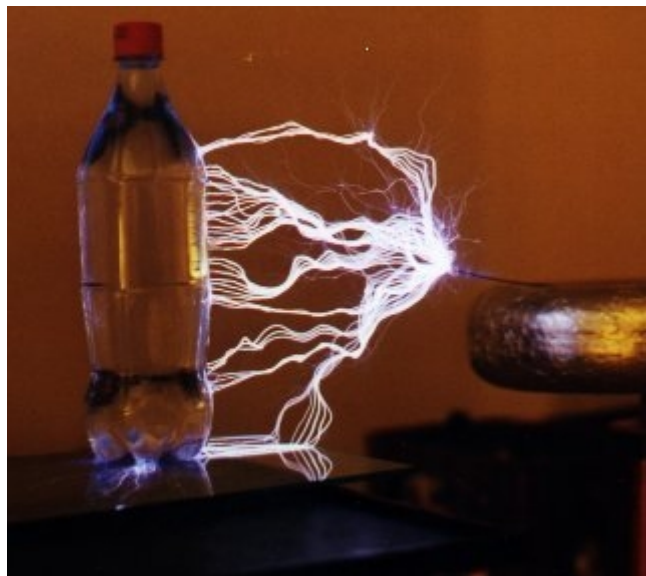
*Abb. 33: Durchdringung einer Glasplatte durch den Hochfrequenzstrom - die Glasplatte erwärmt sich bei diesem Versuch merklich (K1)*

Überschläge auf isoliert im Raum stehende, elektrisch leitende Gegenstände (P Kapazitäten) offenbaren ein sehr ästhetisches Aussehen, da das Plasma ähnlich einem Lichtbogen nach oben steigt. Weil der Entladungskanal während der Impulspausen soweit abkühlt, daß kein Licht mehr emittiert wird, durch seine hohe Temperatur aber emporsteigt, und bei der nächsten Kondensatorentladung wieder zum Leuchten angeregt wird, entsteht auf Fotografien der sog. Banjo-Effekt.





*Abb.34: "Banjoentladung" auf eine ungeerdete Toruselektrode (KI)*



*Abb. 35: "Banjoentladung" auf eine wassergefüllte Kunststoffflasche (KI)*

#### **5.2.4. Anregung von Gasentladungslampen**

Tesla-Generatoren eignen sich mit ihrer Hochfrequenten Ausgangsspannung auch besonders gut, um Gasentladungslampen zum Leuchten zu bringen, sogar Glühbirnen lassen sich als Gasentladungslampen "Mißbrauchen"



*Abb.36: Eine auf dem Entladungsterminal platzierte Neonröhre ergibt einen Interessanten Beleuchtungseffekt (KI)*

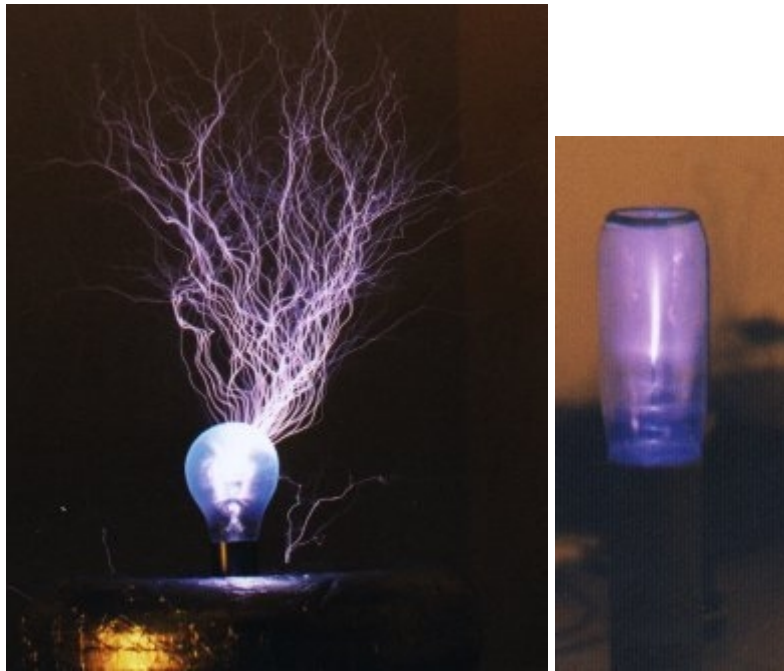


Abb.37: Eine Glühbirne wird zu interessanten Leuchterscheinungen angeregt (K1)      Abb.38: Eine mit Luft gefüllte und auf 60mBar evakuierte Glasflasche (K1)

### 5.2.5. Berührung des Hochspannungsterminals

Erstaunlicherweise ist die Ausgangsspannung des Tesla-Generators relativ ungefährlich. Da Nerven und Muskeln auf Frequenzen ab ca. 20kHz nicht mehr reagieren können, bewirkt die Berührung eines laufenden Tesla-Generators weder Schmerzen noch Muskelkontraktionen.

Bei Berührung eines Tesla-Generators muß allerdings ein metallischer Gegenstand in der Hand gehalten werden, da es bei direkter Berührung des Plasmas mit der Haut zu schwer heilenden, tiefen Verbrennungen kommt, außerdem mußten schon einige Tesla-Generator-Experimentatoren die Erfahrung machen, daß eine direkte Entladung zur Haut sehr wohl schmerzhaft ist. Über die Gründe dieses Phänomens wird noch gerätselt. Dieser "Stunt" birgt aber auch noch andere Gefahren:

- Eine zusätzliche Entladung von der Toruselektrode zur Primärspule würde eine leitende Verbindung zwischen Körper und Primärkreis schaffen, was zu einem lebensbedrohlichen Elektroschock führen würde
- Eine von Körper ausgehende Entladung könnte eine Netzleitung treffen, was ebenfalls zu einem Elektroschock führen würde (es wird berichtet, daß es dadurch schon zu einem Todesfall gekommen ist)
- Eine nicht optimal getunte Tesla-Spule erzeugt neben der Hochfrequenzschwingung auch niederfrequente Schwingungen, die zwar nur zu einen schwachen Elektroschock führen würden, eine durch den Schock ausgelöste Muskelkontraktion könnte jedoch zur Berührung der Primärspule führen
- Der durch den Körper fließende Strom nimmt den Weg des niedrigsten Widerstandes – Nerven und Muskeln - die durch die hohe Leistung überhitzt werden können.

[VIII]

## 5.3. Gefahren des Tesla-Generators

### 5.3.1. Elektrische Gefahren

Während der Ausgangsstrom eines Tesla-Generators, wie bereits erwähnt, relativ harmlos ist, besitzen schon die Hochspannungsversorgungen kleiner Tesla-Generatoren tödliches Potential. Daher dürfen Modifikationen am Tesla-Generator keinesfalls durchgeführt werden, wenn sich

dieser im Betrieb befindet.

### **5.3.2. Ozon und Stickoxide**

Bei allen elektrischen Entladungen in Luft entstehen Ozon und Stickoxide. Wegen der kurzen Betriebsdauer entstehen dadurch im allgemeinen keine gesundheitlichen Gefahren, jedoch klagen manche Experimentatoren über Kopfschmerzen die durch das Reizgas Ozon verursacht werden.

### **5.3.3. Lärm**

Schon die Entladungen kleiner Tesla-Generatoren können sehr lautstark sein, um keine bleibenden Gehörschäden zu riskieren, muß ein Gehörschutz getragen werden.

### **5.3.4 Funkstörung**

Da Tesla-Generatoren den prinzipiellen Aufbau früherer Knallfunkensender besitzen, rufen sie Funkstörung hervor. Da sie allerdings nicht über eine Antenne verfügen, bleiben diese Störungen im Normalfall gering.

### **5.3.5. UV-Strahlung**

Die Entladungen in der Funkenstrecke produzieren ähnlich wie Lichtbogenschweißgeräte intensive UV-Strahlung, sie darf daher nicht mit dem bloßen Auge beobachtet werden.

### **5.3.6. Röntgenstrahlung**

Wie Versuche ergaben, produzieren Tesla-Generatoren keine Röntgenstrahlen in meßbaren Dosen.

Werden jedoch evakuierte Gefäße in die Nähe der Tesla-Spule gebracht, kann es sehr wohl zur Emission von Röntgenstrahlung kommen.

[Sinngemäß nach [XIII]]

## **6. Anwendungen von Tesla-Generatoren**

"Warum baut jemand etwas, das nur große Blitze macht? Das ist eine schwierige Frage. Frag' einen Golfer, warum er Golf spielt. Ich baue sie, weil es mir gefällt, die benötigten Geräte zu konstruieren, und mit Hochspannung zu experimentieren." [Zitat [IX]/Übersetzung aus dem Englischen]

In der Tat ist der Bau eines Tesla-Generators eine interessante Herausforderung, und wird mit einem imposanten Blitzgewitter belohnt. Nebenbei stellen diese interessante und lehrreiche Versuchsobjekte dar, an denen physikalische Prinzipien wie Resonanz, dielektrische Durchdringung, Koronaentladung, elektromagnetische Felder, usw. verdeutlicht werden können. Ein weiteres Einsatzgebiet von Tesla-Generatoren ist die Erzeugung von Special Effects für Film und Fernsehen, da Blitze mit Computern nicht realistisch simuliert werden können. Tesla-Generatoren fanden Einsatz in Filmen wie "Terminator I", "The Entity" oder "Freitag der Dreizehnte VI". In Serien wie "Hulk" oder "Kampfstern Galactika" und Musikvideos wie "Too Hot!" von Coolio. Auch in Theme-Parks wie dem Disney-World wurden Tesla-Generatoren installiert.

## **7. Ausblick**

Obwohl seit der Erfindung des Tesla-Generators neue Werkstoffe entwickelt wurden, hat sich an seinem Grundprinzip nichts verändert. Zwar wurden schon mehrere Elektronenröhren- und MOSFET-betriebene Tesla-Generatoren gebaut, jedoch arbeiten diese im Gegensatz zu "normalen" Tesla-Generatoren nicht im Impulsbetrieb, sondern erzeugen ein Hochfrequenzsignal mit konstanter Amplitude, und können deshalb bei gleicher Eingangsleistung nie mit den Entladungen des Originaldesigns konkurrieren. Obwohl die meisten Menschen mit dem Begriff "Tesla-Generator" nicht besonders viel anfangen können, ist der Bau dieser Apparaturen ein sich verbreitendes Hobby, so hat sich im Internet eine regelrechte Subkultur gebildet.

[VIII]



## 8. Anhang

### 8.1. Fachwörterverzeichnis

Da sich die Tesla-Szene hauptsächlich auf den englischsprachigen Raum beschränkt, ist ein Tesla-spezifisches Arsenal von Abkürzungen und Fachausdrücken entstanden, die sich teilweise nur schwer ins Deutsche übersetzen lassen. Deshalb wird hier ein Überblick über die in meiner Facharbeit benutzten Ausdrücke gegeben.

MOT : Microwave Oven Transformer	Hochspannungstransformator aus Mikrowelle
Gap	Funkenstrecke
RQ-Gap	Serienfunkenstrecke aus mehreren parallelen Kupferrohren
Streamer	Tesla-Generator-Spezifische Koronaentladung, ein "in der Luft hängender" Blitz
Quenching	Die Eigenschaft einer Funkenstrecke, einen Funken wieder zum Verlöschen zu bringen
Strikerail	Über der Primärspule angebrachter, geerdeter Draht, der Überschläge von der Sekundärspule auf die Primärspule verhindert
Levelshifter	Eine Art Spannungsverdoppler, bestehend aus einem Kondensator und einer Diode
Stepped Leader	Eine Art Koronaentladung "Vorblitz"
Mailinglist	Internet-Diskussionsforum

### 8.2. Videofilm

Über den in dieser Facharbeit beschriebenen Tesla-Generator wurde ein Videofilm angefertigt:

- Szene 1: Hier ist der erste Versuchsaufbau von K2 zu sehen. Transformatoren und Levelshifter sind noch nicht auf ein gemeinsames Grundbrett montiert, außerdem wurde ein zusätzlicher Salzwasserkondensator verwendet. Die dafür benötigte, extrem kleine Primärspule konnte jedoch kein ausgedehntes magnetisches Feld erzeugen, deshalb wurde der Kondensator später entfernt. Ebenfalls zu sehen ist eine experimentelle Primärspule.
  - Szene 2: Streamerentladung
- Szene 3: Hier wurde ein Metallprofil auf den Torus gelegt, an dessen Ende sich wegen der hohen Feldstärke bevorzugt Streamer bilden
  - Szene 4: Überschläge zu einer geerdeten Elektrode
  - Szene 5: Entladungen zu einem isoliert stehenden Torus
- Szene 6: Hier wurde ein geerdeter Hartlötbrenner neben der Tesla-Spule aufgestellt, die ionisierten Verbrennungsgase ziehen dabei die Entladungen auf den Brenner
- Szene 7: Hier wurde ein Holzprofil auf den Torus gelegt, das binnen Sekunden zu brennen beginnt; verkohltes Holz und Feuer bilden dabei hervorragende Leiter
  - Szene 8: Eine auf den Torus liegende Neonröhre wird zum Leuchten angeregt
  - Szene 9: Hier wird die Argonfüllung einer Glühbirne zum Leuchten angeregt
    - Szene 10: Kapazitive Durchdringung einer Glasplatte
- Szene 11: "Special Effect" Durch einen Plüschhund wurde ein Draht geführt, der an seiner Schnauze endet, wo sich Streamer bilden
- Szene 12: Hier wurde eine wassergefüllte Kunststoffflasche auf den Torus plaziert, die Bodenfläche wird dabei durchdrungen, Streamer verlassen die Wasseroberfläche

- Szene 13: Eine Aufnahme der sich über der Tesla-Spule befindenden Deckenbeleuchtung, die Neonröhre wird durch das elektrische Feld des Tesla-Generators zum Leuchten angeregt
  - Szene 14+15: Hier wird die Ausgangsleistung der Mikrowellentransformatoren demonstriert: Nach einigen (leider etwas unscharfen) Aufnahmen von Lichtbögen folgt ein Versuch mit Hörner Elektroden
- Szene 15+16: Zwei Szenen aus "Terminator I": Hier sind spektakuläre Aufnahmen eines großen Tesla-Generators zu erkennen

### 8.3. Quellenanhang

#### 8.3.1. Bibliographie

[I]: vol 6, no. 4, "Power and Resonance", the "Journal of the International Tesla Society"

[II]: The Software Toolworks Multimedia Encyclopedia 1992 Edition Version 1.5

[III]: Beaty, William J., Sparks and Lightning,

<http://www.eskimo.com/~billb/tesla/spark.html>

[IV]: Anderson, Kerry/Canadian Forest Service/Edmonton, Alberta, Frequently Asked Question (FAQ) about lightning, [ftp://nofc.forestry.ca/pub/fire/docs/lfg\\_faq](ftp://nofc.forestry.ca/pub/fire/docs/lfg_faq)

[V]: Quick, Richard, Primary Coils, <http://www.eskimo.com/~billb/tesla/primary.txt>

[VI]: Quick, Richard, Toroids, <http://www.eskimo.com/~billb/tesla/toroid2.txt>

[VII]: Nährmann, Dieter, Das große Werkbuch Elektronik, CONRAD electronic Edition

[VIII]: Informationen, die in Newsgroups (Tesla-2 Mailing List" [tesla-2@emachine.com](mailto:tesla-2@emachine.com), GermanTeslaList [gtl@lists.uni-marburg.de](mailto:gtl@lists.uni-marburg.de), Tesla List [tesla@pupman.com](mailto:tesla@pupman.com), USA-TESLA [USA-TESLA@LIST.IEX.NET](mailto:USA-TESLA@LIST.IEX.NET)) gesammelt wurden, und teilweise in eigenen Experimenten bestätigt wurden

[IX]: Hammer, Mike, Frequently Asked Questions, 3. Then why build one?,

<http://www.misslink.net/mhammer/teslafaq.htm>

[X]: Quick, Richard, Tesla Capacitors, <ftp://nic.funet.fi/pub/sci/electrical/tesla/misc/caps1.txt.Z>

[XI]: Small, Dave, THE GREATEST HACKER OF ALL TIME, Current Notes magazine

[XII]: Behrendt, Matt, Formula Page, <http://members.aol.com/electronx/formulas.html>

[XIII]: Atkinson, Chip, TESLA COILS SAFETY INFORMATION,

<http://bhs.brook.k12.wv.us/homepage/CHIP/safety.htm>

#### 8.3.2. Quellennachweis der Abbildungen

Abb. 1: <ftp://nic.funet.fi/pub/sci/electrical/tesla/pictures/misc/tesla1.gif>

Abb.22 : <ftp://nic.funet.fi/pub/sci/electrical/tesla/misc/sparkgap.zip>

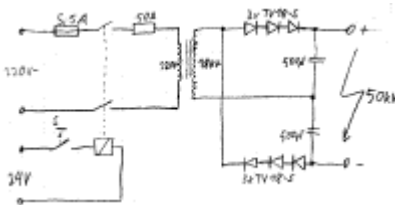
Abb.4: <http://www.seaox.com/graphics/light2.jpg>

# 50kV Spannungsverdoppler



Das ist der Aufbau einer Zweipuls-Verdopplerschaltung. Sie liefert eine Ausgangsspannung von maximal 50kV Gleichspannung. Wenn sich diese Spannung über einen Funken entlädt erzeugt er ein sehr lautes knatterndes Geräusch.

## Schaltungsbeschreibung



Der Aufbau des Hochspannungsgenerators geht aus dem Schaltplan hervor. Die Netzspannung wird über ein Schütz an den Hochspannungstrafo geschaltet. Dieser versorgt dann die eigentliche Verdopplerschaltung. Um bei Funkenbildung nicht gleich die Sicherung auszulösen, wurde ein Strombegrenzungswiderstand mit 50 Ohm in Serie zum Trafo geschaltet. Die Spannungsverdopplung arbeitet nach dem Zweipuls-Verfahren. Das bedeutet, dass beide Halbwellen ausgenutzt werden. In der positiven Halbwellen leiten die oberen Dioden und laden somit den oberen Kondensator auf den Spitzenwert der Wechselspannung (ca. 25kV) auf. In der negativen Halbwellen wird auf gleiche Weise der untere Kondensator geladen. Die Polarität ist hier aber genau umgekehrt zum oberen. Durch Serienschaltung der beiden Kondensatoren erreicht man schließlich die doppelte Spannung von 50kV.

**!! Achtung vor dem  
Nachbau !!**

Spannungen von 50 kV sind eine absolute Hochspannung und kein Spielzeug. Außerdem ist der Strom nicht auf ungefährliche Werte begrenzt, wodurch so ein Gerät eigentlich nur in einem Hochspannungslabor betrieben werden dürfte. Wer also nicht ganz genau weiß, was er tut, der soll sich ein ungefährlicheres Projekt für den Nachbau aussuchen. Wenn man schon unbedingt mit Hochspannung arbeiten will, ist zuerst der

Zeilentrafo eines Fernsehgerätes zu empfehlen. Denn wenn man von dem einige Male "gebissen" wurde, wird man vielleicht etwas vorsichtiger. Wem das bis jetzt noch immer nicht abschrecken konnte, der sollte zumindest den Steuerkreis so aufbauen wie hier beschreiben und immer einen ausreichenden Sicherheitsabstand zu dem Gerät einhalten. Selbst nach dem Abschalten können die Kondensatoren noch lange Zeit aufgeladen sein. Für eine präzise Spannungseinstellung empfiehlt sich der Bau des 40kV-Labornetzgerätes.

## Aufbau

Der Aufbau der Netzseite dürfte kein großes Problem darstellen. Als Strombegrenzungswiderstand kann ein alter Heizlüfter (1000W) verwendet werden. Es ist dabei gar nicht notwendig das Gebläse laufen zu lassen, da so hohe Ströme gar nicht erreicht werden. Als Schutz kann jeder Kleinspannungsschutz verwendet werden. Je höher die Durchschlagsfestigkeit auf die Steuerseite ist, umso größer ist die Sicherheit für den Bediener. Und das sollte einem schon einiges wert sein. Auf keinen Fall sollte für den Steuerkreis die gleiche Spannung (Netzspannung) wie für den Trafo verwendet werden. Auch müssen die Leitungen der Steuerung räumlich von hochspannungsführenden Leitern getrennt sein, damit auf keinen Fall ein Funke von der Hochspannungsseite auf die Steuerseite überspringen kann. Alle Hochspannungskomponenten (außer die Dioden) wurden selbst angefertigt, da sie im Allgemeinen schwer zu beschaffen sind.

### Aufbau der Kondensatoren:

Diese bestehen aus einer 4mm dicken Fensterscheibe mit 25x14 cm. Auf diese Scheibe wurde beidseitig je ein Stück Alufolie mit 22x11cm mittig aufgeklebt. Dazu kann man Epoxydharz verwenden, da es eine sehr hohe Durchschlagsfestigkeit hat.

Das ergibt dann etwa eine Kapazität von 500pF. Um diese Glasscheibe herum wurde noch ein Holzrahmen angefertigt und die Scheibe dann ebenfalls mit Epoxydharz eingeklebt. Wenn das dann alles getrocknet ist empfiehlt sich ein zweiter Anstrich mit Epoxydharz, wobei bis auf die Kontaktflächen alles bestrichen werden sollte. Die Kontaktierung erfolgt über zwei Blechstreifen, die in der Mitte der Alufolie beidseitig angepresst werden.

### Dioden:

Als Gleichrichterioden bieten sich solche aus Fernsehgeräten an. Bei etwas älteren Geräten sind diese noch nicht mit dem Trafo vergossen. Wenn man drei gleiche ausgeschlachtet hat, kann man diese ohne Probleme in Serie schalten. Da solche Dioden aus vielen kleinen Halbleiterscheiben bestehen, ist der Sperrstrom etwas höher gewählt. Deshalb wird kein Parallelwiderstand benötigt, der in Sperrrichtung die Spannung gleichmäßig aufteilt.

### Trafo:

Der Trafo ist ein EI-150 Kern, der in eine Sonderkonstruktion umgebaut wurde. Zuerst wurde die Isolation zwischen den beiden Spulenhälften abgetrennt, und so verschoben, dass die Primärkammer nur noch zwei 2cm breit war, in dieser Lage wurde dann alles mit Epoxydharz und Stoffbandagen verklebt, um die Isolierung wieder zu gewährleisten.

Durch diesen Umbau hat man für die Sekundärspule mehr Wickelfläche, und kann so auch mehr Isolation mitwickeln. Die Leistung des Trafos sinkt dadurch allerdings, da man einen geringeren Querschnitt für die Primärspule verwenden muss.

Die Primärwicklung besteht aus 680Wdg. mit 0,35mm Lackdraht.

Die Sekundärwicklung besteht aus ca. 60000Wdg mit 0,12mm Lackdraht. Alle 5000 Wdg. wurde eine Bandage getränkt mit Epoxydharz gewickelt, um Windungsüberschläge zu vermeiden. Weiters müssen die seitlichen Schlitze zur Ausführung der Drähte verklebt werden, da dort sonst Überschläge auftreten. Dazu kann man unkaschierte Leiterplatten verwenden.

Als Anschlussdrähte für die Sekundärwicklung eignen sich Hochspannungskabel aus

Fernsehgeräten, die meist eine sehr hohe Spannungsfestigkeit besitzen.

## Mögliche Versuche

Diese Anlage wurde eigentlich gebaut, um den Biefeld-Brown-Effekt nachzuweisen. Dieser besagt, dass ein geladener Kondensator sich im Gravitationsfeld der Erde in Richtung seines Pluspols bewegt. Ich vermute sogar, dass er in der Lage ist, die [Trägheit](#) oder das ihr zugrundeliegende Feld zu verändern. Dazu gibt es auf dem Patentserver auch die zugehörige [Patentschrift US 3,187,206](#), sowie auch seine legendären Flugscheiben unter [US 2,949,550](#). Für weitere Theorie zum Biefeld-Brown-Effekt siehe auch [The Borderlands Of Science - \(Anti-\) Gravity: The Biefeld-Brown-Effekt](#). Der Nachweis dieses Effektes ist wegen der elektrostatischen Kräfte und wegen des Ionenwindes schwierig, an einem frei im Raum hängenden Kondensator ist keine vernünftige Aussage möglich.



Erst wenn man den Kondensator, wie hier in einer Metalldose (Keksdose) montiert und diese erdet, ist jede Beeinflussung durch elektrostatische Kräfte und durch den [Ionenwind](#) ausgeschlossen. Für den Versuch wird sie natürlich auch noch oben verschlossen. Mit dieser Anordnung kam es auf der Waage, die immerhin noch 10mg auflösen kann, zu keinem Ausschlag !

Diese Form der Elektrogravitation unterscheidet sich grundlegend von dem viel bekannteren [elektrokinetischen Flugapparat \(auch Lifter genannt\)](#), der zum Antrieb auf jeden Fall einen Ladungstransport in der Luft benötigt. Laut dem Patent [US 2,949,550](#) ist dieser aber nur nötig, um den eigentlichen Effekt hervorzurufen, der Antrieb soll demnach nicht ausschließlich durch den Rückstoß in der Luft erfolgen. Diesen könnte man im [Hochvakuum](#) unter einer [Vakuumglocke](#) ausschließen, dadurch würde aber auch der Stromfluss, wie bei einem Vakuumkondensator, und somit auch der Ladungstransportmechanismus unterbrochen werden, der aber benötigt wird. Man könnte einen Stromfluss dann wieder mit einer Glühkathode, wie bei der [Röntgenröhre](#), erreichen, bei so hohen Spannungen käme es dann aber zwangsweise auch zur Erzeugung von Röntgenstrahlen.

Mit so einem Hochspannungsgenerator kann man viele weitere interessante Versuche durchführen. Dazu eignen sich vor allem die Demonstrationen, einer [Wimshurstmaschine](#) oder die eines Bandgenerators (Van de Graf).



An **einem** Pol des Generators wird ein drehbar gelagertes Metallrad angeschlossen, welches auf einem isolierten Ständer befestigt ist. Wird die Hochspannung eingeschaltet, so beginnt sich das Rad zu drehen.

Das Rad besitzt in Laufrichtung eine große Kante und gegen die Laufrichtung eine Spitze. Auf der Spitze entsteht eine Sprühentladung, die das Rad in Bewegung setzt. Die genaue Beschreibung dieses Effektes befindet sich im Patent Nr. 3,018,194 und ist viel komplexer als diese einfache Beschreibung. Es müssen nämlich die geladenen Luftmoleküle berücksichtigt werden, die im elektrischen Feld beschleunigt werden.



Dazu gibt es dieses Video, das zeigt wie das Rad mit steigender Spannung beschleunigt. Es sind keinerlei Sprühentladungen an den Spitzen des Rades zu entdecken, die einen Rückstoß erzeugen können. Die Beschleunigung erfolgt nur durch die Bewegung der Luftmoleküle im inhomogenen Feld an den Enden des Laufrades.



Die maximale Funkenlänge zwischen zwei Spitzen beträgt etwa 5cm. Wenn man das mit einer [Kugelfunkenstrecke](#) vergleicht, sieht man, dass die Spitzen etwas mehr aus den 50kV "herausholen". Die Sprühentladungen fördern einen Überschlag auch schon bei geringerer Spannung. Die Funken, die von dieser Anlage erzeugt werden, sind sehr laut. Das zeigt wie viel Strom dahinter steckt. Im Gegensatz zu HF-Lichtbögen sind sie nicht so heiß. Bei genügender Ladung aus den Kondensatoren können sie aber auch einiges leisten.



Das zeigt auch dieses Video, indem ein Loch in ein ca. 2cm dickes Buch gebrannt wird. Die Leistung kommt vor allem von den Kondensatoren, die sehr viel Energie speichern können. Man muss bedenken, dass sich die gespeicherte Energie ja quadratisch mit der Spannung erhöht. Dazu ein kleines Rechenbeispiel: Es werden 250pF eingesetzt, da die beiden Kondensatoren ja in Serie geschaltet sind, und sich die Gesamtkapazität deshalb halbiert.

$$W = \frac{C * U^2}{2} = \frac{250\text{pF} * (50\text{kV})^2}{2} = 0,3125\text{Ws}$$

Für einen 12V - Kondensator :

$$C = \frac{2 * W}{U^2} = \frac{2 * 0,3125\text{Ws}}{(12\text{V})^2} = 4340\mu\text{F}$$

Für 1kg Gewicht:

$$h = \frac{W}{m * g} = \frac{0,3125\text{J}}{1 * 9,81\frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 3,2\text{cm}$$

Zwei Stück Fensterglas speichern demnach bei 50kV dieselbe Energie, die ein 4340µF Kondensator bei 12V speichern kann. Wer schon einmal einen Ladeelko eines Netzteils kurzgeschlossen hat, wird das bestätigen können. Mit dieser Energiemenge könnte man aber eine Masse von 1kg nur 3,2cm hochheben.

Stellt sich die Frage was gefährlicher ist. Wenn einem ein 1 kg Gewicht von 3cm Höhe auf die Finger fällt, oder wenn einem ein 50kV Schlag trifft. (Bitte probieren Sie letzteres nicht aus !)

# 20kV aus einem Zeilentrafo

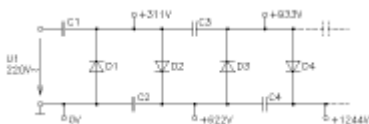


Jeder Bastler weiß, dass ein Fernseher so einiges an nützlichen Sachen zum Ausschlachten enthält. Besonders der Zeilentrafo ist ein sehr interessantes Objekt. Ohne Ansteuerung ist er aber wertlos. Es empfiehlt sich daher beim Ausbau etwas gezielter vorzugehen, um die dazugehörigen Bauteile und deren Beschaltung zu erhalten.

## Funktion

Im Fernseher wird der Zeilentrafo hauptsächlich zur Erzeugung der Horizontalablenkung benötigt. Da diese mit einer Frequenz von 15,625 kHz betrieben wird, ist er meistens als Trafo mit Ferritkern und kleinem Luftspalt ausgeführt. Durch die hohe Arbeitsfrequenz bietet sich aber noch eine andere Anwendung an. Die Bildröhre benötigt für die Nachbeschleunigung eine hohe Gleichspannung von 5...24 kV je nach Größe der Bildröhre. Die hohe Frequenz ermöglicht mit geringen Windungszahlen diese Spannung zu erzeugen. Zur Nachbeschleunigung wird eine positive Gleichspannung benötigt. Deshalb wird meistens eine Gleichrichterdiode in den Trafo mit eingegossen. Nur bei älteren Modellen kann diese noch diskret ausgeführt sein. Mit solchen Dioden kann man eine Spannungsverdopplerschaltung aufbauen.

Weiters kann der Zeilentrafo noch Potentiometer für die Helligkeit und den Fokus der Bildröhre enthalten. Mit diesen lässt sich eine kleine Spannung (einige kV) einstellen, die an den zusätzlichen Leitungen herausgeführt wird. Der Anschluss für die Nachbeschleunigung ist dagegen meist viel stärker isoliert, und somit leicht zu erkennen.



Viele ältere Fernsehgeräte haben nach dem Zeilentrafo oft eine so genannte Kaskade (=Villard-Schaltung) nachgeschaltet. Diese wird mit einer relativ geringen **Wechselspannung** (z.B.500V) vom Zeilentrafo versorgt, gleichgerichtet und vervielfacht. Wenn man die

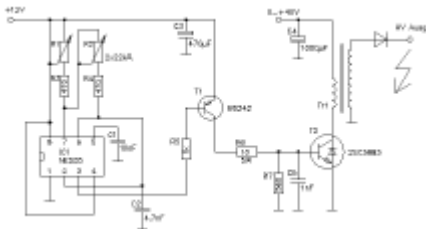


Zusammenschaltung mit dem Trafo beibehält, kann man auch diese verwenden.

Eine Villard-Schaltung ist eine Spannungsvervielfacherschaltung, die ähnlich arbeitet, wie die [Einpuls-Verdopplerschaltung](#) in einem [Mikrowellenherd](#). Die hier dargestellte Schaltung besteht im Prinzip aus 4 Einweg-Verdopplerschaltungen. Die negative Halbwelle der Wechselspannung  $U_1$  ( $=220V$ ) lädt den Kondensator  $C_1$  auf den Spitzenwert von etwa  $311V$  auf. Die folgende positive Halbwelle der Spannung  $U_1$  ist nun mit  $C_1$  in Serie geschaltet, so dass  $C_2$  jetzt über  $D_2$  auf etwa  $622V$  aufgeladen wird. Für die zweite Stufe der Schaltung gilt ähnliches, nur liegt für diese der Nullpunkt bereits an  $+622V$ . Das hat den Vorteil, dass alle Bauteile in der 2. Stufe nur mit der gleichen Spannung ( $622V$ ) wie in der 1. Stufe belastet werden.  $C_3$  wird in der negativen Halbwelle auf  $622V$  ( $=UC_2-UC_1+U_1$ ) aufgeladen,  $C_4$  in der positiven auf ebenfalls  $622V$ . Der Ausgang der Schaltung liegt an  $D_1, C_4$ . Dort kann gegenüber dem Nullpunkt eine Leerlaufspannung von etwa  $+1244V$  ( $=4 * 311V = 4$  stufige Schaltung) als Summe der beiden Stufen abgenommen werden.

Solche Schaltungen werden oft zur Erzeugung hoher Spannungen in Luftionisatoren oder Fliegenfängern verwendet. Unter Belastung sinkt die Spannung mitunter sehr stark ab, da die Kondensatoren über die vielen Stufen nicht so schnell nachgeladen werden können.

## Schaltungsbeschreibung



Die Schaltung zeigt einen Oszillator mit einem NE555. Das ist völlig ausreichend, da wir hier keine präzisen Ablenkspannungen erzeugen wollen. Über die beiden  $22k\Omega$  Potis kann die Frequenz bzw. das Tastverhältnis eingestellt werden. Mit diesen Einstellungen wird der Trafo auf max. Ausgangsspannung abgeglichen. Der Ausgang des Oszillators steuert einen BD242, der wiederum als Treiber für den Endtransistor (2SC3883) dient.

Dieser Typ besitzt eine eingebaute Freilaufdiode.

Der Trafo wird hier als Sperrschwinger betrieben. D.h. der Freilaufkreis bildet sich auf der Sekundärseite des Trafos über die Gleichrichterschaltung. Ist diese Last zu gering (das ist sie ohne Bildröhre meistens), können Überschläge an den anderen freien Wicklungen entstehen. Diese können durch geeignete Belastung (z.B. RC-Glied) verhindert werden.

Soll die Hochspannung einstellbar sein, so ist es zu empfehlen, zwei getrennte Stromkreise aufzubauen. Die Steuerspannung (hier  $12V$ ) bleibt immer konstant. Über die Versorgungsspannung des Trafos lässt sich dann die Hochspannung von Null weg einstellen. Dieses Prinzip wurde auch beim [40kV Labornetzgerät](#) eingesetzt. Eine Änderung im kleineren Bereich ist auch über das Tastverhältnis der Primärspannung möglich.

## Zum Nachbau

Wenn man den Zeilentrafo aus dem Fernseher ausbaut, sollte man sich die Anschlüsse für die Primärwicklung merken. Das ist dort, wo der Hochspannungs-Leistungstransistor angeschlossen ist.

Den sollte man am besten mit seinem Kühlblech auch gleich ausbauen, sofern er nicht defekt ist (ein häufiger Fehler in Fernsehgeräten). Meistens wird der Pluspol der Versorgung direkt an den Trafo geführt und der NPN-Transistor schaltet dann gegen Masse. Viele neue Geräte verwenden eine relativ niedrige Spannung im Primärkreis (z.B.  $38V$ ). Ein solcher Trafo ist bevorzugt zu verwenden, da dann die Spannungsversorgung leichter und ungefährlicher zu realisieren ist. Wenn man auch einen Treibertransistor auf der Platine entdeckt, so kann man diesen natürlich anstelle des

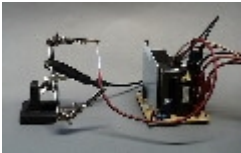
BD242 verwenden. Es empfiehlt sich überhaupt die gesamte Beschaltung um den Leistungstransistor herum direkt zu übernehmen, da diese auf den Trafo abgestimmt ist.

Steht hingegen nur ein bereits ausgebauter Zeilentrafo zur Verfügung, so muss man die Anschlüsse des Zeilentrafos nachträglich ausmessen. Wir gehen davon aus, dass ein moderner Zeiletrafo mit



eingebauter Diode und über 30kV Ausgangsspannung verwendet wird. Meist haben diese Trafos zwei Hochspannungsausgänge für die Vor- und Nachbeschleunigung, manchmal auch noch zusätzliche für die Fokussierung, verwendet wird nur der spannungsstärkere für die Nachbeschleunigung. Dazu geht man wie folgt vor:

1. Mit einem Durchgangsprüfer misst man zuerst alle Pins gegeneinander und markiert jene mit Durchgang als eine Wicklung.
2. Dann misst man die Induktivität jeder Wicklung (oder falls kein L-Meter zur Verfügung steht, nur den Widerstand), damit bekommt man eine Aussage über die Windungszahlen der Spulen. Je höher die Induktivität (und meist auch der Widerstand), umso mehr Windungen.
3. Als nächstes muss der Erdungspin der sekundären Hochspannungswicklung herausgefunden werden, er muss später unbedingt auf Masse gelegt werden. Dazu eignet sich am besten ein Isolationstester, der den Widerstand mit hoher Spannung von z.B. 500V misst. Die hohe Spannung ist notwendig, um die Durchlassspannung der Hochspannungsdiode zu überbrücken. Den negativen Pol schließt man am Hochspannungskabel des Zeilentrafos an und mit dem positiven Pol sucht man alle Pins nach einem Durchgang ab. Steht kein Isolationstester zur Verfügung, so kann auch eine hohe Gleichspannung von z.B. 300V mit einem entsprechend hohen Widerstand z.B. 100kOhm in Zusammenhang mit einer Strommessung verwendet werden. Höchste Vorsicht ist geboten, wenn man diese Spannung aus dem Netz gewinnt.
4. Hat man alle Anschlüsse ausgemessen, so geht es um den Anschluss an die Schaltung. Da diese nur mit 40V Betriebsspannung arbeitet und manche Zeilentrafos mit über 100V arbeiten, muss mit den Wicklungen etwas experimentiert werden. Die mit der höchsten Induktivität ist meist die Original-Primärwicklung und wegen der zu hohen Spannung oft nicht zu gebrauchen. Man beginnt also zunächst mit einer kleinen Wicklung und versorgt sie von der Steuerschaltung. Wichtig beim Anschluss an den Zeilentrafo ist auch die Polarität. Da die interne Diode nur eine Einweggleichrichtung ausführt und die hohe Spannung nur beim Abschalten der Wicklung entsteht, muss der Abschaltimpuls in positiver Richtung an die Diode gelangen. Es ist dann natürlich auch möglich, mehrere Primärspulen polrichtig in Serie zu schalten, um sie optimal an die Betriebsspannung anzupassen.



Die Funken, die damit erzeugt werden können, sind ca. 2cm lang. Diese Länge erreichen sie nur zwischen zwei Spitzen. Ein Vergleich mit der [Kugelfunkenstrecke](#) zeigt, dass dort 20kV nur einen 6mm langen Funken erzeugen würden. Das knatternde Geräusch bei der Entladung, ist charakteristisch für Gleichspannungsentladungen. Wechselfspannungen wie z.B. aus dem [Miniteslatrafo](#) erzeugen ein zischendes Geräusch.

Soll mehr Energie bei der Entladung frei werden, so muss ein Kondensator mit einigen pF parallel zur Hochspannung geschaltet werden. Im Fernseher erledigt das die Bildröhre meist selbst. Da sie außen mit Graphit leitend beschichtet ist, bildet sich ein Kondensator mit der Innenbeschichtung der Nachbeschleunigungselektrode.

## Versuch zum Faradaybecher

Wer sich noch kein [Elektroskop](#) gebaut hat, der kann auch nur mit Hilfe des Zeilentrafos den [Faradaybecher](#) Effekt nachweisen. Mit einem Elektroskop geht es aber viel eleganter und einfacher.



Ein Faradaybecher ist ein isoliert aufgestellter Metallbecher. Hier wurde ein 1/2l Küchenmaß vom [Kelvin-Generator](#) auf einen Keramikisolator gestellt. Mit der

graphitbeschichteten (Graphitspray) Styroporkugel an einem isolierenden Faden ist, es möglich, diesen Becher immer weiter aufzuladen, wenn man ihn im Inneren berührt. Der Becher kann so auf eine höhere Spannung aufgeladen werden, als der Zeilentrafo erzeugt, mit dem man die Styroporkugel immer wieder neu lädt.

Die Styroporkugel wird durch kurzes berühren der Kugel am Ausgang des Zeilentrafos geladen. Eine Kugel ist hier wichtig, da sonst die Spitze des Kabels vom Zeilentrafo die Ladungen in den Raum sprüht, und alles rundherum auflädt. Dann sieht man gar nichts mehr und erhält obendrein einen elektrischen Schlag, wenn man Metallteile berührt.

Ob die Styroporkugel geladen ist, sieht man sofort, wenn sie sich von der Generatorkugel abstößt (gleichnamige Ladungen). Ist sie ungeladen, kann man sie ohne Ablenkung der Generatorkugel nähern, ist sie geladen, versucht sie ihr hingegen auszuweichen.

Nähert man die so geladene Kugel jetzt dem vorher ebenfalls auf Generatorspannung aufgeladenen Becher, so spürt man die gleiche Abstoßung. Bringt man jetzt die Kugel von oben in den Becher, ohne diesen am Rand zu berühren, so kann man die Ladung der Kugel an den Becher abgeben, indem man ihn **weit im Inneren** mit der Kugel berührt. Sobald die Ladung abgegeben ist, ist die Kugel völlig ungeladen und es tritt auch keine weitere Ablenkung mehr auf. Beim Herausziehen der Kugel muss man wieder darauf achten, den Becher nicht am Rand zu berühren, da sonst die Kugel wieder geladen ist. Wenn man das richtig macht, ist die Kugel nachher genau so wenig geladen, wie am Beginn des Versuches. Man kann also die Kugel nie im Inneren des Bechers aufladen. An der Außenseite hingegen, funktioniert das genauso, wie bei der Generatorkugel.

Wenn man so den Becher oft genug "nachlädt", wird man feststellen, dass der Becher auf eine höhere Spannung aufgeladen ist, als sie der Zeilentrafo erzeugen kann. Ohne Elektroskop kann man das nur durch die Intensität und Länge der Funkenentladung des Bechers feststellen. Dazu sollte man sich vorher einmal einprägen, wie die Entladung mit Nennspannung des Zeilentrafos aussieht. Denn der Becher speichert nur sehr wenig Energie, so dass die Entladung viel leiser und mitunter auch kürzer ist, als die des Zeilentrafos.

Die zusätzliche Energie stammt natürlich aus den mechanischen Bewegungen (Ladungstrennung) der Kugel. Beim Eintauchen in den Becher muss mitunter eine relativ große Kraft überwunden werden, die eine leichte Styroporkugel schon zurückwerfen kann. Dieses Prinzip der Ladung eines Bechers durch viele kleine Ladungen wird beim Kelvin-Generator ausgenutzt, um hohe elektrostatische Spannungen zu erzeugen.

### Theoretischer Hintergrund




Der Grund für dieses merkwürdige Verhalten liegt darin, dass das Innere eines leitenden Körpers immer frei von elektrischen Feldern und somit auch frei von Ladungen ist. Die gesamte Ladung eines Körpers sitzt demnach nur an seiner Oberfläche ! Das soll nicht heißen, dass man den Becher innen mit der Erde kurzschließen kann, ohne dass er sich entlädt. Metalle sind immer noch leitend ! Er kann innen nur keine Ladungen abgeben, da sich eben alle Ladungen an seiner Außenfläche befinden. Das soll heißen, mit einer Kugel auf einem isolierten Stab kann man aus dem Inneren keine Ladungen abziehen. Die Kugel ist ungeladen, sobald man sie aus dem Becher zieht ! Nur durch eine Berührung an der Außenfläche kann die Kugel geladen werden.

### Vorschläge für weitere Versuche:

Mit diesem Hochspannungsgenerator habe ich versucht einen Elektret herzustellen. Das ist ein Isolationsmaterial, das immer ein elektrisches Feld erzeugt. Es ist sozusagen das elektrostatische Gegenstück zum Magneten. Dazu habe ich Wachs geschmolzen, und danach zwei Elektroden eingegossen. Während der Abkühlphase wird die Hochspannung angelegt. Leider war nach

Ausschalten der Hochspannung kein Wiederaufladen der Elektroden festzustellen. Vermutlich ist das Wachs nicht genug isolierend, um die Dipole in der ausgerichteten Lage festhalten zu können. Es müssen wahrscheinlich Kunststoffe verwendet werden, die hochisolierend sind. Epoxidharz wäre da ein guter Tipp.

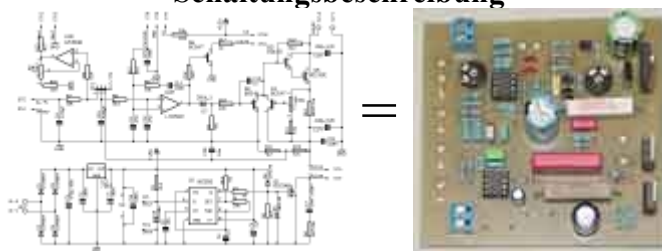
Elektrete sind sehr interessant, da sie immer wieder Ladungen "abgeben" können, ohne die Eigenladung zu verlieren. Das darf nicht unbedingt gleich als unmöglich angesehen werden. Der Elektret erzeugt ja nur ein elektrisches Feld. Wenn in dieses z.B. ein Platten-Kondensator eingebracht wird, so wird durch die Bewegung in das Feld die Ladung influenziert. Es wird also nur die mechanische Energie, nach einem unüblichen Verfahren, in Elektrische umgewandelt. 

# 40kV Labornetzgerät



Bei Versuchen mit der Röntgenröhre oder dem elektrokinetischen Antrieb ist es oft wünschenswert, auf eine stabilisierte Hochspannung zurückgreifen zu können. Für einfache Anwendungen reicht sicher ein unstabiler Zeilentrafo aus, aber mit etwas größerem Schaltungsaufwand ist es auch möglich, mit einem Zeilentrafo ein stabilisiertes Labornetzgerät aufzubauen. Dies ist eine preisgünstige Alternative zu professionellen Hochspannungsnetzgeräten, wie sie etwa von der Fa. Heinzinger angeboten werden.

## Schaltungsbeschreibung



Neben der bereits vom Zeilentrafo bekannten Oszillatorschaltung mit dem NE555 muss zusätzlich noch ein Spannungsregler hinzugefügt werden. Der PI-Regler, im oberen Schaltungsteil wird durch U2A gebildet. Über R12 erhält er vom Poti an ST7-ST9 den Sollwert der Spannung. Der Istwert kann mit JP1 von der normalerweise externen Hochspannungsmessung auf eine interne Messung (R20 und R21) an der Niederspannung umgeschaltet werden und ist für Testzwecke vorgesehen. Die Messspannung gelangt vom externen Hochspannungsteiler auf ST5 und ST6 und wird mit einer RC-Kombination von Störungen durch Funkenüberschläge bereinigt. Über R14 wird diese Spannung U2B zugeführt, der das Messgerät für die Hochspannungsanzeige an ST12 und ST13 versorgt. Mit P2 wird diese Anzeige kalibriert.

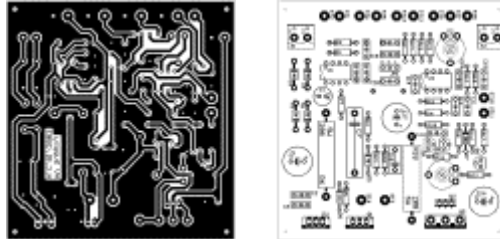
Der Ausgang von U2B treibt über die Zenerdiode D7 den linearen Spannungsregler, der die 45V Betriebsspannung, von X2 kommend, regelt. Q2 dient als Trenntransistor für die hohe Spannung

und Q3 als Treiber für den Längsregeltransistor Q5. Über R18 wird der primäre Strom in den Zeilentrafo an ST3 und ST4 gemessen und über Q4 erfolgt eine Strombegrenzung, die mit P1 eingestellt werden kann.

Über die durch D7 hervorgerufene, sprunghafte Änderung der Spannung am Ausgang von U2B wird mit Q6 ausgewertet, ob das Gerät eine konstante Spannung abgibt, oder ob es sich in der Strombegrenzung befindet. Das wird mit der LED an ST10 und ST11 angezeigt.

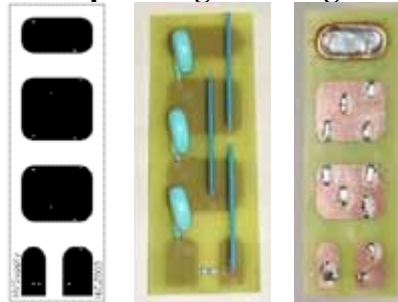
Der untere Schaltungsteil enthält die interne Spannungsversorgung mit dem +15V Regler IC1. U1 bildet den Oszillator zur Steuerung des Zeilentrafos. Er arbeitet etwa mit 18kHz. Durch Schließen von ST1 und ST2 kann der Oszillator deaktiviert werden. Über R4 wird direkt der MOSFET Q1 gesteuert, der die Primärseite des Zeilentrafos schaltet. R6 und C7 bedämpfen die Schaltspitzen.

### Layout



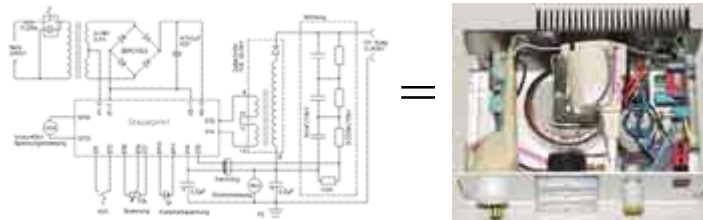
Das Layout der Steuerschaltung wird auf eine einseitige Platine mit 90x88mm geätzt. Das Layout zeigt die Sicht von der Bauteilseite aus, weiße Flächen werden weggeätzt.

### Externe Hochspannungsmessung und Glättung



Das Layout der Glättung wird auf eine einseitige Platine mit 40x127mm geätzt. Sie wird mit den Hochspannungbauteilen 3x 330M $\Omega$ /15kV, 3x 1nF/15kV, sowie einem normalen 100k $\Omega$  Widerstand bestückt. Beim Löten ist darauf zu achten, dass alle Anschlüsse umgebogen werden und die Schnittkanten an den Drahtenden ebenfalls verlötet werden, damit es zu keinen Sprühentladungen an den Spitzen kommt. Der 40kV Anschluss wird zusätzlich noch mit einem 2,5mm<sup>2</sup> Kupferdraht eingefasst, um Sprühentladungen an den Rändern zu vermeiden.

### Gesamtaufbau



Die Netzversorgung übernimmt ein 80VA Ringkerntrafo mit 2x18V Ausgangsspannung. Über den Brückengleichrichter und den Glättungskondensator wird die Steuerprint versorgt. Erfolgt die Versorgung wie hier über einen Netztrafo mit Mittelpunkt, dann können die Dioden D1 und D4 auf der Steuerprint durch Drahtbrücken ersetzt und D2 und D3 weggelassen werden. Der Anschluss des Mittelpunktes erfolgt dann auf X1-2, der Hauptgleichrichter übernimmt dann ebenfalls die Versorgung der Steuerung.

Das Netzgerät wird in ein Alu-Gehäuse mit 235x100x150mm eingebaut. Auf der Rückseite wird ein Kühlkörper mit 150x75x25mm montiert und die Transistoren Q1, Q5 und IC1 werden darauf mit Glimmerscheiben isoliert aufgesetzt.

Die gesamte Glättung mitsamt der Ausgangsbuchse und dem Anschlusskabel vom Zeilentrafo wird zum Schutz vor Überschlägen mit Epoxyharz und Glasfasermatten als Träger eingegossen. Die Ausgangsbuchse besteht aus einem 30mm dicken Kunststoff, indem die 4mm Buchse mindestens 40mm tief versenkt montiert werden sollte.

Am Zeilentrafo eventuell vorhandene Kabel für die Vorbeschleunigung werden abgeschnitten und ausreichend isoliert, um Überschläge zu vermeiden. Je nach Type des verwendeten Zeilentrafos kann es nötig sein, mehrere Wicklungen in Serie zu schalten, um ihn optimal an die Versorgungsspannung anzupassen. Zum Ausmessen der Wicklungen bei einem unbekanntem Zeilentrafo siehe Beschreibung beim [Zeilentrafo](#).

Sehr wichtig bei dieser Schaltung ist eine saubere Erdung, was durch den Einbau in ein Metallgehäuse unterstützt wird. Da die Hochspannung auf Erde bezogen ist und man ja auch mit Funkenüberschlägen rechnen muss, kann es bei schlechter Erdung vorkommen, dass sich das Potential der Schaltung anhebt und dadurch Bauteile zerstört werden. Die beiden 2,2µF Kondensatoren, wovon einer direkt am Amperemeter und der andere direkt an der Schaltungsmasse auf Erde geschlossen werden soll, verhindern ein sprungartiges Ansteigen des Potentials bei Überschlägen. Hierfür sollten richtige Kondensatoren, keine Elkos, mit niedriger Induktivität verwendet werden. Der Ferritring verhindert zusätzlich noch hochfrequente Einkopplungen über die Messleitung in die Schaltung.

### **Abgleich**


Eine wichtige Einstellung ist die Strombegrenzung zum Schutz des Zeilentrafos im Kurzschluss.

Diese erfolgt mit P1 und sollte so eingestellt werden, dass je nach Größe des verwendeten Zeilentrafos etwa 1,5A im Kurzschluss fließen. Dazu schließt man z.B. eine 12V/50W

Halogenlampe von ST3 direkt auf Masse an und misst den Strom in ihr. Der Zeilentrafo wird abgeklemmt und die Regelung muss mit JP1 auf interne Messung umgeschaltet werden. Wenn dann die Spannung langsam hochgeregelt wird, muss die Strombegrenzung spätestens bei 2,5A einsetzen. Das Einsetzen der Strombegrenzung muss durch Erlöschen der LED an ST10 und ST11 signalisiert werden.

Zur Eichung der Spannungsanzeige ist ein Hochspannungstastkopf sehr hilfreich. Die Spannung wird im Leerlauf hochgeregelt und mit P2 wird der Anzeigewert kalibriert. Wer keinen Hochspannungstastkopf zur Verfügung hat, kann auch über das etwas krumme Übersetzungsverhältnis 990MΩ zu 100kΩ der Messung auf die Spannung zurückrechnen. 40kV entsprechen 4,04V am 100kΩ Widerstand.

Je nach Type und Leistung des verwendeten Zeilentrafos muss eventuell der Einstellbereich der Spannung mit R13 angepasst werden. Bei zu geringer Leistungsabgabe kann auch noch das Tastverhältnis des Oszillators durch Vergrößern von R2 bzw. durch Verkleinern von R1, um die Frequenz konstant zu halten, erhöht werden. Zur Abschätzung der maximal möglichen Ausgangsspannung eines Zeilentrafos kann JP1 auf interne Messung gesteckt werden, dann fährt der Regler bis zur Sättigung von Q5 die Spannung hoch.

Ein solches Netzgerät bietet eine sehr gute Spannungsversorgung für viele Hochspannungsversuche, bei denen auch eine gewisse Leistung benötigt wird. Dieses Gerät kann immerhin 1mA bei 40kV bereitstellen, was einer Leistung von 40W entspricht. Ein weiterer Vorteil gegenüber professionellen Netzgeräten ist der variable Maximalstrom. Bei geringeren Spannungen können bis zu 5mA entnommen werden, was sich gut mit den Anforderungen der meisten Versuche deckt. 



# Trägheit

Ich finde, es herrscht allgemein eine falsche Auffassung von Trägheit. Im Physikbuch steht, dass die Trägheit (engl. Inertia) die Fähigkeit eines Körpers ist, seine Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung ohne äußere Krafteinwirkung beizubehalten. Das ist das 1. Newton'sche Axiom und das lernt jeder Schüler in Physik, daher muss es wohl so sein.

Doch dieser Satz ist nur eine Feststellung, die nicht die wahren Zusammenhänge erklären kann. Wenn sie es versuchen, passiert folgendes: *Was befähigt einen Körper dazu seine Geschwindigkeit und Richtung beizubehalten ? - Die Trägheit natürlich ! - Und was ist die Trägheit ? - Die Fähigkeit eines Körpers, seine Geschwindigkeit und Richtung.....* Das ist ein gedanklicher Kurzschluss, der eigentlich nicht unserem logischen Denken entspricht !



Bei den Betrachtungen von trägen Massen geht es letztendlich um ein Phänomen der Energiespeicherung. Beschleunigt man einen Körper, so nimmt er die Energie des Antriebes auf, bremst man ihn ab, so gibt er diese Energie wieder frei. Interessant ist in diesem Zusammenhang auch, dass man wegen der quadratischen Beziehung zwischen Geschwindigkeit und Bewegungsenergie bei einem schnellen Körper mehr Energie braucht, als bei einem langsamen, um beide jeweils um den gleichen Geschwindigkeitsbetrag zu beschleunigen, aber das nur so am Rande.

Damit beim Beschleunigen Energie umgesetzt werden kann, muss klarerweise eine Kraft wirken, die Trägheitskraft eben. Doch wogegen stützt sich diese Kraft ab ? Wenn wir Gegenstände auf der Erde beschleunigen, haben wir immer die riesige Masse der Erde als Gegenpol, welche die Gegenkraft anstandslos aufnimmt, ohne ihre Geschwindigkeit messbar zu verändern. Doch das kann nur gehen, wenn sich die Massen ihrerseits wiederum gegen den Hintergrund abstützen und sozusagen eine äußere Brücke für die Gegenkraft bilden. Jede Kraft, bedingt eine gleich große Gegenkraft, das ist auch ein Newtonsches Axiom, aber wogegen wirkt sie im Falle der Trägheit ?

Viele denken, die Trägheit kommt durch die Gravitation zustande. Wenn dem so wäre, müsste unter Schwerelosigkeit auch die Trägheit verloren gehen. Dem ist aber nicht so. Ein Raumfahrer im Weltall muss sich auch mit Kraft von der Wand des Raumschiffs abstossen, um sich in Bewegung zu setzen. Auch Raketen im freien Raum benötigen Antriebsleistung, um zu beschleunigen und das Rückstoßprinzip würde ohne Trägheit gar nicht funktionieren. Wenn nämlich, die aus der Düse ausgestoßenen Gase, trägheitslos davonfliegen würden, käme das Raumschiff gar nicht von der Stelle. Die Antriebsenergie wird also einerseits in der trägen Masse des Raumschiffes und andererseits in der trägen Masse der ausgestoßenen, schnell fliegenden, Treibstoffteilchen gespeichert. Beide bewegen sich in entgegengesetzter Richtung auseinander. Das Raumschiff macht sich also nur die Massenträgheit des Treibstoffs zunutze, um sich davon abzustoßen. Das ist eigentlich ein sehr uneffizientes Verfahren, man kann nur versuchen, dem ausgestoßenen Treibstoff eine möglichst hohe Geschwindigkeit mitzugeben, damit nur eine geringe Masse verbrannt und vor allem ja auch mitgeführt werden muss.

Es stellen sich jetzt zwei Fragen: Einerseits, woraus besteht dieser Hintergrund, der für alle Trägheiten die Referenz bildet und andererseits, wie die Kraftwirkung zu den Massen übertragen wird. Letztere könnte man noch relativ einfach mit einem Feldbegriff erklären, wie das beim elektrischen und magnetischen Feld üblich ist. Ich möchte hier einmal von einem Trägheitsfeld sprechen, auch wenn es diesen Begriff bis jetzt noch nicht in der Physik gibt. In diesem Zusammenhang denke ich auch, dass es möglich ist, ein solches Feld künstlich aufzubauen, wie das vielleicht beim Biefeld-Brown-Effekt geschieht, der die Trägheit und die Gravitation beeinflussen oder sogar aufheben kann.



Das Zusammenspiel von Trägheit und Gravitation im freien Raum ist aus der Astronomie gut bekannt. Die Trägheit der Massen führt dazu, dass sich Objekte in kreisförmigen Bahnen um einen Gravitationspol herumbewegen und in den meisten Fällen eine stabile Lage einnehmen, bei der sich die Fliehkraft (=Trägheitskraft) und die Gravitationskraft die Waage halten. In einem trägheitslosen Universum würden alle Massen sehr schnell in sich zusammen stürzen. Trägheit und Gravitation sind Energiespeicher für Bewegungs- bzw. Lageenergie. Es bietet sich ein Vergleich mit der Elektrotechnik an. Das Anheben eines Körpers im Gravitationsfeld kann mit dem Laden eines Kondensators verglichen werden, ebenso wie das Beschleunigen eines Körpers mit der Energiezufuhr an eine Induktivität verglichen werden kann. Trägheit und Gravitation stehen demnach in einem ähnlich gegensätzlichen Verhältnis zueinander, wie Spule und Kondensator. Aus der Elektrotechnik ist bekannt, dass ein System aus Spule und Kondensator zu Schwingungen fähig ist. Man könnte daher sagen, die Kreisbahnen von Massen im Universum sind nichts anderes, als die Schwingung, welche in dem System zwischen Bewegungs- und Lageenergie entsteht. Das zeigt in etwa, wie mit Trägheit und Gravitation umzugehen ist. Sie sind beide grundsätzlich verschieden, haben aber eine gemeinsame Ursache.

Wie aus dem Gedankenexperiment auf der Kreisel-Seite mit der Frage "Was dreht sich wirklich" hervorgeht, besitzt jede Bewegung einen absoluten Bezugspunkt, der durch die Summe aller Massen im Universum gebildet wird. Haben wir einen Körper im völlig freien Raum, so können wir weder seine Geschwindigkeit, noch irgendeine Geschwindigkeitsänderung angeben, die eine Beschleunigung bedeuten würde. Es geht sogar soweit, dass wir den Körper nicht einmal mehr beschleunigen könnten, weil die Kräfte z.B. eines Triebwerkes keinen Rückstoß mehr auf die ruhenden Massen haben. Das Trägheitsfeld, als Übermittler dieses Bezuges, muss demnach von allen Massen im Universum gemeinsam erzeugt werden.

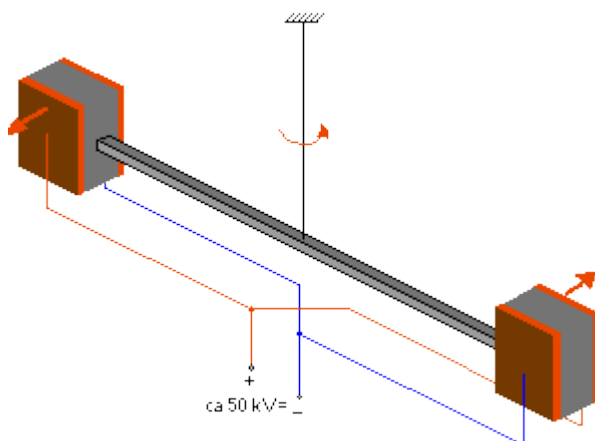
# Der Biefeld-Brown-Effekt

Der Biefeld-Brown-Effekt ist zum Synonym für die "Elektrogravitation" geworden. Auch wenn man bis heute darüber streitet, ob hier tatsächlich die Gravitation manipuliert wird...

- ▶ [Der Effekt](#)
- ▶ [Thomas Townsend Brown](#)
- ▶ [Weitere Untersuchungen](#)
  - ▶ [Quellenangaben](#)



## Der Effekt



Das als Biefeld-Brown-Effekt bekannte Phänomen wurde um 1920 von Thomas Townsend Brown entdeckt und 1923 von ihm und seinem damaligen Physikprofessor Dr. Paul Alfred Biefeld an der Denison University in Granville, Ohio, erstmals eingehend untersucht. Der Effekt besteht darin, daß ein auf hohe Spannung (im kV-Bereich) aufgeladener Kondensator eine Tendenz zeigt, eine Bewegung in Richtung seiner positiv geladenen Platte auszuführen, mit anderen Worten, es entsteht eine Schubkraft, die unabhängig von der Lage des

Kondensators im Raum ist.

Die nebenstehende Skizze zeigt das Prinzip einer Anordnung, mit der ein relativ empfindlicher Nachweis möglich ist. Ein Torsionspendel, bestehend aus zwei Plattenkondensatoren und einem isolierenden Verbindungsstab wird an einem dünnen Draht aufgehängt. Die Kondensatorplatten sind "überkreuz" miteinander verbunden, sodaß sich das durch den Effekt an beiden Kondensatoren entstehende Drehmoment addiert. Durch die Umkehrung der Polung an einem der beiden Kondensatoren ist eine Prüfung möglich, ob der reine Effekt beobachtet wurde (der in diesem Falle kompensiert wird). Die gesamte Apparatur muß natürlich in einem abgeschlossenen Gehäuse untergebracht werden, um sie vor Zugluft zu schützen. Dieses Gehäuse sollte in einer Umgebung mit möglichst ausgeglichener Umgebungstemperatur stehen, Wärmestrahler sollten keine in der Nähe stehen, um Konvektion innerhalb des Gehäuses zu vermeiden. Das Gehäuse sollte weiterhin einen Faradayschen Käfig darstellen, der so geformt ist, daß er dem Torsionspendel keine exponierten Stellen bietet, an denen Ladung abfließen kann (Spitzenentladung). Am günstigsten ist es, wenn man die Möglichkeit hat, die Luft aus dem Gehäuse abzupumpen.

Ziemlich oft hört man als Erklärung, daß der Effekt auf den sogenannten "Ionenwind" zurückzuführen sei, d.h. auf das Abstoßen geladener Gasionen von einer gleichnamig geladenen Oberfläche. Diese Erklärung ist allerdings unzureichend, da der Biefeld-Brown-Effekt auch bei Versuchen in Vakuumkammern auftrat. Diese Variante stellt übrigens auch die einzige Möglichkeit dar, den Effekt "pur" zu beobachten.

Die Stärke des Effektes nach den mir vorliegenden Quellen abhängig von

- der am Kondensator anliegenden Spannung
- der Kapazität des Kondensators, d.h. von
  - Plattenfläche
  - Plattenabstand
- Art des Dielektrikums (Dielektrizitätszahl)
  - der Dichte(!) des Dielektrikums
- diversen Umweltbedingungen, z.B. Sonnenflecken (!)
- der geometrischen Form des Kondensators (und damit des elektrischen Feldes)



## Thomas Townsend Brown



Thomas Townsend Brown wurde 1905 in Zanesville, Ohio geboren. Er zeigt schon relativ früh großes Interesse für Raumfahrt und Elektronik. Noch während seiner Zeit am College entdeckte er den später nach ihm und seinem Physikprofessor benannten Biefeld-Brown-Effekt, den er 1923 an der Denison University in Granville, Ohio erstmals näher untersuchte. Er führt den Effekt auf den vermuteten Zusammenhang zwischen elektrischem und Gravitationsfeld zurück.

Nach Abschluß seines Studiums arbeitete er unter anderem am Swazey-Observatorium in Ohio und ab 1930 dann für das Naval Research Laboratory der Marine.

Er nahm 1932 als Stabsphysiker an der Internationalen Schwerkraft-Expedition des US-Marineministeriums zu den Westindischen Inseln teil und 1933 an der Johnson-Smithsonian-Tiefsee-Expedition. Die Projekte, an denen er nach 1939 bei der Marine arbeitete, sind nicht näher bekannt, teilweise wird vermutet, daß er am Philadelphia-Projekt mitgearbeitet hat. Während seiner beruflichen Tätigkeit hat er jedoch zumindest privat seine Studien zu dem von ihm entdeckten Effekt fortgesetzt und an seiner technischen Anwendung gearbeitet. Anfang 1944 wurde Brown nach einem Nervenzusammenbruch auf Empfehlung der Marineärzte pensioniert und arbeitete später als Berater bei der Lockheed-Vega Aircraft Corporation, die er 1952 wieder verließ. Er zog nach Cleveland und arbeitete weiter an seinem "Gravitor", der technischen Realisierung des

Biefeld-Brown-Effektes. Durch seine fortgesetzte Forschungsarbeit daran war es ihm gelungen, die Wirkung des Effektes soweit zu verstärken, daß der Apparat mehr als sein eigenes Gewicht heben konnte.

1953 gelang es Brown, eine seiner "Luftfolien" in einer Laboranlage auf einem Rundkurs von 6 m Durchmesser fliegen zu lassen. Der Apparat war über einen Draht mit einem Mast verbunden und wurde auf diese Weise mit der nötigen Betriebsspannung von 50 kV versorgt. Die benötigte Leistung lag bei 50 W, die Spitzengeschwindigkeit des Apparates bei fast 185 km/h.

Nach anfänglichen Erfolgen und Verbesserungen sowie etlichen Vorführungen in Europa fusionierte die französische Firma SNCASO, bei der Brown damals tätig war, mit einer anderen Gesellschaft und seine Forschungsmittel wurden gestrichen.

Brown kehrte in die USA zurück und wurde dort innerhalb eines Jahres der Chefberater des Whitehall-Rand-Projektes, ein Forschungsprojekt zu Anti-Schwerkraft-Untersuchungen, das der Bahnson Company in Winston-Salem, North Carolina, unterstand. Nachdem Bahnson jedoch mit seinem Privatflugzeug verunglückte, wurde das Projekt eingestellt.

Brown versuchte es 1958 noch einmal mit einer eigenen Firmengründung, der Rand International Limited, die auch heute noch als Firmenstruktur existiert, doch trotz zahlreicher Patente in den USA und im Ausland war ihm und seinem "Gravitor" kein Erfolg beschieden. Er hatte noch mehrere Vorführungen, u.a. auch bei der NASA und betrieb seine privaten Forschungen in Kalifornien bis zu seinem Tod weiter.

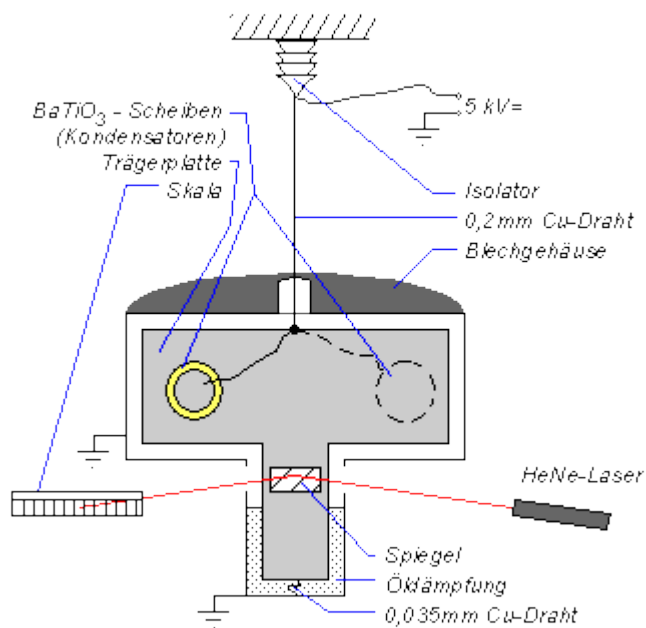
Thomas Townsend Brown verstarb am 22. Oktober 1985 in Avalon, Catalina Island, Kalifornien.

T.T. Brown wurden mehrere Patente gewährt, im Einzelnen sind das

- A Method of and an Apparatus or Machine for Producing Force or Motion  
U.S. Patent No. 300,311, Nov. 15, 1928
  - Electrostatic Motor  
U.S. Patent No. 1,974,483, Sept. 25, 1934
    - Elektrokinetic Apparatus  
U.S. Patent No. 2,949,550, Aug. 16, 1960
      - Elektrokinetic Generator  
U.S. Patent No. 3,022,430, Feb. 20, 1962
        - Elektrokinetic Apparatus  
U.S. Patent No. 3,187,206, June 1, 1965
- Method and Apparatus for Producing Ions and Electrically-Charged Aerosols  
U.S. Patent No. 3,296,491, Jan. 3, 1967
  - Fluid Flow Control System  
U.S. Patent No. 3,518,462, June 30, 1970



## Weitere Untersuchungen



Sven Mielordt beschreibt in (3) seinen Versuch zum qualitativen Nachweis des Biefeld-Brown-Effekts. Den Aufbau verdeutlicht die nebenstehende Skizze. Die Verwendung von Bariumtitanat als Dielektrikum und die Kombination eines Torsionspendels mit einem Lichtzeiger ermöglicht es, schon mit der relativ geringen Spannung von 5 kV eindeutige Resultate (qualitativ) zu erhalten. Das Umpolen der Spannungsquelle und die damit verbundene Umkehr des Effektes zeigen, daß es sich hier nicht um einen elektrostatischen Effekt (Anziehung bzw. Abstoßung) handelt. Allerdings kann man den Ionenwind als Ursache nicht ausschließen. Dies wäre nur mit einer evakuierten Anordnung möglich.



## Quellenangaben

1. **Berlitz, Ch & Moore, W.L.: Das Philadelphia-Experiment.**  
Paul Zsolnay Verlag Gesellschaft mbH, Wien/Hamburg 1979, ISBN 3-552-03100-6
2. **Kelly, D.A.: The Manual of Free Energy Systems and Devices.**  
1986, ISBN 0-932298-59-5
3. **Mielordt, Sven: Kompendium Hypertechnik. Tachyonenenergie, Hyperenergie, Antigravitation.**  
Gehrden 1984.
4. **Brown, T.T.: A Method of and an Apparatus or Machine for Producing Force or Motion**  
U.S. Patent No. 300,311, Nov. 15, 1928
5. **Brown, T.T.: Electrokinetic Apparatus**  
U.S. Patent No. 3,187,206, June 1, 1965

# Elektrokinetischer Antrieb

Das fast schon legendäre US-Patent von T.T.Brown, [US 2,949,550 "Electrokinetic Apparatus"](#), ist schon seit vielen Jahren bekannt und hat vor allem wegen der dort abgebildeten UFO-förmigen Fluggeräte immer wieder für Aufsehen gesorgt. Erst in der letzten Zeit hat es verstärkt Nachbauten auf diesem Gebiet gegeben. Im Internet findet man unzähliger solcher Geräte, die sich meist "Lifter" nennen.



So habe ich mich auch daran gemacht und eine dreieckige Version eines solchen Lifters gebaut. Er wurde aus Plastik-Strohhalmen gefertigt, um das Gewicht möglichst gering zu halten.



Gemäß dieser Zeichnung einer Seite, wird mit nur einem Strohhalm als Träger ein Dreieck gefertigt und an beiden Seiten mit einem 0,12mm dicken Lackdraht bespannt.



Über den Träger und den unteren Draht wird dann eine Alufolie gespannt. Um Gewicht zu sparen, nur auf der Außenseite. Die Folie wird am Träger und am Draht mit je einem umgeschlagenen Saum von 1cm Breite befestigt. Das Gesamtgewicht inklusive Versorgungsdrähte beträgt nur 3g !

Versuche





Für den Betrieb muss die Zuführung der positiven Hochspannung an den oberen Draht so geführt werden, dass es zu keinem Überschlag kommt. Dazu wurde hier ein Kunststoffrohr verwendet. Am anderen Bein erfolgt der Masseanschluss ebenfalls über einen 0,12mm Lackdraht und am dritten Bein wird ein Faden verwendet, um das Gerät während des Fluges zu stabilisieren.

Die Versorgung übernimmt das [40kV Labornetzgerät](#). Bei einer Spannung von etwa 25kV beginnt das Gerät abzuheben und erreicht einen stabilen Flug bei etwa 30kV. Dabei fließt ein Strom von immerhin 500 $\mu$ A, was einer Leistungsaufnahme von 15W entspricht.



Wie im Video deutlich zu hören ist, kommt es beim Hochfahren der Spannung zu sehr starken Sprühentladungen, die im Betrieb in der Umgebung alles elektrostatisch aufladen. Der dabei erzeugte Ionenwind führt zu einer merklichen Luftströmung unterhalb des Gerätes. Wird die Spannung ausgeschaltet, fällt es augenblicklich herunter.

### Erklärung

Der eigentliche Antriebseffekt, der im Patent beschrieben wird, kommt nicht ausschließlich von dem Ionenwind. Er sei vielmehr eine zusätzliche Kraft, die durch das Verteilen von Ladungen im Raum entsteht. Er entsteht durch die Sprühentladung an unterschiedlich großen Flächen. Die in der Luft verteilten Ladungen bilden dann sozusagen denn Anker, gegen den sich das Gerät abstößt. Bei diesem kleinen Modell war es mir nicht möglich, eine Unterscheidung zu treffen was Ionenwind ist und was darüber hinaus geht. Das Modell ist einfach so leicht, dass es durchaus nur durch die Luftströmung gehoben werden kann. Auch die verbrauchte Leistung ist sehr hoch und mit einer konventionellen Luftschaube kommt man sicherlich auf eine geringere Leistung.

Den Ionenwind könnte man im [Hochvakuum](#) unter einer [Vakuumlöcke](#) ausschließen, dadurch würde aber auch der Stromfluss, wie bei einem Vakuumkondensator, und somit auch der Ladungstransportmechanismus unterbrochen werden, der laut Patent aber wichtig ist. Man könnte einen Stromfluss dann wieder mit einer Glühkathode, wie bei der [Röntgenröhre](#), erreichen. Bei so hohen Spannungen käme es dann aber zwangsweise auch zur Erzeugung von Röntgenstrahlen und vor allem haben die Elektronen im Hochvakuum keine Möglichkeit einen trägen Polster zu bilden, auf den das Gerät aufsetzen kann.

Interessant wäre auch noch zu testen, wie weit die [Trägheit](#) von Körpern innerhalb des Kraftfeldes verändert wird, was ja auch immer wieder behauptet wird.


So wird wohl ein solcher Lifter nicht im Weltraum funktionieren können. Viel interessanter halte ich in diesem Zusammenhang das [Patent US 3,187,206](#) von T.T.Brown, das reine Festkörper benutzt, um einen gravitativen Effekt hervorzurufen. Leider hat mein Experiment zum sogenannten [Biefeld-Brown-Effekt](#) nichts ergeben.

### Anmerkung zum Wesen der Gravitation:

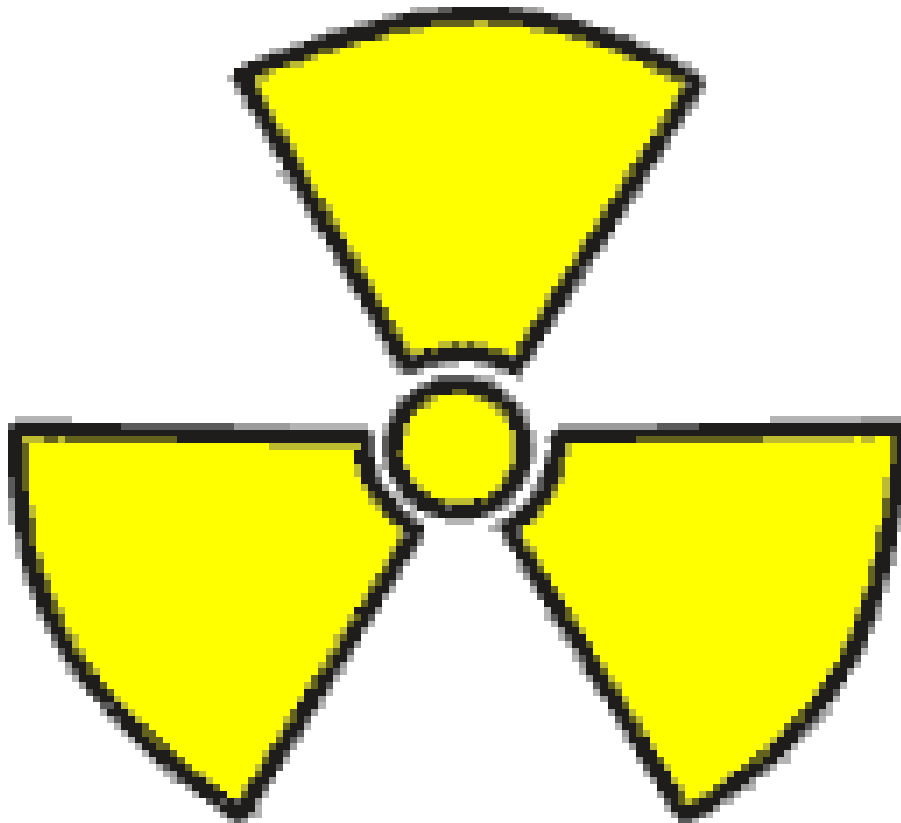
Bei den Überlegungen zur Elektrogravitation, sowie bei Versuchen zur [Gravitationsabschirmung](#)

und auch bei allen Geräten zur Nutzung der Trägheit sollte man ein grundlegendes Verhalten der Gravitation nie aus den Augen verlieren. Die Wirkung der Gravitation wird immer in Form einer Beschleunigung beschrieben, weshalb man zu ihr ja auch Erdbeschleunigung oder Fallbeschleunigung sagt. Die Gravitationskraft ist Ausdruck dieser fortwährenden Beschleunigung, die alle Massen nach unten, in Richtung Erdmittelpunkt, drückt.

Wir merken schon, dass dies wohl nur eine idealisierte Modellvorstellung sein kann. Denn wie soll man sich eine ständig beschleunigende Bewegung der Erdoberfläche nach außen, weg vom Erdmittelpunkt vorstellen ? Denn nur eine solche kann eine nach innen gerichtete Trägheitskraft hervorrufen.

Zum einen zeigt diese Überlegung wie wenig wir wirklich über die Gravitation wissen, zum anderen aber bringt sie auch etwas Licht in das Wesen der Gravitation. Egal wie sie letztendlich auch wirken mag, in ihr gibt es eindeutig eine nach außen gerichtete Komponente. Das mag auch eine Erklärung für die oft unverständlichen Experimente mit langen Pendeln sein, die sich entgegen der Theorie nicht zum Zentrum der Erde hin ausrichten, sondern zu einem Punkt irgendwo weit außerhalb der Erdatmosphäre. 

# Röntgenröhre im Eigenbau



Als Voraussetzung zum Bau benötigt man eine sehr gute Vakuumpumpeinheit. Eine [Turbomolekularpumpe](#) in Verbindung mit einer [Drehschieberpumpe](#) als Vorpumpe ist zu empfehlen.

Eventuell geht es auch nur mit einer sehr guten, mehrstufigen Drehschieberpumpe. Die Pumpe sollte so weit evakuieren können, dass die Leuchterscheinungen, wie wir sie von der [Geißleröhre](#) her kennen, zum Erliegen kommen. Für erste Versuche, zum besseren Verständnis des Verhaltens von Hochvakuumssystemen und zum Abschätzen des erreichten Vakuums empfiehlt sich zuerst immer der Aufbau einer [Hochvakuum-Geißleröhre](#).



Die Röntgenröhre wurde zur besseren Dichtheit des Systems ohne Schlauch direkt auf der [Turbopumpe](#) montiert. Alle Dichtflächen müssen glatt gedreht sein, und die Dichtungen selbst sollten mit Öl oder Vaseline eingefettet werden. Die Dichtheit überprüft man am

besten durch Anlegen von Hochspannung, mit unbeheizter Kathode an den Leuchterscheinungen. Im Hochvakuum darf es zu überhaupt keinen Leuchterscheinungen mehr kommen, wie am Ende des [Videos](#) bei der [Geißlerröhre im Hochvakuum](#).



Um den Stromfluss im Hochvakuum zu gewährleisten, muss prinzipiell eine Glühkathode verwendet werden. Wie wir aber von den Versuchen mit der [Geißlerröhre](#) wissen, ist bei geringem Restdruck das nicht unbedingt nötig. Für eine einfache Glühkathode reicht ein Wolframdraht aus, wie er in jedem Lämpchen vorhanden ist. Der Glaskolben des Lämpchens muss entfernt werden, damit die Elektronen aus dem Draht austreten können. Zwei Messingstifte werden in die Röhre über O-Ringe eingedichtet. Falls das nicht dicht wird, kann man die Elektroden auch verkleben. Daran ist das Lämpchen angeschlossen. Zu beachten ist, dass man das Lämpchen erst einschaltet, wenn das Vakuum bereits aufgebaut ist. Anderenfalls oxidiert der Draht in wenigen Sekunden und brennt durch.

Plexiglasrohr:	Außendurchmesser: 50mm, Innendurchmesser 40mm, 10cm lang
Dichtungen:	Außendurchmesser: 51mm, Innendurchmesser 39mm, 1mm dicke Gummidichtung
Glühkathode:	6V/300mA Lämpchen, Glas entfernt
Kathodenanschlüsse:	Zwei 8mm dicke Messingstäbe mit M4 Gewindeansatz
Anode:	20mm Kupferstab, im 45° Winkel abgeschragt.
Anodendeckel:	Durchmesser: 60mm, 10mm dickes Aluminium. 51x39x2mm Nut für Dichtung eingedreht

#### Funktion:

Die von der Glühkathode austretenden Elektronen werden durch die hohe positive Spannung an der Anode stark beschleunigt und fliegen mit hoher Geschwindigkeit auf sie zu. Wenn sie auf der Anode auftreffen, werden sie in extrem kurzer Zeit abgebremst, und beschleunigte (=verzögerte) Elektronen erzeugen elektromagnetische Strahlen. Deshalb werden die Röntgenstrahlen auch Bremsstrahlung genannt. Weiters werden die Atome in der Anode selbst zum Strahlen angeregt, sodass zusätzlich auch noch ein für jedes Material charakteristische Eigenstrahlung entsteht. Die Röntgenstrahlen bestehen also aus einer Summe von verschiedenen Frequenzen, im Bereich über dem ultravioletten Licht bis zu den Gammastrahlen.

## **Achtung:**

**Die Röntgenstrahlen gehören zu der ionisierenden Strahlung, ähnlich der Gammastrahlung. Sie führen im menschlichen Körper zu Zellveränderungen, bis hin zu Krebs. Achten sie also unbedingt auf einen ausreichenden Schutz.**

**Röntgenstrahlen können nur durch Blei abgeschirmt werden.**

**Andere Metalle wie z.B. Aluminium werden zum Teil durchdrungen. Entfernen sie sich so weit wie möglich von der Röntgenröhre, wenn sie in Betrieb ist. Überprüfen sie immer mit einem Geigerzähler die aktuelle Strahlenbelastung. Beachten sie auch, dass nicht jeder Geigerzähler Röntgenstrahlen messen kann. Der derzeitige Grenzwert der Jahresdosis für exponierte**

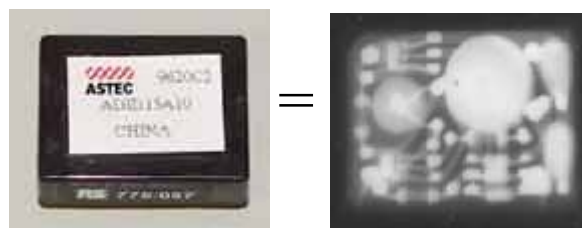
**Personen liegt bei 20mSv. Das sind nach der alten Einheit 2rem und wenn man den für Röntgenstrahlen üblichen Qualitätsfaktor von 1 zugrundelegt, erhält man so eine max. Energiedosis von 2rad pro Jahr. Eine Röntgenröhre kann diese Energiedosis in wenigen Minuten liefern !**

Röntgenaufnahmen:



Zur Belichtung von Röntgenaufnahmen wurde die [Hochvakuumpumpe](#) mitsamt der Röntgenröhre in die Waagrechte gebracht. Die Anode ist so gedreht, dass die Röntgenstrahlen nach unten ausgeworfen werden. Versorgt wird die Röhre mit 40kV von einem [Hochspannungsnetzgerät](#). Der Anodenstrom wird durch die Heizspannung eingestellt, bei 6,7V Heizung fließen etwa 500 $\mu$ A, was bei 40kV dann schon 20W Verlustleistung ausmacht. Die Anode wird also sehr heiß und muss nach ca. 15min gekühlt werden, damit die Dichtung nicht schmilzt. Einen aufgeschraubten Kühlkörper sollte man vermeiden, da dies an den Kanten nur zu unnötigen Sprühentladungen führen würde.

Die Objekte werden je nach Größe in einem möglichst geringen Abstand zur Röhre gelegt. In dem schwarzen Papierumschlag darunter befindet sich der lichtempfindliche Film. Es wurde hierfür ein Standard Schwarz/Weiß Fotopapier "Illford 3,1M" verwendet und anschließend mit entsprechenden Entwickler und Fixierer entwickelt.

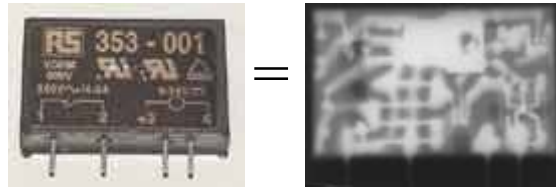


Die Aufnahme dieses vergossenen DC/DC-Spannungswandlers wurde 15min lang belichtet, bei 40kV, 200 $\mu$ A in einem Abstand von 12cm zur Anode.

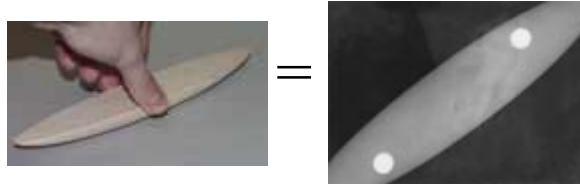
Mit einem Geigerzähler wurde an der Stelle des Objektes eine Energiedosis von ungefähr 2rad/h



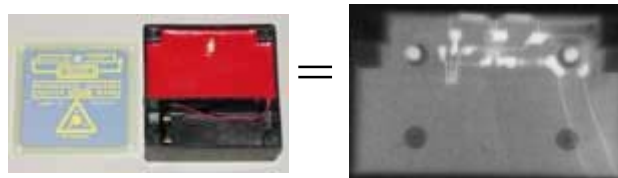
gemessen.



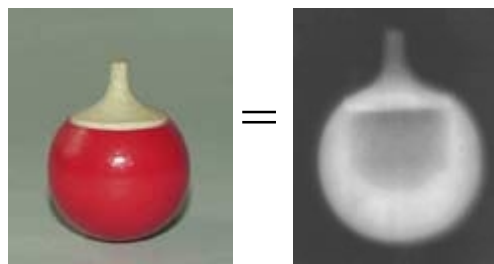
Dieses Halbleiterrelais wurde 12min lang belichtet, bei 42kV, 500 $\mu$ A in einem Abstand von 12cm. An dieser Stelle wurden mit dem Geigerzähler ca. 10rad/h gemessen.



Auch das [Wackelholz](#) konnte mit einer Röntgenaufnahme enttarnt werden. Es sind deutlich die beiden dichteren und daher schwereren Stellen zu erkennen, welche die Asymmetrie in der Bewegung hervorrufen. Diese Aufnahme wurde 10min bei 42kV, 500 $\mu$ A in einem Anstand von 20cm belichtet. Energiedosis in dieser Entfernung nur noch 5rad/h. Hier zeigt sich, wie stark die Strahlung mit dem Abstand abnimmt, also Entfernung ist der beste Schutz.



Auch bei dieser Aufnahme von einem [Mikrowellen](#) Lecktester ist zu sehen, dass uns unter der vergossenen Verpackung nur sehr wenig Bauteile für viel Geld verkauft werden. Die Schaltung ist denkbar einfach, ein Transistor steuert über einen Widerstand die Leuchtdiode an. An seiner Basis (mittleres Bein) sind die beiden Mikrowellendiolen angeschlossen. Aufgrund der sehr dicken Vergussmasse wurde hierfür 20min bei 42kV, 500 $\mu$ A in 12cm Abstand belichtet.




Der [Wendekreisel](#) wurde ebenfalls durchleuchtet und es ist zu erkennen, wie der Schwerpunkt durch eine im oberen Teil angebrachte Bohrung nach unten verlagert wird. Dieses Bild wurde 5min bei 42kV, 500 $\mu$ A in 12cm Abstand belichtet.

### Weitere Versuche: Welle/Teilchen Dualismus



Wer keinen Geigerzähler besitzt, kann die Strahlen auch mit einem [Elektroskop](#) nachweisen. Die Röntgenstrahlen, die ja zu den ionisierenden Strahlen zählen, haben die Eigenschaft, ein geladenes Elektroskop zu entladen. Dabei ist es egal, ob das Elektroskop vorher positiv oder negativ aufgeladen wurde. Für den Versuch sind die 24kV Hochspannung (bei

niedrigeren Spannungen treten überhaupt keine Strahlen mehr auf) von einem [Zeilentrafo](#) an die Röhre bereits angelegt, da dies sonst beim Einschalten zu einem unerwünschten Ausschlag am Elektroskop führt. Es wird nur die Heizung eingeschaltet, wodurch es erst dann zu einem Stromfluss und zur Strahlenproduktion kommt. Die Plättchen im Elektroskop fallen dann rasch zusammen. Umgekehrt ist es nicht möglich, ein leeres Elektroskop so aufzuladen, was auch mit der [Feldmühle](#) gezeigt werden kann, denn sie misst neben der Anodenspannung keine zusätzliche Ladung. Das zeigt den destruktiven Charakter der Strahlen, die nur zur Zerstreung führen. Dieser Effekt wird in der Physik durch den berühmten Dualismus von Welle und Teilchen erklärt. Demnach kann eine elektromagnetische Welle auch als Teilchenstrom betrachtet werden, der in der Lage ist, Ladungen zu übertragen. Mir persönlich gefällt diese widersprüchliche Formulierung, eine Welle sei einmal Teilchen und einmal eben nur Welle, nicht. Es ist überhaupt seltsam, dass dieser Widerspruch in unserem Weltbild Platz findet, wo es doch so sehr vom [logischen Denken](#) geprägt ist. Ich kann mir auch schwer vorstellen, wie Teilchen in der Lage sein sollten, feste Körper, wie das Plexiglas der Röhre und sogar Aluminium zu durchdringen. Auch ist es schwer nachvollziehbar, dass Teilchen zwar Ladungen abführen können, jedoch nicht in der Lage sind, Ladungen auf ein ungeladenes Elektroskop zu übertragen.

Ich hätte eine ganz andere Erklärung für das ionisierende Verhalten von elektromagnetischer Strahlung. Diese Effekte treten ja nur bei sehr hohen Frequenzen, wie eben bei Röntgenstrahlen auf. Es ist z.B. nicht möglich das Elektroskop durch Bestrahlung mit [Mikrowellen](#) zu entladen. Bei den extrem hohen Frequenzen kommt die Wellenlänge in die Größenordnung der Atomabmessungen. Solche Strahlen können ja auch nur mehr auf atomarer Ebene erzeugt werden. Die Struktur der Atome kann so wie eine richtig abgestimmte Antenne für die entsprechende Frequenz wirken und die Strahlung so effektiv aufnehmen, dass es wiederum selbst ionisiert wird und Ladungen ausstößt. Es erscheint überhaupt sinnvoller vom Teilchenbegriff völlig abzusehen und alles nur als Welle zu betrachten. Materie ist dann nichts anderes, als eine eingerollte Wellen oder eben ein [Wirbel](#). 

# Dielektrikum

aus Wikipedia, der freien Enzyklopädie

Als **Dielektrikum** (Mehrzahl: *Dielektrika*) wird jede elektrisch schwach- oder nichtleitende, nichtmetallische Substanz bezeichnet, deren [Ladungsträger](#) im Allgemeinen nicht frei beweglich sind. Ein Dielektrikum kann sowohl ein Gas, eine Flüssigkeit oder ein Feststoff sein.<sup>[1]</sup> Von

Dielektrika spricht man üblicherweise, wenn diese Materialien mit elektrischen oder elektromagnetischen Feldern beaufschlagt werden. Dielektrika sind typischerweise unmagnetisch.

Wirkt z. B. um ein Kabel herum ein [elektrisches Feld](#), kann für den Raum, in dem dieses elektrische Feld wirksam ist, der Begriff *Dielektrikum* verwendet werden. Ein Dielektrikum ist also ein von einem elektrischen Feld begrenzter, räumlicher Bereich (v. griech. *dia-*: „durch“, d. h. das Feld geht durch das Material). Es muss dazu keine [elektrische Leitfähigkeit](#) in diesem Raum vorliegen.

Dielektrika können in leerem Raum ([Vakuum](#)), im gasgefüllten Raum oder auch anderen, von elektrisch nichtleitenden Stoffen ausgefüllten, Volumen vorhanden sein.<sup>[2]</sup>

Die [Feldgrößen](#) des Dielektrikums sind die [elektrische Feldstärke](#)  $E$  und die [elektrische Flussdichte](#)  $D$ , welche im elektrostatischen Fall, d. h. im zeitlich konstanten Fall, und in einem isotropen Medium durch die [Permittivität](#)  $\epsilon$  über folgende Beziehung verknüpft sind:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$$

Die Permittivität setzt sich aus der [elektrischen Feldkonstante](#)  $\epsilon_0$  und der materialspezifischen [Permittivitätszahl](#) oder Dielektrizitätszahl  $\epsilon_r$  (Werte größer 1; die Dielektrizitätszahl von Luft ist annähernd 1 wie im Vakuum) zusammen:

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$$

## Inhaltsverzeichnis

[\[Verbergen\]](#)

- [1 Begriffsverwendung](#)
- [2 Polarisation eines Dielektrikums](#)
- [3 Dielektrika in Kondensatoren](#)
- [4 Dielektrika in Kabeln, Hochfrequenz- und Hochspannungs-Bauteilen](#)
- [5 Literatur](#)

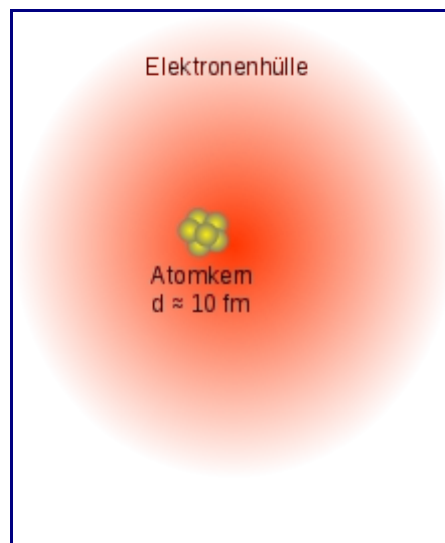
## Begriffsverwendung

Isolatoren, wie der Isolierstoff zwischen Kondensatorplatten, Koaxialkabeln u. Ä. werden als Dielektrikum bezeichnet. Auch Antennen können funktionsbestimmende dielektrische Bauteile besitzen.

Weiterhin wird die Flüssigkeit einer Funkenerodiermaschine, die verhindert, dass die Funken der Elektrode zu lang sind, als Dielektrikum bezeichnet.

Isolierstoffe, die nur zur elektrischen Isolation leitfähiger Teile voneinander dienen, werden in der Regel nicht als Dielektrika bezeichnet, obwohl deren dielektrische Eigenschaften für ihr Funktionieren ausschlaggebend sein können.

## Polarisation eines Dielektrikums



Der Atomkern (positiver Ladungsschwerpunkt) wird durch ein externes Feld links neben den negativen Ladungsschwerpunkt (Elektronenhülle) gezogen.

Da in einem Dielektrikum die Ladungsträger nicht frei beweglich sind, werden sie durch ein äußeres elektrisches Feld polarisiert. Dabei wird zwischen zwei Arten der Polarisation unterschieden:

1. Verschiebungspolarisation: Elektrische Dipole werden induziert, d. h. Dipole entstehen durch geringe Ladungsverschiebung in den Atomen oder Molekülen oder zwischen verschiedenen geladenen Ionen. Bei einem Wechselfeld „schwingt“ der positive Atomkern innerhalb der negativen Elektronenhülle hin und her. Dabei entsteht *keine* Wärmeenergie. Der Effekt kann mit Hilfe der Clausius-Mossotti-Gleichung beschrieben werden.
2. Orientierungspolarisation: Ausrichtung ungeordneter, permanenter Dipole eines Isolators im elektrischen Feld gegen ihre thermische Bewegung. Bei einem Wechselfeld müssen sich die Moleküle ständig umorientieren, wodurch Wärmeenergie entsteht (Mikrowellenherd). Der Effekt kann mit der Debye-Gleichung beschrieben werden.

## Dielektrika in Kondensatoren

Die Kapazität  $C$  eines Kondensators hängt im Wesentlichen vom verwendeten Dielektrikum und dessen Permittivitätszahl bzw. Dielektrizitätszahl  $\epsilon_r$ , der Elektrodenfläche  $A$  und dem Abstand  $d$  der Elektroden zueinander ab.

Für einen Plattenkondensator gilt:

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d}$$

Je höher die Dielektrizitätszahl  $\epsilon_r$  ist, desto mehr Energie kann in dem elektrischen Feld zwischen den Platten eines Kondensators gespeichert werden. Die Dielektrizitätszahl des ausgewählten Isolierstoffes sagt also aus, um das Wievielfache sich die Kapazität eines Kondensators gegenüber Vakuum (bzw. Luft) als Isolierstoff erhöht.

Eine wichtige Größe eines Dielektrikums bei Kondensatoren und Kabeln ist auch dessen Durchschlagsfestigkeit, d. h. ab welcher Spannung das Dielektrikum seine Isolationseigenschaften verliert und es zu Überschlägen zwischen den Kondensatorbelägen kommt.

Je nach Anwendung spielt auch der dielektrische Verlustfaktor bei Kondensator-Dielektrika eine Rolle. Er führt bei Wechselspannung zur Erwärmung des Kondensators.

## Dielektrika in Kabeln, Hochfrequenz- und Hochspannungs-Bauteilen

*Dielektrikum* bezeichnet auch den Isolierstoff zwischen den Leitern eines Kabels (insbesondere Hochfrequenz- und Koaxialkabel), der wesentlich dessen Leitungswellenwiderstand und die frequenzabhängige Dämpfung pro Länge (meist in Dezibel [dB] oder Neper [Np] pro km angegeben) bestimmt.

Dielektrische Antennenelemente und dielektrische Wellenleiter werden in der Hochfrequenztechnik verwendet und gehorchen hier den gleichen Gesetzen der Brechung wie in der Optik bzw. bei Lichtleitkabeln.

Typische Dielektrika in Hochfrequenz-Anwendungen sind Polyethylen, PTFE, Keramik (z. B. Steatit, Aluminiumoxid), Glimmer oder Luft.

Dielektrika für Hochfrequenz-Anwendungen müssen im Allgemeinen besonders geringe dielektrische Verlustfaktoren aufweisen.

Gleiches gilt beispielsweise für Hochspannungsbauteile wie Kabel oder Transformatoren. Hierbei besteht das **Dielektrikum** in erster Linie aus der ölgetränkten Papierisolation zwischen Kabelleiter und Schirm, bzw. zwischen den Transformatorwicklungen. Die dielektrischen Eigenschaften dieser Bauteile können beispielsweise Aufschluss über die Qualität der Isolierung geben.

## Literatur

1. ↑ Arthur von Hippel, Editor: *Dielectric Materials and Applications*. Artech House, London, 1954, [ISBN 0-89006-805-4](#).
2. ↑ Ralf Kories, Heinz Schmidt-Walter: *Taschenbuch der Elektrotechnik*. Verlag Harri Deutsch, 2004, [ISBN 3-8171-1734-5](#).



# Permittivität

aus Wikipedia, der freien Enzyklopädie

	<b>Physikalische Größe</b>			
Name	dielektrische Leitfähigkeit oder Permittivität			
Größen	Tensor			$\epsilon$ oder $\kappa$
Formelzeichen der Größe		<b>Größen- und Einheiten-system</b>	<b>Einheit</b>	<b>Dimension</b>
		SI	$\frac{\text{F}}{\text{A}^2} \frac{\text{m}^{-1}}{\text{s}^2} \text{V}^{-1}$	$\text{M}^{-1}$

Die **Permittivität**  $\epsilon$  (v. lat.: *permittere* = erlauben, überlassen, durchlassen), auch *dielektrische Leitfähigkeit*, gibt die Durchlässigkeit eines Materials für elektrische Felder an. Auch dem Vakuum ist eine Permittivität zugewiesen, da sich auch im Vakuum elektrische Felder einstellen oder elektromagnetische Felder ausbreiten können.

Die **relative Permittivität** (**Permittivitätszahl**, **Dielektrizitätszahl**)  $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$  eines Mediums ist das Verhältnis seiner Permittivität zu der des Vakuums (elektrischen Feldkonstante  $\epsilon_0$ ), kennzeichnet die feldschwächenden Effekte der dielektrischen Polarisaton des Mediums und hängt eng mit der elektrischen Suszeptibilität  $\chi = \epsilon_r - 1$  zusammen.

Die Bezeichnungen **Dielektrizitätskonstante** für *Permittivität* und **relative Dielektrizitätskonstante** für *relative Permittivität* gelten als veraltet und sollten nicht mehr verwendet werden.

# Inhaltsverzeichnis

- 1 Erläuterung der Permittivität am Beispiel isolierender Stoffe
- 2 Permittivität des Vakuums
- 3 Zahlenwert und Einheit
  - 4 Relative Permittivität
    - 4.1 Relative Permittivität in kristallinen Strukturen
    - 4.2 Frequenzabhängigkeit der relativen Permittivität
    - 4.3 Komplexwertige relative Permittivität
    - 4.4 Temperaturabhängigkeit
  - 5 Relative Permittivität ausgewählter Materialien
    - 6 Verallgemeinerungen zur Dispersion, Richtungsabhängigkeit und Magnetfeld
- 7 Siehe auch
- 8 Literatur
- 9 Einzelnachweise

## Erläuterung der Permittivität am Beispiel isolierender Stoffe

Als Permittivität bezeichnet man eine Materialeigenschaft elektrisch isolierender, polarer oder

unpolaren Stoffe, die auch [Dielektrika](#) genannt werden. Diese Eigenschaft wirkt sich aus, wenn der Stoff mit einem elektrischen Feld wechselwirkt, etwa wenn er sich in einem [Kondensator](#) befindet.

In einem mit Material gefüllten Kondensator orientieren sich die Ladungsträger des Isolationsmaterials am elektrischen Feldvektor und bilden ein [Polarisationsfeld](#), das dem äußeren Feld entgegenwirkt und dieses schwächt. Dieses Phänomen der Feldschwächung lässt sich bei Annahme eines gegebenen [elektrischen Erregungsfeldes](#) dadurch beschreiben, dass dem isolierenden Material ein Faktor  $\epsilon_r$  zur elektrischen Feldkonstante  $\epsilon_0$  (Permittivität des Vakuums) zugewiesen wird. Aus der äußeren [elektrischen Erregung](#)  $\vec{D}$ , auch als elektrische Flussdichte bezeichnet, ergibt sich das [elektrische Feld](#)  $\vec{E}$  mit der Permittivität  $\epsilon$  zu:

$$\vec{E} = \frac{\vec{D}}{\epsilon} = \frac{\vec{D}}{\epsilon_r \epsilon_0}.$$

Bei konstanter elektrischer Erregung  $\vec{D}$  und steigenden Werten von  $\epsilon_r$  nimmt die elektrische Feldstärke  $\vec{E}$  ab. Auf diese Weise wird der feldschwächende Effekt bei gleicher elektrischer Erregung erfasst, d. h. bei vorgegebener elektrischer Flussdichte oder vorgegebener elektrischer Ladung. Unter der Einwirkung einer an den Kondensatorplatten angelegten fixen Spannung  $U$  und dem elektrischen Feld  $E = \frac{U}{d}$  (Plattenabstand  $d$ ) ergibt sich die elektrische Erregung  $\vec{D}$  mit der Permittivität  $\epsilon$  zu:

$$\vec{D} = \epsilon_r \epsilon_0 \vec{E}.$$

Die [elektrische Suszeptibilität](#)  $\chi$  ist mit der relativen Permittivität über:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = 1 + \chi.$$

verknüpft. Die Suszeptibilität ist dabei ein Maß für die Dichte im Isolationsmaterial gebundener Ladungsträger bezogen auf die Dichte freier Ladungsträger. Mehr dazu steht im Beitrag [elektrische Suszeptibilität](#).

In der [Elektrodynamik](#) und auch in der [Elektrostatik](#) wird die Permittivität zur Beschreibung der o. a. Phänomene als Proportionalitätsfaktor im Zusammenhang zwischen [elektrischer Flussdichte](#) und [elektrischer Feldstärke](#) verwendet:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$$

In Materie stellt diese Gleichung nur die niedrigste Ordnung eines im allgemeinen nichtlinearen Zusammenhangs dar: Im Falle großer Feldstärken fasst man entweder die Permittivität als feldstärkeabhängig auf und schreibt  $\epsilon(E)$ , oder man führt neben  $\epsilon = \epsilon^{(1)}$  weitere [Taylor-Koeffizienten](#) ein,  $\epsilon = \epsilon^{(2)}$  usw., die die Feldstärkeabhängigkeit von  $\vec{D}$  beschreibt:

$$\vec{D} = \frac{\vec{E}}{\|\vec{E}\|} \left( \epsilon^{(1)} \cdot \|\vec{E}\| + \epsilon^{(2)} \cdot \|\vec{E}\|^2 + \epsilon^{(3)} \cdot \|\vec{E}\|^3 + \dots \right)$$

Im Vakuum als Referenzmaterial eines Isolierstoffes gilt die relative Permittivität  $\epsilon_r = 1$

Die Permittivität ist ein [Proportionalitätsfaktor](#) zwischen der Raumladungsdichte  $\rho$  und der zweiten partiellen Ableitung des Potenzialfelds  $\Phi$ . Sie lässt sich aus der [Poisson-Gleichung](#) der Elektrostatik

errechnen.

$$\varepsilon = -\frac{\rho(\mathbf{r})}{\Delta\Phi(\mathbf{r})}$$

## Permittivität des Vakuums

→ Hauptartikel: [Elektrische Feldkonstante](#)

Die **Permittivität des Vakuums**  $\varepsilon_0$  heißt auch **elektrische Feldkonstante**, entsprechend dem derzeitigen deutschsprachigen Entwurf des [Internationalen Größensystems](#). Weitere Bezeichnungen sind *elektrische Konstante*, *Dielektrizitätskonstante des Vakuums* und *Influenzkonstante*.

Im Vakuum besteht zwischen der [Permeabilität](#)  $\mu_0$ , der Permittivität des Vakuums  $\varepsilon_0$  und der [Vakuumlichtgeschwindigkeit](#)  $c_0$  folgender von [Maxwell](#) vorhergesagte und 1857 von [Wilhelm Eduard Weber](#) und [Rudolf Kohlrausch](#) experimentell bestätigte Zusammenhang:

$$c_0^2 = \frac{1}{\varepsilon_0 \mu_0}$$

Im [Internationalen Einheitensystem](#) (SI-System) geschieht die Rückführung der elektromagnetischen auf die mechanischen Größen in der Definition der [Stromstärke](#) ([Ampere](#)), die darauf hinausläuft, dass sich die Permittivität des Vakuums mit beliebiger Genauigkeit aus den

exakt festgelegten [Naturkonstanten](#)  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}}$  und  $c_0 = 2,997\,924\,58 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  berechnen lässt:

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c_0^2} = 8,854\,187\,817\,62 \dots \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$$

Die Einheit der Permittivität kann hier ausgedrückt werden als:

$$\text{F m}^{-1} = \text{A}^2 \text{s}^4 \text{kg}^{-1} \text{m}^{-3} = \text{As V}^{-1} \text{m}^{-1} = \text{C V}^{-1} \text{m}^{-1}$$

Da sich Luft nur geringfügig [polarisieren](#) lässt, kann oft in ausreichender Genauigkeit für Luft die Permittivität durch  $\varepsilon_0$  genähert werden.

## Zahlenwert und Einheit

→ Hauptartikel: [Elektromagnetische Maßeinheiten](#) und [Elektrische Feldkonstante](#)

Neben dem [Coulomb-Gesetz](#), dem [ampèreschen Gesetz](#) und dem [faradayschen Induktionsgesetz](#) stellt der Zusammenhang zwischen  $\mu_0$ ,  $\varepsilon_0$  und  $c_0$  eine weitere Verknüpfung elektromagnetischer und mechanischer Einheiten dar, die bei der Wahl eines [elektromagnetischen Einheitensystems](#) zu berücksichtigen ist.

Abhängig vom verwendeten Einheitensystem verändert sich dabei die Darstellung der Permittivität  $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ , analog zur Darstellung von  $\varepsilon_0$ .

Die Verhältnisse im SI-Einheitensystem sind oben angegeben. In Einheitensystemen, die die elektromagnetischen Größen explizit auf mechanische Basisgrößen zurückführen, namentlich den

verschiedenen Varianten des [CGS-Einheitensystems](#), wird  $\epsilon_0$  als dimensionslose Zahl gewählt:

$$\epsilon_0 := \frac{1}{4\pi} \quad (\text{elektrostatisches, elektromagnetisches oder } \underline{\text{gaußsches Einheitensystem}}).$$
$$\epsilon_0 := 1 \quad (\underline{\text{Heaviside-Lorentz-Einheitensystem}}),$$

## Relative Permittivität

Für  $\epsilon_r$  sind folgende Bezeichnungen gebräuchlich (nach abnehmender Häufigkeit):

- *Dielektrizitätskonstante*
- *Dielektrizitätszahl*
- *Permittivitätszahl*
- *relative Permittivität*

Die Bezeichnung als Konstante ist unangemessen, da  $\epsilon_r$  im Allgemeinen eine Funktion mehrerer Parameter ist, insbesondere der Frequenz und der Temperatur.

Nur für [isotrope](#) Medien ist  $\epsilon_r$  eine [skalare](#) Größe. In diesem einfachsten Fall gibt sie den Faktor an, um den die Spannung an einem Kondensator sinkt, wenn man bei gleicher Geometrie ein zwischen den Kondensatorelektroden angenommenes Vakuum durch ein dielektrisches, nicht leitendes Material ersetzt. Im Versuch lässt sich dies nachvollziehen, wenn ein Luftvolumen um die Kondensatorelektroden z. B. durch eine dielektrische Flüssigkeit ersetzt wird. Für einen Plattenkondensator genügt es, einen dielektrischen Gegenstand zwischen die Elektroden zu schieben.

### Relative Permittivität in kristallinen Strukturen

Im Allgemeinen ist  $\epsilon_r$  jedoch ein [Tensor zweiter Stufe](#), der die kristalline (oder anders geordnete) Struktur der Materie widerspiegelt und damit die Richtungsabhängigkeit der Faktoren. Die Tensoreigenschaft der Permittivität ist Grundlage für die [Kristalloptik](#).

Die relative Permittivität  $\epsilon_r$  ist ein Tensor zweiter Stufe (und damit als Funktion der Lichtausbreitungsrichtung relativ zu ausgezeichneten Kristallachsen), der sowohl von der [Frequenz](#) (also bei Betrachtung von Licht von dessen [Wellenlänge](#)) als auch vom äußeren elektrischen Feld und [magnetischen Feldern](#) abhängig ist, und wird auch *dielektrische Funktion* genannt. Vor allem im Englischen wird auch das Größensymbol  $\kappa$  verwendet (siehe [Low-k-Dielektrikum](#) bzw. [High-k-Dielektrikum](#)).

### Frequenzabhängigkeit der relativen Permittivität

Die Permittivität in Materie ist frequenzabhängig und kann beispielsweise über das einfache Modell des [Lorentz-Oszillators](#) recht gut modelliert werden. Diese Frequenzabhängigkeit wird [Dispersion](#) genannt. Sie ist beispielsweise bei Wasser sehr stark ausgeprägt.

Die Permittivität im Frequenzbereich sichtbaren Lichts (ca. 550 THz) steht in Form der [Brechzahl](#) in folgender Relation zur [magnetischen Permeabilität](#)  $\mu_r$ :

$$n^2 = \mu_r \cdot \epsilon_r.$$

Für optisch transparente Stoffe gilt  $\mu_r = 1$ , so dass näherungsweise  $\epsilon_r = n^2$  gilt. Die [optische](#)

Dispersion ist ein Ausdruck dafür, dass  $\epsilon$  auch bei den Frequenzen sichtbaren Lichts keine konstante Zahl ist. In Tabellenwerken ist in der Regel der Zahlenwert bei niedrigen Frequenzen (Größenordnung 50 Hz bis 100 kHz) angegeben, bei denen molekulare Dipole dem äußeren Feld nahezu unverzögert folgen können. Das Zurückbleiben der Moleküle gegenüber dem hochfrequenten elektrischen Feld wird makroskopisch mit einer komplexen relativen Permittivität beschrieben.

## Komplexwertige relative Permittivität

Die relative Permittivität  $\epsilon_r$  ist allgemein komplexwertig. Genauso wie bei Gleichfeldern bilden sich auch bei Wechselfeldern in Dielektrika Polarisationsfelder, die aber gegebenenfalls der angelegten äußeren Feldgröße um einen gewissen Phasenwinkel nacheilen. Dabei bleibt die Orientierung der Ladungsträger im Dielektrikum in der Phase (zeitlich) hinter der Umpolarisierung des angelegten Wechselfeldes zurück. Mit zunehmender Frequenz wird dieser Effekt stärker. Es lässt sich leicht vorstellen, dass Wechselfelder hoher Frequenz durch schnelles, wiederkehrendes Umpolarisieren in isolierenden Materialien Wärmeverluste erzeugen. Bei noch höheren Frequenzen, mit denen Ladungsträger im Bändermodell eines Kristalls angeregt werden können, wird ebenfalls Energie absorbiert. Diesen Phänomenen wird dadurch Rechnung getragen, dass die relative Permittivität komplexwertig mit

$$\epsilon_r = \epsilon_r' + j\epsilon_r''$$

alternativ auch mit

$$\epsilon_r = \epsilon_1 + j\epsilon_2$$

beschrieben wird, wobei die dielektrischen Verluste über den Imaginärteil  $\epsilon_r''$  der Permittivität erfasst werden. Eine weitverbreitete Anwendung, die das Phänomen dielektrischer Verluste ausnutzt, ist die Erwärmung im Mikrowellenofen. Die Verlustleistungsdichte bei dielektrischer Erwärmung beträgt, bezogen auf das Materialvolumen:

$$p = \omega \cdot \epsilon_r'' \cdot \epsilon_0 \cdot E^2$$

Die mit der Verlustleistung verbundene dielektrische Erwärmung entspricht bei Integration über den Erwärmungszeitraum exakt der einem Materialvolumen mit elektromagnetischen Wellen zugeführten inneren Energie eines Materials, wie in der Thermodynamik beschrieben. Der Imaginärteil der komplexwertigen, relativen Permittivität ist ein Maß für die Fähigkeit eines Stoffes, elektromagnetische Feldenergie bei Hochfrequenz in Wärmeenergie zu wandeln.

## Temperaturabhängigkeit

Temperaturabhängig ist beispielsweise die komplexwertige, relative Permittivität von Wasser, deren Realteil bei Raumtemperatur einen Wert von etwa 80 annimmt, und bei 95 °C circa 55 beträgt. Die Abnahme der Permittivität bei steigender Temperatur hängt mit dem zunehmenden Grad der Unordnung der Ladungsträger bei einer Zunahme der inneren Energie zusammen. Molekular betrachtet nimmt die Polarisierbarkeit aufgrund der zunehmenden Eigenbewegung der Ladungsträger bei höherer innerer Energie ab; makroskopisch betrachtet sinkt somit die relative Permittivität bei Temperaturerhöhung.

## Relative Permittivität ausgewählter Materialien

Relative Permittivität einiger Stoffe  
bei 18 °C und einer Frequenz von 50 Hz, sofern nicht anders angegeben



Medium	$\epsilon_r$	Medium	$\epsilon_r$
<u>Vakuum</u>	1,0	<u>Luft</u>	1,00059
<u>Acrylbutadienstyrol</u> (ABS) (30 °C)	4,3	<u>Aluminiumoxid</u> (Tonerde)	9
<u>Ammoniak</u> (0 °C)	1,007	<u>Bariumtitanat</u>	$10^3$ – $10^4$
<u>Benzol</u>	2,28	Trockene Erde	3,9
Feuchte Erde	29	<u>Glas</u>	6–8
<u>Glycerin</u>	42,5	<u>Gummi</u>	2,5–3
<u>darrtrockenes Holz</u>	2–3,5	<u>Kaliumchlorid</u>	4,94
		<u>Methanol</u>	32,6
<u>Petroleum</u>	2	<u>Polyethylen</u> (PE) (90 °C)	2,4
<u>Polypropylen</u> (PP) (90 °C)	2,1	<u>Porzellan</u>	2–6
<u>Propanol</u>	18,3	<u>Paraffin</u>	2,2
<u>Papier</u>	1–4	<u>Polytetrafluorethylen</u> (PTFE oder auch Teflon)	2
<u>Pertinax, Epoxidharz</u>	4,3–5,4	<u>Polystyrol</u> -Schaum (Styropor ® <u>BASF</u> )	1,03
<u>Tantalpentoxid</u>	27	<u>Wasser</u>	80,1
<u>Wasser</u> ( $f = 2,54$ GHz)	77	<u>Wasser</u> (sichtbarer Bereich)	1,77
<u>Eis</u> (–20 °C)	$\approx 100$	<u>Eis</u> (–20 °C, $f > 100$ kHz)	3,2
<u>Germanium</u>	16,6		

Tabellierte, umfassende Übersichten frequenz- und temperaturabhängiger, komplexer relativer Permittivitäten vieler Materialien finden sich in [1] und vor allem in [2]

## Verallgemeinerungen zur Dispersion, Richtungsabhängigkeit und Magnetfeld

Aus den Maxwell-Gleichungen folgt ein Zusammenhang zwischen der Brechzahl, der elektrischen Permittivität und der magnetischen Permeabilität,

$$n^2 = \epsilon_r \mu_r$$

Hier sind  $\epsilon$  und  $\mu$  bei der einschlägigen optischen Frequenz (größenordnungsmäßig im Bereich  $10^{15}$  Hz) gemeint. Für gasförmige, flüssige und feste Materie ist  $\epsilon_r$  größer eins. Allerdings gibt es in anderen Materiezuständen, z. B. im Plasma (sog. „vierter Aggregatzustand“), auch Werte, die kleiner als eins sein können.

In dispersiven Materialien hat man es mit der Reaktion des Materials auf elektromagnetische Felder mit der Frequenz von Licht zu tun, also sehr hohen Frequenzen über einen weiten Frequenzbereich.

Hier muss der Zusammenhang zwischen der Brechzahl und den bei niedrigen Frequenzen gemessenen  $\epsilon$  wesentlich allgemeiner gefasst und die Frequenzabhängigkeit berücksichtigt werden (siehe Lorentz-Oszillator). Auf diese Weise können Absorptions- und Reflexionsspektren von Materialien gut dargestellt werden.

Die Dielektrizitätskonstante wird dabei als komplexe Größe verwendet, mit einem Realteil  $\epsilon_r'$  und einem Imaginärteil  $\epsilon_r''$  (vgl. Abschnitt Komplexwertige relative Permittivität).

$$\epsilon_r(\omega) = \epsilon_r'(\omega) + i\epsilon_r''(\omega)$$

Dabei können in diesen beiden Komponenten direkt die Beiträge verschiedener Mechanismen im Material (z. B. [Bandübergänge](#)) angegeben und in ihrer Frequenzabhängigkeit addiert werden – eine detailliertere Darstellung findet sich unter [elektrische Suszeptibilität](#). Über die [Kramers-Kronig-Relation](#) kann dann der (dispargierende) Zusammenhang zwischen der komplexen Dielektrizitätskonstanten und den optischen Kenngrößen Brechzahl  $n$  und [Absorptionskoeffizient](#)  $k$  dargestellt werden. Dies führt zu den theoretischen Spektren von Absorption und Reflexion, die mit gemessenen Spektren verglichen und angepasst werden können.

Für die Berechnung solcher *Spektren* (von [Reflexion](#) oder auch [Absorption](#)) können im Fall von  $\mu_r \approx 1$  (nichtmagnetisches Material) die Größen  $n$  und  $k$  der komplexen Brechzahl direkt aus den Real- und Imaginärteilen der Permittivität bestimmt werden:

$$n^2 = \frac{1}{2} \cdot \left( \sqrt{(\varepsilon_r'{}^2 + \varepsilon_r''{}^2)} + \varepsilon_r' \right) \quad \text{bzw.} \quad k^2 = \frac{1}{2} \cdot \left( \sqrt{(\varepsilon_r'{}^2 + \varepsilon_r''{}^2)} - \varepsilon_r' \right)$$

umgekehrt gilt:

$$\varepsilon_r' = n^2 - k^2 \quad \text{bzw.} \quad \varepsilon_r'' = 2nk$$

Ebenfalls kann u. a. der Reflexionsgrad  $R$  berechnet werden:

$$R = \frac{(n - 1)^2 + k^2}{(n + 1)^2 + k^2}$$

Auf Grund ihrer Kristallstruktur sind die Eigenschaften einiger Materialien richtungsabhängig, z. B. [doppelbrechenden Materialien](#). Diese Materialien finden u. a. Anwendung bei [Verzögerungsplatten](#).

Mathematisch lässt sich diese Eigenschaft durch Darstellung in Tensorform erfassen, mit Komponenten für die einzelnen Richtungen. Diese sind wiederum als frequenzabhängig anzusetzen und sogar je nach Richtung in verschiedenem Maße. Neben der „natürlichen“

Richtungsabhängigkeit können die Eigenschaften auch durch äußere Einwirkungen wie ein [Magnetfeld](#) (siehe [Magnetooptik](#)) oder Druck eine ähnliche Richtungsabhängigkeit bewirken.

## Siehe auch

- [Ferroelektrikum](#)
- [Paraelektrikum](#)
- [Permeabilität \(Magnetismus\)](#) - das Analogon für Magnetfelder

## Literatur

- H. Frohne: *Einführung in die Elektrotechnik, Band 2: Elektrische und magnetische Felder*. 4. Auflage. Teubner, Stuttgart, 1983, [ISBN 3-519-30002-8](#).
- Károly Simonyi: *Theoretische Elektrotechnik*. 10. Auflage. Barth Verlagsgesellschaft, 1993, [ISBN 3-335-00375-6](#).
- Arthur von Hippel, Editor: *Dielectric Materials and Applications*. Artech House, London, 1954, [ISBN 0-89006-805-4](#).
- Arthur von Hippel: *Dielectrics and Waves*. Artech House, London, 1954, [ISBN 0-89006-803-8](#).
- A. C. Metaxas, R. J. Meredith: *Industrial Microwave Heating (IEE Power Engineering Series)*. Institution of Engineering and Technology, 1983, [ISBN 0-90604-889-3](#).

1996, [ISBN 0-471-95644-9](#).

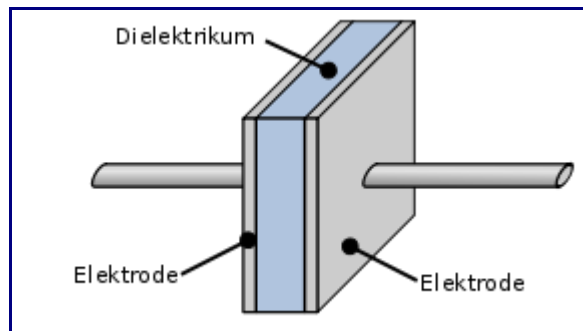
- Feynman, Leighton, Sands: *The Feynman Lectures on Physics, Volume II*. 6. Unveränderte Auflage. Addison Wesley, 1977, [ISBN 0-201-02117-X](#).

## Einzelnachweise

1. ↑ A. C. Metaxas, R. J. Meredith: *Industrial microwave heating*. In: *IEE Power Engineering Series*. Peregrinus, London 1983, [ISBN 0-906048-89-3](#).
2. ↑ Arthur Robert von Hippel (Hrsg.): *Dielectric materials and applications*. Artech House, Boston 1995, [ISBN 0-89006-805-4](#).

# Kondensator (Elektrotechnik)

aus Wikipedia, der freien Enzyklopädie



Prinzipdarstellung eines Kondensators mit Dielektrikum

Ein **Kondensator** (von [lateinisch](#) *condensare*, deutsch „verdichten“) ist ein passives [elektrisches Bauelement](#) mit der Fähigkeit, [elektrische Ladung](#) und damit zusammenhängend [Energie](#) zu speichern. Die Fähigkeit, Ladung zu speichern, wird als [elektrische Kapazität](#) bezeichnet und in der Einheit [Farad](#) gemessen. Kondensatoren wirken Spannungsänderungen aufgrund ihrer Ladungsspeicherfähigkeit entgegen, während eine [Spule](#) Stromänderungen entgegenwirkt.

Die technische Ausführung von Kondensatoren besteht aus zwei elektrisch [leitenden](#) Flächen in meist geringem Abstand, den [Elektroden](#), auch Kondensatorbeläge genannt. Dazwischen befindet sich immer ein Bereich mit [isolierender](#) Eigenschaft, ein [Dielektrikum](#). Bei den meisten Bauformen werden die Elektroden und das Dielektrikum aufgerollt oder als Stapel angeordnet.

Kondensatoren werden in vielen [Anlagen der Elektrik](#) und in nahezu jedem [elektronischen Gerät](#) eingesetzt. Sie realisieren beispielsweise elektrische [Energiespeicher](#), [Blindwiderstände](#) oder [frequenzabhängige Widerstände](#); spezielle Bauformen werden als [Sensor](#) verwendet. Bei besonderen Konfigurationen sind nichtlineare Kondensatoren bekannt.<sup>[1]</sup> Als [Kapazitätsnormal](#) wird ein elektrischer Kondensator mit höchsten Anforderungen an die absolute und relative Kapazitätskonstanz in Bezug auf thermische Umweltänderungen und Alterung bezeichnet. Zusätzlich werden meist noch höchste Anforderungen an die elektrische Güte über einen großen Einsatzfrequenzbereich sowie [Polarisationsspannungen](#) des verwendeten Dielektrikums von weniger als einigen Mikrovolt gefordert. Auch [Thermospannungen](#) sind hier unerwünscht. Diese *Eich-Kapazitätsnormale* werden zur Normierung bzw. zum Abgleich hochwertiger Messgeräte, wie z. B. Präzisions-RLC-Messbrücken eingesetzt bzw. befinden sich in diesen Geräten.

Begrifflich abgegrenzt werden Anordnungen, bei denen die kapazitive Kopplung zweier Elektroden

nicht das unmittelbare Ziel oder unerwünscht ist. Begriffe dieser sogenannten parasitären oder begleitenden Kapazitäten sind zum Beispiel „[Streukapazität](#)“, „[kapazitive Störeinkopplung](#)“ oder „[Leitungskapazität](#)“. Ebenfalls nicht zu den Kondensatoren wird eine Reihe von Aktoren gezählt wie [piezoelektrische Wandler](#), [elektrostatische Lautsprecher](#), [Ablenkplatten](#) und Bauelemente der [Elektrooptik](#). Diese haben zwar einen ähnlichen Aufbau, der jedoch unmittelbar nur der Erzeugung eines elektrischen Feldes dient. Teilweise weisen diese Aktoren relativ hohe, meist hier aber unerwünschte Eigenkapazitäten im Nano-Farad-Bereich auf.

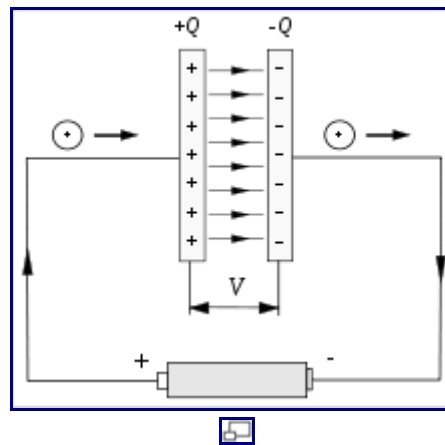
# Inhaltsverzeichnis

- 1 Funktionsweise
- 2 Geschichte
  - 2.1 Leidener Flasche
  - 2.2 Weiterentwicklung
- 3 Berechnung der Kapazität
- 4 Anwendungen
  - 4.1 Energie- und Ladungsspeicher
  - 4.2 Frequenzabhängiger Widerstand
    - 4.2.1 Energietechnik
    - 4.2.2 Filteranwendungen
  - 4.3 Wandler
    - 4.4 Informationsspeicher
    - 4.5 Kondensatoren als Sensoren
      - 4.5.1 Änderung der Elektrodengeometrie
      - 4.5.2 Änderung des Dielektrikums
- 5 Bauarten und Bauformen
  - 5.1 Kondensatoren mit fester



## Funktionsweise

Ein [elektrischer Stromfluss](#) durch einen Kondensator *hindurch* lädt eine der [Elektroden](#) positiv, die andere negativ auf. Allgemein ausgedrückt wird die auf den [Elektroden](#) gebildete [Ladung](#) vom Kondensator gespeichert.



Prinzipielle Darstellung des Stromflusses durch einen Kondensator mit der Bildung eines elektrischen Feldes und der Aufladung der Elektroden, wobei eine Spannung  $V$  entsteht

Zwischen den beiden Elektroden des Kondensators fließt der Strom als [Verschiebungsstrom](#), der mit einer entsprechenden Änderung der [elektrischen Feldstärke](#) einhergeht. Ein weiterer Stromfluss gegen die sich aufbauende [Spannung](#) erhöht die innere Energie des Kondensators. Wird der Kondensator von der Stromquelle getrennt, so bleiben Energie und Ladungen erhalten, die Spannung bleibt konstant. Wird durch Umkehr der Stromrichtung Energie entnommen, sinkt die Spannung wieder.

Ist der Raum zwischen den Elektroden mit einem Dielektrikum ausgefüllt, so besteht der Verschiebungsstrom zusätzlich zu dem Anteil durch die Änderung der Feldstärke aus sich tatsächlich bewegenden Ladungen des Materials. Diese Ladungen sind aber nicht frei beweglich, sodass das Material polarisiert wird. Bei kleinen Feldstärken wächst die Polarisation linear. Dann wird der Einfluss des Isolators beschrieben durch seine [Dielektrizitätszahl](#) und die gespeicherte

Ladung ist proportional zur Spannung. Die Proportionalitätskonstante wird als [Kapazität](#) bezeichnet; sie ist das wesentliche Merkmal eines Kondensators. Je größer die Kapazität ist, desto mehr Ladung und Energie kann ein Kondensator bei einer bestimmten Spannung speichern. Die Gleichungen

$$Q = C \cdot U$$

und

$$W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$$

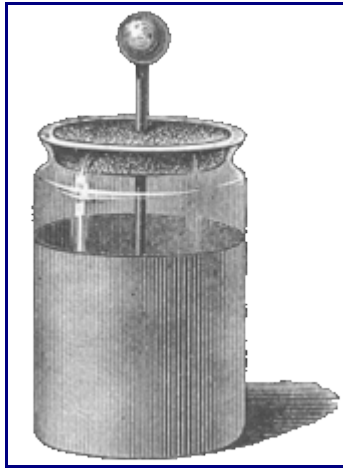
fassen das zusammen.  $Q$  ist die Ladung (in [Coulomb](#), C, oder Amperesekunden, As),  $C$  die Kapazität (in [Farad](#), F) und  $U$  die Spannung (in [Volt](#), V); die Energie (in [Joule](#), J) ist mit  $W$  bezeichnet um sie von der Feldstärke  $E$  zu unterscheiden.

Wichtig ist die Maximalspannung, die ein Kondensator zwischen seinen Elektroden ertragen kann. Diese [Spannungsfestigkeit](#) sowie [weitere Merkmale](#) werden weiter unten besprochen.

Die für viele Anwendungen wichtige Entladedifferentialgleichung befindet sich im Artikel [RC-Glied](#).

# Geschichte

## Leidener Flasche



Leidener Flasche

→ Hauptartikel: [Leidener Flasche](#)

Die Leidener Flasche ist die älteste Bauform eines Kondensators ([Kapazität](#) etwa 5 nF). Sie besteht aus einem Glasgefäß, das innen und außen mit Metallfolie, meist aus Aluminium, belegt ist. Das [Glas](#) wirkt als [Isolator](#), später „Dielektrikum“ genannt. Das Prinzip der Leidener Flasche wurde unabhängig voneinander 1745 von dem [Domdechanten Ewald Jürgen Georg von Kleist](#) in [Cammin \(Pommern\)](#) und ein Jahr später von dem Physiker [Pieter van Musschenbroek](#) in [Leiden](#) gefunden, als sie bei Laborversuchen mit Anordnungen von Gläsern und Metallteilen elektrische [Stromschläge](#) erlitten.

Die Leidener Flasche und ähnliche Laborgeräte wurden in der Folge vornehmlich zur publikumswirksamen Demonstration von Stromschlägen (auch als „Kleistscher Stoß“ bekannt geworden) eingesetzt, bei später zunehmenden Kenntnissen über das Wesen der [Elektrizität](#) auch als [Stromquelle](#) für fortgeschrittenere Experimente: [Benjamin Franklin](#) verband eine Leidener Flasche über eine Metallschnur mit einem Drachen, den er in den Himmel steigen ließ. Es gelang ihm mit diesem gefährlichen Experiment, Ladung von Gewitterwolken auf die Leidener Flasche zu übertragen. Er prägte den Begriff „electrical condenser“.

## Weiterentwicklung

Ein verbesserter Kondensator wurde 1775 durch [Alessandro Volta](#) (1745–1827) erfunden, er nannte ihn „electrophorous“ ([Elektrophor](#), Elektrizitätsträger). Er bestand aus zwei Metallplatten, die durch eine [Ebonitschicht](#) gegeneinander isoliert waren. Man kann diese Anordnung bereits als Prototyp moderner Kondensatoren betrachten. Der Einsatz besserer Dielektrika führte später zu einer Reduzierung der Baugröße. Etwa 1850 wurde [Glimmer](#), ein natürlich vorkommendes Mineral, in Scheiben geschnitten und als Isolator verwendet; kommerziell wurden diese Kondensatoren ab der Zeit des ersten Weltkrieges hergestellt. Gewickelte [Papierkondensatoren](#) mit Metallfolienbelägen sind seit 1876 in Gebrauch.[\[2\]](#)

Kondensatoren, die durch den chemischen Aufbau eines äußerst dünnen Dielektrikums aus nichtleitendem Aluminiumoxid auf einer Aluminium-Anode und Verwendung eines flüssigen [Elektrolyten](#) zu Kondensatoren mit höherer Kapazität führten, die späteren „[Elektrolytkondensatoren](#)“, wurden 1896 von Charles Pollak zum Patent angemeldet[\[3\]](#), sie wurden anfangs als Siebkondensator zur Unterdrückung von Brummgeräuschen in Telefonnetzen benutzt.

Seit etwa 1900 wurde auch Porzellan als Dielektrikum in Kondensatoren verwendet. Erst in den

1930er Jahren erfolgte durch die Erforschung weiterer keramischer Werkstoffe als Ersatz für Porzellan und Glimmer die Entwicklung der Keramikkondensatoren.

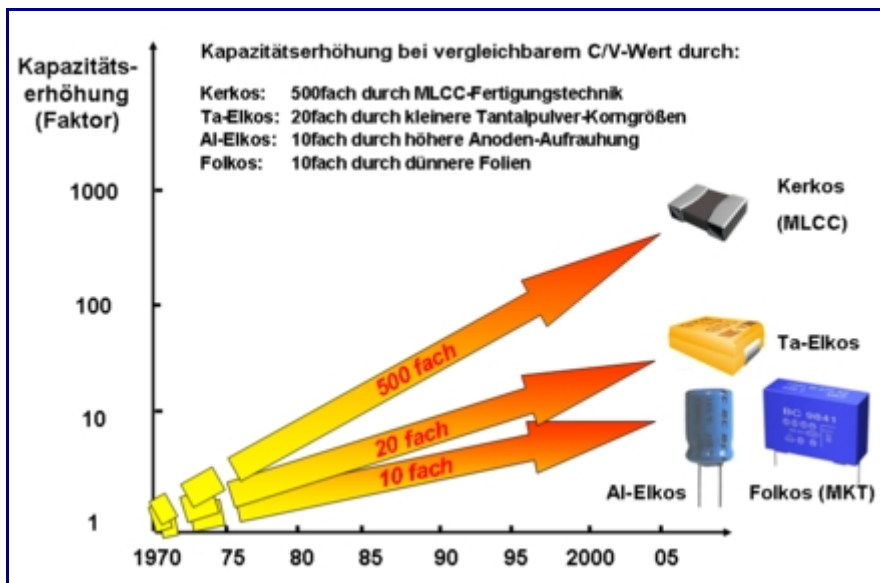
Mit der Entwicklung hochwertig isolierender Kunststofffolien aus dem Bereich der organischen Chemie nach dem Zweiten Weltkrieg begann die Industrie, das Papier in den Metall-Papierkondensatoren durch dünnere und spannungsfestere Kunststofffolien zu ersetzen, aus denen sich eine breite Palette von unterschiedlichen Kunststoff-Folienkondensatoren entwickelte.

Ebenfalls nach dem Zweiten Weltkrieg, ab etwa 1950, wurde bei der General Electric in den USA mit der Entwicklung von Tantal-Elektrolytkondensatoren begonnen. Hier gelang es, nicht nur eine Miniaturisierung durch eine erheblich höhere Kapazität pro Bauvolumen gegenüber den bislang bekannten Kondensatoren zu erreichen, sondern mit der Entwicklung eines festen Elektrolyten konnte außerdem die Langzeitstabilität von Elektrolytkondensatoren deutlich verbessert werden.

Eine nochmals deutliche Kapazitätssteigerung gelang mit dem von General Electric 1957 patentierten „Low voltage electrolytic capacitor“, [4] der durch SOHIO und ab 1971 durch NEC zu einem marktreifen Bauelement weiterentwickelt wurde und später die treffende Bezeichnung „Doppelschicht-Kondensator“ erhielt.

Eine neuere Entwicklung sind Silizium-Kondensatoren. Diese resultieren aus der großen Erfahrung der Halbleiterindustrie mit der Strukturierung von Silizium und bieten dem Anwender frequenzstabile Kapazitätswerte bis in den Gigahertz-Bereich.

In den letzten Jahren erfolgte bei allen dafür geeigneten Kondensatorarten eine Entwicklung zu immer kleinerem Bauvolumen und hin zu oberflächenmontierbaren (SMD) Kondensatoren. Darüber hinaus wurde speziell bei Aluminium- und Tantal-Elektrolytkondensatoren durch Einführung von neuen Polymer-Elektrolytsystemen eine erhebliche Erhöhung der Elektrolyt-Leitfähigkeit und entsprechend geringere Verlustwiderstände erreicht.



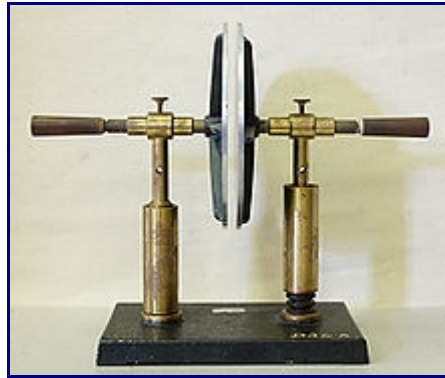
Die Miniaturisierung in der Elektronik wurde nicht zuletzt auch durch Miniaturisierung bei den Kondensatoren erreicht. Die Volumeneffizienz eines Keramikkondensators beispielsweise konnte durch Weiterentwicklung in der Fertigungstechnik hin zu MLCC-Keramikkondensatoren bei gleichem C/V-Wert um etwa den Faktor 500 gesteigert werden.

Kondensatoren werden in einer Vielzahl von Geräten eingesetzt, sie hatten 1998 ein Marktvolumen von 9,2 Milliarden Dollar, wobei 38 % Keramikkondensatoren und 28 % Elektrolytkondensatoren einnahmen. Der Rest verteilte sich überwiegend auf Folien- und Papierkondensatoren. [5]

Aktuelle (2009) Forschungen beschäftigen sich unter anderem mit neuen Oberflächenstrukturierungen der Elektroden. Beispielsweise lässt sich durch eine Nanostruktur in

Form von Milliarden nebeneinander liegender kleiner Löcher in einer dünnen Aluminiumschicht, beschichtet mit Titan-Nitrid/Aluminiumoxid/Titan-Nitrid als kapazitiver Aufbau, die Leistungsdichte eines [Nanokondensators](#), gemessen in W/kg, um mehr als das Zehnfache gegenüber [Elektrolytkondensatoren](#) vergrößern und erreicht damit eine Speicherfähigkeit in der Größenordnung von [Doppelschichtkondensatoren](#), ohne deren Nachteil, die begrenzte Lade- bzw. Entladegeschwindigkeit aufzuweisen.[\[6\]\[7\]\[8\]\[9\]](#)

## Berechnung der Kapazität

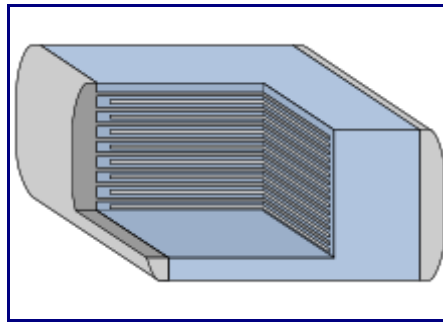


Einfacher Plattenkondensator aus dem Physikunterricht

Für eine Reihe von idealisierten Elektrodenanordnungen lässt sich die Feldverteilung  $E(r)$  im Kondensator und damit seine Kapazität  $C$  exakt bestimmen. In der folgenden Tabelle sind einige wichtige Anordnungen aufgeführt:

Bezeichnung	Schematische Darstellung	Elektrisches Feld	Kapazität
Plattenkondensator		$\mathbf{E} = \frac{Q}{\epsilon_0 \epsilon_r A}$	$C = \epsilon_0 \epsilon_r \cdot \frac{A}{d}$
<a href="#">Zylinderkondensator</a>		$\mathbf{E}(r) = \frac{Q}{2\pi r l \epsilon_0 \epsilon_r}$	$C = 2\pi \epsilon_0 \epsilon_r \frac{l}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}$
<a href="#">Kugelkondensator</a> <a href="#">Kugel</a>		$\mathbf{E}(r) = \frac{Q}{4\pi r^2 \epsilon_0 \epsilon_r}$	$C = 4\pi \epsilon_0 \epsilon_r \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)^{-1}$ $C = 4\pi \epsilon_0 \epsilon_r R_1$

Hier bezeichnet ggf.  $A$  die Elektrodenfläche,  $d$  deren Abstand,  $l$  deren Länge,  $R_1$  sowie  $R_2$  deren [Radien](#). In der schematischen Darstellung sind die Elektroden hellgrau bzw. dunkelgrau und das Dielektrikum blau gefärbt. Anzumerken ist hier, dass bei den Anordnungen *Plattenkondensator* und *Zylinderkondensator* nur der Kapazitätsanteil durch dieses blau dargestellte Dielektrikum berechnet wird. Da auch Felder außerhalb des dargestellten Dielektrikums existieren – die bildlich gesprochen seitlich herausquellen –, stellen die gegebenen Formeln nur Näherungen dar, die umso besser werden, je geringer der Abstand der Elektroden im Vergleich zu ihrer Länge ist.



Aufbau eines Vielschichtkondensators: Das Dielektrikum ist blau, die mit einem Potentialanschluss verbundenen Elektroden sind dunkelgrau, mit dem anderen hellgrau dargestellt.

Plattenkondensatoren erlauben in einer modifizierten Ausführung sehr hohe Kapazitäten pro Volumen: Indem man die jeweils mit einem Potential verbundenen Elektroden abwechselnd aufeinander gestapelt, werden sie doppelt wirksam. Die Abbildung des *Vielschichtkondensators* verdeutlicht dies. Sind die Platten als Metallfolie oder -film ausgeführt, können sie bei einem geeigneten Isolator auch aufgewickelt werden, auch dabei verdoppelt sich die Wirkung. Aufgrund seiner kompakten Bauform ist das der gebräuchlichste Kondensator.

Zylinderkondensatoren werden meist nur bei speziellen Anwendungen eingesetzt, beispielsweise als Vakuum- oder Durchführungskondensator. Die für die Bauform angegebene Gleichung ist aber auch hilfreich, um den [Kapazitätsbelag](#) einer [Koaxialleitung](#) zu bestimmen.

Bei Kugelkondensatoren ist insbesondere der Spezialfall,  $R_2 \rightarrow \infty$  von Bedeutung, die Kapazität einer freistehenden Kugel. Hier wird die Gegenelektrode durch die Umgebung gebildet, sie liegt deshalb gewöhnlich auf [Erdpotenzial](#). Die Kapazität dieser Bauform ist sehr gering. So hat eine Kugel mit einem Radius von 15 cm, wie sie im [Van-de-Graaff-Generator](#) zur Ladungsspeicherung oder in [Tesla-Spulen](#) zur Bildung eines [LC-Schwingkreises](#) eingesetzt wird, theoretisch eine Kapazität von ca. 16,7 pF. In der Praxis ist die Kapazität jedoch höher, weil die Gegenelektrode (Erde) nicht unendlich weit entfernt ist. Im CGS-Einheitensystem ist die Kapazität eines Kugelkondensators gleich dem Radius der Kugel in Zentimetern, die oben genannte Kugel hat also eine Kapazität von 15 cm. Da auf der Kugeloberfläche das elektrische Feld sehr homogen ist, können Kugelkondensatoren auf mehrere Millionen Volt aufgeladen werden, bevor es zu einer [Funkenentladung](#) kommt.

## Anwendungen

### Energie- und Ladungsspeicher

Eine typische Anwendung in der [Leistungselektronik](#) bilden [Zwischenkreiskondensatoren](#) in [Schaltnetzteilen](#) und [Umrichtern](#). Hier übernimmt eine Schaltung (zum Beispiel [Gleichrichter](#), [Vierquadrantensteller](#)) die [Gleichrichtung](#) von [Wechselstrom](#), dieser Schaltungsteil agiert als Stromquelle. Ein zweiter Schaltungsteil agiert als Senke (zum Beispiel [Wechselrichter](#)). Der Zwischenkreiskondensator hat die Aufgabe, den pulsierenden Strom aus dem Gleichrichter aufzunehmen und dem Wechselrichter eine ausreichend konstante Spannung zuzuführen. Je größer seine Kapazität desto kleiner die Spannungsänderung durch die Stromentnahme zwischen den Ladepulsen. Die gleiche Funktion haben auch die [Glättungskondensatoren](#) am Ausgang von [Gleichspannungswandlern](#) und in [Gleichspannungsnetzteilen](#), sie halten deren [Brummspannung](#) möglichst klein.

In ähnlicher Weise können Kondensatoren zeitlich begrenzt hohe Leistung bereitstellen (siehe auch [Doppelschichtkondensator](#)). Sie werden auf eine bestimmte Spannung aufgeladen und können dann Verbraucher mit hohem kurzzeitigem Leistungsbedarf antreiben. Beispiele dafür sind die



Hochspannungs-Kondensatorzündung bei Verbrennungsmotoren und in der Waffentechnik der „exploding-bridgewire detonator“ [10].

Eine typische Anwendung findet man in Blitzlichtgeräten. Ein Kondensator wird mit Hilfe eines Spannungswandlers innerhalb von einigen Sekunden aus einer Batterie bis etwa 400 V aufgeladen. Nach Zündung der Blitzröhre entlädt sich der Kondensator innerhalb einiger Mikrosekunden und liefert dabei eine Leistung von einigen Kilowatt. Die Batterie selbst kann wegen ihres hohen Innenwiderstandes unmöglich so viel Leistung zur Verfügung stellen.

Gleiches gilt für die heute in der Medizin eingesetzten Defibrillatoren. Implantierbare Defibrillatoren arbeiten mit Spannungen von zirka 650 bis 800 V und einer Schockenergie von 30 J bei einer Batteriespannung von zirka 3,5 V. Die Kapazitäten der Kondensatoren liegen bei etwa 100 bis 170  $\mu\text{F}$ .

Stützkondensatoren dienen zur Stabilisierung der Versorgungsspannung in hochfrequenten und komplexen digitalen Schaltungen. Hier werden zu jedem IC oder Schaltungsabschnitt ein oder mehrere Kondensatoren parallel zur Versorgungsspannung geschaltet, die als Spannungs- oder Energiequelle in Momenten hohen Strom- bzw. Leistungsbedarfs wirken. Durch ihre niedrige Impedanz bei hohen Frequenzen verringern sie die Impedanz der übergeordneten Spannungsversorgung oder deren Zuleitung und verhindern eine gegenseitige Beeinflussung der Energieversorgung von Teilschaltungen. Umgekehrt können Kondensatoren störende, zeitlich begrenzte Überspannungen in elektronischen Schaltungen aufnehmen und so ihre Ausbreitung und schädliche Wirkung verhindern. Man nennt das Glätten oder Abblockung und bezeichnet jene Bauteile als Glättungs- oder Blockkondensatoren. Entstehen die Überspannungen durch Schaltvorgänge an Relais oder Leistungshalbleitern, werden die Kondensatoren speziell als Lösch- bzw. Snubberkondensatoren bezeichnet.

Des Weiteren werden Verschaltungen von mehreren Kondensatoren zum Herauf-, Herabsetzen und zum Invertieren von Versorgungsspannungen genutzt. Hier werden Kondensatoren zyklisch auf ein Potential aufgeladen, mit einem anderen Potential verbunden und dort entladen. Gebräuchliche Schaltungen sind die Ladungspumpe und deren spezielle Ausführung als Hochspannungskaskade.

Für Anwendungen, in denen es nicht auf schnellste Verfügbarkeit ankommt, sind zur Speicherung größerer Energiemengen andere Speichertechnologien wirtschaftlicher.

## **Frequenzabhängiger Widerstand**

Für die Anwendung als frequenzabhängiger Blindwiderstand muss der Kondensator eine bekannte Kapazität haben, da der Kapazitätswert direkten Einfluss auf den kapazitiven Blindwiderstand hat. Im folgenden werden Anwendungen des frequenzabhängigen Blindwiderstandes genannt, wie sie in der elektrischen Energietechnik, Nachrichtentechnik, Analog- und Digitaltechnik auftreten.

### **Energietechnik**

In der Energietechnik können Kondensatoren dazu genutzt werden, die Phasenlage zwischen Strom und Spannung eines Wechselstromes zu ändern: Werden in Industrieanlagen große Elektromotoren betrieben, kommt es aufgrund deren Induktivität zu einem erheblichen Blindstrom. Dieser kann durch die „Phasenverschiebung“ des Kondensators kompensiert werden, der den „funktionalen Gegenpol“ der Induktivität bildet. Für diese Blindstromkompensation müssen Kondensator und Induktivität die gleiche Impedanz haben.

Eine weitere Anwendung findet der Kondensator in einem Kondensatormotor, bei dem er zusammen mit einer Feldspule des Motors die Phasenlage des Wechselstroms verschiebt, wodurch letztendlich ein magnetisches Drehfeld erzeugt wird.

Zur Herabsetzung von Spannungen bzw. als kapazitiver Vorwiderstand wird der Kondensator in einem Kondensatornetzteil verwendet: er arbeitet dort an einer großen Wechselspannung (in der



Regel die [Netzspannung](#)) und liefert einen kleinen Wechselstrom, der eine nachfolgende Schaltung mit einer kleineren Spannung versorgt.

## Filteranwendungen

Die Frequenzabhängigkeit des Wechselstromwiderstands wird benutzt, um Wechselspannungen frequenzabhängig anzuheben oder abzusenken, zu „[filtern](#)“. Eine einfache Schaltung ist das [RC-Glied](#), das je nach Schaltung als Hoch- oder Tiefpass wirkt. Einen Grenzfall des Hochpasses stellt der Koppelkondensator dar, der dazu dient, Gleichströme von überlagerten, höherfrequenten Wechselstromanteilen zu trennen. Das ist unter anderem nötig, um den [Arbeitspunkt](#) bei [Analog-Verstärkern](#) einstellbar zu halten.

Zusammen mit [Spulen](#), die als Kenngröße eine bestimmte [Induktivität](#) aufweisen, ohmschen Widerständen und eventuell aktiven Bauelementen werden Kondensatoren in elektronischen Schaltungen auch für [Schwingkreise](#), [Bandfilter](#) und [Frequenzweichen](#) verwendet. Dabei ergibt sich eine bestimmte Resonanzfrequenz. Entsprechende Schaltungen sind ebenfalls Hoch- oder Tiefpässe, lassen sich allerdings mit höherer [Güte](#) herstellen. Ein Beispiel dafür sind die [Frequenzweichen](#) in [Lautsprechern](#).

Eine zeitdiskrete Variante von speziellen Filtern, die Kondensatoren in ihrem Aufbau verwenden, stellen die [Switched-Capacitor-Filter](#) dar. Weiters können in Filtern Spulen durch sogenannte [Gyratoren](#) nachgebildet werden: Dabei wird mit der Kapazität eines Kondensators unter Verwendung einer aktiven Schaltung die Induktivität einer Spule nachgebildet.

## Wandler

Die sich an einem Kondensator aufbauende Spannung ist proportional dem Integral des Ladestromes über die Zeit. Auf diese Weise werden Kondensatoren zur Festlegung von Schaltzeiten genutzt, zum Beispiel bestimmt ein Kondensator die Schaltzeiten einer [astabilen Kippstufe](#). Dazu wird ein Kondensator über eine [Stromquelle](#) geladen; seine Spannung nimmt proportional zur verstrichenen Zeit zu. Sobald die Spannung einen bestimmten Wert überschreitet, erfolgt ein Zustandswechsel der Schaltung. In ähnlicher Weise wird eine Reihe von Wandlerschaltungen realisiert:

- **Spannungs-Frequenz-Wandler:** Diese Schaltung wandelt eine Eingangsspannung in eine dazu proportionale [Frequenz](#) um. Ein Kondensator wird zyklisch durch eine spannungsgesteuerte [Konstantstromquelle](#) bis zu einer vorgegebenen Spannung geladen, dann schlagartig entladen. Die Frequenz des sägezahnförmigen Spannungsverlaufes am Kondensator ist das Ausgangssignal.
- **Analog-Digital-Umsetzer** nach dem *slope*-Prinzip: Dieser Wandler gleicht dem Spannungs-Frequenz-Wandler, arbeitet allerdings nicht zwingend zyklisch.
- **Zeitmessung:** Hier wird die Stromquelle durch einen Impuls unbekannter Länge gesteuert, die Spannung des Kondensators nach dem Impulsende ist proportional zur Impulslänge.
- **Frequenz-Spannungs-Wandler:** Zur Frequenzmessung werden im Takt der zu messenden Frequenz Impulse konstanter Länge erzeugt. Diese laden periodisch einen Kondensator, dem ein konstanter Entladestrom entnommen wird. Die Spannung am Kondensator ist das Ausgangssignal.

## Informationsspeicher

Der Ladungszustand eines Kondensators kann [Information](#) in [digitaler](#) oder [analoger](#) Form repräsentieren. Analoge Informationsspeicherung mittels eines Kondensators findet beispielsweise in der [Abtast-Halte-Schaltung](#) statt: während der Abtastphase wird ein Kondensator mit einer Eingangs-Signalspannung verbunden, von welcher er während der Haltephase getrennt wird. Der

Spannungswert steht dann zur Weiterverarbeitung, typischerweise einer [Analog-Digital-Wandlung](#) (ADC), konstant zur Verfügung. Eine andere Art analoger Informationsspeicherung ist der [Eimerkettenspeicher](#).

Zur Speicherung von großen Informationsmengen können einige Milliarden Kondensatoren in einer [integrierten Schaltung](#) zusammengefasst werden. Beispiele dafür sind [dynamisches RAM](#) (DRAM), [Eraseable Programmable Read Only Memory](#) (EPROM) und [Flash-Speicher](#).

## Kondensatoren als Sensoren

Sonderbauformen von Kondensatoren sind als Sensoren für eine Reihe [physikalischer Größen](#) geeignet. Diese Größen bewirken eine Änderung der Kapazität oder der enthaltenen Ladung, beides kann durch eine nachfolgende Schaltung ausgewertet werden. Man kann die Messprinzipien in die beiden folgenden Gruppen einteilen:

### Änderung der Elektrodengeometrie

Die Kapazität eines Kondensators ändert sich mit dem Abstand der Elektroden. So können Kondensatoren zur [Abstands-](#) und [Dickenmessung](#) verwendet werden, indem eine Elektrode mit der Messgröße mechanisch gekoppelt wird und sich so die Veränderung der Messgröße auf eine Veränderung des Plattenabstandes überträgt. So können zum Beispiel Lackschichtdicken oder der Abstand einer Düse bei der [Laser-Materialbearbeitung](#) bestimmt werden. In diese Gruppe gehören auch der [kapazitiver Näherungsschalter](#) und der kapazitive [Touchscreen](#). Bei letzterem wird der Abstand zum Finger orts aufgelöst ausgewertet.

Auch [Beschleunigung](#) kann auf diese Weise erfasst werden: Aufgrund der [Massenträgheit](#) einer beweglichen Elektrode zum Beispiel in einem [mikromechanischen Beschleunigungssensor](#) ändert eine Beschleunigung den Abstand zwischen den Elektroden eines Kondensators. In ähnlicher Art sind Sensoren für Druck und Druckänderung ([Manometer](#)) aufgebaut: Ein kompressibles Dielektrikum, meist Luft, bewirkt, dass eine Druckänderung eine Abstandsänderung der Platten hervorruft. Nach diesem Prinzip funktioniert auch das [Kondensatormikrofon](#), das den [Schalldruck](#) oder den [Schalldruckgradienten](#) in ein elektrisches Signal wandelt. Dessen Umkehrung ist der [Kondensatorlautsprecher](#).

Alternativ kann eine Messgröße auch die Überdeckung der Elektroden verändern, wodurch sich ebenfalls die Kapazität ändert. So lassen sich bspw. Winkel messen, indem kreissegmentförmige Elektroden gegeneinander verdreht werden, ähnlich dem weiter unten beschriebenen [Drehkondensator](#).

### Änderung des Dielektrikums

Die zumeist störende Eigenschaft des Dielektrikums, unter Einfluss von [ionisierender Strahlung](#) seine [Leitfähigkeit](#) zu erhöhen, wird bei der Steuerung der [Belichtungszeit](#) von [Röntgenfilmen](#) genutzt. Dazu liegt im Strahlengang ein Kondensator, der vor der Aufnahme eine der [Filmempfindlichkeit](#) proportionale Ladung erhält. Sobald die Ladung während der Aufnahme einen bestimmten Wert unterschreitet, wird die Belichtung abgebrochen.

Ähnlich funktionieren manche [Brandmelder](#), bei denen ein radioaktives Präparat verwendet wird, dessen ionisierende Wirkung durch die Rauchgase abgeschwächt wird. [CCD-Sensoren](#) als Bildaufnehmer nutzen den gleichen Effekt: Die Leitfähigkeit eines [Halbleiters](#) wird durch Lichteinstrahlung erhöht und die Ladung abgebaut. Bei einem kapazitiven [Hygrometer](#) beeinflusst die [Luftfeuchtigkeit](#) die Dielektrizitätszahl eines speziellen Isolationsmaterials und auf diese Weise die Kapazität.

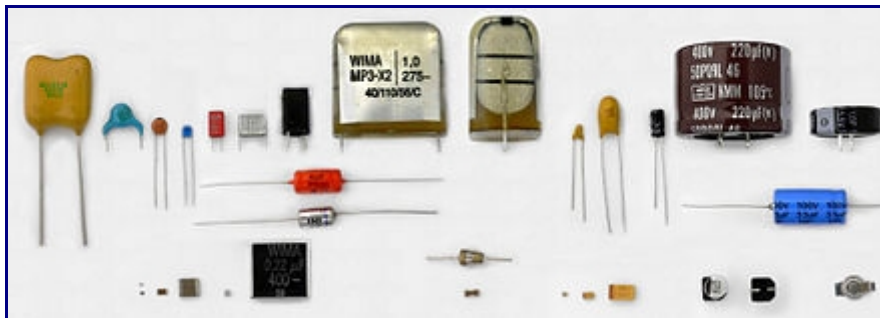
Ebenfalls auf einer Änderung der Dielektrizitätszahl beruht der kapazitive [Füllstandssensor](#). Hier sind die Elektroden so befestigt, dass sie mit zunehmenden Füllstand weiter in die Flüssigkeit

eintauchen. Durch die höhere Permittivität der Flüssigkeit nimmt die Kapazität mit zunehmender Tauchtiefe zu.

## Bauarten und Bauformen

Im Laufe der Historie der Kondensatoren haben sich viele industriell genutzte Bauarten, auch Familien oder Technologien genannt, entwickelt. Diese werden gemäß der Eingruppierung in den internationalen und nationalen Normen in Kondensatoren mit fester Kapazität, die „Festkondensatoren“, und Kondensatoren mit veränderbarer Kapazität, die „Veränderbaren oder Variablen Kondensatoren“, unterteilt.

### Kondensatoren mit fester Kapazität, Festkondensatoren



*Kondensatoren zur Montage auf Platinen.*

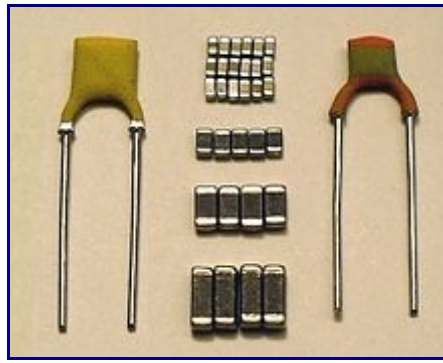
*Obere Reihe, radiale Anschlüsse (v.l.):* Glimmer, Keramik-Y, Keramik-Scheibe, Keramik-Mehrschicht, Folie gewickelt und vergossen, geschichteter Folienkondensator, gewickeltes und vergossenes Polystyrol, gewickelter X-Metallpapierkondensator, dito hochkant (man sieht die großflächige Kontaktierung der Stirnseiten), zwei Tantal-, zwei Aluminiumelektrolytkondensatoren, Doppelschichtkondensator

*Mittlere Reihe, axiale Anschlüsse:* gewickelter Polypropylen-, Polystyrol-Folienkondensator, Keramik-Durchführungskondensator, bipolarer Elektrolytkondensator.

*Untere Reihe, SMD-Bauformen:* zwei  $\text{SiO}_2$ -, zwei Keramik Kondensatoren, zwei Folienkondensatoren, Durchführungskondensator sowie SMD-Tantal- und Aluminium-Elektrolytkondensatoren.

Festkondensatoren haben einen definierten und mit einer Toleranz versehenen Kapazitätswert. Es gibt sie je nach den technischen Anforderungen wie z. B. Spannungsfestigkeit, Strombelastbarkeit, Kapazitätsstabilität, Temperaturkoeffizient, Einsatzfrequenzbereich, Temperaturbereich oder Montageart (SMD-Ausführung) sowie nach wirtschaftlichen Anforderungen (Preis) in zahlreichen verschiedenen Technologie-Familien, Ausführungen und Bauformen.

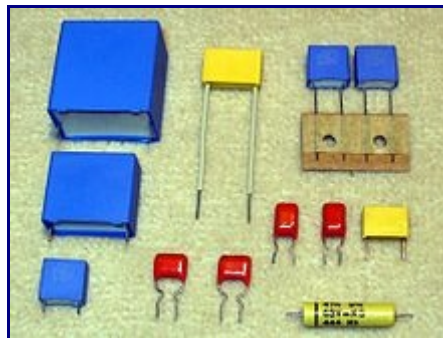
Die wichtigsten industriellen hergestellten Festkondensatoren sind [Keramik-](#), [Kunststoff-](#), [Elektrolyt-](#) und [Doppelschicht-Kondensatoren](#). Keramik- und Kunststoff-Folienkondensatoren besitzen Kapazitätswerte im Bereich weniger Pikofarad bis zu etwa 100 Mikrofarad. Elektrolytkondensatoren beginnen bei etwa 1 Mikrofarad und erstrecken sich bis in den Farad-Bereich. Darüber hinaus haben Doppelschicht-Kondensatoren Kapazitätswerte bis in den Kilofaradbereich.



Keramikvielschicht- Chipkondensatoren unterschiedlicher Größe zwischen Keramik-Scheibenkondensatoren

### Keramikkondensatoren

haben keramische Dielektrika mit Spannungsfestigkeiten von 10 bis zu 100.000 V bei verschieden hoher Permittivität. Sie bilden eine große Gruppe von Kondensatoren im unteren Kapazitätsbereich (0,5 pF bis zu 100 µF oder mehr). Die verwendeten Keramikarten gehören einerseits zu den paraelektrischen Materialien mit feldstärkeunabhängiger relativer Permittivität, beispielsweise Titandioxid (TiO<sub>2</sub>), andererseits zu den ferroelektrischen Materialien mit feldstärkeabhängiger relativer Permittivität, wie zum Beispiel Bariumtitanat (BaTiO<sub>3</sub>). Keramikkondensatoren werden aus fein gemahlten Granulaten durch Sinterung im Temperaturbereich zwischen 1200 und 1400 °C hergestellt. Durch geeignete Zusatzstoffe (Aluminium-Silikate, Magnesium-Silikate, Aluminiumoxide) kann die relative Permittivität  $\epsilon_r$  eines Keramikkondensators zwischen 6 und 14.000 liegen. Die Keramikkondensatoren werden anhand ihrer Keramikart und damit zusammenhängend ihren elektrischen Eigenschaften in zwei Klassen eingeteilt: Klasse-1-Kondensatoren, die sich für Hochfrequenz- und Filteranwendungen eignen und Klasse-2-Kondensatoren, die als Energiespeicher und Siebkondensator eingesetzt werden.



Gebecherte und tauchlackierte Kunststoff-Folienkondensatoren

### Kunststoff-Folienkondensatoren

verwenden Folien aus Kunststoff oder Kunststoffmischungen als Dielektrikum und werden in zwei Ausführungen hergestellt:

- Kunststoff-Folienkondensatoren mit Metallbelägen bestehen aus je zwei Kunststofffolien, die beide mit einer Metallfolie, meist aus Aluminium, belegt sind und gemeinsam zu einem Wickel aufgerollt werden. Bei den üblichen kleineren Bauformen ragen die Metallfolien abwechselnd entgegengesetzt über die Kunststofffolie hinaus, so dass auf jeder Seite des Wickels eine der Metallfolien übersteht, die dann großflächig und induktionsarm mit dem jeweiligen Anschluss kontaktiert wird.
- Metallisierte Kunststoff-Folienkondensatoren bestehen im einfachsten Fall aus zwei Kunststofffolien, die jeweils einseitig mit Aluminium bedampft sind. Diese werden mit

leichtem seitlichem Versatz so aufgewickelt, dass die metallisierten Folien an gegenüberliegenden Seiten aus dem Wickel heraus stehen und somit kontaktiert werden können. Diese Bauform gibt es auch als Schichtkondensatoren – die Lagen werden zu einem großen Block geschichtet, aus dem die einzelnen Kondensatoren herausgesägt werden. Metallisierte Kunststoff-Folienkondensatoren sind, wie MP-Kondensatoren, bei einem [Durchschlag](#) selbstheilend, da die dünne Metallschicht der Beläge vom Spannungsdurchschlags-Lichtbogen um den Durchschlagskanal herum verdampft.

#### Metallpapierkondensatoren (MP-Kondensatoren)

bestehen aus je zwei mit Aluminium metallisierten Papierstreifen ([Isolierpapier](#)), die mit einer weiteren Papierfolie zu einem Wickel aufgerollt und in einem Becher eingebaut werden. Der Wickel wird mit einem Isolieröl imprägniert, wodurch die Spannungsfestigkeit erhöht und der Verlustfaktor verringert wird. MP-Kondensatoren finden vor allem als [Leistungskondensatoren](#) im Bereich der Leistungselektronik und für Netzanwendung als [Entstörkondensator](#) Verwendung. Sie sind auf Grund der metallisierten Beläge, wie vergleichbare Kunststoff-Folienkondensatoren, selbstheilend.



Verschiedene Bauformen von Tantal- und von Aluminium-Elektrolytkondensatoren

#### Elektrolytkondensatoren

(auch Elko genannt) ist ein gepolter Kondensator, dessen Anoden-Elektrode aus einem Metall ([Aluminium](#), [Tantal](#) und [Niob](#)) besteht, auf dem durch Elektrolyse ([anodische Oxidation](#), [Formierung](#)) eine äußerst dünne, elektrisch isolierende Schicht aus dem Oxid des Anodenmetalls erzeugt wird, die das Dielektrikum des Kondensators bildet. Zur Vergrößerung der Oberfläche wird die Anode strukturiert, bei Aluminium-Elkos wird die Anodenfolie aufgeraut, bei Tantal- und Niob-Elkos wird Metallpulver zu einem schwammartigen Körper gesintert. Der Elektrolyt kann aus einem flüssigen Elektrolyten ([Ionenleiter](#)) oder einem festen Elektrolyten ([Elektronenleiter](#)) bestehen und bildet die Kathode des Elektrolytkondensators, die sich der strukturierten Oberfläche der Anode perfekt anpassen muss. Die Stromzuführung zum Elektrolyten erfolgt über Folien gleichen Metalls wie das der Anode oder über eine andere geeignete Kontaktierung. Elektrolytkondensatoren sind, mit Ausnahme bipolarer Elektrolytkondensatoren, immer gepolte Bauelemente, die Anode ist der positive Anschluss. Sie dürfen niemals mit falsch gepolter Spannung betrieben werden (Explosionsgefahr) und können schon bei geringer Überspannung zerstört werden. Zur besseren Verpolungssicherheit gibt es Bauformen mit drei Pins, welche in Form eines unregelmäßigen Dreiecks angeordnet sind und daher nur in einer bestimmten Position in die Platine gelötet werden können. Der dritte Pin ist je nach Hersteller entweder unbeschaltet, mit dem Gehäuse oder mit der Kathode verbunden. Durch gegenpolige Serienschaltung zweier Anodenfolien in einem Kondensatorgehäuse werden für spezielle Anwendungen (zum Beispiel Tonfrequenzweichen) auch Bipolar-Elektrolytkondensatoren für



Wechselspannungsbetrieb hergestellt. Neueste Entwicklungen auf dem Gebiet der Elektrolytkondensatoren sind Aluminium- und Tantal-Elektrolytkondensatoren mit Polymer-Elektrolyte aus leitfähigen Polymeren, die sich durch besonders geringe interne ohmsche Verluste auszeichnen.



Doppelschicht-Kondensatoren für Kraftfahrzeug-Anwendungen

#### Doppelschicht-Kondensatoren

(Markennamen *Gold Cap*, *Supercap*, *UltraCap*, *BoostCap*, *Green Cap*) zeichnen sich durch höchste Energiedichte aus. Ihre sehr hohe Kapazität basiert auf der Dissoziation von Ionen in einem flüssigen Elektrolyt, die an der Grenzschicht zu den Elektroden ein dünnes Dielektrikum von wenigen Atomlagen bilden. Das ist kombiniert mit einer großen Elektrodenoberfläche, die meist aus Aktivkohle hergestellt wird. Doppelschicht-Kondensatoren haben nur eine Spannungsfestigkeit von max. 5,5 Volt und wegen ihres höheren Serienwiderstandes – außer bei Spezialkondensatoren – eine relativ geringe Strombelastbarkeit sowie eine typischerweise auf eine Million begrenzte Anzahl von Ladungs-Entladungszyklen. Doppelschicht-Kondensatoren sind wie Elektrolytkondensatoren ebenfalls gepolte Bauelemente und dienen häufig zur Betriebsspannungs-Stützung von Halbleiterschaltkreisen geringer Stromaufnahme.



Aufgesägter Vakuumkondensator

#### Vakuumkondensatoren

Sie sind bei großen hochfrequenten Strömen und Spannungen im Kilovolt-Bereich vorteilhaft und werden vorzugsweise bei Sendern hoher Sendeleistungen eingesetzt. Es gibt auch Bauformen mit variabler Kapazität. [11][12][13]

#### Glas-Dielektrikum

erlaubt einen hohen Temperaturbereich von  $-75$  bis  $+200$  °C; typische Werte sind 300 pF bis 100 nF. [14]



## Kondensatoren auf Siliziumsubstrat

In integrierten Schaltkreisen werden Kondensatoren konventionell durch eine Schichtfolge von [Silizium](#), [Siliziumoxid](#), [Aluminium](#) hergestellt. Silizium und Aluminium bilden dabei die Elektroden des Kondensators; das Siliziumoxid (auch [Siliziumnitrid](#)) bildet das Dielektrikum.

Sind besonders viele Kondensatoren erforderlich, wie in [Halbleiterspeichern](#), so kommen auch schwieriger zu verarbeitende Dielektrika mit höherer Dielektrizitätszahl zum Einsatz. In besonderen Fällen, wenn der Speicherinhalt ohne Energieversorgung erhalten bleiben soll, auch [Ferroelektrika](#).

Nach einem ähnlichen Verfahren werden auch diskrete Kondensatoren hergestellt, die bei Frequenzen bis in den Gigahertz-Bereich gute Eigenschaften besitzen. [\[15\]](#)[\[16\]](#)

### [Glimmerkondensatoren](#)

haben ein Dielektrikum aus dem natürlich vorkommenden Mineral [Glimmer](#). Dieses weist eine hohe Spannungsfestigkeit auf und ist aufgrund seiner Schichtstruktur spaltbar in dünne Blättchen bis hinab zu 20 µm Dicke, die meist mit Silber als Elektrodenbeläge bedampft werden. Glimmerkondensatoren werden aufgrund der niedrigen Verlustfaktoren in der Sendetechnik und aufgrund ihrer hohen Kapazitätskonstanz und geringen Kapazitätstoleranz in [Messnormalen](#) und in Filter- und [Schwingkreisanwendungen](#) für hohe Anforderungen eingesetzt. Sie werden, nach dem englischen Wort für Glimmer, oft auch als Mica-Kondensatoren bezeichnet.

Neben der Unterteilung von Kondensatoren nach verwendetem Dielektrikum bzw. bei Elkos nach der Kathode kann auch eine Klassifizierung nach Anwendungsbereich oder nach Bauform erfolgen. Wichtige Beispiele sind:

### [Leistungskondensatoren](#)

sind Metallpapier- oder Kunststoff-Folienkondensatoren. Sie können direkt an Versorgungsnetzspannung betrieben werden und zeichnen sich durch eine größere Bauform, je nach Leistungsbereich durch Steck- oder Schraubanschlüsse sowie meist durch erdbare Blechgehäuse aus und sind funktionell für eine hohe Strombelastbarkeit vorgesehen. [\[17\]](#) [\[18\]](#)

### [Durchführungskondensatoren](#)

sind meist koaxial aufgebaute Kondensatoren, oft Keramik Kondensatoren, die eine elektrische Leitung durch eine leitfähige Wandung (Abschirmung) führen. Der innen liegende Anschluss ragt beidseitig an den Enden eines leitfähigen Belags aus dem Kondensator heraus und bildet die *Durchführung* für eine elektrische Verbindung. Die außen liegende Elektrode des Kondensators wird mit der Wandung kontaktiert. Die Kapazität, die zwischen Innen- und Außenanschluss wirkt, leitet hochfrequente Störungen, zum Beispiel einkoppelnde Funkwellen aus der Umgebung, aus einer Geräte-Zuleitung gegen [Masse](#) ab.

### [Schutzringkondensatoren](#)

sind eine spezielle Bauform eines Plattenkondensators um Randeffekte in Messvorgängen zu reduzieren.

## **Bauformen von Festkondensatoren**

Die heutzutage industriell genutzten Bauformen von Festkondensatoren spiegeln die Entwicklung der industriellen Technik der letzten 100 Jahre wider. Die Bauformen zu Beginn des letzten Jahrhunderts wurden noch mechanisch mit Schrauben befestigt und die Anschlüsse per Hand gelötet oder auch angeschraubt. Der Preisdruck in der Fertigung führte Mitte des 20. Jahrhunderts zur Leiterplattentechnik. Dafür wurden bedrahtete Bauteile benötigt und die Kondensatoren wurden

entsprechend mit Anschlussdrähten entwickelt. Aus zunächst liegenden Bauformen mit axialen Anschlüssen wurden, um Leiterplattenkosten einzusparen, dann etwas später radiale, stehende Bauformen. Nochmals aus Kostengründen, denn die Bohrungen in der Leiterplatte sind auch eine Kostenfrage, diesmal aber auch verbunden mit der zunehmenden Miniaturisierung der Bauteile, begann in den 1990er Jahren der Siegeszug der oberflächenmontierbaren Bauelemente, der sog. „SMD“-Chips.



### Bauformen von Kondensatoren

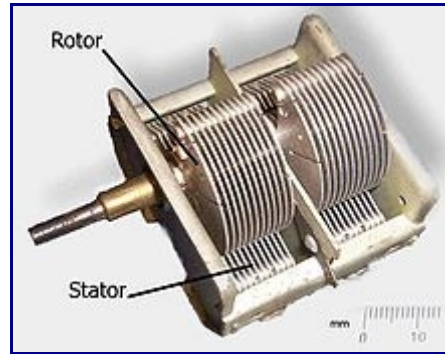
Neben den Bauteilen für das industrielle Massengeschäft finden sich aber auch weiterhin Bauformen, die sich aus speziellen Anforderungen der jeweiligen Schaltung ergeben.

Beispielsweise die Flachbandanschlüsse von Folienkondensatoren für eine hohe Impuls-Strombelastbarkeit, die Schraubanschlüsse großer Aluminium-Elektrolytkondensatoren für hohe Strombelastbarkeit oder spezielle Bauformen für zum Beispiel Durchführungskondensatoren. Die quantitativ größte Anzahl von Kondensatoren ist aber eine direkte Folge der Digitalisierung und der damit verbundenen Miniaturisierung in der Elektronik. Es sind die kapazitiven Strukturen in Dynamic RAM's, auch „Silicium-Kondensatoren“ genannt, die in einem epitaktischen Prozess auf Siliziumkristallen hergestellt werden und eine ganz spezielle Bauform unter den Kondensatoren bilden.

### Kondensatoren mit einstellbarer Kapazität

Einstellbare oder *Variable Kondensatoren* sind elektrische Kondensatoren, deren Kapazität in definierten Grenzen mechanisch stufenlos von Hand oder mit einer geregelten Motorsteuerung einstellbar ist. Sie werden unterschieden in Drehkondensatoren, kurz Drehkos genannt und in Trimmkondensatoren, auch *Trimmer* genannt. Neben den mechanisch einstellbaren Dreh- und Trimmkondensatoren gibt es Bauelemente mit elektrisch veränderbaren kapazitiven Eigenschaften, wie Kapazitätsdioden (Varicaps) und weitere, die als Sensoren (Winkelgeber, Näherungsschalter, Touchscreen) verwendet werden.

## Drehkondensatoren



Beim Drehkondensator wird das Kondensatorprinzip der sich gegenüberliegenden Elektrodenplatten besonders deutlich. Hier abgebildet ist ein Zweifachdrehkondensator.

Mechanisch einstellbare Drehkondensatoren (Abk.: Dre(h)ko), auch Regel- oder Korrektionskondensatoren genannt, sind für häufige und wiederholende Betätigungen ausgelegt zum Beispiel für die manuelle [Sendereinstellung](#) in [Rundfunkgeräten](#). Die Kapazitätsänderung bei Drehkondensatoren erfolgt durch Änderung der kapazitiv wirksamen Fläche, meist indem ein [Elektrodenpaket](#), der Rotor, mit einer Welle mechanisch kammartig in ein zweites, feststehende Elektrodenpaket, den Stator, hineingedreht werden kann. Als [Dielektrikum](#) wird Luft, eine Kunststoffolie, ein [Vakuum](#) oder ein Schutzgas verwendet.

Drehkondensatoren für Kleinsignalanwendungen (Senderwahl und Schwingkreisabstimmung in Rundfunk- und Fernsehempfängern) sind heute weitgehend entweder durch Kapazitätsdioden abgelöst, deren Sperrschichtkapazität durch eine überlagerte [Gleichspannung](#) gesteuert wird oder sind durch VCO-gesteuerte [PLL](#)-Schaltungen ersetzt worden. Allerdings sind für Leistungsanwendungen mechanisch einstellbare Vakuum- und Schutzgaskondensatoren in Hochfrequenzsendern auch heutzutage (2009) durchaus noch im Einsatz, wobei die mechanische Betätigung zur Konstanthaltung einer Senderfrequenz meist über eine Motor-gesteuerte automatische Regelung erfolgt.

### Vakuum- und Schutzgas-Drehkondensatoren

Vakuum- und Schutzgas-Drehkondensatoren ähneln konstruktiv den unter [Variable Kondensatoren](#) beschriebenen Tauchtrimmern. Umhüllt sind diese einstellbaren Kondensatoren mit einem hermetisch abdichtenden Glas- oder Keramikgehäuse.

Als Dielektrikum wird bei den variablen Vakuumkondensatoren ein Vakuum mit einer sehr hohen Spannungsfestigkeit, die im Mittel mit etwa 40 kV/mm angegeben wird, verwendet. Bei den variablen Schutzgas-Kondensatoren wird [Schwefelhexafluorid](#)  $\text{SF}_6$  als Isoliergas eingesetzt. Es besitzt ebenfalls eine hohe Durchschlagsfestigkeit und darüber hinaus auch noch eine hohe Dielektrizitätszahl sowie gegenüber vielen Feststoffen kleinere dielektrische Verluste. Eingesetzt werden beide Arten dieser variablen Kondensatoren in Hochfrequenz-Sendern. Die größten und leistungsstärksten Kondensatoren dieser Art besitzen eine Vorrichtung zur Wasserkühlung. [\[19\]](#)

## Trimmer



Kunststoff-Folientrimmer

Trimmerkondensatoren (kurz Trimmer) sind ebenfalls stufenlos einstellbare Variable Kondensatoren, deren Kapazität in definierten Grenzen mechanisch einstellbar sind. Sie sind im Gegensatz zu Drehkondensatoren nicht für häufige Betätigung ausgelegt und werden nur zur Erstinbetriebnahme und ggf. nach Reparaturen betätigt, um einen schaltungstechnisch bedingten Kapazitätsausgleich eines Filters oder eines Schwingkreises in zum Beispiel Rundfunk- oder Fernsehgeräten herbeizuführen (Abgleich). Die Kapazitätsänderung bei einem Trimmer erfolgt durch Veränderung der kapazitiv wirksamen Fläche des Kondensators. Trimmerkondensatoren können oft nur mit einem isolierenden (HF-neutralen) Werkzeug, meist einem Plastik-Schraubendreher, eingestellt werden. Als Dielektrikum in Trimmkondensatoren wird Luft (Luftplatten- und Tauchtrimmer), Kunststofffolie, (Folientrimmer) und Keramik (Draht-, Rohr-, Scheiben- und SMD-Trimmer) verwendet. Trimmer für Kleinsignalanwendungen (Senderwahl und Schwingkreisabstimmung in Rundfunk- und Fernsehempfängern) sind heute weitgehend entweder durch Kapazitätsdioden abgelöst, deren Sperrschichtkapazität durch eine überlagerte Gleichspannung gesteuert wird oder sind durch VCO-gesteuerte PLL-Schaltungen ersetzt worden. Die moderneren Bauformen von Trimmerkondensatoren sind oberflächenmontierbar. Die Keramik-SMD-Trimmer haben eine keramische Schichtung mit einer halbkreisförmigen Metallisierung in der Stator-Grundplatte und eine Rotorelektrode, die drehbar montiert ist. SMD-Trimmer für Lötwellenlötung sind, um Verschmutzungen während des Lötprozesses zu verhindern, gekapselt. Trimmer für Reflow-Lötung können etwas einfacher geschützt sein. [20]

Bei der zweiten Trimmer-SMD-Bauform, den SMD-Abgleichkondensatoren, gibt es keine mechanisch bewegliche Einstellmöglichkeit mehr. Bei ihnen wird der Kapazitätswert durch gezieltes Wegbrennen von Flächenanteilen einer oben liegenden offen zugänglichen Elektrode mit Hilfe eines Laserstrahles eingestellt. Damit lässt sich gezielt gewünschter Kapazitätswert mit einer sehr großen Genauigkeit einstellen. [21]

## Kapazitätsdiode

Die Kapazitätsdiode, auch Varicap, Varaktor, Abstimmidiode oder Ladungsspeicherdiode genannt, ist ein elektronisches Halbleiter-Bauteil. Wird eine Diode in Sperrrichtung betrieben, so entsteht am p-n-Übergang eine Ladungsträgerverarmungszone (die als Dielektrikum wirkt), an der sich auch ein elektrisches Feld aufbaut. Mit steigender Spannung vergrößert sich die Breite der ladungsfreien Zone, damit nimmt die Kapazität ab. Durch Änderung der angelegten Spannung lässt sich eine elektrisch steuerbare Kapazität erreichen.

## Kennzeichnungen

Bei Kondensatoren gibt es keine so einheitliche Kennzeichnung wie bei Widerständen. Einige häufige Varianten sind unten aufgelistet. Weitere Informationen sind über die Weblinks unten zu finden.

## Kennzeichnung der Kapazität

- 473: Die ersten beiden Ziffern geben den Wert in Pikofarad an, die dritte die Anzahl der nachfolgenden Nullen. 473 bedeutet also  $47 \times 10^3 \text{ pF} = 47000 \text{ pF} = 47 \text{ nF}$ .
- 18: Oft auf keramischen bedrahteten Kondensatoren als Aufdruck zu finden, bedeutet eine Angabe in Pikofarad, hier also 18 pF.
  - 3n9: Bedeutet 3,9 nF.
- .33 K 250: Die erste Zahl gibt den Wert in Mikrofarad an, also  $0,33 \mu\text{F} = 330 \text{ nF}$ . K steht für eine Kapazitätstoleranz von 10 % und 250 für die Spitzenspannung in Volt, die angelegt werden darf.
- Für die zunehmend seltener werdende axiale Bauform waren auch [Farbcodes](#) üblich.



Papierkondensator mit der Kapazität „5000 cm“.

Mitte des 20. Jahrhunderts wurden vor allem Papierkondensatoren, welche in den damals aufkommenden ersten [Röhrenempfängern](#) für den Rundfunkempfang eingesetzt wurden, häufig mit der Einheit „cm“ beschriftet, der Kapazitätseinheit im heute kaum noch gebrauchten [elektrostatischen CGS-Einheitensystem](#).

Die nebenstehende Abbildung zeigt einen Papierkondensator der Firma *SATOR* aus dem Jahr 1950 mit einer Kapazität laut Aufdruck von „5.000 cm“ bei einer Prüfspannung von „2.000 V“. Das wäre eine Kapazität von zirka 5,6 nF im heute üblichen [SI-Einheitensystem](#). Eine Kapazität von 1 cm im CGS-Einheitensystem entspricht 1,1 pF im SI-Einheitensystem, der Umrechnungsfaktor ist  $4 \pi \epsilon_0$ .

## weitere Kennzeichnungen

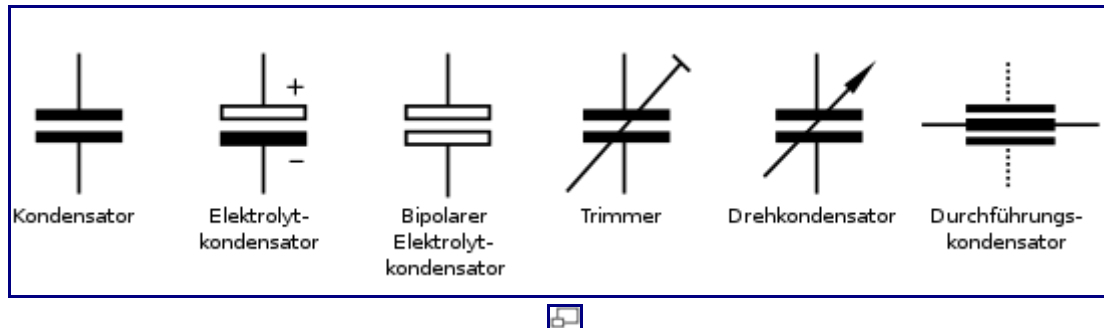
- Oft wird auch bei [Elektrolytkondensatoren](#) ein in mehreren Ziffern verschlüsselter Datumscode aufgedruckt, um das Herstellungsdatum erkennen zu können, da Elektrolytkondensatoren in Abhängigkeit von der Zeit ihre Kapazität verringern können; zum Beispiel 2313 : 2 = 2002, 3 = März, 13 = 13. Tag, also 13. März 2002. Der Aufbau der Codes kann sich bei verschiedenen Herstellern unterscheiden, da nur wenige sich nach einheitlichen Normen richten. (weiteres siehe auch [hier](#))
- Sofern es die Bauform des Kondensators zulässt, wird auch der Hersteller, der Betriebstemperaturbereich, die Spannungsfestigkeit und eine [Baureihen](#)bezeichnung angebracht, die Aufschluss über den verwendeten Isolator gibt. Da hier teilweise noch [Patentschutz](#) besteht, ist eine herstellerübergreifende Baureihenbezeichnung nicht möglich.
- [Keramikkondensatoren](#) werden mit ihrer Toleranz und dem gültigen Temperaturbereich gekennzeichnet.
  - Die Bezeichnungen *X1*, *X2* sowie *Y1* und *Y2* dienen der Kennzeichnung von [Entstörkondensatoren](#) zur Verwendung in [Netzfiltern](#) im [Niederspannungsnetz](#). X-Kondensatoren werden zwischen [Außenleiter](#) und [Neutralleiter](#) eingesetzt. Der X1-Typ hält einem Spannungsimpuls von 4 kV stand, X2 von 2,5 kV. Durch eine spezielle Konstruktion geraten sie auch bei Überlastung nicht in Brand. Die Y-Typen werden eingesetzt, wenn eine [Schutzisolierung](#) überbrückt wird und deren Defekt zu einem Stromschlag führen kann; sie halten Spannungsimpulse der doppelten Höhe stand.
- Eine weitere Kennzeichnung von radialen Kondensatoren zum Beispiel bei der Bestellung ist das Rastermaß (abgekürzt: RM). Das ist der Abstand in mm von Beinchen zu Beinchen.



(Der Abstand von Bohrung zu Bohrung in einer Leiterplatte)

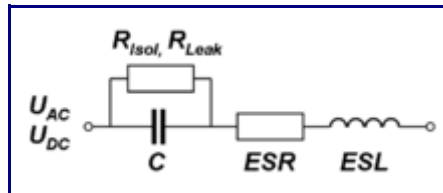
## Schaltzeichen

In den unten abgebildeten [Schaltzeichen](#) symbolisieren die horizontalen Flächen die separierten Elektroden.



## Normung und Ersatzschaltbild

Diskrete Kondensatoren sind Industrieprodukte, die mit etwa 700 Milliarden Stück jährlich hergestellt und eingebaut werden. Wie bei allen Industrieerzeugnissen ist es von entscheidender Bedeutung, dass die elektrischen Werte der Bauelemente präzise erfasst werden um die Reproduzierbarkeit von Schaltfunktionen sicherzustellen. Für Kondensatoren werden die elektrischen Werte und die Kriterien ihrer Messverfahren im internationalen Bereich harmonisiert durch die Rahmenspezifikation IEC 60384-1, die in Deutschland als DIN EN 60384-1 (VDE 0565-1) im Mai 2010 erschienen ist. Diese Norm definiert zunächst die elektrischen Werte eines Kondensators mit Hilfe eines Serien-Ersatzschaltbildes. Darin sind:



Serien-Ersatzschaltbild eines Kondensators

- $C$ , die Kapazität des Kondensators,
- $R_{isol}$ , der Isolationswiderstand des Dielektrikums bzw.  $R_{Leak}$ , der Widerstand, der den Reststrom bei Elektrolytkondensatoren repräsentiert,
- $ESR$  (engl. Equivalent Series Resistance), der äquivalente Serienwiderstand, in ihm sind die ohmschen Leitungs- und die dielektrischen Umpolungsverluste des Kondensators zusammengefasst
- $ESL$  (engl. Equivalent Series Inductivity  $L$ ), die Äquivalente Serieninduktivität, sie fasst die parasitäre Induktivität des Bauelementes zusammen.

Mit diesem Ersatzschaltbild, den Vorschriften in der DIN EN 60384-1 und den jeweiligen untergeordneten Bauartspezifikationen können Betriebszustände von Kondensatoren so beschrieben werden, dass für definierte Randbedingungen (Frequenz, Temperatur, anliegende Spannung) reproduzierbare Messergebnisse erzielt werden können.

## Elektrotechnische und systemtheoretische Beschreibung

Für die unterschiedlichen Anwendungsbereiche wurde eine Reihe von Beschreibungen entwickelt, die bestimmte Aspekte des Verhaltens eines Kondensators hervorheben.

## Feldenergie

Ein geladener Kondensator speichert elektrische Energie in dem elektrischen Feld, das *zwischen* den geladenen Platten besteht (siehe Berechnung elektrostatischer Felder). Ist ein Kondensator der Kapazität  $C$  auf die Spannung  $U$  geladen, so enthält sein Feld die Energie  $W$  gemäß:

$$W = \frac{1}{2} C \cdot U^2$$

Zum Laden eines Kondensators werden elektrische Ladungen von der einen Platte zur anderen transportiert. Je weiter der Kondensator während dieses Vorgangs bereits aufgeladen ist, desto stärker ist das bereits zwischen seinen Platten herrschende elektrische Feld  $E$ , desto mehr Kraft wird ausgeübt, um die Ladung von einer Platte zur anderen zu bringen. Mit steigender Spannung des Kondensators wird daher zunehmend mehr Arbeit für eine weitere Spannungserhöhung verrichtet. Am Schluss ist die während des Aufladens verrichtete Gesamtarbeit als Feldenergie gespeichert. Beim Entladen wird diese wieder frei.

## Zeitbereich

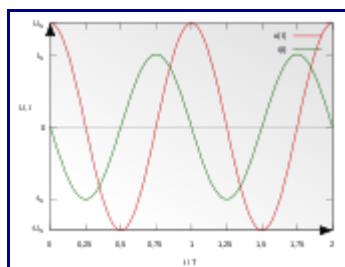
Eine Beziehung zwischen Strom und Spannung ergibt sich durch die zeitliche Ableitung der Elementgleichung des Kondensators  $Q = CU$ :

$$I = \frac{dQ}{dt} = C \frac{dU}{dt}$$

Das bedeutet, dass der Strom durch den Kondensator proportional der Spannungsänderung am Kondensator ist. Die Aussage, dass der Strom proportional der zeitlichen Ableitung der Spannung ist, lässt sich umkehren: Die Spannung ist proportional zum zeitlichen Integral des Stroms. Legt man beispielsweise einen konstanten Strom an, so folgt daraus eine konstante Spannungsänderung, die Spannung steigt linear an.

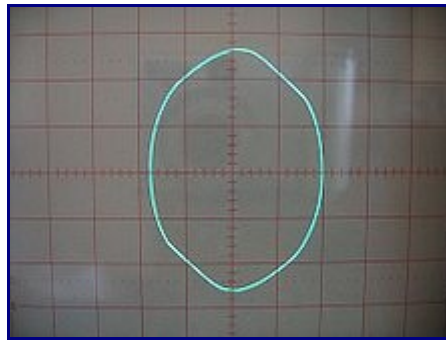
Das Aufladen und Entladen eines Kondensators durch eine Spannungsquelle über einen Widerstand resultiert in einen exponentiell abflachenden Spannungsverlauf. Es wird ausführlich unter RC-Glied behandelt.

## Phasenverschiebung und Blindwiderstand



Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung an einem Kondensator





Mit einem Komponententester aufgenommene Darstellung der Kennlinie eines Kondensators auf einem Oszilloskop macht die Phasenverschiebung sichtbar

Eine kosinusförmige Wechselspannung mit der Amplitude  $U_S$  und der Frequenz  $f$  bzw. der Kreisfrequenz  $\omega = 2\pi f$ , also

$$u(t) = U_S \cos(\omega t + \varphi_u)$$

an einem Kondensator bewirkt den Stromfluss

$$i(t) = C \frac{du(t)}{dt} = \omega C U_S (-\sin(\omega t + \varphi_u))$$

$$i(t) = I_S (-\sin(\omega t + \varphi_u)) = I_S \cos(\omega t + \varphi_u + 90^\circ).$$

Der Strom fließt zeitlich versetzt zur Spannung („Phasenverschiebung“), er eilt dieser um  $\pi/2$  bzw.  $90^\circ$  voraus.

$$\varphi_i = \varphi_u + \frac{\pi}{2}$$

Die Stromstärke  $I_S$  ist proportional zur Frequenz  $f$  der angelegten Spannung und zur Kapazität  $C$  des Kondensators:

$$I_S \sim f$$

$$I_S \sim C$$

Das Verhältnis von Spannungsamplitude zu Stromamplitude wird allgemein als Scheinwiderstand bezeichnet; im Falle eines idealen Kondensators, bei dem der Strom der Spannung um genau  $90^\circ$  vorausseilt, als kapazitiver Blindwiderstand  $X_C$ :

Phasenverschiebungswinkel:

$$\varphi_z = \varphi_u - \varphi_i = -\frac{\pi}{2}$$

Blindwiderstand:

$$X_C = \frac{U_S}{I_S} \cdot \sin(\varphi_z) = \frac{U_S}{\omega C U_S} \cdot \sin\left(-\frac{\pi}{2}\right) = -\frac{1}{\omega C}.$$

Die Formel zeigt, dass der elektrische Blindwiderstand des Kondensators mit zunehmender

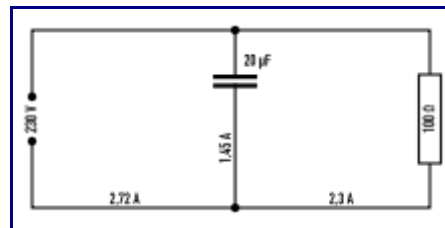
Frequenz bis zum praktischen Kurzschluss bei Hochfrequenz abnimmt und andererseits bei der Frequenz  $f=0$ , also bei Gleichspannung, unendlich groß wird und praktisch wie eine Leitungsunterbrechung wirkt.

Durch die Phasenverschiebung von  $90^\circ$  zwischen Spannung und Strom wird an einem Blindwiderstand im zeitlichen Mittel keine Leistung in Wärme umgewandelt; die Leistung pendelt nur hin und her und wird als Blindleistung bezeichnet.

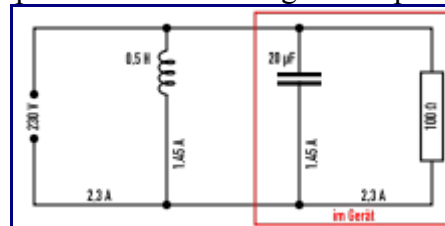
Wird ein Kondensator von periodischen nichtsinusförmigen Wechselströmen durchflossen, so können diese mittels der Fourieranalyse als eine Summe von sinusförmigen Wechselströmen dargestellt werden. Für diese lässt sich die Verknüpfung von Spannung und Strom am Kondensator auf jede einzelne Sinusschwingung getrennt anwenden, der resultierende nichtsinusförmige Spannungsverlauf am Kondensator ergibt sich dann als Summe der einzelnen sinusförmigen Spannungsverläufe.

Diese Zusammensetzung gilt nur, wenn die Kapazität des Kondensators nicht von der anliegenden Spannung abhängt. In diesem Fall ist der Kondensator ein lineares Bauelement und die damit aufgebauten Schaltungen mit den Methoden der komplexen Wechselstromrechnung zugänglich. Hängt die Kapazität des Kondensators von den Momentanwerten der anliegenden Spannung ab, d. h., die dielektrische Leitfähigkeit des zwischen den Platten befindlichen Dielektrikums ist von der elektrischen Feldstärke abhängig, liegt ein nichtlinearer Kondensator vor. In diesem allgemeinen Fall können die obige Beziehungen zwischen Strom und Spannung am Kondensator nicht angewendet werden.

### Beispiel für die Kompensation einer Phasenverschiebung



Kapazitive Blindleistung unkompensiert



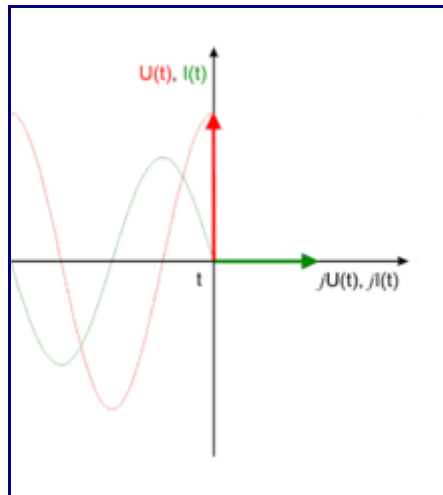
Blindleistung kompensiert

Die nebenstehende Parallelschaltung aus einem Widerstand und einem Kondensator ist am 230-V-Stromnetz angeschlossen, bei 50 Hz fließen die angegebenen Ströme. Durch den Widerstand fließt 2,3 A Wirkstrom, der bezahlt werden muss, auf den Blindstrom von 1,45 A darf der Elektrizitätszähler nicht reagieren und die Anschlussleitung muss für den Gesamtstrom von 2,72 A bemessen sein. Einer Wirkleistung von 529 W steht eine Blindleistung von 334 var (W) gegenüber, die zwischen Generator und Kondensator pendelt und Leitungen und Trafos unnötig belastet.

Zur Kompensation dieser Blindleistung wird eine passend gewählte Induktivität von 0,5 H parallel zum Gerät geschaltet, deren Blindstrom ebenfalls 1,45 A beträgt. Die Blindströme von Kondensator und Spule kompensieren sich auf Grund ihrer entgegengesetzten Phasenlagen und die gesamte Stromaufnahme sinkt auf 2,3 A. Die gesamte Anordnung gleicht nun einem gedämpften Schwingkreis.

## Impedanz

Insbesondere Systeme mit mehreren Kondensatoren, Widerständen und Spulen sind mit dem oben genannten Formalismus umständlich zu beschreiben. Um nicht Phase und Betrag von Signalen getrennt berechnen zu müssen, werden in der komplexen Wechselstromrechnung die Amplituden sinus- und kosinusförmiger Spannungsverläufe in Imaginär- und Realteil einer komplexen Amplitude der auf die komplexe Ebene erweiterten Kreisfunktion  $e^{j\omega t}$  zusammengefasst, wobei  $j$  die imaginäre Einheit und  $\omega$  die Kreisfrequenz bezeichnen (die nebenstehende Darstellung verdeutlicht dies). Kleine Buchstaben für Spannungen und Ströme kennzeichnen zeitlich veränderliche Größen; zeitlich konstante Größen werden mit Großbuchstaben gekennzeichnet; komplexe Größen werden unterstrichen:



Darstellung der komplexen Spannung (rot) und des Stromes (grün) am Kondensator. Die imaginäre Achse ist horizontal gezeichnet, um die Zusammenhänge zu verdeutlichen

$$\underline{u}(t) = U_0 e^{j\omega t},$$

$$\underline{i}(t) = C \frac{d\underline{u}(t)}{dt} = j\omega C U_0 e^{j\omega t}.$$

Der Realteil davon ergibt den Momentanwert der Größe.

Der Zusammenhang zwischen Strom und Spannung, die Impedanz  $Z_C = R_C + jX_C$ , lässt sich daraus analog dem ohmschen Widerstand durch Quotientenbildung gewinnen:

$$\underline{Z}_C = \frac{\underline{u}(t)}{\underline{i}(t)} = \frac{U_0 e^{j\omega t}}{j\omega C U_0 e^{j\omega t}} = \frac{1}{j\omega C} = -j \frac{1}{\omega C}$$

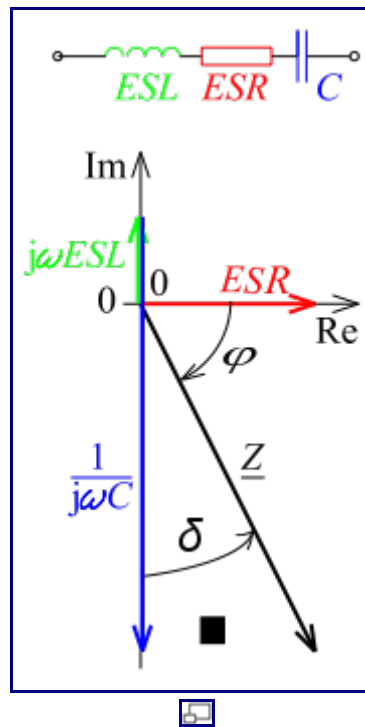
Als Beispiel wird der Betrag der Impedanz eines 5-nF-Kondensators bei 3 kHz berechnet:

$$Z_C = \frac{1 \Omega}{2\pi \cdot 3000 \cdot 5 \cdot 10^{-9}} = 10,6 \text{ k}\Omega$$

Man sieht, dass für den (idealen) Kondensator der Wirkwiderstand  $R_C$  gleich 0 ist und der Blindwiderstand  $X_C$  automatisch das negative Vorzeichen bekommt.

Durch diese Betrachtungsweise werden Differentialgleichungen vermieden. Anstelle der Ableitung tritt eine Multiplikation mit  $1/j\omega = -j/\omega$  (mathematisch negativer Drehsinn).

Da reale Kondensatoren nicht nur eine Kapazität  $C$  sondern auch immer noch parasitäre Effekte aufweisen (Seriensatzwiderstand  $ESR$ , engl. *Equivalent Series Resistance*, Seriensatzinduktivität  $ESL$ , engl. *Equivalent Series Inductance*  $L$ ), ändert sich die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung. Sie ist nicht mehr  $90^\circ$ , sondern nimmt einen um den Verlustwinkel  $\delta$  kleineren Wert an. Mit einem Zeigerdiagramm kann auf anschauliche Weise nicht nur die Impedanz  $\underline{Z}$  sondern auch noch der Phasenverschiebungswinkel  $\varphi$  und der ergänzende Verlustwinkel  $\delta$  dargestellt werden. Dabei ist zu beachten, dass dieses Diagramm jeweils nur für eine Frequenz gilt.



Ersatzschaltbild eines Kondensators bei höherer Frequenz (oben); Darstellung der zugehörigen Impedanz als Zeigerdiagramm in der komplexen Ebene (unten)

Sind die Seriensatzwerte eines Kondensators bekannt, dann kann die Impedanz auch über diese Werte berechnet werden. Er ist dann die Summe der geometrischen (komplexen) Addition der Wirk- und der Blindwiderstände, also des Ersatzserienwiderstandes  $ESR$  und des induktiven Blindwiderstandes  $X_L$  abzüglich des kapazitiven Blindwiderstandes  $X_C$ . Die beiden Blindwiderstände weisen mit der Kreisfrequenz  $\omega$  folgende Beziehungen auf:

$$X_L = \omega L_{ESL}, \quad X_C = -\frac{1}{\omega C}$$

Der Scheinwiderstand ist dementsprechend der Betrag der geometrischen (komplexen) Addition der Wirk- und der Blindwiderstände:

$$Z = \sqrt{R_{ESR}^2 + (X_L + X_C)^2}$$

(Zur verwendeten Vorzeichenkonvention siehe Anmerkung unter Blindwiderstand, zur Herleitung siehe unter Komplexe Wechselstromrechnung).

In den Datenblättern der Hersteller von Kondensatoren wird meist der Betrag der Impedanz, also der Scheinwiderstand  $|\underline{Z}|$ , angegeben.

## Verlustfaktor, Güte und Serienwiderstand

Reale Kondensatoren weisen parasitäre ohmsche Verluste auf. Sie bewirken, dass die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung an den Klemmen eines realen Kondensators nicht mehr genau  $90^\circ$  beträgt, sondern um den sogenannten Verlustwinkel  $\delta$  reduziert ist. Dieser Winkel wird als Tangens ausgedrückt und heißt dann *Verlustfaktor*  $\tan \delta$  (engl.: *dissipation factor*, abgekürzt *DF*). Er ergibt sich aus dem Tangens des Phasenwinkels  $\delta$  zwischen der geometrischen Summe der Blindwiderstände  $X_C$  und  $X_L$  und dem Ersatzreihenwiderstand *ESR*. Unter Vernachlässigung der Induktivität *ESL* sind der Verlustfaktors  $\tan \delta$ , der *ESR* und die Kapazität *C* eines Kondensators bei einer bestimmten Frequenz *f* mit folgender Formel miteinander verbunden:

$$\tan \delta = \text{ESR} \cdot \omega C$$

Für kleine Werte von  $\delta$  (ausgedrückt im Bogenmaß) gilt:

$$\tan \delta \approx \delta$$

Bei verlustarmen Klasse-1-Keramik Kondensatoren wird anstelle des Verlustfaktors häufig sein Kehrwert, die Güte *Q* oder der Gütefaktor spezifiziert.

$$Q = \frac{1}{\tan \delta} = \frac{1}{\text{ESR} \cdot \omega C}$$

Dieser Wert bezieht sich auf die Bandbreite *B* bei der Resonanzfrequenz  $f_0$  und berechnet sich nach der Gleichung:

$$Q = \frac{f_0}{B},$$

wobei sich die Bandbreite, definiert als der Frequenzbereich, an dessen Grenzen sich der Spannungspegel um 3 dB gegenüber dem Mittenwert geändert hat, ergibt aus:

$$B = f_2 - f_1.$$

mit  $f_2$  als obere und  $f_1$  als untere Grenzfrequenz. Da der Verlauf der Impedanzkurve im Resonanzbereich um so steiler ist, je kleiner der ESR ist, kann auch mit der Spezifikation der Güte bzw. des Gütefaktors eine Aussage über die ohmschen Verluste gemacht werden. [23]

Die oben beschriebene Definition der Spezifikation der ohmschen Verluste in einem Kondensator geht von dem allgemein üblichen und in der Fachgrundspezifikation DIN EN (IEC) 60384-1 spezifizierten Serien-Ersatzschaltbild aus, in dem die dielektrischen und die Leitungsverluste zum ESR bzw. Verlustfaktor zusammengefasst werden. Einige Fachbücher benutzen zur Erklärung des Verlustfaktors aber ein anderes Ersatzschaltbild, in dem die ohmschen Verluste durch einen Widerstand  $R_p$  modelliert werden, der (zusätzlich zum Isolationswiderstand) zu einem idealen Kondensator mit der Kapazität *C* parallelgeschaltet ist. (Wenn in diesen Beschreibungen dann die ohmschen Verluste mit den dielektrischen Verlusten gleichgesetzt werden, dann erfolgt das aus dem Wissen heraus, dass die Leitungsverluste in diesen Kondensatoren vernachlässigbar sind.) Die Verlustleistung  $P_V$  ergibt sich damit beim Betrieb des Kondensators an einer Wechselspannung mit

dem Effektivwert *U* zu

$$P_V = \frac{U^2}{R_p}.$$

Der Kehrwert dieses Widerstands ist der Leitwert  $G$  (wird auch als *Ableitung* bezeichnet). Der Tangens des Verlustwinkels  $\delta$  kann in der Form

$$\tan \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{G}{B_C} = \frac{1}{2\pi f C R_p} \quad [24]$$

dargestellt werden.

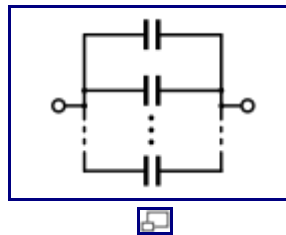
## Spektralbereich

Eine Beschreibung im [Bildbereich](#) der [Laplace-Transformation](#) vermeidet die Beschränkung auf harmonische Schwingungen. Für die Impedanz im Bildbereich gilt dann

$$Z_C = \frac{1}{sC}$$

Dabei ist  $s = \sigma + j\omega$  die „komplexe Frequenz“,  $\sigma$  charakterisiert die exponentielle Einhüllende,  $\omega$  wiederum die Kreisfrequenz.

## Parallel- und Reihenschaltung



Parallelschaltung von Kondensatoren

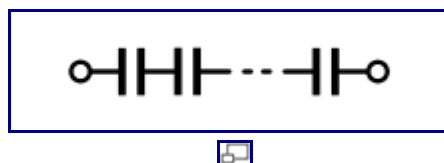
Kondensatoren sind in einer elektrischen Schaltung als [Parallelschaltung](#) miteinander verbunden, wenn dieselbe Spannung an allen Bauteilen anliegt. In diesem Fall addieren sich die Kapazitäten der einzelnen Bauteile zur Gesamtkapazität:

$$C_{\text{ges}} = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

Durch die Parallelschaltung erhöht sich sowohl die Gesamtkapazität als auch die Strombelastbarkeit der Schaltung. Der gesamte Stromfluss  $I_{\text{ges}}$  verteilt sich auf den  $k$ -ten Kondensator gemäß:

$$I_k = \frac{C_k}{C_{\text{ges}}} \cdot I_{\text{ges}}$$

Neben einer Erhöhung der Kapazität und Strombelastbarkeit der Schaltung, reduzieren sich durch parallel geschaltete Kondensatoren auch deren unerwünschte parasitäre Eigenschaften wie Induktivität (ESL) und Ersatzserienwiderstand (ESR).



Reihenschaltung von Kondensatoren

Eine [Reihenschaltung](#) liegt vor, wenn durch zwei oder mehr Kondensatoren derselbe elektrische Strom fließt. Dann addiert sich der [Kehrwert](#) der Kapazität der einzelnen Bauteile zum Kehrwert

der Gesamtkapazität:

$$\frac{1}{C_{\text{ges}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

Die Reihenschaltung wird beispielsweise angewendet, um eine hohe Spannung auf mehrere Kondensatoren mit geringerer [Spannungsfestigkeit](#) zu verteilen, wenn kein Einzelbauelement für diese Spannung verfügbar ist. Da die Isolationswiderstände bzw. bei Elektrolytkondensatoren die Restströme der einzelnen Kondensatoren stark unterschiedlich sein können, kann über unterschiedliche Isolationswiderstände bzw. Restströme eine Spannungsaufteilung entstehen, die nicht mit der kapazitiven Spannungsaufteilung übereinstimmt. Dadurch können unter Umständen einzelne Kondensatoren mit einer zu hohen Spannung beaufschlagt werden, was zu Kurzschlüssen führen könnte. Aus diesem Grunde werden in der Regel in Reihe geschaltete Kondensatoren symmetriert, das heißt, jedem Kondensator wird ein definierter hochohmiger Widerstand (jedoch deutlich geringer als  $R_{\text{Leak}}$ ) parallel geschaltet, damit eine definierte Spannungsaufteilung entsteht.

## Material- und bauartbedingte Merkmale

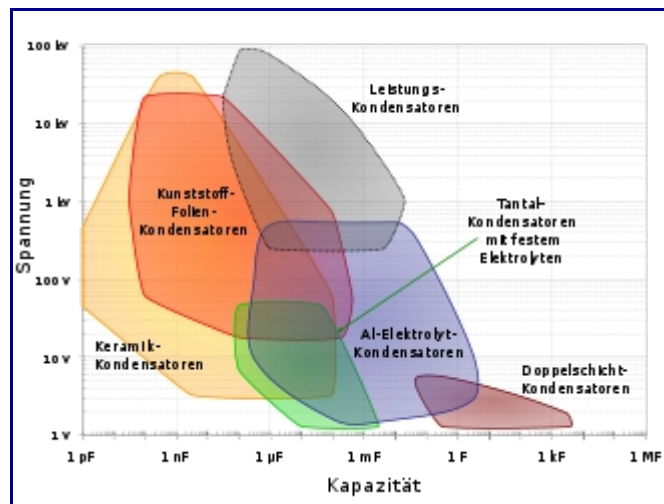
### Kapazität und Spannungsfestigkeit

Die überwiegende Anzahl der industriell hergestellten Kondensatoren sind im weitesten Sinne als Plattenkondensatoren ausgeführt. Die [Kapazität](#) ergibt sich damit aus der Oberfläche der [Elektroden](#), der [Dielektrizitätszahl](#) des verwendeten [Dielektrikums](#) und dem Kehrwert des Abstandes der Elektroden zueinander. Neben diesen drei Parametern, die bei realen Kondensatoren erheblich voneinander abweichen können, spielt die Verarbeitbarkeit der Materialien eine entscheidende Rolle. Dünne, mechanisch flexible Folien lassen sich gewickelt oder gestapelt leicht zu großen Bauformen mit hohen Kapazitätswerten verarbeiten. Hauchdünne metallisierte Keramiksichten zu [SMD](#)-Bauformen gesintert bieten dagegen beste Voraussetzungen für die Miniaturisierung von Schaltungen.

Materialdaten der wichtigsten in der Elektronik verwendeten Kondensatorfamilie

Kondensatorfamilie	Dielektrikum	Dielektrizitätszahl bei 1 kHz	Spannungsfestigkeit in V/ $\mu\text{m}$	Minimale Dicke des Dielektrikums in $\mu\text{m}$
<a href="#">Keramikkondensator</a> , Klasse 1	<a href="#">paraelektrisch</a>	20...40	< 100(?)	1
Keramikkondensator, Klasse 2	<a href="#">ferroelektrisch</a>	200...14000	< 25(?)	1
<a href="#">Kunststoff-Folienkondensator</a>	<a href="#">PET</a>	3,3	580	0,7
Kunststoff-Folienkondensator	<a href="#">PEN</a>	3,0	500 (?)	0,9
Kunststoff-Folienkondensator	<a href="#">PPS</a>	3,0	470	1,2
Kunststoff-Folienkondensator	<a href="#">PP</a>	2,2	650	3,0
<a href="#">Aluminium-Elektrolytkondensator</a>	$\text{Al}_2\text{O}_3$	8,4...9,6[25]	700	0,01
<a href="#">Tantal-Elektrolytkondensator</a>	$\text{Ta}_2\text{O}_5$	24...28[25]	625	0,01





## Kapazitäts- und Spannungsbereiche verschiedener Kondensator-Technologien

Reale Kondensatoren können nicht bis zu einer beliebigen Spannung aufgeladen werden. Überschreitet man die zulässige Spannung, die durch die Spannungsfestigkeit des jeweiligen Dielektrikums bestimmt wird, bis zur „Durchschlagsspannung“, so schlägt der Kondensator durch, das heißt, es fließt plötzlich ein erheblich größerer Strom über eine Funkenstrecke oder auf eine ähnliche Art ab. Meist führt das zur Zerstörung des Kondensators (zum Beispiel Kurzschluss oder gar eine Explosion) und zu weitergehenden Zerstörungen an den Geräten. Die zulässige Höchstspannung ist abhängig von der Einwirkzeit, der Temperatur, der elektrischen Belastung und bei Wechselspannungsanwendungen auch von der Frequenz.

Bei Keramik Kondensatoren ist es nicht möglich, eine physikalisch begründete präzise Durchschlagsspannung einer keramischen Schicht für eine definierte Dicke festzulegen. Die Durchschlagsspannung kann in Abhängigkeit von der Zusammensetzung des Elektrodenmaterials und der Sinterbedingungen bis um den Faktor 10 variieren.

Metallisierte Kunststoff-Folienkondensatoren besitzen die Fähigkeit zur Selbstheilung, ein Durchschlag führt dabei lediglich zur lokalen Verdampfung der dünnen Elektroden. Der Kondensator verliert jedoch einen bestimmten, geringen Teil seiner Kapazität ohne dass seine Funktionsfähigkeit darunter leidet.

Elektrolytkondensatoren sind vom Aufbau her gepolte Bauelemente. Die Spannungsfestigkeit der Oxidschichten gilt nur bei richtig gepolt anliegender Spannung. Falschpolspannung zerstört den Elektrolytkondensator.

## Frequenzabhängigkeit

Die Frequenzabhängigkeit der Kapazität und des Verlustfaktors von Kondensatoren ergibt sich aus zwei Komponenten:

- aus dem frequenzabhängigen Verhalten des Dielektrikums von Kondensatoren (ausgenommen Klasse-1-Keramikkondensatoren). Das beeinflusst den Kapazitätswert, der mit steigender Frequenz abnimmt und die Verluste im Dielektrikum, die mit steigender Frequenz zunehmen.
- eine bauartbedingte, parasitäre Induktivität (Anschlüsse, Aufbau), die im Ersatzschaltbild als eine in Reihe liegende Induktivität dargestellt wird. Sie wird ESL (von engl. *equivalent series inductance*) genannt und führt zu einer charakteristischen Eigenresonanzfrequenz, bei der der Kondensator seine minimale Impedanz besitzt.

Ist bei einer Anwendung eine geringe Impedanz in einem weiten Frequenzbereich erforderlich, schaltet man Kondensatoren verschiedener Bauarten parallel. Bekannt ist das Parallelschalten eines

Elektrolytkondensators mit einem Keramikkondensator oder auch das Parallelschalten von Keramikkondensatoren verschiedener Baugrößen.

## Temperaturabhängigkeit

Die Kapazität eines Kondensators ist temperaturabhängig, wobei die verschiedenen Dielektrika starke Unterschiede im Verhalten bewirken. Für [Keramikkondensatoren](#) gibt es [paraelektrische](#) Dielektrika mit positivem, negativem und nahe null betragendem Temperaturkoeffizienten. Auch einige [Kunststoff-Folienkondensatoren](#) weisen ähnliche Eigenschaften auf. Bei hohen Stabilitätsanforderungen an zum Beispiel [Schwingkreisen](#) können auf diese Weise Temperatureinflüsse anderer Bauteile ausgeglichen werden. Keramikkondensatoren aus [ferroelektrischer](#) Keramik sowie [Elektrolytkondensatoren](#) haben günstigerweise eine sehr hohe Permittivität, was zu einem hohen Kapazitätswert führt, haben jedoch auch einen hohen, meist nichtlinearen [Temperaturkoeffizienten](#) und eignen sich daher für Anwendungen ohne große Anforderungen an die Stabilität wie zum Beispiel Siebung, Funkentstörung, Kopplung oder Entkopplung.

Temperaturabhängigkeit der Kapazität häufig eingesetzter Kondensatoren

Kondensatorfamilie, dielektrisches Material	Bezeichnung	$\Delta C/C$	Üblicher Temperaturbereich
Keramikkondensator Klasse 1, paraelektrisch	NP0	$\pm 0,3$ % bzw. $\pm 30$ ppm/K	$-55 \dots +125$ °C
Keramikkondensator Klasse 2, ferroelektrisch	X7R	$\pm 15$ %	$-55 \dots +125$ °C
Keramikkondensator Klasse 2, ferroelektrisch	Y5V	$+22$ % / $-82$ %	$-30 \dots +85$ °C
Folienkondensator, <a href="#">Polyphenylensulfid</a> (PPS)	(F)KI, MKI	$\pm 1,5$ %	$-40 \dots +150$ °C
Folienkondensator, <a href="#">Polypropylen</a> (PP)	(F)KP, MKP	$\pm 2,5$ %	$-40 \dots +105$ °C
Folienkondensator, <a href="#">Polyethylenphthalat</a> (PEN)	(F)KN, MKN	$\pm 5$ %	$-40 \dots +150$ °C
Folienkondensator, <a href="#">Polyester</a> (PET)	(F)KT, MKT	$+5$ %	$-40 \dots +125/150$ °C
metallisiertes Papier (Ölgetränkt)	MP	$\pm 10$ %	$-25 \dots +85$ °C
Aluminium-Elektrolytkondensator, $Al_2O_3$		$\pm 20$ %	$-40 \dots +85/105/125$ °C
Tantal-Elektrolytkondensator, $Ta_2O_3$		$\pm 20$ %	$-40 \dots +125$ °C

## Spannungsabhängigkeit

Ferroelektrische Klasse-2-Keramikkondensatoren zeigen einen spannungsabhängigen, [nichtlinearen](#) Verlauf der Kapazität. Daraus resultiert zum Beispiel bei Anwendungen im Audibereich ein [Klirrfaktor](#). Dort werden bei hohen Qualitätsanforderungen deshalb oft Folienkondensatoren eingesetzt.

Formal lässt sich ein nichtlinearer Kondensator durch eine von der Momentanspannung  $u$  abhängige [Dielektrizitätszahl](#)  $\epsilon_r(u)$  beschreiben. Diese relative Dielektrizitätszahl ist also nicht konstant, sondern ist als Funktion der am Kondensator anliegenden Spannung  $u$  zu betrachten. Beispielsweise ist bei einem nichtlinearen Kondensator die spannungsabhängige Kapazität gegeben als:

$$C(u) = \epsilon_r(u) \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d}$$

Die Funktion  $\epsilon_r(u)$  ist werkstoffabhängig.

Klasse-2-Keramikkondensatoren weisen, abhängig von der Art der Keramik, bei Nennspannung einen Abfall der Kapazität von bis zu 90 % gegenüber der genormten Messspannung von 0,5 oder 1 V auf.

## Alterung

Die elektrischen Eigenschaften einiger Kondensatorfamilien sind Alterungsprozessen unterworfen, sie sind zeitabhängig.

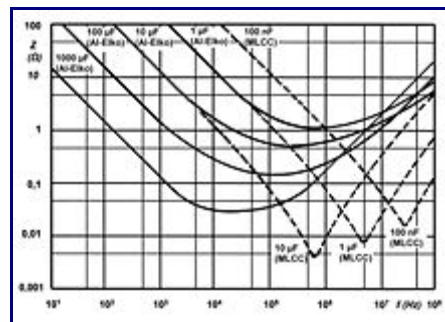
Keramische Klasse-2-Kondensatoren mit Dielektrika aus ferroelektrischen Materialien zeigen eine ferroelektrische Curietemperatur. Oberhalb von etwa 120 °C, der Curietemperatur von Bariumtitanat, ist die Keramik nicht mehr ferroelektrisch. Da diese Temperatur beim Löten von SMD-Kondensatoren deutlich überschritten wird, werden die dielektrischen Domänen parallel ausgerichteter dielektrischer Dipole erst beim Abkühlen des Materials neu gebildet. Diese Bereiche zerfallen aufgrund mangelnder Stabilität der Domänen jedoch im Laufe der Zeit, die Dielektrizitätszahl verringert sich und damit sinkt die Kapazität des Kondensators, der Kondensator altert. Die Alterung folgt einem logarithmischem Gesetz. Dieses definiert die Alterungskonstante als Kapazitätsabnahme in Prozent während einer Zeitdekade, zum Beispiel in der Zeit von 1 h auf 10 h.

[26]

Aluminium-Elektrolytkondensatoren mit flüssigem Elektrolyten altern infolge der langsamen, temperaturabhängigen Austrocknung des Elektrolyten im Laufe der Zeit. Dabei verändert sich zunächst die Leitfähigkeit des Elektrolyten, die ohmschen Verluste (ESR) des Kondensators steigen an. Später sinkt dann auch der Benetzungsgrad der porigen Anodenstrukturen wodurch die Kapazität absinkt. Sofern keine anderen chemischen Prozesse im Kondensator auftreten, kann die Alterung von „Elkos“ mit dem sog. „10-Grad-Gesetz“ beschrieben werden. Die Lebensdauer dieser Kondensatoren halbiert sich, wenn die auf den Kondensator einwirkende Temperatur um 10 °C ansteigt.

Auch Doppelschichtkondensatoren sind einem Alterungsprozess durch Verdunstung des Elektrolyten unterworfen. Die damit verbundene Erhöhung des ESR begrenzt die mögliche Anzahl von Ladezyklen des Kondensators.

## Scheinwiderstand und Resonanz



Typische Impedanzverläufe des Scheinwiderstandes  $|Z|$  verschiedener Kondensatoren mit unterschiedlicher Kapazität. Je kleiner die Kapazität ist, desto höher wird die Frequenz, die der Kondensator ableiten (filtern, sieben) kann.

Die Anwendungsbereiche von Kondensatoren nutzen überwiegend die Eigenschaft als kapazitiver Wechselstromwiderstand zum Filtern, Sieben, Koppeln und Entkoppeln von erwünschten oder unerwünschten Frequenzen oder zum Erzeugen von Frequenzen in Schwingkreisen. Aus diesem Grunde ist das Frequenzverhalten der Impedanz ein mitentscheidender Faktor für den Einsatz in

einer [Schaltungsfunktion](#).

Der Betrag der Impedanz, der Scheinwiderstand  $|Z|$ , wird in Datenblättern von Kondensatoren häufig als Kurve über der Frequenz  $f$  dargestellt. Dabei sinkt mit steigender Frequenz zunächst der Scheinwiderstand ab bis zu einem Wendepunkt in der Kurve, ab dem er wieder ansteigt. Dieser Verlauf ist das Resultat der Konstruktion realer Kondensatoren, die nicht nur eine Kapazität  $C$  sondern immer auch noch eine in Serie dazu liegende parasitäre Induktivität  $L$  (ESL) aufweisen. (Siehe Absatz „Normung und Ersatzschaltbild“). Kapazität  $C$  und Induktivität  $ESL$  bilden einen Serienschwingkreis [\[27\]](#), [\[28\]](#), der bei der Frequenz

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

in Resonanz gerät. An diesem Punkt hat der Scheinwiderstand nur noch einen Realanteil, den ESR des Kondensators. Darüber hinaus überwiegt der induktive Anteil, und der Kondensator ist als solcher unwirksam, da er dann wie eine [Spule](#) wirkt.

Herkömmliche Aluminium-Elektrolytkondensatoren haben aufgrund ihrer großen Kapazität relativ gute Siebeigenschaften im Bereich niedriger Frequenzen bis etwa 1 MHz. Sie weisen aber aufgrund ihres gewickelten Aufbaus eine relativ hohe [Induktivität](#) auf, so dass sie für den Einsatz bei höheren Frequenzen ungeeignet sind. Keramik- und Folienkondensatoren sind schon von ihren kleineren Kapazitäten her für höhere Frequenzen bis zu einigen 100 MHz geeignet, Sie haben außerdem durch ihre Konstruktion (Stirnkontaktierung der Folien, Parallelschaltung der Elektroden) deutlich niedrigere parasitäre Induktivitätswerte. Um einen sehr breiten Frequenzbereich abdecken zu können, wird häufig ein Elektrolytkondensator mit einem Keramik- oder Folienkondensator parallel geschaltet.

Viele Neuentwicklungen bei Kondensatoren haben unter anderem eine Verringerung der parasitären Induktivität  $ESL$  zum Ziel, um durch Erhöhung der Resonanzfrequenz zum Beispiel die Schaltgeschwindigkeit digitaler Schaltungen erhöhen zu können. Durch die Miniaturisierung speziell bei den SMD-Keramikvielschicht-Chipkondensatoren ([MLCC](#)) wurde hier schon viel erreicht. Eine weitere Verringerung der parasitären Induktivität ist durch Kontaktierung der Elektroden an der Längsseite anstatt der Querseite erreicht worden. Die „Face down“ Konstruktion verbunden mit der Multi-Anodentechnik hat bei Tantal-Elektrolytkondensatoren ebenfalls zu einer Verringerung der  $ESL$  geführt. Aber auch neue Kondensatorfamilien wie die sog. MOS- oder Silizium-Kondensatoren bieten Lösungen an, wenn Kondensatoren für sehr hohe Frequenzen bis in den GHz-Bereich benötigt werden.

## Ohmsche Verluste

Ohmsche Verluste in diskreten, handelsüblichen Kondensatoren für die Elektronik entstehen durch dielektrische Umpolarisierungsverluste im Wechselfeld und durch den ohmschen Widerstand der Zuleitungen und der Elektroden des Kondensators. Bei [Aluminium-Elektrolytkondensatoren](#) trägt besonders die begrenzte Leitfähigkeit flüssiger Elektrolyte zu diesen Verlusten bei. Die verschiedenen Verlustwiderstände werden, da sie bei industriell gefertigten Kondensatoren messtechnisch nicht voneinander getrennt gemessen werden können, zu einem gemeinsamen Wert zusammengefasst. Sie können in den jeweiligen Datenblättern als [Verlustfaktor](#)  $\tan \delta$ , als [Güte](#)  $Q$  und als Ersatzreihenwiderstand  $ESR$  dargestellt werden. Der Zahlenwert des Verlustfaktors und der Güte ist, bei gleicher Messfrequenz, innerhalb eines spezifizierten Bereiches unabhängig von dem Kapazitätswert des Kondensators. Der  $ESR$  dagegen ist unabhängig von den Blindwiderständen und ist eine Größe, die jeden Kondensator einzeln kennzeichnet. Über ihn kann mit Hilfe der Gleichung

$$P = I^2 \cdot ESR$$

leicht die im Kondensator entstehende Verlustwärme  $P$  bei Strombelastung mit dem Strom  $I$  errechnet werden.

Bei [Leistungskondensatoren](#) wie z. B. [Vakuumpkondensatoren](#), große Keramik- und Polypropylen-Folienkondensatoren werden die ohmschen Verluste anders definiert. Anstatt Verlustfaktor, Güte oder ESR wird hier oft die maximale Strom- oder Impulsbelastung spezifiziert. Auch diese Angabe ist letztendlich ein Ausdruck der ohmschen Verluste des Kondensators und ermittelt sich aus der zulässigen Verlustwärme, die über die ohmschen Verluste bei der Strombelastung entsteht.

Die ohmschen Verluste von Kondensatoren hängen von der Bauart ab, sind also spezifisch für eine bestimmte Fertigungstechnik. Innerhalb einer Bauart sinken die ohmschen Verluste mit steigender Kapazität. Dies scheint zunächst paradox, weil mit steigender Kapazität die dielektrischen Verluste größer werden müssten. Das dies nicht der Fall ist liegt am technischen Aufbau der Kondensatorarten. Anschaulich wird es am Beispiel der Keramik-Vielschichtkondensatoren. Die vielen Einzelkondensatoren im Schichtverbund sind parallel geschaltet, so dass auch ihre einzelnen Verlustwiderstände parallel geschaltet sind. Dadurch reduziert sich der Gesamtwiderstand entsprechend der Anzahl parallel geschalteter Einzelkondensatoren. Bei [Folienkondensatoren](#) bewirkt die Stirnflächenkontaktierung des Wickels ähnliches. Die Art der Kontaktierung kann als eine Vielzahl parallel geschalteter Einzelkondensatoren beschrieben werden. Bei [Elektrolytkondensatoren](#), bei denen die Zuleitungsverluste über den [Elektrolyten](#) die ohmschen Verluste maßgeblich bestimmen, kann bei größer werdenden Elektrodenflächen die steigende Anzahl der Zuleitungspfade als Parallelschaltung vieler Einzelwiderstände verstanden werden, wodurch sich die gesamten ohmschen Verluste verringern. Bei sehr großen Aluminium-Elektrolytkondensatoren reduziert außerdem häufig eine Mehrfachkontaktierung der Anoden- und Kathodenfolien die ohmschen Verluste. Aus demselben Grund werden [Tantal-Elektrolytkondensatoren](#) in einigen Ausführungsformen mit Mehrfach-Anoden gefertigt.

Die ohmschen Verluste sind Wechselstromverluste, Gleichstromverluste (Isolationswiderstand, Reststrom) bei Kondensatoren sind meist vernachlässigbar. Die Messfrequenz zum Messen der Verluste muss eindeutig festgelegt sein. Da aber handelsübliche Kondensatoren mit Kapazitätswerten von pF (Pikofarad,  $10^{-12}$  F) bis einigen 100 F bei Doppelschichtkondensatoren mit etwa 14 Zehnerpotenzen einen außerordentlich großen [Kapazitätsbereich](#) abdecken, ist es nicht möglich, mit nur einer Messfrequenz den gesamten Bereich zu erfassen. Nach der Fachgrundspezifikation für Kondensatoren, der DIN EN (IEC) 60384-1, sollen die ohmschen Verluste mit derselben Frequenz gemessen werden, die auch zur Messung der Kapazität verwendet wird, mit:

- 100 (120) Hz für Elektrolytkondensatoren und andere Kondensatoren mit  $C > 10 \mu\text{F}$
- 1 kHz (Bezugsfrequenz) oder 10 kHz für andere Kondensatoren mit  $1 \text{ nF} \leq C \leq 10 \mu\text{F}$
- 100 kHz, 1 MHz (Bezugsfrequenz) oder 10 MHz für andere Kondensatoren mit  $C \leq 1 \text{ nF}$

Die ohmschen Verluste von Kondensatoren sind frequenz-, temperatur- und zum Teil auch zeitabhängig (Alterung). Eine Umrechnung der Einheit  $\tan \delta$  in ESR und umgekehrt ist möglich, erfordert aber einige Erfahrung. Sie kann nur erfolgen, wenn die Messfrequenz hinreichend weit entfernt von der Resonanzfrequenz ist. Denn bei der Resonanz ändert sich der Kondensator von einem kapazitiven in ein induktives Bauelement, dabei ändert sich der Verlustwinkel dramatisch und ist deshalb zur Umrechnung nicht mehr geeignet.

### **Ohmsche Verluste unterschiedlicher Klasse-1-Kondensatorarten**

Die Güte und der Verlustfaktor sind charakteristische Größen der ohmschen Verluste im Dielektrikum bestimmter Kondensatoren, bei denen die Leitungsverluste vernachlässigbar sind. Diese Kondensatoren, bei den Keramik-kondensatoren „Klasse-1“ genannt, werden überwiegend in Frequenz bestimmenden Schaltungen oder in Hochleistungsanwendungen als Leistungskondensatoren eingesetzt. Als Messfrequenz für den in der Elektronik üblichen



Kapazitätsbereich von 30 pF bis 1 nF wird von großen Herstellern meist 1 MHz genommen. Mit dieser hohen Frequenz wird auch Bezug auf die Anwendung solcher Kondensatoren genommen, die überwiegend im höheren Frequenzbereich liegt. Die betroffenen kleinen Kapazitätswerte mit den dazu vorhandenen niedrigen ESL-Werten stellen außerdem sicher, dass der Messwert noch weit genug von der Resonanzfrequenz entfernt ist.

Die folgende Tabelle, in der die ESR-Werte rechnerisch ermittelt wurden, gibt einen Überblick über die ohmschen Verluste (Maximalwerte) unterschiedlicher Kondensatorarten (ohne Leistungskondensatoren) bei 1 MHz in für Frequenz bestimmende Anwendungen in der Elektronik:

Ohmsche Verluste unterschiedlicher Kondensatorarten  
für frequenzbestimmende Schaltungen (Bezugsfrequenz 1 MHz)

Kondensatorart	Kapazität	ESR 100 pF	ESR 1000 pF	$\tan \delta$	Güte Q
	in pF	in $m\Omega$	in $m\Omega$	in $10^{-4}$	
Siliziumkondensator <a href="#">[29]</a>	560	400	—	2,5	4000
Glimmerkondensator <a href="#">[30]</a>	1000	650	65	4	2500
Klasse-1-Keramikkondensator (NP0) <a href="#">[31]</a>	1000	1600	160	10	1000

### Ohmsche Verluste unterschiedlicher Kondensatorarten im mittleren Kapazitätsbereich

Der Kapazitätsbereich von 1 nF bis 10  $\mu$ F wird überwiegend von Klasse-1- und Klasse-2-Keramikkondensatoren und von Kunststoff-Folienkondensatoren abgedeckt.

Elektrolytkondensatoren werden in diesem Kapazitätsbereich weniger häufig eingesetzt. Dieser

Kapazitätsbereich ist durch eine Vielzahl unterschiedlicher Anwendungen mit stark unterschiedlichen Anforderungen gekennzeichnet. Die ohmschen Verluste dieser Kondensatoren in den Datenblättern der Hersteller werden überwiegend über den Verlustfaktor spezifiziert. Allerdings sind in diesem Bereich auch Wechselfspannungs- und Impulskondensatoren angesiedelt, die sich über eine Strombelastung spezifizieren.

In der folgenden Tabelle sind als allgemeines Beispiel die Verlustfaktoren (Maximalwerte) bei 1 kHz, 10 kHz und 100 kHz sowie die daraus abgeleiteten ESR-Werte für einen 100 nF Kapazitätswert gelistet.

Ohmsche Verluste unterschiedlicher Kondensatorarten  
mit  $1 \text{ nF} < C \leq 10 \mu\text{F}$  (Bezugswert 100 nF)

Kondensatorart	ESR 1 kHz	ESR 10 kHz	ESR 100 kHz	$\tan \delta$	$\tan \delta$	$\tan \delta$
	in $m\Omega$	in $m\Omega$	in $m\Omega$	in $10^{-3}$	in $10^{-3}$	in $10^{-3}$
Klasse-1-Keramikkondensator (NP0, N750) <a href="#">[32]</a>	1600	160	16	1	1	1
Klasse-2-Keramikkondensator (X7R, Y5V) <a href="#">[33]</a>	4000	400	40	2,5	2,5	2,5
PP-Folienkondensator (Polypropylen) <a href="#">[34]</a>	6400	800	160	4	5	10
PET-Folienkondensator (Polyester)	12700	2400	480	8	15	30
PEN-Folienkondensator (Polyethylenphthalat)	12700	2400	480	8	15	30
PPS-Folienkondensator (Polyphenylensulfid)	24000	3200	800	15	20	50



## Ohmsche Verluste unterschiedlicher Kondensatorarten im höheren Kapazitätsbereich

Kondensatoren mit Kapazitätswerten größer 10  $\mu\text{F}$  werden überwiegend in Anwendungen im Bereich der Stromversorgungen, der Sieb- und der Stützsaltungen eingesetzt. Es ist der typische Kapazitätsbereich, in dem Elektrolytkondensatoren und hochkapazitive Keramik-Vielschichtkondensatoren eingesetzt werden. Nach der Fachgrundspezifikation für Kondensatoren, der DIN EN (IEC) 60384-1 sollen die ohmschen Verluste solcher Kondensatoren mit 100 Hz (bzw. 120 Hz) gemessen werden. Da in der Elektronik die Arbeitsfrequenzen in den letzten Jahrzehnten aber deutlich gestiegen sind und auch im Bereich der Schaltnetzteile mit sehr viel höheren Frequenzen gearbeitet wird, finden sich in den Datenblättern, speziell denen von Elektrolytkondensatoren, auch häufig die 100-kHz-ESR-Werte.

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die ohmschen Verluste (Maximalwerte) verschiedener Kondensatorarten für Sieb- oder Stützanwendungen im Niederspannungsbereich. Zur Vergleichbarkeit der Kondensatorarten miteinander ist jeweils die Kapazität von etwa 100  $\mu\text{F}$  und eine Spannungsfestigkeit von 10 bis 16 V gewählt worden. Da für diesen Anwendungsbereich in der Elektronik das Bauvolumen eine große Rolle spielt, sind in der Tabelle die Abmessungen mit aufgeführt worden. Die Zeile mit der Kapazität 2200  $\mu\text{F}$  ist als Beispiel dafür aufgeführt, dass mit größerer Kapazität und Baugröße auch bei der preiswertesten Kondensatorart, den „Elkos“, niedrige ESR-Werte zu erreichen sind. Im Übrigen ist der höhere ESR bei den „Elkos“ mitunter schaltungstechnisch sogar erwünscht, weil die Dämpfung über diese Verluste unerwünschte Resonanzen auf Leiterplatten verhindern kann.

Ohmsche Verluste unterschiedlicher Kondensatorarten für Sieb- und Stützanwendungen im Niederspannungsbereich

Kondensatorart	Kap./Sp g in $\mu\text{F}/\text{V}$	$L \times B \times H$ in $\text{mm}^3$ bzw. $D \times L$ in $\text{mm}^2$	ESR 100 Hz in $\text{m}\Omega$	$\tan \delta$ 100 Hz in %	ESR 100 kHz in $\text{m}\Omega$
Klasse-2-Keramikkondensator (X5R) <a href="#">[35]</a>	100/6,3	$3,2 \times 1,6 \times 1,6$	2400	15	typ. 2
Klasse-2-Keramikkondensator (YV5)	100/6,3	$3,2 \times 1,6 \times 1,6$	3180	20	—
Tantal-Elektrolytkondensator mit Polymer-Elektrolyten <a href="#">[36]</a>	100/10	$7,3 \times 4,3 \times 2,8$	1600	10	18
Tantal-Elektrolytkondensator mit Braunstein-Elektrolyten	100/10	$7,3 \times 4,3 \times 2,8$	1275	8	150
Aluminium-Elektrolytkondensator mit Polymer-Elektrolyten	100/10	$7,3 \times 4,3 \times 1,6$	960	6	15
Aluminium-Elektrolytkondensator mit TCNQ-Elektrolyten <a href="#">[37]</a>	120/10	$8 \times 6,9 \times 8,3$	1600	12	35
Aluminium-Elektrolytkondensator mit flüssigem Elektrolyten <a href="#">[38]</a>	150/10	$6,3 \times 5,8$	2020	19	260
Aluminium-Elektrolytkondensator mit flüssigem Elektrolyten <a href="#">[39]</a>	2200/10	$12,5 \times 20$	130	18	90

## Wechselstrombelastbarkeit



Geplatzte Elektrolytkondensatoren, die an dem geöffnetem Sollbruchventil erkennbar sind. Verursacht vermutlich durch überhöhte Wechselstrombelastung über die Kondensatoren im [Schaltregler](#) eines PC-Mainboards.



Dieser defekte Kondensator in einem Nähmaschinenpedal entwickelte nicht nur starke Wärme, sondern sorgte auch für selbstständiges Anlaufen des Maschinenmotors

Eine [Wechselspannung](#) oder eine einer [Gleichspannung](#) überlagerte Wechselspannung bewirkt Lade- und Entladevorgänge in einem Kondensator. Es fließt ein Wechselstrom, der Umgangssprachlich auch Rippelstrom genannt wird. Der Effektivwert dieses Wechselstromes bewirkt über die ohmschen Verluste des Kondensators (ESR, Verlustfaktor) eine Verlustleistung  $P_V$ , die das Bauelement von innen heraus erwärmt.

$$P_V = I^2 \cdot \text{ESR}$$

oder

$$P_V = 2\pi f \cdot C \cdot U^2 \cdot \tan \delta$$

Die entstandene Wärme wird über [Konvektion](#) und [Wärmeleitung](#) an die Umwelt abgegeben. Die Menge der Wärme, die an die Umwelt abgegeben werden kann, hängt von den Maßen des Kondensators und den Bedingungen auf der [Leiterplatte](#) und der Umgebung ab.

Die zulässige Wechselstrombelastung von Elektrolytkondensatoren und Kunststoff-Folienkondensatoren wird allgemein so berechnet, dass maximal eine zulässige interne Temperaturerhöhung von 3 bis 10 K entsteht. Bei Keramikkondensatoren kann die Wechselstrombelastung so spezifiziert werden, dass bei einer gegebenen Umgebungstemperatur durch die im Kondensator entstehende Wärme die spezifizierte Maximaltemperatur nicht überschritten wird.

In den Datenblättern von Folienkondensatoren und Keramikkondensatoren wird anstelle eines Wechselstromes oft eine maximal zulässige effektive Wechselspannung spezifiziert, die innerhalb des Nenntemperaturbereiches am Kondensator dauernd anliegen darf. Da mit steigender Frequenz die ohmschen Verluste im Kondensator ansteigen, die interne Wärmeentwicklung bei

gleichbleibender Effektivspannung also größer wird, muss bei höheren Frequenzen die Spannung reduziert werden, um die zulässige Temperaturerhöhung einzuhalten.

Besonders bei [Elektrolytkondensatoren](#) ist eine hohe Wechselstrombelastung kritisch. Da sich der Kondensator erwärmt, wird die zu erwartende Lebensdauer reduziert. Wird durch überhöhte Wechselstrombelastung die maximal zulässige Temperatur überschritten, so kann der flüssige Elektrolyt unter Umständen in den Siedebereich kommen und den Kondensator so zum Platzen bringen.

## Isolationswiderstand und Selbstentladung

Ein auf eine Gleichspannung  $U_0$  aufgeladener realer Kondensator entlädt sich mit der Zeit von selbst. Dieser Effekt kann durch einen endlichen *Isolationswiderstand*  $R_{\text{isol}}$  des Dielektrikums beschrieben werden, der zu einem idealen Kondensator mit der Kapazität  $C$  parallel geschaltet ist [\[40\]](#). Der fließende Strom wird als Leckstrom bezeichnet; er wird bei Baureihen häufig als Funktion der Kapazität spezifiziert. Der zeitliche Verlauf der absinkenden Kondensatorspannung hat die Form

$$u(t) = U_0 \cdot e^{-t/\tau_s},$$

wobei

$$\tau_s = R_{\text{is}} \cdot C$$

die *Selbstentladezeitkonstante* ist. Nach der Zeit  $\tau_s$  ist die Kondensatorspannung um 63 % auf 37 % des Anfangswertes abgesunken. Die Selbstentladezeitkonstante ist ein [Maß](#) für die Isolation des Dielektrikums zwischen den Elektroden eines Kondensators. Diese Zeitkonstante ist beispielsweise wichtig, wenn ein Kondensator als zeitbestimmendes Glied (zum Beispiel in Zeitrelais) oder zur Speicherung eines Spannungswertes wie in einer [Abtast-Halte-Schaltung](#) oder [Integrierern](#) eingesetzt wird.

Keramikkondensatoren der Klasse-1 müssen gemäß geltender Normen einen Isolationswiderstand von mindestens 10 G $\Omega$ , die der Klasse mindestens 4 G $\Omega$  oder eine Selbstentladezeitkonstante von mindestens 100 s besitzen. Der typische Wert liegt meist darüber. Kunststoff-Folienkondensatoren haben typischerweise einen Isolationswiderstand zwischen 6 und 12 G $\Omega$ . Das entspricht für Kondensatoren im  $\mu\text{F}$ -Bereich einer Selbstentladezeitkonstante von 2000 bis 4000 s [\[41\]](#).

Bei Elektrolytkondensatoren wird der Isolationswiderstand des Oxidschichtdielektrikums über den Reststrom des Kondensators definiert.

Der Isolationswiderstand bzw. die Selbstentladezeitkonstante ist teilweise stark temperaturabhängig und sinkt mit steigender Temperatur. Der Isolationswiderstand bzw. die Selbstentladezeitkonstante darf nicht verwechselt werden mit der Isolierung des Bauelementes gegenüber der Umgebung.

## Reststrom, Leckstrom

Bei Elektrolytkondensatoren wird nicht der Isolationswiderstand definiert, sondern der Reststrom, auch „Leckstrom“, (engl. *Leakage Current*), genannt.

Der Reststrom eines Elektrolytkondensators ist der Gleichstrom, der durch den Kondensator fließt, wenn eine Gleichspannung an die Anschlüsse des Kondensators gelegt wird. Er entsteht aus einer Schwächung der Oxidschicht durch chemische Prozesse während Lagerzeiten und durch Strombrücken außerhalb der Kondensatorzelle. Der Reststrom ist kapazitäts-, spannungs-, zeit- und temperaturabhängig. Er ist außerdem noch abhängig von der Vorgeschichte, zum Beispiel von der Temperaturbelastung durch einen Lötprozess.

Bedingt durch Selbstheilungseffekte in Elektrolytkondensatoren wird der Reststrom normalerweise immer geringer, je länger der Kondensator an Spannung liegt. Obwohl die Größenordnung des Reststromes moderner Elektrolytkondensatoren, wenn er in einen Isolationswiderstand umgerechnet wird, deutlich kleiner ist als derjenige von Folien- oder Keramikkondensatoren, kann die Selbstentladung geladener Elektrolytkondensatoren mehrere Wochen dauern.

## Dielektrische Absorption

Die Dielektrische Absorption ist eine unerwünschte Ladungsspeicherung des Dielektrikums. Wird ein Kondensator kurz entladen, entsteht an den Elektroden nach einigen Sekunden bis Minuten wieder ein Teil der vorher angelegten Spannung. Das Dielektrikum hatte einen Teil der Ladung absorbiert und gibt ihn nun nach und nach wieder frei. Dieser Nachladeeffekt ist als dielektrische Absorption oder als dielektrische Relaxation bekannt. Die Größe der Absorption wird im Verhältnis zur ursprünglich angelegten Spannung angegeben und hängt von dem verwendeten Dielektrikum ab.

Kondensatortyp	Dielektrische Absorption
Kunststoff-Folienkondensatoren, Polyesterdielektrikum	0,2 bis 0,25 %
Kunststoff-Folienkondensatoren, Polypropylendielektrikum	0,01 bis 0,05 %
Keramikkondensatoren, X7R	0,6 bis 1 %
Keramikkondensatoren, Z5U	2,0 bis 2,5 %
Aluminium-Elektrolytkondensatoren	etwa 10 bis 15 %

Abhängig vom Kondensatortyp können solche Nachladungen bis zu 15 % der vorher angelegten Spannung erreichen. Das kann unter Umständen zu relativ hohen Spannungen (sogar einige Volt) führen, die eine Gefährdung darstellen können: Es können dadurch Schäden an Halbleitern oder Funkenbildung beim Kurzschließen von Anschlüssen verursacht werden. Aber auch in Messschaltungen ist dieser Effekt eher unerwünscht, da er zu falschen Messergebnissen führt. Hochspannungs- und Leistungskondensatoren, auch größere Aluminium-Elektrolytkondensatoren werden daher kurzgeschlossen transportiert bzw. geliefert.

## Streu- bzw. Parasitärkapazität

Aus physikalischen Gründen hat jedes reale elektrische Bauelement mehr oder weniger stark eine kapazitive Kopplung mit der Umgebung (Streukapazität) oder parallel zu seinem gewünschten Verhalten (Parasitärkapazität). Dieses kapazitive Verhalten kann vor allem bei hohen Frequenzen unerwünschte Auswirkungen haben.

Schaltungen, die an sich einen Kondensator benötigten, können aufgrund dieser schon vorhandenen Streukapazität zuweilen ohne einen Kondensator als separates Bauteil ausgeführt werden.

Insbesondere können Kondensatoren im Picofaradbereich durch eine entsprechende Ausformung von Leiterzügen auf einer [Leiterplatte](#) ersetzt werden: Zwei gegenüberliegende Kupferflächen von 1 cm<sup>2</sup> haben bei einem Abstand von 0,2 mm beispielsweise bei Verwendung von [FR4-Material](#) ( $\epsilon_r = 3,4$ ) eine Kapazität von 15 pF. Die Realisierung solcher „Kondensatoren“ ist jedoch eine

Preisfrage. Ein 15-pF-MLCC-Klasse-2-Keramikkondensator ist einschließlich der Bestückungskosten und abzüglich der von ihm benötigten Leiterplattenfläche deutlich preiswerter als 1 cm<sup>2</sup> Leiterplattenfläche.

Auch bei einem Kondensator können unerwünschte kapazitive Kopplungen entstehen. Insbesondere gewickelte Kondensatoren sind unsymmetrisch in Bezug auf die Außenfläche. An die außen liegende Schicht wird der „kalte“ Schaltungsteil (meist die Masse) angeschlossen, der das geringere oder niederohmige Wechselfeldpotential führt, um eine Kopplung des Kondensators mit dem Umfeld zu verringern. Ähnlich verhält es sich mit Trimmkondensatoren, hier gilt das für den zur Trimmung betätigbaren Anschluss, um bei Betätigung mit einem Werkzeug dessen Störeinfluss

zu verringern.

## Siehe auch

- [Frequenzkompensation](#)

## Literatur

- Friedhelm Schiersching: *Kondensatoren verstehen und anwenden*. Telekosmos-Verlag, Stuttgart 1983, [ISBN 3-440-05185-4](#)
- Otto Zinke, Hans Seither: *Widerstände, Kondensatoren, Spulen und ihre Werkstoffe*. Springer, Berlin 1982, [ISBN 3-540-11334-7](#).
- Peter Volkmann, Edgar P. Vorndran: *Elektrisches Feld und Kondensator*. Aufgaben Elektrotechnik + Elektronik. Bd 2. VDE-Verl., Berlin 1999, [ISBN 3-8007-2018-3](#).
- Wolfgang Just, Wolfgang Hofmann: *Blindstromkompensation in der Betriebspraxis: Ausführung, Energieeinsparung, Oberschwingungen, Spannungsqualität*. VDE-Verl., Berlin 2003, [ISBN 3-8007-2651-3](#).
- Karsten Block, Block-Hölzel-Weigt-Zachert: *Bauelemente der Elektronik und ihre Grundsaltungen*. Einführung in die Elektronik. Teil 1. Stam, Troisdorf 1996, [ISBN 3-8237-0214-9](#).
- H.-J. Bauckholt: *Grundlagen und Bauelemente der Elektrotechnik*. 3. Auflage, S. 389ff, [ISBN 3-446-17047-2](#).
  - DIN EN 60384-1

## Weblinks

-  [Commons: Bilder von Kondensatoren](#) – Sammlung von Bildern, Videos und Audiodateien
  - [Grundlagen und Funktionsweise](#)
  - [Elektrisches Feld in Plattenkondensatoren](#) (Animation)
  - [CapSite](#) Technische Details zu industriell relevanten Kondensatoren (englisch)
  - Technische Daten und weiterführende Informationen finden sich auf den Seiten der Hersteller, insbesondere: [AVX](#), [Cornell Dubilier](#), [epcos](#), [ELECTRONICON](#), [Europe Chemi-Con](#), [KEMET](#), [Nichicon](#), [Panasonic](#), [RUBYCON](#), [VISHAY](#), [WIMA](#)
- [Daniel Bellan: Kondensatoren, TU Berlin Projektlabor Sommersemester 2005](#) (PDF-Datei; 148 kB)



# Einzelnachweise

1. ↑ L. A. Vsevolozhskii, V. A. Filinov: *Methods of measuring nonlinear capacity*. In: *Measurement Techniques*. 19, Nr. 10, 1976, S. 1497–1500, [doi:10.1007/BF01101215](https://doi.org/10.1007/BF01101215).
2. ↑ [Capacitor](#): World of Invention, 27. Mai 2006, Abgerufen am 11. August 2009.
3. ↑ Patent [DE92564](#): *Elektrischen Flüssigkeitskondensators mit Aluminiumelektroden*. Veröffentlicht am 19. Mai 1897, Erfinder: Charles Pollack ([Patentnr. DRP 92564 auf DEPATISnet](#), abgerufen am 13. Dezember 2009).
4. ↑ Patent [US2800616](#): *Low voltage electrolytic capacitor*. Veröffentlicht am 23. Juni 1957.
5. ↑ Matt Saltz: *Capacitors: A Story of Dielectrics*. Electronic News, 18. Januar 1999.
6. ↑ Parag Banerjee, Israel Perez, Laurent Henn-Lecordier, Sang Bok Lee, Gary W. Rubloff: *Nanotubular metal-insulator-metal capacitor arrays for energy storage*. In: *Nature Nanotechnology*. 4, Nr. 5, 2009, S. 292–296, [doi:10.1038/nnano.2009.37](https://doi.org/10.1038/nnano.2009.37).
7. ↑ Katherine Bourzac: *Winzige Sandwiches für den großen Energiehunger*. In: *Telepolis*. 20. Apr. 2009, abgerufen am 20. Apr. 2009.
8. ↑ [NanoCenter Improves Energy Storage Options](#). In: *Nanotechnology Now*. 23. März 2009, Abgerufen am 11. August 2009.
9. ↑ [New Electrostatic Nanocapacitors Offer High Power and High Energy Density](#). In: Green Car Congress. 17. März 2009, Abgerufen am 11. August 2009.
  10. ↑ [exploding-bridgewire detonator](#), englische Wikipedia
  11. ↑ [Technische Dokumente der Fa. Jennings zu Vakuum-Kondensatoren](#)
  12. ↑ [Technische Daten der Vakuum-Kondensatoren der Fa. Comet](#)
  13. ↑ [Technische Übersicht über variable und feste Vakuumkondensatoren der Fa. Meiden](#)
  14. ↑ [Übersicht und weiterführende Informationen der Fa. AVX zu Kondensatoren mit Glas-Dielektrikum](#)
    15. ↑ [Datenblatt des „MOS Cap“ von AVX](#)
  16. ↑ [\[1\]](#) Technische Informationen zu SiO<sub>2</sub>-Kondensatoren der Fa. Vishay
  17. ↑ [Leistungskondensatoren der Fa. EPCOS für unterschiedlichen Anwendungen](#)
  18. ↑ [Produktbeschreibung von Leistungskondensatoren der Fa. ABB](#) (englisch)
    19. ↑ WVS-Technology, Vakuum-Kondensatoren: [\[2\]](#)
20. ↑ [Ceramic Trimmer Capacitors](#). Murata, 27. August 2008, Abgerufen am 11. August 2009.
21. ↑ [LASERtrim® SMT Tuner Capacitors](#). Johanson, Oktober 2008, Abgerufen am 11. August 2009 (Produktinformation).
22. ↑ [Film Capacitors. General technical information](#). EPCOS, Mai 2009, Abgerufen am 11. August 2009 (PDF, 1,8 MB).
23. ↑ [Umrechnung: 'Bandbreite in Oktaven' N in Gütefaktor Q und Gütefaktor Q in 'Bandbreite in Oktaven' N](#)
24. ↑ Wolf-Ewald Büttner: *Grundlagen der Elektrotechnik 2*. Oldenbourg, 2004, [ISBN 3486272969](https://www.isbn-international.org/number/3486272969), S. 102.
25. ↑ [<sup>a</sup> <sup>b</sup>](#) S. P. Murarka, Moshe Eizenberg, A. K. Sinha: *Interlayer dielectrics for semiconductor technologies*. Academic Press, 2003, [ISBN 9780125112215](https://www.isbn-international.org/number/9780125112215), S. 338–339.
26. ↑ K. W. Plessner: *Ageing of the Dielectric Properties of Barium Titanate Ceramics*. In: *Proceedings of the Physical Society. Section B*. 69, 1956, S. 1261–1268, [doi:10.1088/0370-1301/69/12/309](https://doi.org/10.1088/0370-1301/69/12/309).
27. ↑ WIMA: [Induktivität und Eigenresonanz](#).
28. ↑ Ludwig-Maximilians-Universität München, Fakultät für Physik: [Der Kondensator](#).
  29. ↑ Siliziumkondensator, Vishay, HPC0603A, [\[3\]](#)
  30. ↑ Simic Electronics, Chip Mica Capacitors, [\[4\]](#)
  31. ↑ AVX, NP0, 1000 pF 100 V, 0805, Q >= 1000 (1 MHz), [\[5\]](#)



- 32.↑ Murata, C0G, 100 nF 50 V, 1206,  $Q > 1000/1$  kHz, [6]
- 33.↑ Holystone, HCC, X7R, Y5V, 0805, 100 nF 25 V, [7]
- 34.↑ Wima,, FKP3, 100 nF 63 V, MKS4, 100 nF 50 V, SMD-PEN, 100 nF 63 V, , MKI2, 100 nF 63 V, [8]
- 35.↑ Murata, X5R, 100  $\mu$ F 6,3 V, 1206, Tan d 0,15/120Hz, Y5V, 100  $\mu$ F 6,3 V, 1206, Tan d 0,2/100Hz, <http://search.murata.co.jp/Ceramy/image/img/A18X/E0000026.pdf>
- 36.↑ Kemet, Produktsuche, T491, T510, T520, T530, A700, 100/10  
<http://www.kemet.com/kemet/web/homepage/kechome.nsf/weben/products>
- 37.↑ Sanyo, Os-Con, SMD-SVP, 120/10, <http://www.edc.sanyo.com/pdf/e046.pdf>
- 38.↑ Panasonic, SMD-FP, 150/10,  
[http://www.panasonic.com/industrial/components/capacitive/cap\\_smtelc.htm](http://www.panasonic.com/industrial/components/capacitive/cap_smtelc.htm)
- 39.↑ Jianghai, CD 263 BK, 1000/10, 10x16 mm,  
[http://xcnet.de/projekte/xnetcreate.de\\_v2/pics/kunden/dateianager/5221/JE8\\_CD\\_263\\_BK.pdf](http://xcnet.de/projekte/xnetcreate.de_v2/pics/kunden/dateianager/5221/JE8_CD_263_BK.pdf)
- 40.↑ [Das Elektronik-Kompendium: Kondensatoren.](#)
- 41.↑ WIMA: [Isolationswiderstand.](#)

# Biologische Wirkungen von modulierten hochfrequenten elektromagnetischen Feldern

Gutachten im Auftrage von Herrn Gerd Zesar Prof. Dr. rer. nat. Peter Semm Universität Frankfurt  
Zoologisches Institut

priv. Simrockstr. 16c 65187 Wiesbaden

Wissensstand vom März 2001

Kopieren ist zwar erwünscht, aber das Gutachten darf jedoch vor Gericht  
nur in Abstimmung mit Prof. Semm verwandt werden!

## Zusammenfassung

Modulierte elektromagnetische Felder, die von Mobiltelefonen und Sendeanlagen ausgehen, rufen in biologischen Systemen Reaktionen hervor, die es wahrscheinlich machen, dass es im Falle des Menschen zu gesundheitlichen Störungen kommt. Besonders im Bereich des Zentralnervensystems ist die Empfindlichkeit für eine solche Einflussnahme besonders ausgeprägt. Es kommt zu Störungen des Hormonhaushaltes insbesondere des Pinealhormons Melatonin, und der vegetativen Balance (Schlafstörungen, Nervosität, Unwohlsein, Kopfschmerzen). Auch speziellere Einwirkungen, wie z.B. beim Tinnitus (akustisches System), sind wahrscheinlich, da die entsprechenden Hirngebiete direkt unter der Schädeldecke lokalisiert sind und somit durch die Felder direkt beeinflusst werden können.

Die bis jetzt gemessene Schwelle für die elektromagnetische Beeinflussung von einzelnen Nervenzellen bei Tieren liegt bei ca. 200 nW/cm<sup>2</sup>. Es ist jedoch wahrscheinlich, dass eine größere Empfindlichkeit vorliegt (vergleiche Magnetsinn bei Vögeln liegt bei 20 nanoTesla) und dass eine elektromagnetische Dauerbelastung das Zentralnervensystem im Sinne einer fortdauernden Allergie sensibilisiert. Es ist zu beachten, dass Nervenzellen bei Mensch und Tier nach dem gleichen elektrochemischen Prinzip funktionieren und gleichartig aufgebaut sind. Aus diesem Grunde sollte man sich von Sendeanlagen mindestens (für kürzere Zeit) 50 m entfernt aufhalten. Für längere Zeiten sollte ein Abstand von 500 Metern gewahrt werden.

Spätestens seit den Vorbereitungen zum Bau der ersten Atombombe muss sich verantwortungsbewussten Sachkundigen - die grundsätzliche Frage stellen, ob die menschliche Gesellschaft es sich leisten kann, die schnell fortschreitende Technisierung zu akzeptieren und zum eigenen Vorteil zu nutzen, ohne vor der Installation überprüft zu haben, ob soziale und gesundheitliche Schäden wahrscheinlich sind und wie mit den eventuellen Folgen umgegangen werden kann. Die Technologiesgeschichte der vergangenen Jahrzehnte macht deutlich, dass die Begeisterung über den erzielten Fortschritt in den meisten Fällen die eigentlich notwendige und kluge Vorsicht dominiert hat oder aber mögliche Folgen einfach auf Grund der naturgegebenen beschränkten Einsichtsfähigkeit des Menschen nicht erkannt wurden.

Einerseits könnte das simple Fazit sein, dass die Spezies Homo sapiens zu selbstsüchtig und nicht intelligent genug ist, um mit sich selbst und dieser Welt behutsam und vernünftig umzugehen. Den Biologen erschreckt dies wenig, da mehr als 90 Prozent aller Lebewesen im Laufe der Erdgeschichte ausgelöscht wurden. Für das Gesamtgefüge, soweit wir es erkannt und verstanden haben, ist dies unerheblich.

Andererseits könnte das Prinzip Hoffnung aber in dem Sinne greifen, dass wir nicht "zurück zur (schon teilweise zerstörten Natur) nach Rousseau" auf unsere Fahne schreiben, sondern humane Erkenntnis und pragmatisches, folgerichtiges Handeln walten lassen. Wissenschaftliche Arbeit ist ein Versuch, diesen Weg zu beschreiten. Dabei wurde bei dem hier behandelten Thema die reine, akademische Grundlagenforschung durch angewandte, zum Teil industriell geförderte oder beauftragte Forschung abgelöst. Dies bringt neue Sachzwänge, teilweise Abhängigkeiten und die Notwendigkeit zum interdisziplinären Arbeiten. In diesem Zusammenhang ist die zur Zeit geführte Diskussion über die eventuellen Folgen des "Elektrosmog" zu sehen.

Schon seit den sechziger Jahren werden mögliche Wirkungen von Magnetfeldern, elektrischen Feldern und elektromagnetischen Feldern auf ihre biologischen Effekte hin untersucht, und es gibt weltweit genügend Studien zu diesem Thema, die eine biologische Wirksamkeit und damit gesundheitliche Folgen wahrscheinlich machen. Die US Regierung hat in einer offiziellen Verlautbarung diesen Zusammenhang zumindest für den niederfrequenten Bereich anerkannt (bei der Beschlussfassung des Department of Energy war ich selbst 1995 in Palm Springs anwesend). Wie später ausgeführt, gibt es eine Gleichsetzung zwischen niederfrequenten Feldern und solchen, die niederfrequent moduliert werden.

Elektrische Felder können statisch oder als Wechselfelder vorkommen. Das gleiche gilt auch für Magnetfelder. Bei Wechselfeldern verändert sich die Polung mit der Zeit. Aber es gibt auch den Fall, dass ein Wechselfeld oder ein eigentlich statisches Feld zeitliche Intensitätsschwankungen zeigt. Diese zeitlichen Änderungen können regelmäßig (periodisch) sein oder auch unregelmäßig.

*Technische Wechselfelder sind meist sinuskurvenförmig und regelmäßig, Sie können jedoch auch in der Amplitude (Intensität) mit einer anderen, niedrigeren Frequenz moduliert sein, die dann, wie sich vielfach deutlich herausgestellt hat, eine starke biologische Wirkung hat. Dies ist zum Beispiel der Fall bei den digitalen Mobilfunknetzen D1, D2, Viag Intercom und E-plus sowie bei Fernseh- und Rundfunksendern und beim Radar.*

Natürliche Wechselfelder (bei Gewitter, durchziehenden Wetterfronten, durch Sonneneinflüsse) sind in ihrer Intensität meist unregelmäßig oder impulsartig. Natürlichen Wechselfeldern ist oft gemein, dass man nicht eindeutig von einer bestimmten Frequenz ausgehen kann, sondern vielmehr von einem charakteristischen Spektrum (Frequenzgemisch). Allerdings gibt es auch künstliche Energiespektren.

Die Zuordnung eines Wechselfeldes zu elektrischen, magnetischen oder elektromagnetischen Wechselfeldern kann mitunter schwierig sein, da jede Verschiebung von Ladungsträgern zu einem elektrischen Strom führt, der immer von einem Magnetfeld begleitet ist.

Wechselfeldern einer bestimmten Frequenz ( Feldwechsel / sec) können wir eine bestimmte Wellenlänge zuordnen. Die Wellenlänge  $\lambda$  ist dabei die Ausbreitungsgeschwindigkeit in einem bestimmten Medium (z.B. Luft) geteilt durch die Frequenz. Bei Entfernungen weit unter der Wellenlänge zur Strahlungsquelle lassen sich elektrische und magnetische Komponente des elektromagnetischen Feldes voneinander unterscheiden. Man spricht in diesem Fall vom Nahfeld. Bei größerer Entfernung, also im Fernfeld, lässt sich diese Unterscheidung nicht mehr so einfach machen. Man spricht hier nur noch vom elektromagnetischen Feld. Das erklärt das Phänomen, warum frequenzabhängig auch die Einheiten wechseln, mit denen die Feldstärke gemessen wird.

Grundsätzlich kann bei den Wirkungen von elektromagnetischen Wechselfeldern auf einen Organismus zwischen thermischen und nicht-thermischen Wirkungen unterschieden werden. **Thermische Wirkungen:** die zugeführte Energie führt zu einer Erhöhung der Temperatur im Gewebe und löst so eine Wirkung aus.

Die Wirkung lässt sich dann sofort feststellen. Schon während des 2. Weltkrieges gab es Berichte über Verbrennungen bei Technikern durch starke Radaranlagen. Gefürchtet sind heute zum Beispiel Augenlinsenschäden, da Linsen schlecht durchblutete Organe sind, und die zugeführte Energie schlecht abführen können. Jedes Organ hat für einen bestimmten Frequenzbereich eine bestimmte spezifische

Absorptionsrate SAR, die in Watt/Kg gemessen wird.

**Nichtthermische Wirkungen:** hier lassen sich wegen der geringeren Energie bzw. schlechterer Übertragung auf den Organismus keine thermischen Wirkungen beobachten. Wirkungen treten meist mit einer Verzögerung auf. Zu den nichtthermischen Wirkungen gehören Änderungen der räumlichen Anordnung von Molekülen, des zellulären Stoffwechsels, Veränderungen der Zellkommunikation, Einflüsse auf Nervenbahnen, auf die DNA-Synthese und den Hormonhaushalt

## 1. Statische elektrische Felder (SEF)- gemessen in KV / m

Natürliche, hohe elektrostatische Felder finden sich zum Beispiel bei Gewittern. Niedrigere Werte finden sich in der Natur immer durch den Potenzialunterschied zwischen Erdboden und Ionosphäre, der bei etwa 300 KV liegt. Die gemessenen Werte am Erdboden schwanken täglich (um **40 %**) sowie im Laufe der Jahreszeiten, und werden durch Pflanzen und Gebäude teilweise abgeschirmt.

Elektrostatische Felder scheinen einen Einfluss auf das Zellwachstum zu haben, und es gab in der Vergangenheit Versuche auf diese Weise das Pflanzenwachstum in der Landwirtschaft zu beschleunigen. In der Literatur werden elektrische Felder für Ratten als Stressoren betrachtet (Harkness 1980).

### Table: typische Feldstärken statischer elektrischer Felder:

Elektr. Gleichfeld der Erde	130-270 V / m mit starken Schwankungen (Leitgeb N)
Gewitter	bis etwa 20 KV / m
Aufreißen eine Kunststoffpackung/ Aufstehen vom Kissen	10 KV / m bis mehrere 100 KV / m Leitgeb N)
Feldstärke im synaptischen Spalt	107 V / m

## **2. elektrische Wechselfelder (EWFF): KV/m**

Künstliche, also vom Menschen geschaffene elektrische Wechselfelder sind häufig von entsprechenden Magnetfeldern begleitet, denen eine größere Wirkung zugeschrieben wird. Wechselfelder im ELF-Bereich und mit einer Feldstärke von 2-40 KV/m führen nach einer 21-tägigen Exposition zu einer verminderten Serotonin-NAT-Aktivität der Zirbeldrüse und folgender Hemmung der pinealen Melatoninsynthese bei der Ratte (Wilson BW bioelectromagnetics 1981,1983). Die Hemmung wurde ab einer Mindestfeldstärke von 2 KV/m beobachtet (Ratte). Die Prolaktinsekretion wird auch beeinflusst (Leung 1988). 10 Hz Felder haben einen starken synchronisierenden Effekt auf unsere innere Uhr, und können in einem Bereich von +/- 1 Stunde den circadianen Rhythmus beeinflussen (RA Wever). Bei Isolationsversuchen stellte sich heraus, dass Versuchspersonen, die sich in (gegenüber EMF) abgeschirmten Räumen befanden, und die sich über die Uhrzeit nicht informieren konnten, eine längere endogene Periodendauer zeigten gegenüber Versuchspersonen, die in nicht abgeschirmten, aber sonst identischen Räumen isoliert waren (zumindest von 1964-1968). Wever folgerte daraus, dass nicht wahrnehmbare ENT die "autonomous period" verkürzen und interindividuelle Unterschiede zwischen Versuchspersonen vermindern (in "the circadian system of man" 1979). Interessant ist in diesem Zusammenhang der 10 Hz Peak (Alphawellen) im menschlichen EEG sowie die Anwesenheit eines natürlichen elektrischen Wechselfeldes mit einer ähnlichen Frequenz (und anderen Frequenzen im 10 KHz-Bereich bekannt als Schumannstrahlung). Dieses Feld ist allerdings ein EMF. (siehe weiter unten)

### Table: typische Feldstärken elektrischer Wechselfelder:

Im Haushalt:	20 – 40 V/m
Extremwerte	1 – 1000 V/m
Grenzwert DIN/VDE:	20 KV/m an Arbeitsstellen

Grenzwert DIN/VDE 7 KV/m übrige Bevölkerung

Grenzwert WHO/IRPA 5 KV/m

## **2. Magnetfelder (MF):**

Maßeinheit: A/m und Tesla ( früher Gauss G und Oerstedt Oe )

1 A / m entspricht 1,25 MikroTesla (in Luft) 1 Gauss = 100 MikroTesla

1 Tesla = 10.000 Gauss

Magnetfelder kommen als statische MF oder als Wechselfelder (MWF) vor, bzw. auch als Überlagerung beider Formen. Daneben lassen sich auch pulsierende Magnetfelder erzeugen. Das bekannteste Magnetfeld ist das **Erdmagnetfeld**, das ein statisches Magnetfeld ist und das einigen Tieren zur (zusätzlichen) Orientierung dient, und dem der Mensch seit seinem Erscheinen immer ausgesetzt war, und dem er sich anpassen konnte bzw. von dessen Präsenz physiologische Vorgänge abhängen. Die amerikanische Kompasspflanze (Silphium lacinatedum) soll ihr Wachstum nach den magnetischen Feldlinien des Erdmagnetfeldes ausrichten. Heute ist es unumstritten, dass Magnetfelder einen Einfluss auf die Epiphyse und die Melatoninfreisetzung haben. Plötzliche Magnetfeldwechsel auch geringer Intensität über mehrere Stunden andauernd, führen zu einer **Herabsetzung der Aktivität des synthetisierenden Enzyms NAT** (N-Acetyltransferase) und der Melatoninsekretion in der Nacht, sowie zu einem Anstieg des Serotonins (als Vorläufer des Melatonins und Substrat der NAT). Typischerweise stehen Melatonin und Serotonin im Pinealorgan in einem umgekehrten Mengenverhältnis zueinander. Die von außen einwirkenden Magnetfeldstärken können dabei im Bereich der Feldstärke des Erdmagnetfeldes von ca. 40-50 MikroTesla liegen und eine Wirkung erzielen. Reuss beschreibt 1985 ein "magnetic-window", das einzig eine Wirkung erzielen würde. Zu schwache, aber auch zu starke Felder (z.B. Kernspintomographie mit 1,5 Tesla) haben keine Wirkung. Olcese und Kollegen beobachteten 1985 dass die Hemmung der Melatoninsynthese durch MF nur bei Tieren mit einem intakten visuellen System zu beobachten ist. Bei erblindeten Ratten war es nicht mehr möglich S-NAT (Serotonin-NAT) Änderungen oder Melatoninveränderungen durch NW zu beobachten. Dies deutet auf die Bedeutung der Augen und insbesondere auf die Retina für einen Einfluss von MF auf das Melatoninsystem. Allerdings haben viele (nicht alle!) Blinde einen circadianen Melatoninrhythmus, von dem ja bekannt ist, dass er über die Netzhaut vom Tageslicht synchronisiert wird. Einzelne Neurone im visuellen System von Vögeln zeigen Reaktionen auf Magnetstimuli (Semm P, Demaine C 1986). 1986 wurde außerdem berichtet, dass NW nur dann pineale Enzyme der Melatoninsynthese hemmen können, wenn **schwaches rotes Licht** anwesend ist (Reuss S 1986 neurosci lett). In völliger Dunkelheit gelang es nicht die Melatoninsynthese durch eine Verlagerung der horizontalen Komponente des statischen Magnetfeldes zu beeinflussen. Die Autoren vermuten einen Einfluss von MF auf Photorezeptoren nach einem von MJM Leask 1977 vorgeschlagenen paramagnetischen Mechanismus [1] (nature Heft 267 1977). Brahim Selmaoui und Kollegen untersuchten im Jahre 1996 die Wirkungen von einem pulsierenden 50 Hz - Magnetfeld von 10 MikroTesla (zusätzlich zu 47 MikroTesla Erdmagnetfeld) auf 32 Probanden in der Nacht. Beim Menschen ließ sich auf diese Weise kein Effekt auf Melatonin im Serum oder auf die Ausscheidung von Melatoninmetaboliten nachweisen (1996 life sciences).

Höchstwahrscheinlich ist der die Melatoninsynthese begrenzende Einfluss u.a. in **induzierten elektrischen Strömen (eddy currents)** zu suchen. Es handelt sich dabei um Induktionsströme nach dem Faraday'schen Gesetz, deren Stromstärke von Entfernung, Feldstärke und Geschwindigkeit der Feldstärkeänderung abhängt.

Beim Menschen konnte eine Verminderung des 6-Hydroxymelatonins im Urin von Versuchspersonen beobachtet werden, die gegenüber Vergleichspersonen 10 Wochen lang auf Heizdecken schliefen, die ein stärkeres Feld aufwiesen als konventionelle Heizdecken (Wilson BW 1988). Bekannt ist auch, dass die **Bildung von cAMP** bei Ratten magnetfeldabhängig ist. Der cAMP-Spiegel spielt bei der Melatoninsynthese eine wichtige Rolle. Ob von außen einwirkende Magnetfelder nur auf die Pinealis oder zusätzlich über andere Organe, oder vielleicht sogar ausschließlich über andere Organe (z.B. die Netzhaut) einwirken, ist zur Zeit noch nicht geklärt. Beispielsweise wurden nächtliche Serotoninschwankungen bei Ratten im Bereich des Hirnstamms nach Magnetfeldstimulation gefunden. Möglicherweise beeinflussen die oben genannten Induktionsströme die sympathische Innervation des Pinealorgans, oder aber direkt den Pinealisstoffwechsel.

***Diese Versuche sind insofern sehr wichtig, als - wie später beschrieben - die niederfrequente Modulation der Handy - und auch der Felder der Basisstationen- der entscheidende Faktor bei den biologischen Reaktionen ist - und nicht der hochfrequente Anteil. Insofern sind diese Ergebnisse vergleichbar.***

Des Weiteren besteht die Möglichkeit, dass elektromagnetische Felder auch über die Augen einwirken können. Die als "**Magnetophosphene**" oder Phosphene bekannten visuellen Reize treten beim Menschen allerdings erst bei sehr großen Magnetfeldstärkeänderungen auf, und zwar ab etwa 2 T/s - 5 T/s. Eine andere Beobachtung ist auch interessant: Magnetfelder können auch die **synaptische Übertragung** beeinflussen; beispielsweise können elektromagnetische Felder zu einem "nach innen wandern" von -Rezeptoren der Zellmembran führen. Auch über eine Beeinflussung der DNA - Synthese durch Magnetfelder wurde berichtet.

**Starke Magnetfelder führen auch zu einer Beeinflussung des somatischen Nervensystems, sodass es zu unwillkürlichen Bewegungen im Feld kommt.**

Die NAT-Aktivität wird durch Magnetfelder wechselnder Intensität negativ beeinflusst (Welker 1983 exp brain res). Mit einer Wirkung ab 1 - 10 MikroTesla muss gerechnet werden (der übliche Wert in Wohnhäusern liegt bei etwa 0,2 MikroTesla, berufliche Exposition kann sehr viel höher sein).

Allerdings gibt es auf der Erde keinen Ort an dem wir nicht in irgendeiner Weise Magnetfeldern oder sog. Sferics ausgesetzt sind. Täglich finden weltweit zur gleichen Zeit etwa 6000 Gewitter statt, die seit Urzeiten zu unserer natürlichen Umwelt gehören (Leitgeb 1990: 1000-2000). Sie erzeugen, bedingt durch Resonanzen mit der Erde, die sog. **Schumannstrahlung** mit diversen Maxima im elektromagnetischen Spektrum bei wenigen Hertz (ca. 7 - 10 Hz bzw. 30.000 Km Wellenlänge), aber auch im 10 KHz-Bereich (30 Km Wellenlänge) im nanoTesla-Bereich. Einzelne Blitzeinschläge dauern etwa eine halbe Millisekunde und können noch als elektromagnetische Impulse in 1000 Km Entfernung gemessen werden. Es gibt Hinweise für eine physiologische Bedeutung dieser Wechselfelder. So zeigten zwei Studien aus Giessen, dass derartige Signale (hier 50 nTesla) unser EEG beeinflussen können (Schielen A 1996 int j psychophysiol, 1997 int j neurosci).

Wetterfähige Menschen zeigten in den Versuchen ein verändertes Reaktionsmuster (Veränderungen im Alpha- und Betabereich) im EEG. Magnetfeldfreie Räume sind dagegen als künstliche, vom Menschen geschaffene Räume anzusehen. In US-Raumkapseln, in denen ja das Magnetfeld der Erde wegen der Entfernung zur Erdoberfläche keinen Einfluss mehr hat, erzeugt die NASA ein künstliches Magnetfeld, um irdische Verhältnisse nachzuahmen. Das ubiquitär vorhandene Erdmagnetfeld unterliegt schwachen circadianen, circaannualen und anderen Schwankungen im Jahrhundertbereich (sogar Umkehrungen in der Vorzeit). Der Sonnenwind hat einen schwachen Einfluss auf das Erdmagnetfeld. Bei uns kommt es bis Mitternacht zu einer Abnahme des Feldes um etwa 30- 1 00 Nanotesla, was etwa maximal 2 % des Flusses ausmacht. Des Weiteren kommt es zu täglichen Verschiebungen der Deklination und auch der Inklination (Skiles DD 1985). Neben diese circadianen Schwankungen des Erdmagnetfeldes kommt es in unregelmäßigen Abständen zu größeren Schwankungen im MikroTeslabereich. (sog. Magnetstürme)

Seit 1997 vertritt RJ Reiter von der Universität San Antonio in Texas die Meinung, dass Magnetfelder die pineale Melatoninsekretion **nicht** negativ beeinflussen, sondern stattdessen die Aufnahmegeschwindigkeit von Melatonin in Körpergewebe erhöhen, und so zu einer Senkung des Plasmamelatonins führen. Dies würde sich dann auf die Elimination von Radikalen negativ auswirken. ( siehe auch Grota LJ, Reiter RJ 1994 bioelectromagn ) Takahashi zeigte in 1986 durchgeführten Experimenten, dass MF eine stimulierende Wirkung auf die **DNA-Synthese** beim chinesischen Hamster haben. Ein Effekt konnte nur bei Feldstärken im "magnetic window" - Bereich des Erdmagnetfeldes beobachtet werden (Takahashi K 1986 experientia ).

## **2.1 Statische Magnetfelder (SNW) scheinen keinen oder nur einen geringen Einfluss auf die Melatoninfreisetzung zu haben.**

Brandislav D Jankic, der 1990 Versuche mit kleinen unter die Kopfhaut implantierten Dauermagneten (600 Gauss) bei Ratten machte, konnte feststellen, dass die Magnete zu einer Thymusvergrößerung nach 24 oder 34 Tagen führten. Implantierte nichtmagnetische Metallkörper derselben Größe wie die Magnete zeigten diesen Effekt nicht. Dieselben Versuche zeigten bei den Ratten auch eine Zunahme der CD4+ Lymphozyten, und eine Abnahme der CD8+ Zellen, sowie einen Einfluss auf die Arthus-Reaktion. Jancic vermutet einen Einfluss auf die Zirbeldrüse hinter diesen beobachteten Wirkungen konstanter Magnetfelder, oder aber einen **Einfluss auf das Opioid-System** (Jancic BD 1991 int j neurosci). Ab 0,3 T zeigt sich eine Zunahme der T-Welle im EKG, bei 2 T etwa erreicht die T-Welle den 4-fachen Wert. Die T-Wellenerhöhung setzt sofort ein und verschwindet sofort nach dem Abschalten des Feldes. Starke Magnetfelder können eine Vagusreizung bewirken und es kann sich so eine Beeinflussung der Pulsfrequenz zeigen.



## 2.2. Magnetfelder mit zeitlich veränderlicher Intensität

### ( variable Felder / Magnetfeldgradienten )

Ab etwa 2 T/sec können magnetische Phosphene auftreten. Es handelt sich um eine Reizung des Nervus optikus und (oder) der Retina, und äußert sich als Lichtblitz bei der betroffenen Person in diesem starken Magnetfeldgradienten.

Tabelle: Typische Magnetfeldstärken in unserer Umwelt (Effektivwerte bei veränderlichen Felder):

Feld	Frequenz	Feldstärke
Magnetfeld peripherer Nerven		5 fT
Evoked cortical activity		50 fT
Menschliches herz (R.Zacke)		50 pT
Erdmagnetfeld (natürlich)	0 - statisch	30 – 70 MikroTesla
Erdmagnetfeld am Äquator	0 - statisch	etwa 30 MikroTesla
Erdmagnetfeld am Magnetpol	0 - statisch	etwa 60 MikroTesla
Magnetfeld Oberfläche der Sonne	statisch	10 MikroTesla
Feld eines Kernspintomographen	statisch + HF-	1,5 Tesla (1.500.000 MikroTesla -2 T)
Im Eisenbahnwagen bei 180 km/h	16,66 Hz Wechselfeld	5 MikroTesla
Im Eisenbahnwagen bei maximaler Beschleunigung	16,66 Hz Wechselfeld	22 MikroTesla
außerhalb des Zuges	16,66 Hz Wechselfeld	3 – 100 MikroTesla
an einigen Arbeitsplätzen (Bahn)	16,66 Hz Wechselfeld	Einige MilliTesla!
Wohnraum	50 Hz + Oberwellen	0,05 – 0,2 MikroTesla *

Magnetfeldexposition eines deutschen „Durchschnittsbürgers“	50 Hz + Oberwellen	0,1 MikroTesla (BfS 1999)
In der Nähe von Elektrogeräten	50 Hz + Oberwellen	0,5 – 30 MikroTesla
Unter Hochspannungsleitung (1 KA)	50 Hz + Oberwellen	8 – 16 MikroTesla
Unter Hochspannungsleitung, in 50 m	50 Hz	1 – 3 MikroTesla

\* Kaune WT 1987 bioelektromag: bis 3 MikroTesla

### **3, Elektromagnetische Felder (EMF)**

Elektromagnetische Felder werden nach ihrer Frequenz (oder Spektrum) unterschieden (bzw Wellenlänge).

ULF ultra low frequency	bis 3 Hz
ELF extremely low frequency*	3 Hz bis 3 KHz
VLF very low frequency	3 KHz bis 30 KHz
HF high frequency / Hochfrequenz** mit weiteren Unterteilungen wie Langwelle, Mittelwelle, UKW (VHF), UHF, SHF, Mikrowellenbereich usw.	ab 30 KH

\*\*Manche Quellen rechnen Frequenzen ab 100 KHz zur Hochfrequenz, andere sprechen schon ab 300 Hz von HF. \*ELF Bereich wird auch mit 10- 150 Hz angegeben. Sendeanlage 8.217

—

#### **3.1 Niederfrequente elektromagnetische Felder bis 30 KHz (meist 16,66 / 50 Hz)**

In diesem Bereich liegen Felder von Eisenbahn (16,66 Hz), Haushalt und Industrie (50 Hz) sowie manchen Spektren natürlicher elektromagnetischer Strahlung wie (Atmo)-sferics, Schumannstrahlung. Wechselfelder mit 50 Hz (USA/Japan 60 Hz) finden sich z.B. unter Hochspannungsleitungen, in der Nähe stromführender Kabel, in der Nähe von Transformatoren, in der Nähe elektrischer Geräte wie Rasierer und über eingeschalteten Heizdecken.

Wahrscheinlich ist im Nahfeld die magnetische Komponente von niederfrequenten elektromagnetischen Feldern von größerer Bedeutung als die elektrische Komponente.

#### **3.2 Hochfrequente elektromagnetische Felder (HF): ab etwa 30 KHz**

Es gibt in der Literatur unterschiedliche Angaben zur unteren Grenzfrequenz des Hochfrequenzbereichs.

Bei HF-Feldern muss zwischen Daueraussendungen ( continuous wave CW oder z.B. FM moduliert ) und gepulster bzw. amplitudenmodulierter Abstrahlung (AM) unterschieden werden. Das alte C-Netz der Telekom arbeitet z.B. FM-moduliert, während die neueren D- und E-Netze HF-Impulse benutzen mit einer Pulsfrequenz von 217 Hz (Basistationen 217 Hz bis ca. 1800 Hz). Dabei steht die kurze Aussendezeit im Verhältnis 1: 8 oder 1: 16 zur längeren Empfangspause (Abb.2).

Des weiteren ist die jeweilige Frequenz, oder das Spektrum zu beachten sowie die abgestrahlte Leistung, Polarisation und ihre Verteilung im Raum.

Hochfrequente Felder erzeugen im Gewebe Wirbelströme, die zur Erwärmung führen. HF-Felder könnten nach mehreren Studien zu einer höheren Krebsinzidenz bei Exponierten führen.

In der Umgebung des Kurzwellensenders Schwarzenburg bei Bern konnte in einer Studie (größtenteils an Beschäftigten des Senders) in den Jahren 1992 und 1993 Auswirkungen auf den Schlaf und das Wohlbefinden beobachtet werden, obwohl sämtliche Grenzwerte eingehalten wurden. Die Effekte ließen mit wachsender Entfernung nach und zeigten sich deutlicher bei älteren Menschen.

Bei sehr hohen Frequenzen im GHz-Bereich kann es bei hohen Leistungen zu Linsentrübungen als einem thermischen Effekt kommen. Die schlecht durchblutete Linse kann zugeführte Energie schlecht abführen. Die Kataraktbildung soll dabei ab 43 Grad stattfinden.

Tabelle: Möglicherweise beeinflusste andere Systeme durch MF / EMF

-circadiane Rhythmen und Schlaf (beim Mensch: Wever 1968 Andechs Bunker)
-Immunsystem
-Hormonhaushalt: Melatonin, Prolactin
-Veränderte Neurotransmittersynthese und Freisetzung
-Melatoninhaushalt und mögliche Folgen (Schlaf, Immunsystem...)
-ZNS (evozierte Potenziale vermindert Graham C 1984) EEG Veränderung (Schienle)
-Affekt: Depressionen häufiger in Wohnungen mit hohen Magnetfeldern (Perry F. Pearl L 1988 publik health)
-Suizide häufiger in der Nähe von hohen elektr. Feldern (Ehret 1980)
-Orientierungssinn bei Vögeln

**Symptome, die mit Elektromagnetische Felder in Zusammenhang gebracht werden:**

- strain injury bei Bildschirmarbeit
- Allergien (durch beschleunigte und geladene Allergene im elektrischen Feld)
  - Kopfschmerzen
- anhaltende Müdigkeit und Unwohlsein
- erhöhte Exitabilität ("Nervosität") und Hyperaktivität (Sheppard AR 1977)
- verminderte Lichtempfindlichkeit (Krause KG 1985 Buch: The pineal gland S.209ff )
  - Miniwinterschlaf bei Nagetieren in hohen elektr. Feldern (Ehret 1980)

**Neue Elektromogverordnung vom 16. 12. 96 (D)**

Frequenz	Elektrisches Feld	Magnetische Flussdichte
Unter 16,66 Hz		
16,66 Hz	10 KV /m	300 Mikrottesla
50 Hz (Haushalt/Industrie)	5 KV /m	100 Mikrottesla
10 – 400 MHz	27,5 V/ m	73 mA/m – x Wurzel aus Freq.
400 – 2000 MHz	1,375 V/m –x Wurzel aus Frequenz	3,7 mA/m – x Wurzel aus Frequenz.
2-200 GHz	61 V/m	160 mA/m

Abkürzungen

EF Elektrisches (statisch oder als Wechselfeld)  
 MF Magnetfeld  
 EMF Elektromagnetisches Feld

### **Athermische Wirkungen der elektromagnetischen Felder**

Mit den epidemiologischen Studien von Wertheimer und Leeper [1979, 1982] traten mögliche Beeinflussungen (leichte Erhöhung der Leukämierate bei Kindern, Hirntumore etc.) durch technisch erzeugte niederfrequente (50/60 Hz u.a.) elektrische und magnetische Felder in das Blickfeld der Wissenschaft.

Diese durch Hochspannungsleitungen und elektrische Geräte hervorgerufenen Felder erreichen den Menschen nur mit geringen Intensitäten. Das bedeutet: aufgrund der geringen Energie können die Felder nicht dadurch wirken, dass sie biologisches Gewebe erwärmen (thermische Reaktion), sondern es wurde vermutet, dass so genannte athermische Wirkungen elektromagnetischer Felder existieren müssten, d. h. eine Reaktion ohne physiologisch relevante Wärmeentwicklung. Diese athermischen Wirkungen stießen jedoch aus physikalischen Gründen (z. B. Thermodynamik, Elektrodynamik, physikalische Chemie) auf Erklärungsschwierigkeiten.. Diese Schwierigkeiten sind heute durch Berechnungen unter Zuhilfenahme der Quantentheorie weitgehend behoben. Es existieren jedoch noch keine befriedigenden biophysikalischen Modelle für athermische Wirkungen, obwohl diese in der Wissenschaft als nachgewiesen gelten. Mit der verstärkten Entwicklung und Verwendung der Mikrowelle etc., erstreckte sich die Vermutung der Gesundheitsbeeinträchtigung durch elektromagnetische Felder nahezu folgerichtig auf die hochfrequenten Felder. Wissenschaftliche Untersuchungen zur thermischen Wirkung von Radiosendern und der zur Erwärmung von Speisen konstruierten Mikrowellengeräte führten relativ bald zur Entwicklung von Sicherheitsvorschriften bei der Nutzung dieser Felder.

Der Aufbau der digitalen Mobilfunktelefonnetze ist direkt abhängig von der flächendeckenden Einrichtungen von mehreren tausend Basisstationen, die eine Leistung im Bereich von 50 bis 200 Watt aufweisen ( in bestimmten Situationen können 560 Watt gebündelt auftreten; die äquivalente Strahlung liegt weit höher).

Die Abstände, die über die entsprechenden Normen bisher zu Wohn-, Büro- und Krankenhäusern und sonstigen öffentlich zugänglich Arealen vorgeschrieben und wohl auch eingehalten wurden, verhindern sicherlich technische Wirkungen vollständig. **Der athermische Bereich ist hiervon jedoch nicht berührt.**

Im Labor wurden athermisch bedingte biologische Effekte schwacher elektromagnetischer Felder auf biologische Systeme bereits seit einiger Zeit untersucht und nachgewiesen. Für das biologische Experimentieren im hochfrequenten elektromagnetischen Feld ist ein intensives Kooperieren verschiedener Disziplinen notwendig. Erst im Laufe der Zeit wurde dies von medizinischen und biologischen Experimentatoren erkannt. Nur die sehr enge interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Biologen und Medizinern einerseits und Hochfrequenztechnikern und Physikern andererseits kann zu technisch einwandfreien und artefaktbefreiten Ergebnissen führen.

Die Tatsache, dass die feldbedingten Effekte von einer Reihe biologischer und physikalischer Faktoren abhängen, erfordert eine besonders sorgfältige experimentelle Konzeption, Durchführung und Auswertung der Experimente. Es hat sich gezeigt, dass z.B. genaueste Charakterisierung der Frequenzen oder der Intensitäten der verwendeten Felder sowie des gesamten elektronischem Expositionsequipments einerseits und dem biologischen Status der untersuchten Organismen andererseits von ganz entscheidender Bedeutung für die Reproduzierbarkeit und Verlässlichkeit der Ergebnisse ist. Hinzu kommt, dass offensichtlich die Hintergrundaktivität des Erdmagnetfeldes bzw. die Auswirkung der untersuchten biologischen Systeme relativ zum Erdmagnetfeld von Bedeutung ist. Gleiches könnte für das elektromagnetische "Hintergrundrauschen im Experimentierfeld gelten. Werden diese technischen Bedingungen nicht ausreichend dokumentiert oder werden elektromagnetische Parameter nicht beachtet, gemessen und beschrieben, sei es in der Versuchsbeschreibung von Originaldaten in Publikationen und oder bei der Reproduktion von publizierten Daten, vermindert sich die Chance auf ein erfolgreiches Experiment.

Inzwischen sind die biologischen Reaktionsschwellen für den athermischen Bereich bekannt und so kann die Frage nach eventuellen pathologischen Reaktionen des Menschen im sehr schwachen elektromagnetischen Feld auch außerhalb der Sicherheitszone der Basisstationen beantwortet werden.

Ich möchte dies an einem Beispiel aus unserem Laboralltag beschreiben. Seit mehreren Jahren beschäftigen wir uns mit der Reaktion einzelner Nervenzellen von Vögeln und Insekten auf schwache hochfrequente elektromagnetische Felder. Es werden dabei mit 217 Hz gepulste Felder appliziert, wie sie für Handies typisch sind. Wir sehen deutliche feldbedingte Änderungen in der Sprache der Nervenzellen, der elektrischen Aktivität (Aktionspotenziale) bei beiden Tierarten und zwar ausschließlich auf die gepulsten Signale.

**Die neuronalen Reaktionen setzten erst nach einigen Minuten ein und konnten die eigentliche Feldexposition um ca. 30 min überschreiten.**

**Die Schwelle für die neuronalen Reaktionen lag bei 0.00004 mW/cm<sup>2</sup>. Dies sind annähernd die Werte, wie sie auch in Wohnbereichen außerhalb der Sicherheitszone von Sendeanlagen zu messen sind. Es ist zu erwarten, dass Nervenzellen eine noch größere Empfindlichkeit besitzen. Dies kann jedoch nur in abgeschirmten Experimentierräumen gemessen werden. Unsere Messungen wurden in der Nähe des großen Frankfurter Sendeturms ausgeführt d.h. das Hintergrundrauschen war erheblich und dazu zeitlich variabel.**

Es ist demnach sehr wahrscheinlich, dass gerade bei einer bestimmten Sensibilität im Zentralnervensystem des Menschen z.B. Epilepsie, Schlafstörungen, vegetative Dystonie) oder bei anderen zentralnervösen Alterationen - wie beim Tinnitus die dauernde Befeldung zum Krankheitsbild selbst oder zu einer Verschlimmerung, eines bestehenden Leidens führt.

Belegt wird dies dadurch, dass Patienten, die sich zeitweise in eine strahlungsärmere Zone Besserung ihrer Beschwerden erfahren. Bei einer Rückführung in die alte Umgebung setzen diese wieder ein. Wahrscheinlich sind auch Synergieeffekte mit (UV-Licht, Smog, Stresssituationen, Belastungen durch das Stromnetz, Rundfunk, Fernsehen etc).

Letztendlich möchte der Biologe noch darauf hinweisen, dass natürlich nicht nur Menschen, sondern auch Haustiere und andere Mitgeschöpfe von der beschriebenen Strahlenbelastung betroffen sein müssen.

#### Verzeichnis der Wichtigsten Fachausdrücke

Ableitung:	Messung bioelektrischer Größen, z.B. Membranpotenziale, Muskelpotenziale.
Aktionspotenzial:	Potenzialänderung von Nerven oder Muskeln. Aktionspotenziale sind die Informationseinheiten des Nervensystems.
AM:	amplitudenmoduliert (Amplitudemaximale Auslenkung einer Schwingung moduliert verändert).
Antikörper:	Körpereigenes Molekül, das an eine Substanz spezifisch bindet; Antikörper entstehen durch eine Immunreaktion eines Tieres und können aus dessen Blutplasma isoliert werden. Sie werden technisch vermindert, um spezielle Proteine nachzuweisen. Im Immunsystem selbst haben sie die Funktion, den eingedrungenen Fremdstoff (das Antigen) zu markieren und ihn so für die anderen Bestandteile des Immunsystems erkennbar zu machen.
Befeldung:	Bestrahlung eines bestimmten Objekts mit definierten (z.B. elektromagnetischen) Feldern.
biogene Amine:	eine Gruppe von Neurotransmittern, die als chemisches, gemeinsames Merkmal eine Aminogruppe besitzen (NH <sup>2</sup> ). Zu den biogenen Aminen gehören Noradrenalin, Adrenalin und Dopamin (die auch als Katecholamine bezeichnet werden), sowie Serotonin und Histamin
circadian:	Ungefähr 24 Stunden, endogene Rhythmen, die ungefähr mit dem Tagesablauf schwanken, wie z. B. die Körpertemperatur, bezeichnet man daher als circadianen Rhythmus. Diese Rhythmen werden vom Organismus selbst erzeugt und mit Hilfe eines äußeren Zeitgebers - wie z. B. der Photoperiode - ständig abgeglichen. Es wird angenommen, dass eine Störung der endogenen Rhythmik gesundheitliche Schäden verursacht.
elektrische Spontanaktivität:	Es gibt Nervenzellen, die in bestimmten Abständen eigenständig Aktionspotenziale erzeugen. Kennzeichen ihrer Ruheaktivität sind daher rhythmische Entladungen (syn. spontane elektrische



	Entladungsfrequenz), die durch die Einwirkung eines Reizes in der Frequenz angehoben oder gesenkt werden können.
Enzym:	Eiweißkörper (syn. Protein), der in der Lage ist, bestimmte Stoffwechselfunktionen auszulösen. Enzyme sind als Biokatalysatoren die "Werkzeuge des Stoffwechsels und reagieren mit bestimmten Stoffen (Substraten), ohne selbst umgewandelt zu werden.
exzitatorisch:	Erregend (Gegenteil: hemmend, inhibitorisch).
Ganglion:	Ansammlung von Nervenzellkörpern.
gepulst:	Ein-, Ausschaltvorgang mit einer Pause (syn. getaktet).
Hormon:	chemischer Botenstoff, der von endokrinen Drüsen ausgeschüttet, über den Blutkreislauf im Körper verteilt werden und an den entsprechenden Zielorten bestimmte Wirkungen auslöst.
Ionen:	Elektrisch geladene Teilchen.
Ionenkanäle:	Membranproteine, die durch ihre Form Kanäle bilden, durch die Ionen hindurchtreten können.
Inhibition:	Hemmung; man spricht zum Beispiel von Inhibition, wenn der von dem vorgeschalteten Neuron ausgeschütteten Neurotransmitter durch die Bindung an die Rezeptoren des nachgeschalteten Neurons dessen Feuerfrequenz senkt. (Gegenteil: Exzitation, Erregung, exzitatorisch).
Kohlendioxyd:	Kohlenstoffmolekül, an das zwei Moleküle Sauerstoff gebunden sind; Kohlendioxyd entsteht - zusammen mit Wasser - beim oxidativen Abbau von organischer Substanz, also zum Beispiel beim Glucoseabbau. Das im Gewebe anfallende Kohlendioxyd wird durch das Blut zur Lunge transportiert und von dort ausgeatmet. Im Gehirn entsteht durch die Aktivität der Neurone ständig Kohlendioxyd, dass durch die Bluthirnschranke ausgeschleust und zur Lunge transportiert werden muss. Dies geschieht im Austausch gegen Sauerstoff, den die Zellen zur Oxidation der Glucose benötigen.
Konzentrationsgradient:	ein Unterschied (Gefälle) der Konzentrationen von bestimmten Stoffen (Molekülen, Atomen, Ionen etc.)
Latenz:	Verzögerung im Bezug auf ein Ereignis oder einen Reiz.
magnetische Intensitätsreize:	künstliche Veränderung der magnetischen Intensität z.B. des Erdmagnetfelds (ohne Änderung der magnetischen Richtung).
Melatoninproduktion:	Herstellung (Synthese) des Aminosäurederivats Melatonin, die vorwiegend in der Epiphyse stattfindet. Melatonin ist ein Hormon, das in einen circadianen Syntheserhythmus gebildet und ins Blut abgegeben (sezerniert) wird.
neuromodulierend:	Als neuromodulierend werden Substanzen bezeichnet, die zwar nicht wie ein Neurotransmitter Nervenzellen zur Ausbildung von

	Aktionspotenzialen veranlassen können, aber dennoch den Aktivierungszustand von Neuronen beeinflussen. Sie modulieren daher die Wirkung der Neurotransmitter.
Neurone:	Nervenzellen.
Neurotransmitter:	chemischer Überträgerstoff, der die elektrische Erregung zwischen Nervenzellen vermittelt. Transmitter werden von spezialisierten Endstrukturen der Nervenzellen (Synapsen) auf einen elektrischen Impuls hin ausgeschüttet und von der nachgeschalteten Zelle aufgenommen. Dort bewirkt der Neurotransmitter wieder eine Veränderung der elektrischen Aktivität.
Noradrenalin:	Neurotransmitter gehören zusammen mit Dopamin und Adrenalin zu den Katecholaminen. Ähnlich wie dopaminerge Verknüpfungen verteilen sich auch noradrenerge Projektionen über das gesamte Gehirn. Noradrenalin wird daher eine allgemein erregende Wirkung zugeschrieben.
Nuclear-Magnetic-Resonance-Tomograph:	Kernspin-Tomograph; diagnostisches Gerät in der Medizin; Bei diesem Verfahren werden starke Magnetfelder verwendet.
Photoperiode:	die Zeit des Hell- und Dunkelseins innerhalb von 24 Stunden; in mittleren Breiten verschieben sich die Hell- und Dunkelanteile der täglichen Photoperiode über das Jahr, d. h. im Sommer ist die Hellphase länger, während im Winter die Dunkelphase länger ist.
Photorezeptoren:	Zellen der Netzhaut, die Lichtreize in elektrische Impulse des Nervensystems umwandeln. Als Photorezeptoren bezeichnet man alle Zellen, die spezielle Strukturen besitzen, um Licht wahrnehmen zu können.
Pinealozyten:	Zellen des Pinealorgans; das Pinealorgan (synonym: Epiphyse, Zirbeldrüse) ist ein Teil des Zwischenhirns.
Reversion des horizontalen Magnetfeldvektors:	Drehung der horizontalen Komponente eines Magnetfeldes um 180°. Dabei kehrt sich die Nord-Süd-Richtung um.
sympathisch:	Das sympathische System ist Teil des autonomen Nervensystems, durch das der Zustand der inneren Organe (Drüsen, Verdauung, Exkretion, Herzschlag etc.) kontrolliert wird. Es wirkt als Gegenspieler zum parasympathischen Nervensystem. Der sympathische Anteil des autonomen Nervensystems bewirkt allgemein erregend, wird also zum Beispiel infolge von Stress aktiviert.
Synapse:	spezialisierte Endstruktur von Nervenzellen, an der Transmitter ausgeschüttet werden. Mit Hilfe der Synapsen kommunizieren die Zellen des Nervensystems miteinander. Der Begriff Synapse bezeichnet vorwiegend die funktionelle Verknüpfung zweier Nervenzellen (Signalweiterleitung). Dabei wird die Seite der Synapse, an der das Aktionspotenzial eintrifft als praesynaptisch, die gegenüberliegende Seite als postsynaptisch bezeichnet.
Synchronizität:	zeitgleicher Ablauf (stabile Phasenbeziehung)
Thorax:	Brustraum

Zeitgeber	Externer Referenzpunkt mit dessen Hilfe ein Organismus seine endogenen Rhythmen abgleicht; z. B. können circadiane Rhythmen mit Hilfe des Sonnenlichts jeweils nachgestellt werden.
ZNS:	Zentrales Nervensystem

Als Beispiel einer fachgerechten Bevormundung der elektromagnetischen Situation möchte ich eine Stellungnahme des BUND anfügen.

## **BUND-Untersuchung fordert Schutz vor Elektrosmog**

Bonn, 9. Februar 1999 Der Arbeitskreis Immissionsschutz des Bundes Umwelt- und Naturschutz Deutschland (BUND) hat eine Literaturstudie zu *Forschungsarbeiten über Elektrosmog* erstellt. Danach ist es erwiesen, dass künstliche elektromagnetische Felder die menschliche Gesundheit beeinflussen. Der BUND leitet daraus Forderungen zum Schutz vor Gesundheitsschäden ab.

Der Studie zufolge sind bisher hauptsächlich die Wärmewirkungen der elektromagnetischen Felder auf den Menschen untersucht worden. Wichtiger erscheinen dem Umweltverband jedoch die nichtthermischen Wirkungen, die allgemein als Elektrosmog bezeichnet werden. Nachgewiesene Wirkungen des Elektrosmogs sind: 1. Die Bildung des Zirbeldrüsen-Hormons Melatonin wird beeinflusst. Melatonin regelt unter anderem die "innere biologische Uhr" von Wirbeltieren, also auch des Menschen. Die Studie nennt Melatonin-Wirkungen auf die Immunabwehr und die Sexualität.

2. Elektrosmog verändert die Aktivität der Nervenzellen.

3. Die Calcium-Zellregulierung im Körper wird verändert.

4. Eine bereits vorhandene Krebserkrankung wird verstärkt.

5. Die Blut-Gehirn-Schranke, über die der Stoffaustausch zwischen dem Blut und dem Zentralorgan des Nervensystems geregelt wird, wird beeinflusst.

Die Formulierungen weisen darauf hin, dass die Wirkungen des Elektrosmogs noch weiterer Erforschung bedürfen. In dieser Situation wäre normalerweise besondere Vorsicht angezeigt, bis Genaueres bekannt ist. Wie der BUND kritisiert, nehmen staatliche Stellen die Situation jedoch zum Anlass großer Sorglosigkeit. Geltende Grenzwerte bieten weder Schutz, noch sind sie Ausdruck vorsorglichen Handelns.

Als typisches Negativ-Beispiel dient dem BUND die Haltung des Bundesamtes für Strahlenschutz. Eine wissenschaftliche Arbeit stellte z.B. fest, dass Elektrosmog bei Mäusen zu einer bestimmten Krebsart führt, die beim Menschen nicht vorkommt. Das Amt verbreitete daraufhin, Menschen seien nicht gefährdet. Das war jedoch eine wissenschaftlich unzulässige Interpretation. Ziel der Arbeit war gewesen, herauszufinden, ob überhaupt bei elektromagnetischer Strahlung Krebs auftritt. Und genau dies hatte sich bestätigt.

Aufgrund der vorhandenen Erkenntnisse stellt der Umweltverband 14 konkrete Forderungen an Politik und Wirtschaft zum Schutz vor Elektrosmog auf. Die wichtigsten Forderungen: Stopp für neue Sendeanlagen und Wohnbauten unter Hochspannungsleitungen, bis genauere Kenntnisse vorliegen; generelles Minimierungs- und Optimierungsgebot für alle Geräte, die Elektrosmog verursachen; wer elektromagnetische Felder erzeugt, muss Beschäftigte und Verbraucher über Details der Belastung informieren; Anlagen und Einrichtungen, die Elektrosmog verursachen, müssen ein Genehmigungsverfahren durchlaufen, bei dem die Öffentlichkeit mitredet. Um der wissenschaftlichen Erkenntnis voranzuhelfen, fordert der BUND schließlich die Einrichtung eines unabhängigen und interdisziplinären Forschungsrates zur Untersuchung von Elektrosmog.

Weitere Informationen: Die BUND-Broschüre "Elektromagnetische Felder", Umfang 35 Seiten, kostet 5 DM. Bestelladresse: BUND-Laden, Im Rheingarten 7, D-53225 Bonn, T 0228-4642 71, Fax 364418.

### **Anlage:**

**Ergebnisse einiger Studien zum Thema:** (Einzelheiten wie Polarisation, Kurvenform, Tiergeschlecht, Beleuchtung etc nichtberücksichtigt)

Autor(en)	Jahr	Lebewesen	Feld	Frequenz	Dauer	Wirkung
Wilson BW, Matt KS	1999	Hamster	50/100 MikroTesla MWF	60 Hz	akut 16 bis 42 Tage	Melatonin erniedrigt bei einmaliger oder längendauernder Exposition
Selmaoui B, Touitou Y	1999	junge und alte Wistar-Ratten	100 MikroTesla MWF	50 Hz	1 Woche	Melatonin erniedrigt NAT erniedrigt. (nur junge Tiere)
Akerstedt T	1999	18 gesunde Menschen	1 MikroTesla	50 Hz	-	keine Wirkung auf Melatoninwerte aber Schlaf beeinträchtigt
Löscher, Mevisen, Lerchl	1998	Ratte(Sparague- Dawley) weiblich	10 MikroTesla MWF	50 Hz	13 Wochen	keine Wirkung auf Melatoninwerte

Author	Year	Species	Field Strength	Frequency	Duration	Notes
Wood, Amstrong...	1998	Männer	20 MikroTesla MWF	50 Hz		Belastung vor dem Melatonin-peak(abends) Melatonin steigt verzögert (+30 Min) an und ist leicht erniedrigt. Nur 20% der Männer sprechen auf das Feld an (responder).
Lerch I A, Zachmann A, AliMA, Reiter RJ	1998	Forelle (Fische)	40 MikroTesla maximal	1 Hz	3 Wochen	erhöhte Melatoninkonzentration sowohl in der Zirbel als auch im Serum
Karasek M	1998	Männer mit Rückenschmerzen	2,9 MikroTesla MWF	40 Hz	3 Wochen	Alle Männer hatten erniedrigtes nächtliches Melatonin
Junttilainen	1997	Menschen (Arbeiter einer Kleiderfabrik in Finnland)	1 MikroTesla	(50 Hz)	berufliche Exposition	Melatonin bei stärkerer Belastung und nachts erniedrigt
Rapoport SI	1997	Menschen mit KHK in Klinik	Störung des Erdmagnetfeldes			Korrelation zwischen Störung des MF der Erde und Melatoninsekretion
Mevisen M, Lerch I, Löscher	1996	Ratte (Sprague-Dawley) weiblich	10 MikroTesla MWF	50 Hz	91 Tage	Melatonin nächtlich durch das MFW erniedrigt
Reif, Burch	1996	Arbeiter der Energieversorgung			berufliche Exposition	höher belastete hatten nach 2 und 3 Tagen niedrige Melatoninwerte
Yellon SM	1996	Hamster	1 Gauss	60 Hz	15 Min	Melatoninsekretion wird beeinflusst
Selmaoui Lambrozo, Touitou	1996	Junge Männer	10 MikroTesla MWF	50 Hz	9 Stunden	keine Wirkung auf Melatoninwerte
				60 Hz		
Rogers, Reifer	1995	Primaten	MWF 50-100 MikroTesla und EWF 6-30 KV/m	(langsames Ein- und Ausschalten der Felder)	6 Wochen	keine Wirkung auf Melatoninwerte
Selmaoui, Touitou	1995	Wistar Ratten (männlich)	MWF 1-100 MikroTesla	50 Hz	12Stunden und 30Tage	Melatonin wurde im 12 Std. Versuch nur ab 100 MikroTesla erniedrigt, nach 30 Tagen schon ab 1 MikroTesla. NAT beeinflusst.
Löscher, Mevisen	1994	Ratte (Sprag-Dawl)	MWF 0.3 bis 1 MikroTesla	50 HZ	91 Tage	Melatonin signifikant
Kato M	1994	(Albino)	MWF 1MikroTesla	50 HZ	6 Wochen	Melatoninwerte in Zirbeldrüse oder Plasma erniedrigt
Yellon SM	1994	Hamster	1 Gauss MWF	60 Hz	15 min	Melatoninwerte erniedrigt auch bei Wiederholung 6Monate später
Schneider, Thalau, Semm	1994	Zugvogel	- 46 MikroTesla SMF	SMF	30 Min	Melatonin erniedrigt
Kato M	1993	Wistar King Ratte	1-250MikroTesla MWT	50 HZ	6 Wochen	nächtliches Melatonin signifikant erniedrigt bei Flussdichten über

						1 MikroTesla
Yaga K, Reiter Rj	1993	Ratte	MF	?	?	pineales NAT und Melatonin erniedrigt in Abhängigkeit von der Beleuchtung
Richardson BA	1992	Ratte	0,4 Gauss	Pulsierendes Magnetfeld	1 Std / 2 Std	NAT und Melatonin erniedrigt
Yellon	1991	Hamster	100 MikroTesla MWF	60 Hz	2 Stunden	Melatonin erniedrigt
Randall W	1990	Inuit Eskimos (USA)	- feldänderung		11 Jahres Zyklus	Melatoninwerte und Geburtenrate beeinflusst durch Sonnenaktivität auf das MF der Erde
Rondolph	1988	Wistar Ratten	0,15 G SMF, Invertierung des Erdmagnet- feldes	-	1 Stunde	pineales cAMP erniedrigt
Cremer- Bartels G	1984	?	Beeinflussung des Erdmagnet- feldes	-		HIOMT und NAT beeinflusst
Demaine C, Semm P	1986	Taube	Beeinflussung des Erdmagnet- feldes	SMF	1 Std	Beeinflussung der Melatonineinwirkung auf Purkinjenzellen
Reuss, Semm, Vollrath	1983	Ratte	SMF- Änderungen (Invertierung des Erdmagnet- feldes)	-	< 1Minute	Veränderung der elektrischen Aktivität der Pinealozyten
Welker, Semm, Willig, Commentz..	1983	Ratte	SMF (Invertierung des Erdmagnet- feldes)	-	15Min bis 15Stunden	NAT und Melatonin erniedrigt
Semm, Schneider, Vollrath	1980	Meerschweinchen	SMF 0,5 Oe  Stimuli		25 Min.	Veränderung der elektrischen Aktivität  der Pinealozyten (Abnahme)
Wilson	1980	Ratte	EF	-	1 Monat	Melatonin erniedrigt
Wever	1968	Mensch	25 mV/cm	10 Hz	1 Woche	Beeinflussung des circadianen  Systems

MWF = magnetisches Wechselfeld

SMF = statisches Magnetfeld

EF = elektr. Wechselfeld

SEP = statisches elektrisches Feld oder langsames ein- und ausgeschaltet, um schnelle Feldänderungen zu vermeiden

**[1]** Anmerkung von Dr.Schreiber:

Verschiedene Stoffe sind verschieden magnetisch.

1. Diamagnetische Stoffe sind z.B. Quecksilber neben Silber und Wasserstoff



sie geben Magnetismus ab.

2. paramagnetische Stoffe sind: Palladium, Aluminium, Chrom, Magnesium, Kalium, Sauerstoff

sie nehmen Magnetismus auf.

Silber und Quecksilber wirken daher zusätzlich schwächend auf das schon seit den letzten 500 Jahren um 50% abgesunkene Magnetfeld der Erde.

Auch zivilisatorische Maßnahmen sorgen dafür, dass es absolute Nullpunktstellen gibt, wie durch Betonbauten; Straßenasphaltierungen oder das Absinken des Grundwasserspiegels.