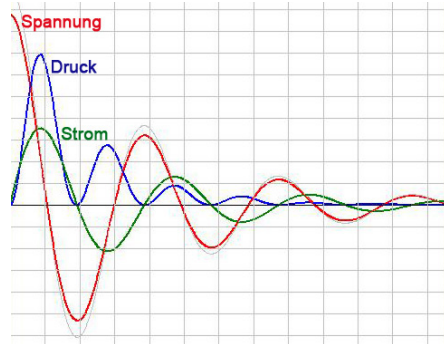
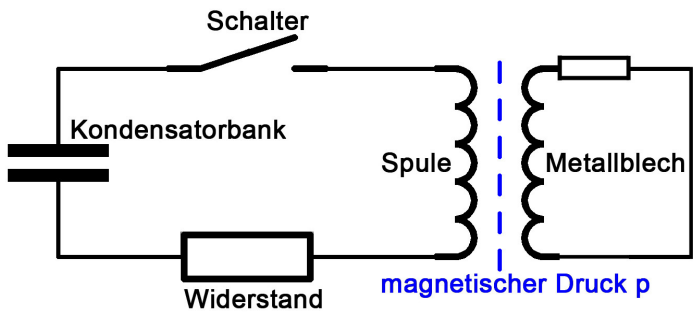


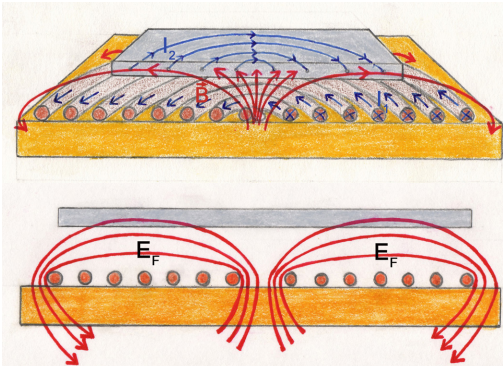
Was sind die physikalischen Grundlagen des Verfahrens?

Entlädt sich eine große Kondensatorbank über eine Spule, so wird die in den Kondensatoren gespeicherte Energie in die Spule übertragen. Es bildet sich ein Schwingkreis, dessen Stromverlauf in der Umgebung der Spule ein zeitlich veränderliches Magnetfeld erzeugt.



Wird nun auf eine Flachspule (schneckenartig gewickelte Spule in Form einer archimedischen Spirale) ein elektrisch gut leitfähiges Metallblech (z.B. Aluminium oder Kupfer) platziert, so werden in dem Werkstück Wirbelströme induziert, die dem Spulenstrom entgegengerichtet sind.

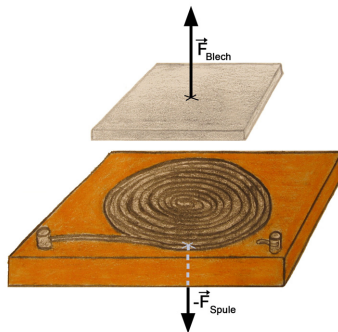
Wegen des sog. „Skinneffekts“ reduziert sich die Eindringtiefe des elektromagnetischen Wechselfeldes je nach Frequenz f_0 jedoch auf die Werkstückwand des zu bearbeitenden Metallblechs.



Dieser Effekt hat zur Folge, dass das Magnetfeld auf den Volumenraum V zwischen Spule und Blech beschränkt wird und einen sog. *magnetischen Druck* zwischen Werkstückwand und Spule hervorruft. Da der wirksame Druck der *magnetischen Energiedichte* im Volumenraum V entspricht, gilt:

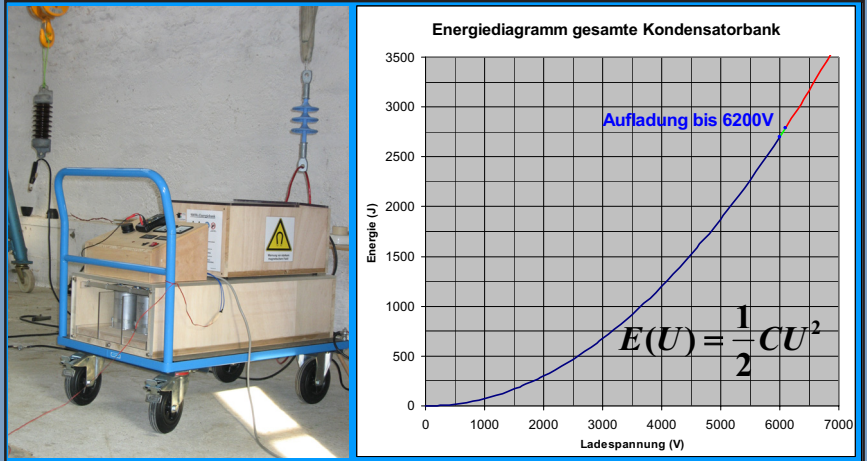
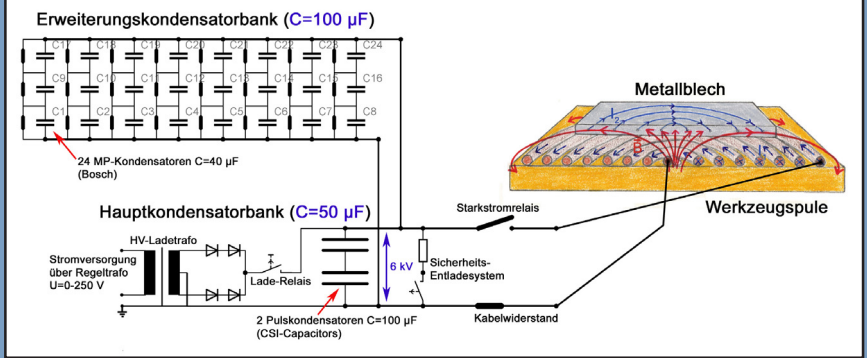
$$p = \frac{B^2}{2\mu_0} = \frac{E_C}{V}$$

Dieser wirksame Druck p entspricht in Abhängigkeit von der Blechfläche A einer Kraft ($F=pA$), die auf das Blech wirkt. Nach dem 3. Newtonschen Gesetz wirkt diese Kraft in entgegen gesetzter Richtung auch auf die Spule ($F_{\text{Blech}} = -F_{\text{Spule}}$). Aufgrund des Impulserhaltungssatzes ergeben sich zwei betragsgleiche Kraftstöße in entgegengesetzte Richtungen. Da die Spule zusammen mit ihrer Unterlage eine sehr hohe Masse besitzt wird nur das Metallblech aufgrund seiner geringen Masse beschleunigt.



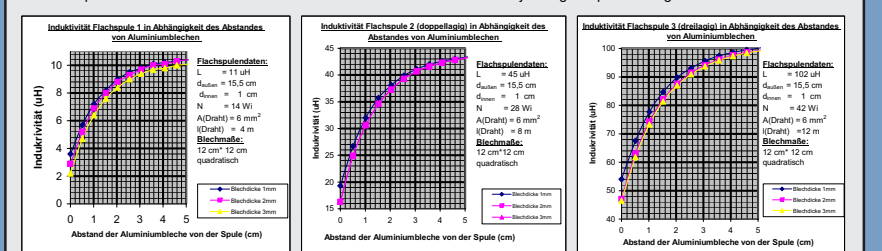
Wird das Metallblech jedoch während seiner Abstoßungsbewegung durch entsprechende Fügepartner blockiert, so kann es in verschiedenartigste Gebilde verformt bzw. gestanzt werden (siehe **"Elektromagnetische Verformung von Kreisblechen"**; **"Elektromagnetisches Stanzen von Metallblechen"**). Nach demselben physikalischen Prinzip können rohrartige Metallgebilde auch berührungslos verformt werden, was anhand des **"Elektromagnetischen Dosenzerquetschers"** demonstriert wird.

Schaltplan der Versuchsanordnung



Variation der Spuleninduktivität bei unterschiedlichem Blechabstand

Die Induktivität der verwendeten Flachspulen hängt nicht nur von den Windungszahlen, sondern auch von der Art der Gegeninduktivität, d.h. den physikalischen Eigenschaften des aufgelegten Metallblechs (Dicke, ohmschen Widerstand, magnetische Suszeptibilität, etc.) ab. Je nach Abstand von der Spule ergibt sich eine mehr oder weniger starke Erniedrigung der Spuleninduktivität.



Aus den Diagrammen ist ersichtlich, dass die Spuleninduktivität stark von dem Abstand zwischen Flachspule und Blech abhängt. Bei direktem Kontakt des Bleches zur Spule ist die Induktivität am geringsten und beträgt zwischen 18-50% der ursprünglichen Spuleninduktivität. Entfernt man nun das Blech schrittweise von der Spule, so zeigt sich ein starkes Anwachsen der Induktivität. Dies lässt sich durch die Abnahme des *Kopplungsfaktors* k zwischen Spule und Blech erklären. Bei einem Abstand von ca. 5 cm nähert sich die Spuleninduktivität schließlich asymptotisch an die ursprüngliche Spuleninduktivität an. Da das Metall während des Stanzvorgangs von der Spule weg beschleunigt wird, ändert sich in diesem Zeitraum ständig die Gegeninduktivität der Spule. Dies bedeutet, dass die *Spuleninduktivität nicht konstant*, sondern *zeitabhängig* ist. Anhand der Diagramme kann man jedoch das jeweilige "Induktivitätsspektrum" abschätzen und quantitativ den Stromverlauf berechnen.

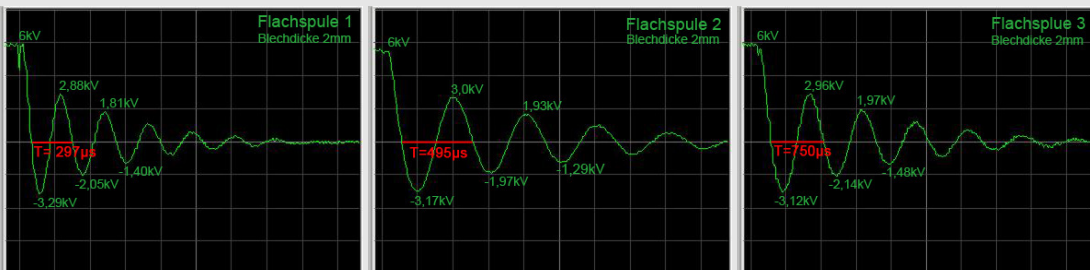
Spannungszillogramme der Pulsentladungen

Mit Hilfe des **Lichtwellenleiter-Meßsystems** ist es möglich die Spannungsverläufe an den Kondensatoren während den Pulsentladungen mit einem digitalen Speicheroszilloskop aufzuzeichnen. Anhand der Oszillogramme lassen sich verschiedene Parameter bzw. Funktionen berechnen, die für die Optimierung der "Metallverformung durch Kurzpuls-magnetfelder" essentiell sind:

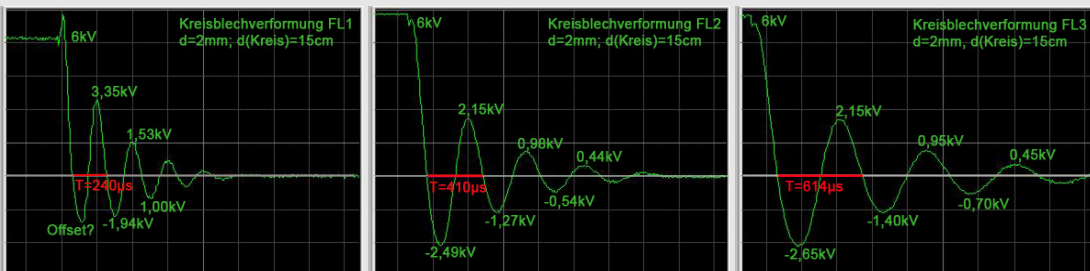
- 1.) tatsächliche Resonanzfrequenz/ Periodendauer
- 2.) Dämpfung
- 3.) max. Pulsleistung
- 4.) Umkehrspannung (reversal voltage)
- 5.) quantitativer Stromverlauf
- 6.) qualitativer Verlauf des magnetischen Drucks

Je nach Flachspulenausführung und Anwendung ergeben sich unterschiedliche Spannungszillogramme.

"Stanzoszillogramme":



"Kreisblechoszillogramme":

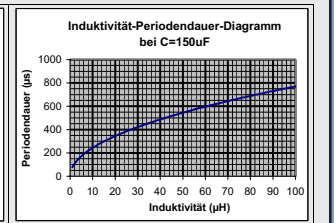
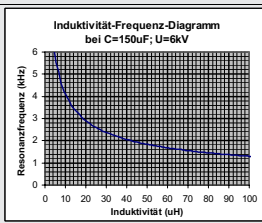


Resonanzfrequenz und Periodendauer

Nach der sog. Thomson-Gleichung ist die Spuleninduktivität zusammen mit der Kondensatorkapazität charakteristisch für die Resonanzfrequenz der Pulsentladungen:

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

Da die Kapazität der Kondensatorbank (C=150 µF) als fester Wert anzunehmen ist, lässt sich die Resonanzfrequenz als Funktion der Spuleninduktivität darstellen.

$$f(L) = \frac{1}{2\pi\sqrt{150 \cdot 10^{-6} \cdot L}}$$


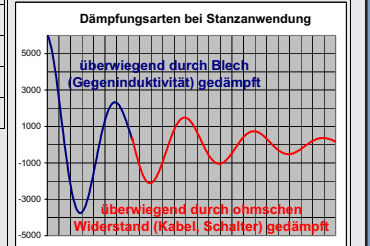
Dämpfung

Der Abklingfaktor δ einer exponentiell gedämpften Sinusschwingung der Art $U(t) = U_0 \cdot e^{-\delta t} \cdot \cos \omega t$ lässt sich darstellen durch $\delta = \frac{\Lambda}{T}$. Das sog. logarithmische Dekrement Λ wiederum ist definiert mit: $\Lambda = \ln \frac{y(t)}{y(t+T)}$. Bildet man den Logarithmus des Verhältnisses zweier aufeinander folgender Spannungsamplituden mit selben Vorzeichen, so erhält man Λ . Die Werte der logarithmischen Dekremente lassen sich nun in einer Tabelle darstellen.

	FL1- Stanzanordnung	FL2- Stanzanordnung	FL3- Stanzanordnung
log. Dekrement → Extrema 0-2	$\Lambda = 0,73$	$\Lambda = 0,70$	$\Lambda = 0,71$
log. Dekrement → Extrema 1-3	$\Lambda = 0,47$	$\Lambda = 0,48$	$\Lambda = 0,38$
log. Dekrement → Extrema 2-4	$\Lambda = 0,46$	$\Lambda = 0,44$	$\Lambda = 0,41$
log. Dekrement → Extrema 3-5	$\Lambda = 0,38$	$\Lambda = 0,42$	$\Lambda = 0,37$

Wie man erkennen kann ist das *logarithmische Dekrement* innerhalb der einzelnen Zeitintervalle *nicht konstant*! Dies bedeutet, dass sich die Funktionen der Pulsoszillationen nicht durch $U(t) = U_0 \cdot e^{-\delta t} \cdot \cos \omega t$ darstellen lassen, da δ nach $\delta = \frac{\Lambda}{T}$ kein konstanter Wert ist.

Trotzdem lässt sich aus den Werten der Dekremente die ungefähre Position der Metallbleche während den Pulsentladungen abschätzen. Aus dem "großen Sprung" zwischen den Dekrementen $\Lambda_{\text{Extrema 0-2}}$ und $\Lambda_{\text{Extrema 1-3}}$ kann man schließen, dass das Metallblech schon zwischen dem 2. und 3. Spannungsextrema keine direkte Kopplung mehr zu der Spule hat. Das bedeutet, dass das Metallblech ab diesem Zeitpunkt nicht mehr beschleunigt wird und der Schwingkreis nun überwiegend durch den ohmschen Widerstand (Kabel, Schalter, Spule) gedämpft wird.



Maximale Pulsleistung

Je nach Induktivität der angewandten Spulen ergibt sich ein unterschiedlicher Energieumsatz pro Zeit (dW/dt). Um die jeweilige Durchschnittspulsleistung innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls zu ermitteln ist es zweckmäßig die Spannungsextrema und deren Zeitpunkte aus den Oszillogrammen abzulesen. Hieraus lassen sich nun die jeweiligen Kondensatorenergien berechnen:

$$E_C(t) = \frac{1}{2} \cdot C \cdot (U(t))^2 \quad P = \frac{dW}{dt}$$

max. Pulsleistung bei "Stanzanwendungen":

Spulenart	Kondensatorenergie bei Stanzanwendung nach einer Schwingungsperiode:	Verlustenergie während der 1.Periode	Pulsleistung während der 1.Periode
FL1-Anordnung	$E_C(297 \mu s) = \frac{1}{2} \cdot 150 \cdot 10^{-6} \cdot (2880V)^2 = 622J$	$E_{\text{Loss}} = E_{\text{Start}} - 622J = 2700J - 622J = 2078J$	Periode Periode = $dW/dt = 2078J / 297 \mu s = 7,0 MW$
FL2-Anordnung	$E_C(495 \mu s) = \frac{1}{2} \cdot 150 \cdot 10^{-6} \cdot (3000V)^2 = 675J$	$E_{\text{Loss}} = E_{\text{Start}} - 622J = 2700J - 675J = 2025J$	Periode Periode = $dW/dt = 2025J / 495 \mu s = 4,1 MW$
FL3-Anordnung	$E_C(750 \mu s) = \frac{1}{2} \cdot 150 \cdot 10^{-6} \cdot (2960V)^2 = 657J$	$E_{\text{Loss}} = E_{\text{Start}} - 622J = 2700J - 657J = 2043J$	Periode Periode = $dW/dt = 2043J / 750 \mu s = 2,7 MW$

max. Pulsleistung bei "Kreisblechanwendungen":

Spulenart	Kondensatorenergie bei Kreisblechanwendung nach einer Schwingungsperiode:	Verlustenergie während der 1.Periode	Pulsleistung während der 1.Periode
FL1-Anordnung	$E_C(240 \mu s) = \frac{1}{2} \cdot 150 \cdot 10^{-6} \cdot (3350V)^2 = 842J$	$E_{\text{Loss}} = E_{\text{Start}} - 622J = 2700J - 842J = 1858J$	Periode Periode = $dW/dt = 1858J / 240 \mu s = 7,7 MW$
FL2-Anordnung	$E_C(410 \mu s) = \frac{1}{2} \cdot 150 \cdot 10^{-6} \cdot (2150V)^2 = 347J$	$E_{\text{Loss}} = E_{\text{Start}} - 622J = 2700J - 347J = 2353J$	Periode Periode = $dW/dt = 2353J / 410 \mu s = 5,7 MW$
FL3-Anordnung	$E_C(614 \mu s) = \frac{1}{2} \cdot 150 \cdot 10^{-6} \cdot (2150V)^2 = 347J$	$E_{\text{Loss}} = E_{\text{Start}} - 622J = 2700J - 347J = 2353J$	Periode Periode = $dW/dt = 2353J / 614 \mu s = 3,8 MW$