

~~$$\begin{aligned}
 a_n &= 17.2 \Rightarrow P_{med} = 7.3 \cdot 10^{-6} \text{ Watt} \\
 a_m &= 34.6 \Rightarrow P_{med} = 8.4 \cdot 10^{-6} \text{ Watt} \\
 a_{m1} &= 73 \Rightarrow P_{med} = 3.6 \cdot 10^{-8} \text{ Watt}
 \end{aligned}$$~~

Vgl: D mechan Schwingungs-Energie  
 E elektr. Schwingungs-Energie

Welche nichtlineare Lastwiderstände gibt's in der Realität

- ① Zenerdiode  
 ideal  $R = \infty$  bei  $U \leq U_{grenz}$   
 $R = R_{last}$  bei  $U \geq U_{grenz}$
- ② Diode:  $R(U) = \text{Polynom}$ : Germanium  $R \sim U^2$   
 Silizium  $R \sim U^3$
- ③ elektronisch kann man beliebige Lasten basteln, z.B.  $R = R(U)$   
 oder:  $R = R(u)$

Elektronisch ist wenig Energie in dem Ding drin, also bringt es auch wenig raus.

Wkter Hal: Teil 7:

Solange ist die gewünschte Leistung nicht aus dem System herausziehen kann, schaltet sich's immer auf, überdreht und läuft nicht mehr.

→ Um einen stabilen Betrieb zu bekommen, muß die gewünschte Leistung abfallen.

Sas geht (a) mechanisch

oder (b) nach Vergrößerung des Kondensators, weil mein Schwingkreis L.C (in  $v_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$ ) extern asymmetrisch ist, mit großem L und kleinem C

Nun kann ich entweder (i) riesengroße Kondensatorplatten an die Wand kleben ( $2 \times 3 \text{ Meter}^2$ ) oder (ii) die Kondensatorplatten auf federndes Material kleben und aufwölben



Fläche z.B.  $0.2 \times 30 \text{ Meter}^2$

→ Ist lange also mit (b)(ii) an und will mal mit  $6 \text{ m}^2$  Kondensatorfläche rechnen.

Flächige He, Stellung ist kein Problem → siehe Doppelglas-Tensid schreiben

Mit so einem großen Kondensator kommt gewaltig viel Energie heraus

Erster Versuch mit mechanischer Energiesteigerung: "New-Sprung-7-0011486480"  $\frac{\text{eVs}}{\text{pas}}$  (Angabe in %)

Mit sehr hohem Widerstand ( $R_{\text{last}} = 30 \text{ M}\Omega$ ) läßt sich die ganze aufspeichernde Leistung in elektrischer Form entnehmen, auch wenn man nur mit winzigst kleiner Spannung (Amplitude  $10^{-19} \text{ Volt}$ ) ansetzt. Das ist vielleicht nur ein Reden - Anekdote wegen zu hohen Zeit - Glimmen → nicht ernst nehmen. Mit feinerer Zeitauflösung gelingt es nicht.

↳ Aus hier bekommt man elektrisch die Energie nicht vernünftig heraus.

# Teil 8:

Zum stabilen Betrieb muß ich jetzt eine mechanische Energie-Entnahme einführen.  
 Dazu muß ich in die Spl (\*2 von S.8) einen Leistungsentnahme-Term einführen (bzw Energie-Entnahme-Term).

$$m \ddot{x}_i = - \underbrace{\int \cdot (x_i - \frac{c\delta}{2})}_{\substack{\text{Federkraft} \\ \text{(pro Kondensatorplatte)}}} - \underbrace{\frac{Q_{i-1}^2}{4\pi\epsilon_0 \cdot (2x_i)^2}}_{\substack{\text{Coulomb-} \\ \text{Kraft}}}$$

↑  
 F<sub>last</sub> wirkt der Beschleunigung entgegen

Einem ersten einfachen Versuch wurde ich mit

## "Energie-Schwing-8- mechan-Entnahme" .ps

Bilokal: (1) Kolonne A → mechan. Leistungsentnahme  
 (2) Kolonne B → mechan. Schwingungsenergie  
 (3) Kolonne E → elekt. Schwingungsenergie

elektr. Leistungswert im Mittel  $1.03 \cdot 10^{-3} \text{ Watt}$   
 mech. entnommene Leistung (Mittel)  $1.45 \cdot 10^{-3} \text{ Watt}$

## Zweiter Versuch, Teil 8:

Wir definieren jetzt einen geeigneten Lastwiderstand  
 Es wird wirksam, sobald die (mechanische) Energie des Schwingers "ES" zu groß wird. Solange der Schwinger nur schwach  
 schwingt, soll man ihm die Möglichkeit geben, sich aufzuwärmen.

Wir wählen es so: Wenn die Energie des Schwingers reicht, um mit der Auslenkung der Kondensatorplatten den halben  
 Plattenabstand zu überwinden, müssen wir die Schwingung dämpfen (d.h. Leistung entnehmen)

$$ES \geq \frac{1}{2} \delta \cdot \left( \frac{c\delta}{4} - \frac{c\delta}{2} \right)^2 = \frac{1}{32} \cdot \delta \cdot c\delta^2$$

ab dann wird  
 merklich Leistung  
 entnommen

Es muß also einen Prozentsatz dieser  
 Energie im Schwinger ansetzen, ab dem  
 die Leistungsentnahme losgeht, z.B.  $ES_{\text{grenz}} \geq 4\% \cdot \frac{\delta \cdot c\delta^2}{32}$

- Im einfachen Ansatz kann ich für die betroffenen Schwingungszustände mit viel Energie einfach 90% der antreibenden  
 Systemkraft als Lastkraft einsetzen und wegnehmen. Dadurch wird das System länger schwingfähig, aber trotzdem  
 nicht dauerhaft stabil, denn es sammelt sich trotzdem auf. → **Bei nimmt die Energie im Schwing-8-System mit einer  
 exp-Fkt der Zeit zu. Das habe ich indigewiesen.**
- Besser geeignet ist eine Lastkraft zur Leistungsentnahme, die immer genau so viel wegnimmt, wie zurecht ist. Das was  
 zuviel ist, wird der **Verlust** zugeführt, und das, was das System zum Selbsthalt braucht, bleibt drinnen im  
 System. (besteht aus dem Energie-Eintrag exponentiell als Plot der Schwing-8-Energie stärker machen.)
- So funktioniert eine stabile Dämpfung durch geeignete Energie-Entnahme:  
 ES = Energie des Schwingers, wenn  $ES \geq 4\%$  des max mögl Energie, dann mache die Lastkraft auf  
 104% der antreibenden Systemkraft

Wenn das Schwingschwarz läuft, darf es Schwingung nehmen, aber wenn es schneller wird, dann fängt man sehr bald schon an, reichlich viel Energie herauszuholen (man liest mehr als in diesen Phasen produziert wird), damit man ganz frühzeitig dem Aufschaukeln vorbeugt.

Mit unserer 4%-Lösung bekommen wir immerhin

$$\begin{aligned} P_{in, elektr} &= 1.3541 \cdot 10^{-7} \text{ Watt} \rightarrow \\ P_{out, elektr} &= 1.3501 \cdot 10^{-7} \text{ Watt} \\ P_{out, mechan} &= 2.6111 \cdot 10^{-5} \text{ Watt} \end{aligned}$$

$$\eta = \frac{261.11 + 1.35}{1.35} = 194.41 = 19441\%$$

Bei mehrmaligem Aufschaukeln und Säußen und einer Redendauer von 4.09 sec

Teiles "Gross-Schwing-8-Langzeitstabil-4-prozent"

↳ Erstes Bild: Entnommene Leistung als Fkt der Zeit  
Zweites Bild: Mechanische Leistung im Schwingen als Fkt der Zeit

Wenn ich ein bisschen zu spät anfangen zu bremsen, z.B. bei 6% des möglichen Energiegehalts statt 4%, dann gibt es schon kein Halten mehr und das Ding divergiert exponentiell → zerbricht/explodiert.

z.B.: Bremsen ist ein bisschen zu schwach, also z.B. mit  $F_{last} = 1.03 \cdot F_{ges}$  in die Brems-Phase, dann habe ich das gleiche Problem des zu stark (exponentiell) hochlaufenden Energie und die Maschine explodiert.

Man muß also wirklich den Wirkungsgrad auf "niedrigst möglich" herunterdämpfen, um die Stabil zu machen.

Leichte Veränderung der Parameter, und schon wieder läuft das System weg.

Komisch: Wenn ich die Input-Spannung absenke, kann ich ins exponentielle Aufschaukeln kommen.

Achtung: Das ist also noch kein in allen Lebenslagen stabiler Betrieb

Lastwidarstand elektr  $R_{last} = 900 \text{ K}\Omega$  → Verringerung ist den Lastwidarstand, dann divergiert das System (explodiert), Erhöhung ist den Lastwidar, dann passiert konstante Weise das selbe.

Es gibt aber immer wieder Stellen, die stabil sind, z.B.  $R_{last} = 1500 \text{ K}\Omega$

Die Schwingigkeit ist also nicht die "overunity", sondern die Stabilität des Systems.

↳ gibt auch den Fall, daß das System erst eine Zeit lang stabil ist und dann doch aus dem Keller läuft:

Verdacht: Wenn man lange genug laufen läßt, dann gerät die Schwingung immer irgendwann zu exponentiellen Explosion. Man schränkt sich das System so auf, wie man kein bisschen Energie, im Idealfall keine Energie, und Konstanten-Energie relativ zur periodischen Auswertung, daß es, irgendwann kein Halten mehr selbst.

Anregung mit selten gegebenen Reduct-hulsen ist wesentlich stabiler als Anregung mit Sinus!  
Aber auch hier kann man exponentielle Explosion sehen, wenn man lange genug wartet  $\rightarrow$  "Erster Schwing- & -dauerschalt." als  
 $\hookrightarrow$  Was sich z.B. durch andere Dämpfung (mit 5% statt 4%) auf wieder stabil machen läßt.

Resumée:

Stabiler Betrieb hängt von sehr vielen Parametern ab, deren Einstellung durchaus kritisch ist.  
Wir haben ein Doppelmot, mechanisch & Elektrisch.  
Solche Systeme sind chaotisch.

(Arbeiten (dauerschalt laufen lassen) kann man das System nur in "Stabilitäts-Mech!"  
 $\hookrightarrow$  Soetwas scheint z.B. bei der Einstellung "Erster Schwing- & -100 sec - stabil: als" der Fall zu sein.

Alles: Sobald man zwei Schwingungen hat, die unabhängig voneinander Energie gewinnen können, kommt man in den Chaos-Bereich. Synchronisation zweier periodische Vorgänge, wie z.B. eine Rotation und eine elektrische Schwingung (Wobbelspannung) kann kämpft man um Stabilität.

Anders: Klassisches Elektromotor  $\rightarrow$  Die beiden periodischen Bewegungen sind nicht unabhängig voneinander, sondern der Wechselstrom schiebt direkt den Rotor ab

Lsg für die Kammernergie  $\rightarrow$  Die (beiden) Schwingungen muß man so aneinander koppeln, daß sie mit konstanter Phasenbeziehung zueinander stehen.

$\rightarrow$  Mit was für einem System kann man das erreichen?

Der Kepe hat die Lösung  $\rightarrow$  Er hat ein Relais. Das rußt, an der Stellung des Motors, wann der Antrieb einen Impuls braucht. Und genau in dem Moment gibt es einen kurzen Impuls. Dann sind die Schwingungen aneinander gekoppelt und die Chaotizität ist weg  $\Rightarrow$  stabiler Betrieb.

Kilg:

Das versuche ich nun im

- 1. Relais auf  $\rightarrow$  Spannungspulse zum Starten sein dann Schwingung definiert hochlaufen lassen
- 2. Relais auf  $\rightarrow$  Leistung abziehen, um ein exponentielles Explodieren zu vermeiden.

Das ganze dann immer zyklisch laufen lassen.

! Also Trigger-Geber verwende ich die Info über den aktuellen Schwingungsstand! (so wie Kepe das Relais verwendet)  
File: "Param-optimieren-9".ps

Zuerst trigger ist die Einspeisung der Input-Signale

Kontrolle: Kolonne 7  $\rightarrow$  Input-Spannung  
Kolonne 8  $\rightarrow$  X-Auslenkung

Jetzt ist es mir gelungen, keine Pulse einzugeben, die den Oszillator aufschaukeln. Diese Pulse orientiere ich am oben Umkehrpunkt der mechanischen Schwingung und verschiebe deren Phase so, daß maximale Aufschaukelung stattfindet  $\rightarrow$  Eingabe direkt im Spannungsgenerator U<sub>gpm</sub> "U7"

Phasenshift wird je Zähl in Einheiten von "x"

| $\Delta \varphi$ | $\Delta$ Amplitude [mm] |
|------------------|-------------------------|
| 0                | + 0.0355                |
| 10               | + 0.0409                |
| 20               | + 0.0484                |
| 40               | + 0.0690                |

usw.

Zuerst tests noch ohne mechanische Last (-kraft)

Im Gpm habe ich U7(t) so gemacht, daß es invariant gegenüber dt reagiert.

Empirisch ausprobiert  $\rightarrow$  Phasenshift von 34.5 sorgt für starkes Aufschaukeln der Schwingung:  $OU = 425975\%$  mechanisch  
also elektr. input, mechan output

Das Aufschaukeln ist dokumentiert in "Erw.-Schwing.-9-Trigger": 0.03  
und in "Erw.-Schwing.-9-Anfangs": 0.03

U0 nur in der ersten Hälfte der dargestellten Zeit angelegt wird. Das geht dann in einen konstanten Schwingungszustand.



Interessante Beobachtung: Je größer das  $\mu_N$  ist, um so weniger Leistung läßt das System aus dem Spannungspunkt in die Spule hinein. Aber das mechanische Aufschaukeln passiert trotzdem immer in gleicher Weise, sodaß das mechanische Wirkungsgrad auf diese Weise beliebig groß gemacht werden kann.  
Nur wenn id's übertrieben geht's mitl.  $\mu_N = 400$  klappt am besten. "Erw.-Schwing.-9-mur 400": 0.03

Der xls-Graph ist das selbe Bild wie bei "Erw.-Schwing.-9-Anfangs"

So als nächstes Schritt kommt dann: Jetzt muß ich die hineingebrachte Energie wieder herausziehen.

Wegen Computers - Befehl heißt das File jetzt "Param - optimieren - 10".

Jetzt passe ich die mechanische Last an meine Betriebsart an.

Eine Geschwindigkeits-proportionale Regelung geht immer: "Graw - Schwing - 10 - gpr" <sup>aus</sup> <sub>des</sub>

↑ Geschw. prop. Regelung

Jetzt versuche ich die Geschw.-prop.-Regelung darauf einzustellen, daß die entnommene Leistung maximal wird. Erst aufschwingen lassen, damit ordentlich Energie im Pendel ist und darauf ab einem bestimmten Zeitpunkt die Last einschalten zwecks Leistung ziehen.

1. Beobachtung: Plötzlich eingeschaltete ändert die

Frequenz der Bewegung und damit die Phasensteuerung

Die Last schaltet ich in dem Moment ein, wo die Amplitude ca 25% der Kondensatorplattenabstandes übersteigt.: File "Graw - Schwing - 10 - last - einschalten"

Dann muß ich U7 die Phasen-/Impuls-Steuerung an die gebräuchteste Schwingung anpassen

→ Allerdings stelle ich fest, daß das keinen all zu großen Effekt hat.  
Trotzdem Idee: "Graw - Schwing - 10 - last - einschalten - phasenhom."

Dann kommt die Frage: Wie muß ich die Impulse gestalten, damit ich möglichst viel Leistung

aus der Anordnung herausziehen kann?

} Gut kommt folgende Einstellung:

"Graw - Schwing - 10 - 6379 mV" mit einer OA = 6810000%

Achtung: Die Klappen dürfen einander nicht berühren.

Wenn ich noch mehr will, muß ich die Federkräfte erhöhen, und damit auch die Schwingungsfrequenz

→ "Graw - Schwing - 10 - 143 mV" Das Bild zeigt die Auslenkung

entnommene gewandelte Leistung 143  $\mu$ Watt im Mittel

In der zweiten Hälfte ist es mehr (ca doppelt so viel)

OU =

179 379 47%

Dazu noch die Parameter fein ausoptimiert  $\Rightarrow$  "new-swing-10-229 mV" mit  $OU = 219\,994\,02\%$   
"new-swing-10-2800 mV"  
 $\rightarrow$  "new-swing-10-4500 mV" mit  $OU = 165\,861\,17\%$   
bringt aber immerhin  $4\frac{1}{2}$  Millivolt!

Es gibt noch viel zu tun!

Die Kondensatorplatten wiegen 440 kg pro Stück

So der nächste Schritt:

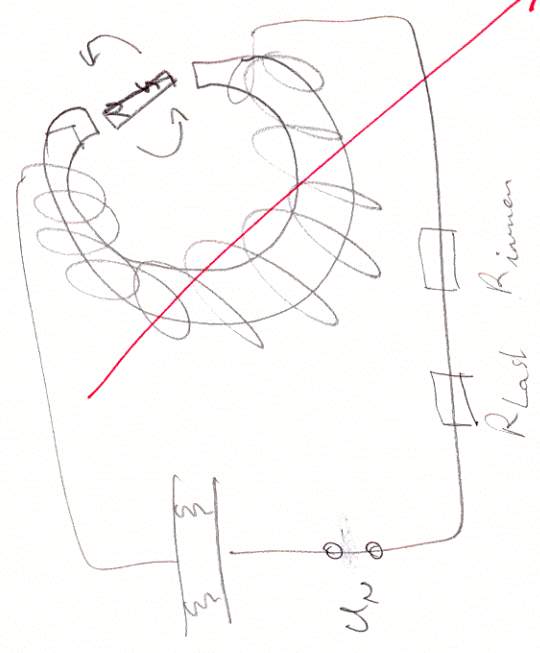
Das Ganze handliches / kleiner machen und die Magnetfelder nutzen, um einen rotierenden Magneten anzutreiben

Das Feld eines Magneten ist das gleiche wie bei einer Zylinderspule  
Dieser Dauermagnet dreht in seinem Toroid-Spulen-Magnet (mit Jod)

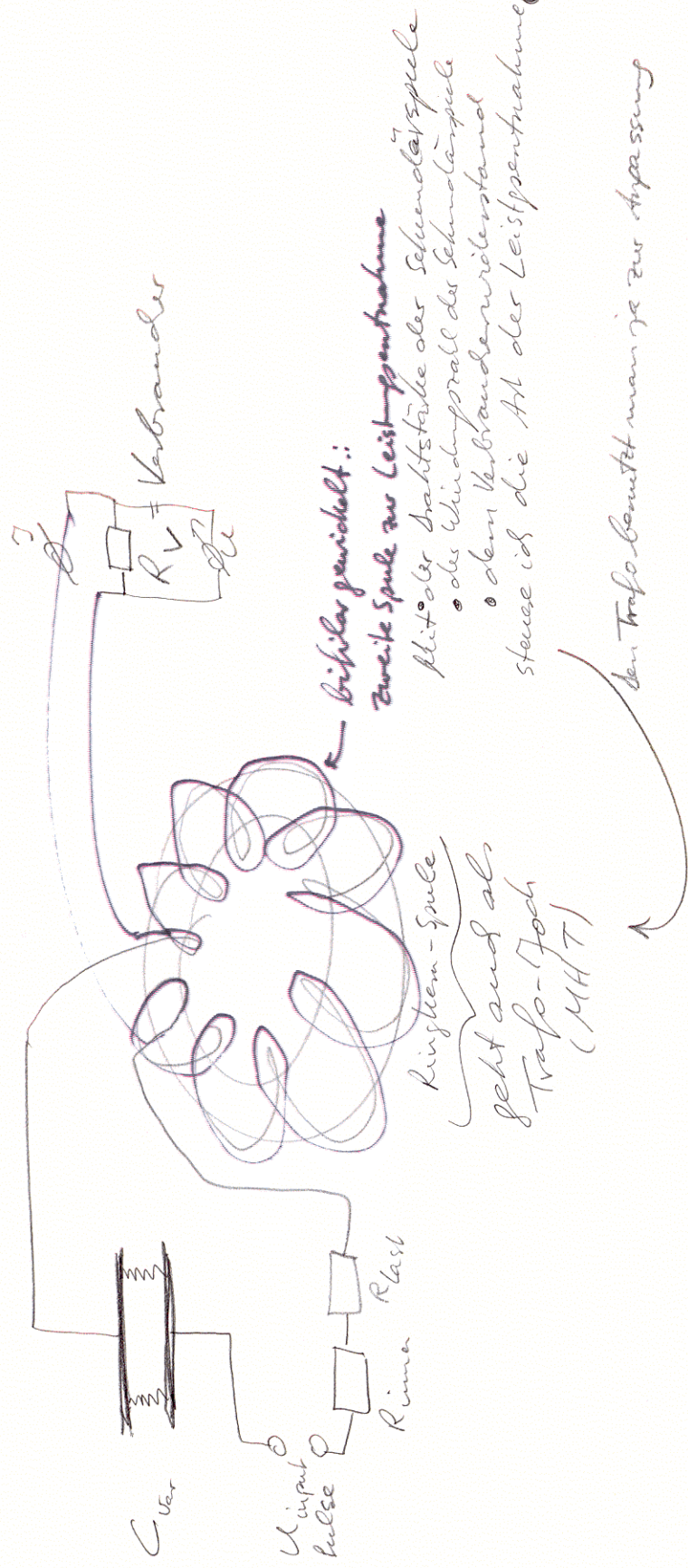
Das ist meine Anordnung plus ein Dauermagnet.

Nutlast ist das erzeugte Wechselfeld in Bezug auf meine Anordnung LCR

Her aus kommt die Rotationsbewegung des Dauermagneten.



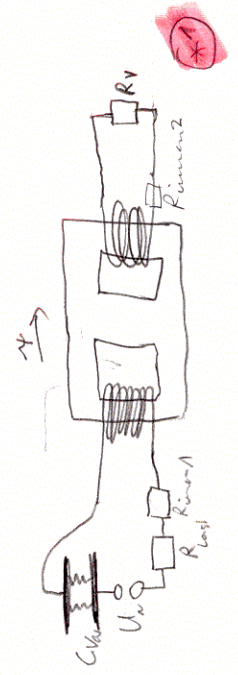
noch besser geht's auf der nächsten Seite.  
 $\rightarrow$  Motionless-converter mit Last-Steuerung.

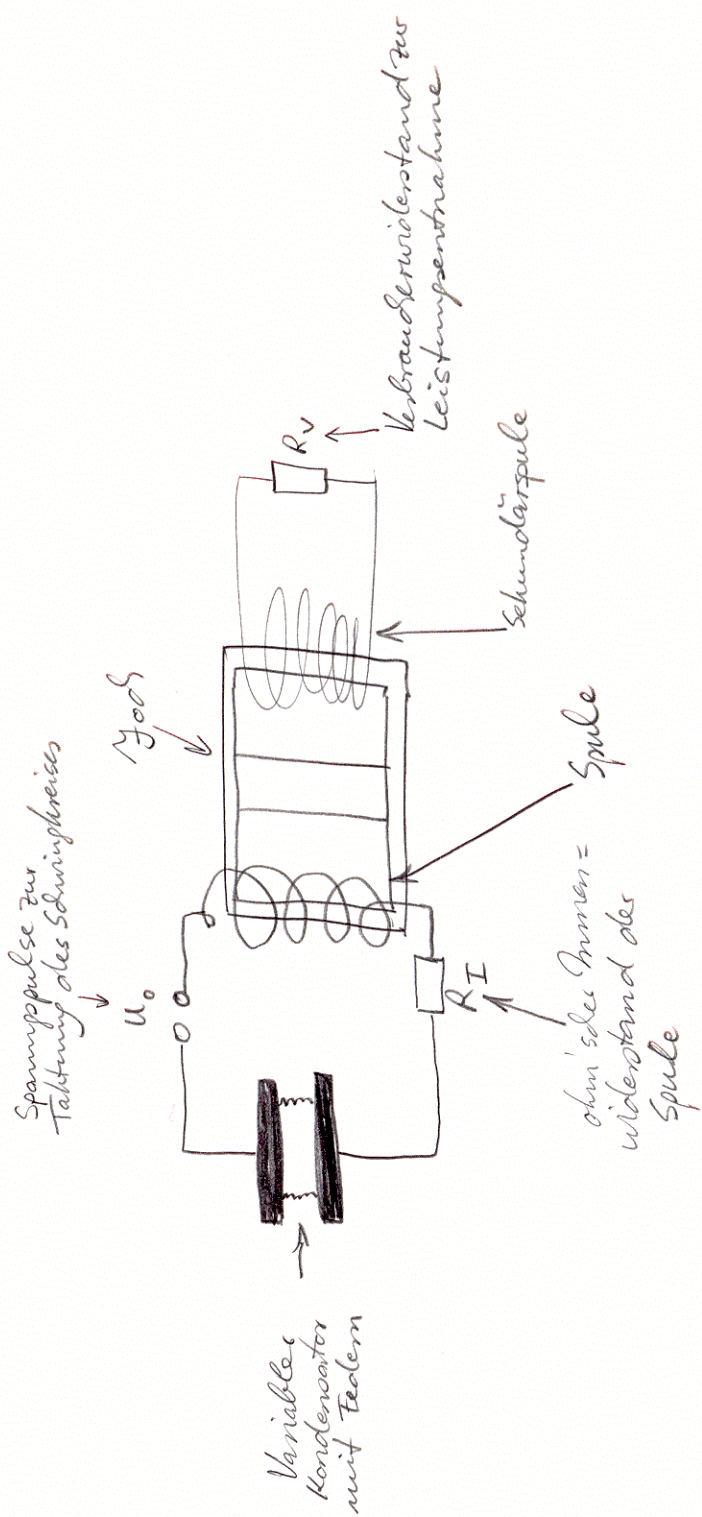


Am leichtesten zum Bedienen geht's wenn ich einen klassischen Trafo verwende, weil ich dann meine Spule mit Topf weiterverwenden kann wie bisher

Dann muß ich nur die magnetische Flussdichte  $\vec{B} = \int \vec{B} d\vec{A}$  im Trafo berechnen und mit dem Induktionsgesetz ausrechnen, wieviel die Sekundärspule davon herauszieht, um Energie zu entnehmen.

Und weil ich dann dem Kondensator mechanisch keine Energie entnehme, kann ich ihn dann auch aufladen und kompakt machen.





Und das macht die Spule am Traf (Zwecks Leistungsabnahme):

S. 20

Magnetisches Feld einer Zylinderspule, kurze Spule, Stöcker S. 441  
Näherung des Feldes als eingenommen homogen

$$H = \frac{n \cdot I}{\sqrt{l^2 + 4R^2}}$$

$H$  = magnetische Feldstärke  
 $n$  = Windungszahl Primärspule  
 $I$  = Spulenstrom  
 $l$  = Länge der Spule  
 $R$  = Radius

$$\Rightarrow \text{Magnetische Flussdichte: } B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$$

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am}$   
 $\mu_r$  = relative Permeabilität des Füllmaterials

$$\Rightarrow \text{Magnetischer Fluss } \Phi = \int_A \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad \text{mit } A = \text{durchflossene Fläche} \quad (\text{siehe Stöcker S. 432})$$

Damit berechne ich den magnetischen Fluss in der Primärspule  
der fließt dann durch die Sekundärspule und induziert dort eine Spannung nach dem Induktionsgesetz:

$$U_{ind} = -m \cdot \frac{d\Phi}{dt}$$

mit  $m$  = Windungszahl der Sekundärspule  
(siehe Stöcker S. 448, § 15.18)

$$\text{dadurch fließt über den vorhandenen Widerstand (Sekundärseitigen) Strom } I = \frac{U_{ind}}{R_{inner2} + R_V}$$

$$\text{Die entnommene Leistung ist also } P_2 = U_{ind} \cdot I$$

(das entnimmt die Sekundärseite aus der Primärseite)

Diese Formeln lassen sich prima in den AGO einprogrammieren, um die Abordnung Leistung zu entnehmen.

Was macht ich im Traf: Schwache ich  $\Phi$  potenzial ab? (Indem ich mit der Sekundärspule Energie entnehme)  
Müßte ich dann nur finden, wie  $E = E(\Phi)$  zusammenhängt

$\rightarrow$  Oder soll ich schauen, ob ich zum Traf Angaben in den Formelsammlungen finde?

Hier finde ich zur Kopplung zwischen der Primärseite und der Sekundärseite:  $\Phi_1 = \Phi_2$

Es muß am Ende herauskommen, wieviel Leistung ist entnommen (wieviel Energie pro Zeit)

Beinhalt die Frage: Kann ich den Zshang zwischen dem magnetischen Fluß und der Leistung herstellen? Es will ich nun versuchen:

- Was ich kenne:  $Q_1(t)$ ;  $\dot{Q}_1(t) = I$ ;  $\ddot{Q}_1(t) = \frac{dI}{dt}$  in der Primärspule

Wenn die Spulengeometrie  $(R, L, n)$   $\Rightarrow L_1 \propto R_1$  (Induktivität und Ohm'scher Widerstand) (bei bekanntem  $\mu_1$ )  
 $\hookrightarrow$  Innenwiderstand der Spule

W!

Phase, Effektivwerte, ... gelten für bestimmte Sinusformen  
 Die Betrachtungsweise ist nicht vollständig dynamisch (Momentanwerte als Fkt der Zeit) und sie ist daher nicht für mod (JFEM) geeignet  
 } kleine komplexe Wechselstromrechnung

Es w (Frequenz) darf in meinen Berechnungen über = konst nicht auftreten!

- Damit rechne ich wie folgt: I.h.  $\rightarrow$  die Spannung über der Spule mit samt Innenwiderstand ist

$$U_L + U_R = -L \ddot{Q}(t) + R \dot{Q}(t) \quad \leftarrow \text{Vorzeichen probieren!}$$

$\Rightarrow$  Die Leistung die durch die Spule läuft ist  $\hookrightarrow$  Vorzeichen am Fz zu testen.

$$P = U \cdot I = (U_L + U_R) \cdot \dot{Q} = -L \ddot{Q} \cdot \dot{Q} + R \dot{Q} \cdot \dot{Q}$$

Der Anteil der Leistung schwingt in der Spule und kommt wieder heraus.

Der Anteil geht in der Spule verloren und wandelt sich in Wärme um

und zwar dynamisch als Fkt der Zeit!

- Dabei erzeugt die Spule einen magnetischen Fluß im Fz, der, lautel

$$\Phi = \int B dA = B \cdot A = \mu_0 \mu_r \cdot \frac{n \cdot I}{\sqrt{L^2 + 4R^2}} \cdot \pi R^2 = \mu_0 \mu_r \cdot \frac{\pi R^2}{\sqrt{L^2 + 4R^2}} \cdot n \cdot \dot{Q}$$

Bei homogenem Magnetfeld

\* und \*<sup>3</sup> von S.2.0

A = Querschnittsfläche von Spule und Fz:  
 $A = \pi R^2$

neu anders herum hingenommen (überprüfbar)

Die Spule ist coll. dynamisch, also  $\Phi = \phi(t)$

Dieser magnetische Fluß durchfließt nun ebenso die Sekundärspule ( $\Phi_1 = \Phi_2$ ) wegen des Jochs.

Es induziert dort die "Sekundärspannung"  $U_{ind} = -m \frac{d\Phi(t)}{dt}$

$\uparrow$   
nach (\*4 von S. 20),  
wobei  $m = \text{Wirkzahl der Sekundärspule}$

$$= -\mu_0 \mu_r \cdot m \cdot m \cdot \frac{\pi R^2}{\sqrt{R^2 + 4R^2}} \cdot \ddot{Q}$$

$\uparrow$   
Das  $R$  hier ist der Spulenradius der Primärspule

Man darf sich nicht dazu verwirren lassen, daß "m·m" (also beide Windungszahlen) als Faktoren im Zähler stehen. Es ist hier nicht das Spannungs-Übersetzungs-Verhältnis von Transformatoren gemeint ( $\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}$ ), denn da mußte auf der rechten Seite nicht  $\ddot{Q}$  stehen, sondern  $\dot{Q}$  ohne Ableitung

(Jedes Mal beim Ableiten kommt ein Faktor m).  
Der Weg vom Spang zu Strom geht über  $U \cdot R \cdot \ddot{Q}$  und  $R \cdot m$ , d.h. der Widerstand ist proportional zu Zahl der Windungen.)

$$U_{ind} = -L \ddot{I}_2$$

$\uparrow$   
Das ist aber jetzt der sekundärseitige Strom und nicht der Strom auf der Primärseite. Man darf das nicht verwechseln.

Über die Spulengeometrie der Sekundärspule und das Induktionsgesetz kann man zur Sekundärseite weiterrechnen

Auf diesem Weg komme ich zur sekundärseitig entnommenen Energie/Leistung:  $P_{ind} = U_{ind} \cdot I_2 = U_{ind} \cdot \frac{(-L \ddot{I}_2)^2}{R_V}$

Was ich noch überlegen muß, ist die Lenz'sche Regel: Wie wirkt der entnommene magnetische Fluß zurück auf die Primärseite. Wie reduziert sich der magnetische Fluß auf der Primärseite.

Man ist an die Energieerhaltung gewöhnt, rechnet es aber über die entnommene Leistung, d.h. daß primärseitig genau das an Leistung fehlt, was sekundärseitig entnommen wurde.

Das heißt, daß auf der Primärseite genau die Leistung  $P_1 = P - P_{ind}$  übrig bleibt:

$\Rightarrow P_1 = -L \ddot{Q} \cdot \ddot{Q} + R \ddot{Q} \cdot \ddot{Q}$   
unfertig  
Stop, wegen Klausuren

PAUSE WEGEN KLASSEN-KOORDEINATUR  $\Rightarrow$  ZUSAMMENHANG VERLOREN.

Also setze ich alles ab S. 19 nochmals neu zusammen, achte jetzt aber darauf immer die Indizes

1 und 2 für die primärseitigen und sekundärseitigen Größen hinzuschreiben.

Also: Aus meinem SFEM heraus kennen wir primärseitig  $\dot{Q}_1, \ddot{Q}_1, \dot{Q}_1, \ddot{Q}_1$  } Zeile (\*)  
 Die Systemgrößen sind sowieso bekannt:  $L_1, R_1$  und  $L_2, R_2$  } Zeile (\*)

Bestimmen müssen wir nun die sekundärseitig entnommenen  $\dot{Q}_2, \ddot{Q}_2, \dot{Q}_2, \ddot{Q}_2$  } Zeile (\*)  
 sowie deren Rückwirkung zur Veränderung der hinagrößen  $\Delta \dot{Q}_1, \Delta \ddot{Q}_1, \Delta \dot{Q}_1, \Delta \ddot{Q}_1$  } Zeile (\*)

# I Bestimmung der Größen von Zeile 3

Aspekt über den magnetischen Fluss, denn aufgrund des Jobs ist  $\Phi_1 = \Phi_2$  !  
 aus der Primärseite bekommen wir, welcher Fluss erzeugt wird: (\*)

$$\Phi_1 = \int_A \vec{B}_1 d\vec{A}_1 = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H_1 \cdot A_1 = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{N_1 \cdot \dot{Q}_1}{\sqrt{L_1^2 + 4R_1^2}} \cdot \pi R_1^2$$

Mit einem Kreisstrom als Job, welches die Material-Querschnittsfläche  $\pi R_1^2 = \pi R_2^2$  hat.

~~Handwritten scribbles and crossed-out text.~~

Dieser Fluss fließt durch die Sekundärseite und induziert dabei dort folgende Spannung: (\*)

$$U_{ind,2} = -N_2 \frac{d\Phi_1}{dt} = -\mu_0 \cdot \mu_r \cdot N_1 \cdot N_2 \cdot \frac{\pi R_1^2}{\sqrt{L_1^2 + 4R_1^2}} \cdot \ddot{Q}_1 = -L_2 \ddot{Q}_2$$

(\*) von S. 22) mit  $\Phi_1 = \Phi_2$

Induktivität der Sekundärspule

$$L_2 = \mu_0 \mu_r \cdot \frac{\pi R_2^2}{L_2} \cdot N_2^2$$

(nach S. 452, Formel (8)) oder genauer  $L_2 = \mu_0 \mu_r \cdot \frac{\pi R_2^2}{\sqrt{L_2^2 + 4R_2^2}} \cdot N_2^2$  (\*)

Vom SFEM-Algo schreibe ich primärseitig den Index 1 mit hin, denn das Symmetrisch bleibt ohne den Index 1. Zur Unterscheidung bekommen dann die Sekundärgrößen den Index 2.

gegeben  
 gesucht

Diese Zeile (\*7 von S.23) kann ich auflösen nach dem Zusammenhang zwischen  $\ddot{Q}_1$  und  $\ddot{Q}_2$ :

$$M_1^2 \cdot \frac{\pi R_1^2}{\sqrt{L_1^2 + 4R_1^2}} \cdot \ddot{Q}_1 = M_2^2 \cdot \frac{\pi R_2^2}{\sqrt{L_2^2 + 4R_2^2}} \cdot \ddot{Q}_2 \quad (*)$$

Und mit diesem  $\ddot{Q}_2$  gehe ich auf die Sekundärseite in die Spl von Spule und Lastwiderstand hinein, um zu finden, wie die Sekundärseite reagiert

Nach der Maschenregel im Bezug auf (\*1 von S.19) ist sekundärseitig  $U_{L_2} + U_{RV} \Rightarrow -L_2 \ddot{Q}_2 + R_V \dot{Q}_2 = 0$  (\*)

↑ Sekundärspule      ↑ Verbrauchswiderstand

Damit komme ich von  $\ddot{Q}_2$  nach  $\ddot{Q}_1$ :  $(*) \Rightarrow R_V \dot{Q}_2 = L_2 \ddot{Q}_2 \Rightarrow \dot{Q}_2 = \frac{L_2}{R_V} \ddot{Q}_2$

Auf diese Weise erzeugt die Spannung in der Sekundärspule einen Strom im Verbraucher-Widerstand.

Die dadurch im Verbrauchswiderstand verheizte Leistung ist  $P_V = U_V \cdot I_V = R_V \cdot I_V^2 = R_V \cdot \dot{Q}_2^2 = R_V \cdot \left( \frac{L_2}{R_V} \ddot{Q}_2 \right)^2 = \frac{L_2^2}{R_V} \ddot{Q}_2^2$  (\*)

Hier ist die aus dem System entnommene Nutzleistung.

Setzt man  $L_2$  aus den Systemparametern ein (lt \*8 von S.23), so erhält man

$$P_V = \underbrace{\left( \mu_0 \mu_r \cdot \frac{\pi R_2^2}{\sqrt{L_2^2 + 4R_2^2}} \cdot n_2 \right)^2}_{\text{(nach *8 von S.23)}} \cdot \underbrace{\frac{1}{R_V}}_{\text{(nach *)}} \cdot \underbrace{\left( \frac{n_1^2}{n_2^2} \cdot \frac{\pi R_1^2 \cdot \sqrt{L_2^2 + 4R_2^2}}{\sqrt{L_1^2 + 4R_1^2}} \cdot \pi R_2^2 \right)}_{\text{(nach *)}} \cdot \ddot{Q}_1^2 \quad (*)$$

für die sekundärseitig im Lastwiderstand entnommene Leistung.

Die letzte offene Frage ist nun noch: Wie wirkt die sekundärseitig entnommene Leistung auf die Primärseite zurück? Das müssen wir nun überlegen:

→ Mit Frank telefonieren? } → Sara hat Frank später vollauf eine Idee. Wir probieren zunächst mal eine Vereinfachung.

Vielleicht sollte ich nur mal auf die aus der Primärspule entnommene Leistung diese betragt nach (S. 21) mein das ist die Leistung auf der Primärseite, nicht die Leistungsentnahme

Die entnommene Leistung ist proportional  $(\Delta \Phi)^2$   
 Wir setzen mal einfach so eine Beziehung an, es könnte auch anders sein.  
~~Wir kommen zu diesem Ansatz wegen~~  $E \sim B^2 \Rightarrow P = \frac{dE}{dt} \sim B^2 \sim \dot{\Phi}^2$

Besser: das kann ich auch richtig begründen:

Die Energie im Feld ist proportional  $|\vec{B}|^2$ , weil die Energiedichte  $u = \frac{\epsilon_0}{2} \cdot |\vec{B}|^2$  und das Feld hat ein konstantes Volumen  $E = \int u dV$   
 Energie im Feld

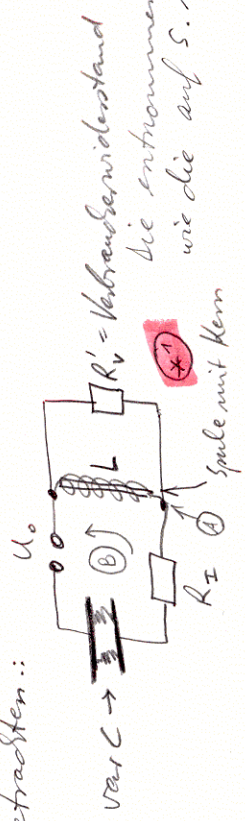
Wegen  $\Phi \sim \dot{Q}_1 \Rightarrow \Phi \sim B$

Energie  $E \sim B^2 \sim \dot{\Phi}^2$

Zeitliche Ableitungsführt zur Leistung  $\Rightarrow P = \frac{dE}{dt} \sim 2 \cdot \dot{\Phi}_1 \cdot \ddot{Q}_1$   
 Kettenregel

Das ist dann die Leistung im Feld und es entspricht auf (S. 21) ohne Lastwiderstand.

Frank Lienend schließt nun vor, als Ersatzschaltbild für S. 19B (bzw. S. 19), einen Verbrauchswiderstand parallel zur Primärspule zu betrachten:



Die entnommene Leistung in dem  $R'_V$  ist genau so groß wie die auf S. 19B sekundärseitig entnommene Leistung

Wir würden damit die Spl (\*1 von S. 10) um einen weiteren Term erweitern müssen, nämlich um einen Verbratenwiderstand  $R_V$ , der parallel zur Spule  $L$  geschaltet ist, weil das Schaltbild (\*2 von S. 10) ersetzt wird durch das Schaltbild (\*1 von S. 25):

(\*1 von S. 10 lautete)  $U_L + U_R + U_C = U_0 \cdot \cos(\omega \cdot t)$  (\*1)

↓

An  $U_L$  müssen wir nun einprägen:

Da bekannt ist zweigekoppelte Spln  $\rightarrow$  Am Knoten A in (\*1 von S. 25)

ist der Strom  $I_{R_V} = I_L + I_{R_V}$  (\*2)

Dann sind die drei Ströme:  $I_{R_V} = \dot{Q}_M$ , das ist ja der Strom, der in der Masche B läuft.

$I_L = \int \frac{U_L}{L} dt$ , entsprechend (\*3 von S. 5)

$I_{R_V} = \frac{U_L}{R_V}$ , weil über dem (transformierten) Verbratenwiderstand die gleiche Spannung abfällt, wie über der Spule.

Diese 3 Terme muß ich nun entsprechend (\*2) in die Spl (\*1) hineinbasteln: Das machen wir auf den nachfolgenden Seiten.

Komplexe Wechselstrom-Darstellung müßte mir gar nichts, weil die Sache mit der Phase = Verschiebung etwas mit der Sinus- bzw Cosinus-Ten der klassischen Wechselströme zu tun hat. Das muß ja aussehen, wenn es eine beliebige Impulsform hat.

Wir muß  $U_c$  ersetzen durch die Parallelschaltung aus Spule und Widerstand

Kennre tue ich oben Strom in der Masche  $\dot{Q}_M = \dot{Q}$  aus den bisherigen Spln (\* von S. 10)

Der teilt sich jetzt aber auf in 2 Ströme, und die Frage ist: Wieviel fließt wo:  $\dot{Q} = \dot{Q}_L + \dot{Q}_{PV}$

↑  
Strom aus der Masche teilt sich auf in → Strom in Spule

↑  
Strom im Verbraucherwiderstand

Stromflusswiderstand in der Spule

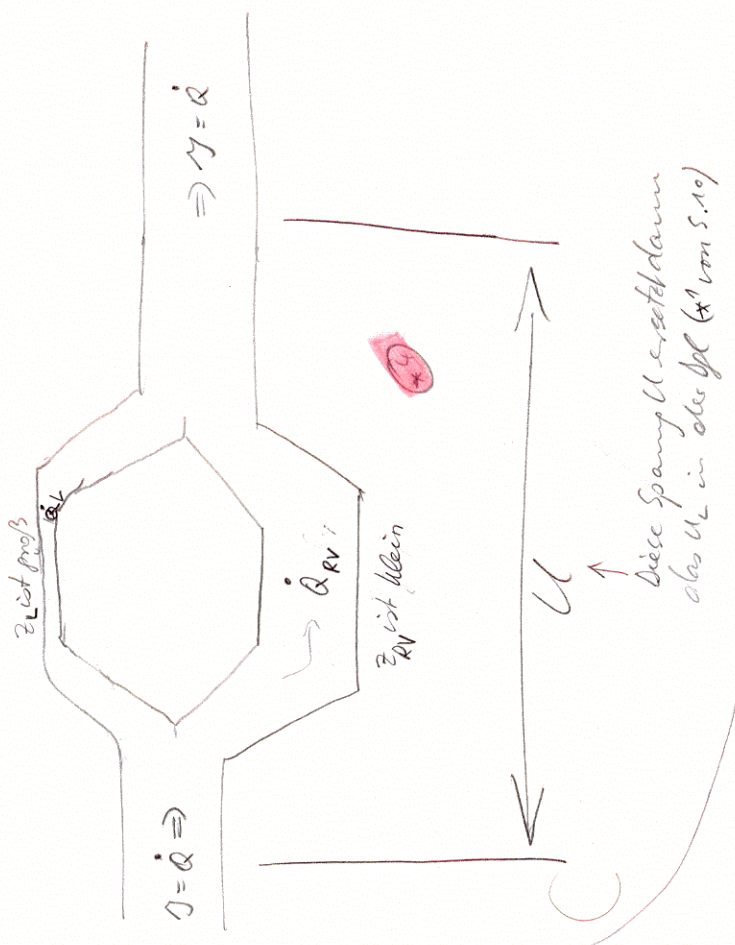
$$Z_L = \frac{U}{I} = \frac{-L \ddot{Q}_L}{\dot{Q}_L} \quad (*)2$$

Index "L" → fließt in der Spule

Stromflusswiderstand im Verbraucherwiderstand

$$Z_{RV} = \frac{U}{I} = \frac{R \cdot \dot{Q}_{RV}}{\dot{Q}_{RV}} = R_V \quad (*)1$$

Index "RV" → fließt im Verbraucher-Widerstand



Damit teilen wir die Strom auf:

$$\dot{Q} = \dot{I} = \dot{Q}_L + \dot{Q}_{RV} = \frac{U}{Z_L} + \frac{U \cdot \dot{Q}_L}{-L \ddot{Q}_L} + \frac{U}{R_V}$$

nach (\*)1 und (\*)2

Auflösen nach  $U$  liefert

$$\Rightarrow \dot{Q} = \left( \frac{\dot{Q}_L}{-L \ddot{Q}_L} + \frac{1}{R_V} \right) \cdot U \Rightarrow U = \frac{\dot{Q}}{\frac{\dot{Q}_L}{-L \ddot{Q}_L} + \frac{1}{R_V}}$$

also  $\Rightarrow U = \frac{\dot{Q}_L \ddot{Q}_L \cdot R_V}{-\dot{Q}_L R_V + L \cdot \ddot{Q}_L} \quad (*)3$  hier wurde nur der Nenner weggemacht

Dieses  $U$  muß ich an Stelle von  $U_L$  in die Gl (\*) von S. 10 einfügen und erhalte dadurch die Gl für die Schaltung (\*) von S. 25.

Was ich dann aber noch brauche, ist das  $\dot{Q}_L$ ,  $\ddot{Q}_L$ , und das ist unbekannt. Dieses muß ich durch  $\dot{Q}$ ,  $\ddot{Q}$  ersetzen, welches ich aus der Gl herne und bestimme

Also: Wie läßt sich  $\dot{Q}_L$  durch  $\dot{Q}$  ausdrücken, → das finden wir auf der nächsten Seite (S. 29) wieder.

Sas könnte vielleicht so gehen::

Wie ist bei hintereinander geschalteten Widerständen eine Spannungsteilung kenne,  
so müsste es bei parallel geschalteten Widerständen eine Stromteilungsverteilung finden können.

$$\frac{I_L}{I_{RV}} = \frac{\frac{1}{Z_L}}{\frac{1}{Z_{RV}}} \quad \text{und entsprechend kann ich die beiden Ströme prozentual aufteilen}$$

$$\frac{I_L}{I} = \frac{\frac{1}{Z_L}}{\frac{1}{Z_L} + \frac{1}{Z_{RV}}} \quad \text{und} \quad \frac{I_{RV}}{I} = \frac{\frac{1}{Z_{RV}}}{\frac{1}{Z_L} + \frac{1}{Z_{RV}}}$$

für den Anteil durch die Spule

für den Anteil durch den Verbraucherwiderstand

Hier müsste ich die Möglichkeit haben, den Strom  $I_L$  durch  $I = \dot{Q}$  auszudrücken.

Hier müsste ich die Möglichkeit haben, den Strom  $I_{RV}$  durch  $I = \dot{Q}$  auszudrücken.

Wir probieren das so::

$$\frac{\dot{Q}_L}{\dot{Q}} = \frac{\frac{\dot{Q}_L}{-L \ddot{Q}_L} + \frac{1}{R_V}}{\frac{\dot{Q}_L}{-L \ddot{Q}_L} + \frac{1}{R_V}} = \frac{-\dot{Q}_L \cdot R_V}{-Q_L \cdot R_V + L \cdot \ddot{Q}_L} \Rightarrow \dot{Q}_L = \frac{-L \cdot \ddot{Q}_L + R_V \cdot \dot{Q}}{R_V} \quad \text{aufgelöst nach } \dot{Q}_L$$

nach (\*) & (\*) von S. 28)

doppelte wegmachen

$$\text{oder } \dot{Q} = \frac{\dot{Q}_L \cdot R_V - L \cdot \ddot{Q}_L}{R_V} \quad \text{aufgelöst nach } \dot{Q}$$

für  $R_V \rightarrow \infty$  ist  $\dot{Q} = \dot{Q}_L$ , das ist eine beruhigende Kontrolle, denn wenn der Widerstand  $R_V$  sehr groß ist, geht der gesamte Strom durch die Spule.

Es ist  $Z_{RV} = R_V$   
und  $Z_L = -L \cdot \ddot{Q}_L / \dot{Q}_L$

Damit kann man eigentlich alle  $\dot{Q}$  durch  $\dot{Q}_L$  ersetzen  
 dazu setzen wir (\*1 von S. 29) und (\*3 von S. 28) in die Spl (\*1 von S. 10) ein  
 $U_L + U_R + U_C = U_0(t)$  ↖ anliegende Spannung

$$\underbrace{\frac{\dot{Q}_L \ddot{Q}_L \cdot R_V}{L \ddot{Q}_L - R_V \ddot{Q}_L}}_{\text{nach (*3 von S. 28)}} + \underbrace{R \cdot \frac{\dot{Q}_L \cdot R_V - L \ddot{Q}_L}{R_V}}_{\text{nach (*1 von S. 29)}} + \frac{1}{C} \cdot \frac{Q_L R_V - L \dot{Q}_L}{R_V} = U_0(t)$$

(\*1) nach Integration der (\*1 von S. 29)

Das ist jetzt eine Spl in  $Q_L, \dot{Q}_L, \ddot{Q}_L$ , die ich (hoffentlich) lösen kann.  
 Die entnommene Leistung kann ich dann auch ausrechnen, indem ich aus  $\eta_L = \dot{Q}_L$  das  $\eta_{RV} = \dot{Q}_{RV}$  ausrechne

Dazu hilft (\*2 von S. 29)  $\Rightarrow \eta_{RV} = \eta_L \cdot \frac{Z_L}{Z_{RV}}$

Die entnommene Leistung ist dann  $P = R_V \cdot \eta_{RV}^2 = R_V \cdot \dot{Q}_L^2 \cdot \frac{Z_L}{Z_{RV}}$  ↖ siehe (\*4 von S. 29)

für die im  $\eta_{RV}$  =  
 Brauchender =  
 Stand entnommene  
 Leistung.

Auch wenn in der Formel der  $\eta_{RV}$  =  
 Brauchender Widerstand nicht explizit  
 auftaucht, so spielt der doch eine  
 wesentliche Rolle, weil er aus der Spl  
 her die  $\dot{Q}_L$  und  $\ddot{Q}_L$  bedingt.

Mit (\*1) und (\*2) läßt sich die Schwingung mit Leistungsentnahme  
 aus der Spule durchrechnen.

Aber zuvor sehe ich nach, obß im ersten Summanden ein  $\dot{Q}$  ohne Index "L" steht.  
 Der muß weg, und zwar kann ich ihn ersetzen gemäß (\*1 von S. 29)

(\*1 hier)  $\Rightarrow$   $\frac{\dot{Q}_L R_V - L \ddot{Q}_L}{R_V} \cdot \frac{L \ddot{Q}_L R_V}{L \ddot{Q}_L - R_V \ddot{Q}_L} + R \cdot \frac{\dot{Q}_L \cdot R_V - L \ddot{Q}_L}{R_V} + \frac{1}{C} \cdot \frac{Q_L R_V - L \dot{Q}_L}{R_V} = U_0(t)$  ↖ Input-Spannung

Doppelbrüche weg =  $\left\{ \begin{array}{l} \text{Kürzen, erst kürzen,} \\ \text{dann blau} \end{array} \right\} \Rightarrow$

$$-L \ddot{Q}_L + R \cdot \frac{\dot{Q}_L \cdot R_V - L \ddot{Q}_L}{R_V} + \frac{1}{C} \cdot \frac{Q_L R_V - L \dot{Q}_L}{R_V} = U_0(t)$$

Diese Spl ist nun in einer Form, die ich im  
 Prinzip tatsächlich für den JFM-Algorithmus  
 so verwenden kann.

- Ich will nochmals alles in  $Q, \dot{Q}, \ddot{Q}$  formulieren (in (\*1 von S.10)), die Maxlansregel (\*1 von S.27) verwenden, bzw (\*2 von S.26) und die Stromteilung gemäß (\*2, \*5, \*6 von S.29).  
Der Unterschied zu (\*1 von S.30) wird dann sein, daß es alles in  $Q, \dot{Q}, \ddot{Q}$  ausdrücke und nicht in  $Q_L, \dot{Q}_L, \ddot{Q}_L$ .
- Was ich dazu leisten muß, ist lediglich folgendes: Ich muß  $-L\ddot{Q}$  (Bspalte Spalte) ersetzen durch (\*4 von S.28)

Wie machen das über  $\ddot{Q}$  und leiten anschließend ab.

Nach (\*4 von S.28) gilt: (Vgl. auch \*1 von S.27)

$$\dot{Q} = \dot{Q}_L + \dot{Q}_{RV} = \frac{-L\ddot{Q}_L + R_V\dot{Q}}{R_V} + \frac{-L\ddot{Q} + R_V\dot{Q}}{R_V} \cdot \frac{Z_L}{Z_{RV}} = -\frac{L\ddot{Q} + R_V\dot{Q}}{R_V} \cdot \left(1 + \frac{-L\ddot{Q}_L}{R_V}\right)$$

ausklammern, danach  $Z_L$  und  $Z_{RV}$  einsetzen gemäß (\*4 von S.29)

das ist wieder  $\ddot{Q}_L$   
hier Umrechnen in  $\ddot{Q}_{RV}$   
nach (\*2 von S.29)

Weiteres mit (\*5 & \*6 von S.29)  
dividiert nach (\*7 von S.29)

~~$$\begin{aligned}
 (*5 \text{ von S.29}) \Rightarrow \dot{Q}_L &= \dot{Q} \cdot \frac{\frac{1}{Z_L} + \frac{1}{Z_{RV}}}{\frac{1}{Z_L} + \frac{1}{Z_{RV}} + \frac{1}{R_V}} = \dot{Q} \cdot \frac{\frac{1}{Z_L} + \frac{1}{Z_{RV}}}{\frac{1}{Z_L} + \frac{1}{Z_{RV}} + \frac{1}{R_V}} \Rightarrow \dot{Q} = \frac{\dot{Q}_L \cdot R_V - L\ddot{Q}_L}{R_V} \\
 &\quad \text{auflösen (siehe *1 von S.29)}
 \end{aligned}$$~~

das Brauch ich nicht.

Wird  $\ddot{Q}_L$  und  $\ddot{Q}_L$  nebeneinander kommt, kann ich nicht alles nach  $\dot{Q}$  oder  $\ddot{Q}$  auflösen.

Deshalb muß ich doch die Dgl in  $Q_L(t)$  stehen lassen, wie es in (\*1 von S.30) der Fall ist.

Sackpasse.

S.h., ich löse die Dpl in  $Q_L(t)$  gemäß (\*3 von S.30) mit der zugehörigen Berechnung der entnommenen Leistung nach (\*2 von S.30) und  
 → Einbau der Dpl und Lösen mit dem JFEM-Algorithmus  
 Nach den Klausuren habe ich den Text verloren, also nehme ich das letzte File "param-optimieren-10" und  
 ziehe eine Kopie davon, mit der ich arbeite → diese Arbeitskopie heißt "param-optimieren-11"

Die Algorithmen sind jetzt die Bezeichnungen

$$\begin{aligned} Q[i] &\hat{=} Q_L(t) && \text{Ladung über der Spule!} \\ Q_p[i] &\hat{=} \dot{Q}_L(t) && \text{deren Ableitung} \\ Q_{pp}[i] &\hat{=} \ddot{Q}_L(t) && \text{nochmals ableiten} \end{aligned}$$

mit Index L

für die Dpl (\*3 von S.30)

$$\begin{aligned} Q_m[i] &\hat{=} Q(t) \\ Q_{mp}[i] &\hat{=} \dot{Q}(t) \\ Q_{mpp}[i] &\hat{=} \ddot{Q}(t) \end{aligned}$$

ohne Index L

das kann man umrechnen nach (\*5, \*6 von S.29)

Die Größen in der Klamme muß ich dann umrechnen gemäß

Um (\*3 von S.30) einsetzen zu können, muß ich diese Dpl erst explizit nach  $\ddot{Q}_L$  auflösen. Ich brauche es in der expliziten Form.

$$\ddot{Q}_L = \frac{-L \cdot \dot{Q}_L + R_V \cdot Q_L + R \cdot C \cdot R_V \cdot \dot{Q}_L - C \cdot R_V \cdot U_0(t)}{C \cdot L - (R + R_V)}$$

zu JFEM-Ago

Mit dem rechts stehenden Konsistenztest  
 muß ich also in JFEM-Ago für  $R_V \rightarrow \infty$   
 der bisherige alte Lauf ohne Leistungsent-  
 nahme aus der Spule reproduzieren lassen.

$$\ddot{Q}_L = \frac{-1}{C \cdot (R + R_V)} \ddot{Q}_L + \frac{1}{C \cdot L} \cdot \frac{R_V}{R + R_V} \dot{Q}_L + \frac{R}{L} \cdot \frac{R_V}{R + R_V} \dot{Q}_L - \frac{1}{L} \cdot \frac{R_V}{R + R_V} \cdot U_0(t)$$

neue hier zu = getrennter Term für Leistungsentnahme  
 entspricht  $\frac{R}{L} \cdot \dot{Q}$  in (\*2) ohm'scher Widerstand des Spulendrades  
 entspricht  $-\frac{U_0}{L}$  in (\*2) Spannung

$$\text{Test: } \lim_{R_V \rightarrow \infty} \ddot{Q}_L = -\frac{U_0}{L} + \frac{R \dot{Q}_L + \frac{Q_L}{LC}}{L}$$

MathCAD  
 Konsistenzüberprüfung

$$\Rightarrow -L \ddot{Q}_L = U_0 - R \dot{Q}_L - \frac{Q_L}{C}$$

Umformung  
 $+R \dot{Q}_L + \frac{Q_L}{C}$

$$\Rightarrow -L \ddot{Q}_L + R \dot{Q}_L + \frac{Q_L}{C} = U_0(t)$$

Das reproduziert tatsächlich unsere einfache alte Dpl (\*1 von S.10) ohne Energieentnahme aus der Spule, weil für  $R_V \rightarrow \infty$  keine Energie entnommen wird und  $Q = Q_L$  wird. Der Konsistenztest ist also erfolgreich verlaufen.

(\*3)

Eingetippt im Algorithmus habe ich dann diese Formel (\*3) hier. Das ist übersichtlicher zu tippen im Pascal als (\*1).



- Damit fahre ich jetzt den in der Klammer in Serie geschalteten Lastwiderstand herunter ( $R_{last}$ ) und bringe anstelle dessen den parallel geschalteten  $R_v$  (für Jod und Sekundärspule) zur Leistungsentnahme ein. Die mechanische Last & Leistungsentnahme aus der Oszillation der Kondensatorplatten kann dann auf reduziert werden.
- Die Leistungsentnahme über die Sekundärspule geht nach  $(x^2 \text{ von } 5.30) \rightarrow$  Ich programmiere das so in den AGo ein.
- Nun fahre ich den Lastwiderstand runter auf  $R_{last} = 620 \Omega$  und mache  $R_v = 10 \cdot 10^8 \Omega \Rightarrow$  median Leistungsentnahme:  $59.7 \text{ mWatt}$   
Sekundärspulen-Entnahme:  $1.09 \cdot 10^{-7} \text{ Watt}$

Das File heißt dann: "Mit Sekundärspule - 59 mW - dpr"

$\hookrightarrow$  Aber das ist nur die median Leistung  
Die elektr. Leistung ist nicht so groß.

Die Betrachtung des Systems geht wieder über die Excel-Kolumnen wie folgt:

- A: mediane Auslenkung
- B:  $Q_{LC} \rightarrow$  drückt nicht viel aus } nicht mehr
- C:  $P_{in} = P_{out} = \text{Leistung}$  } aussagekräftig
- D:  $E_{med} = \text{median Energie}$
- E:  $E_{el} = \text{el. Energie}$
- F:  $P_{out} = \text{Spannung } U_{sig}$

59.7 mWatt  
mechanisch.  
mechanische Leistung =  
aufnahme.

Da habe ich noch ein bißchen die  
Parameter optimiert  
 $\Rightarrow$  "Mit Sekundärspule - 63 mW - dpr"  
mit 63 mWatt mechanisch.

Was ich jetzt machen muß: Den Kondensator verkleinern und schauen, ob ich dann immer noch Energie herausbekomme  
herausbekomme  
"Mit Sekundärspule - 180 mWatt - dpr"

Über die Sekundärspule bekomme ich auch hier die Energie nicht vernünftig heraus  $\rightarrow$  180 mWatt heraus  
 $\rightarrow$  Das File heißt, wie ich elektrisch über den Trafo 180 mWatt herausbekomme  
 $\rightarrow$  Das heißt elektrisch wird über die Sekundärspulen.  
Offensichtlich geht die Leistungsentnahme elektrisch so schlecht, weil die schwingende Energie hauptsächlich  
mechanisch ist, aber nur ein geringer Teil elektrisch. Das ist vermutlich der Fall, weil L und C so unterschiedlich  
sind  $\rightarrow$  deshalb kann der elektr. Schwingkreis nicht viel Energie aufnehmen, und das Ding paßt sich mechanisch auf.

```

Var epo,muo      : Double; {Naturkonstanten}
    v            : Double; {Propagationsgeschwindigkeit der Ströme}
    CA,CD,C      : Double; {Platten-Kondensator: Plattenfläche, Plattenabstand, Kapazität}
    GG3          : Double; {Gleichgewichtsposition der flexiblen Platten, Teil 3, Federkraft=Coulombkraft}
    SP3          : Double; {Plattenabstand mit flexiblen Platten, Teil 3, mechanische Vorspannung}
    UC,UL{,UR}   : Double; {Spannung über Kondensator, Spule, Widerstand}
    SN,SL,SA,SR  : Double; {Luft-Spule: Windungszahl, Spulenlänge, Querschnittsfläche, Spulen-Radius}
    L            : Double; {Induktivität der Luft-Spule}
    DL           : Double; {Drahtlänge des Spulendrahtes}
    epr,mur      : Double; {Epsilon_r und Mü_r für Kondensator und Spule}
    rho,R        : Double; {spezifischer und Ohm'scher Widerstand des Spulendrahtes}
    AD           : Double; {Querschnittsfläche des Spulendrahtes}
    Q,Qp,Qpp     : Array[0..200000] of Double; {Ladung auf dem Kondensator als Fkt der Zeit}
    x,xp,xpp     : Array[0..200000] of Double; {Auslenkung jeder einzelnen Kondensatorplatte}
    Eel,Emech    : Array[0..200000] of Double; {Elektrische und mechanische Energie in der Schwingung}
    Esum         : Array[0..200000] of Double; {Insgesamt in die Schwingung zugeführte Energie als Fkt der Zeit}
    Pin          : Array[0..200000] of Double; {Elektrische Leistung im Input der Anregung}
    Pent,Eent    : Array[0..200000] of Double; {Mechanische Leistungs-Entnahme und Energie-Entnahme}
    Pse          : Array[0..200000] of Double; {Leistungs-Entnahme über die Sekundär-Spule}
    Utrig        : Array[0..200000] of Double; {Spannung bei Bewegungstriggerung}
    dt           : Double; {Zeitschritte}
    N            : LongInt; {Anzahl der Zeitschritte insgesamt}
    i,j          : LongInt; {Laufvariable zum Durchzählen der Zeitschritte}
    Abstd        : Integer; {Jeder wievielte Punkte soll geplottet werden}
    rhoAL,rhoFol : Double; {Dichte von Aluminium und Folie}
    dAL,dFol     : Double; {Dicke der Aluminium-Kondensatorplatten und der Folie}
    D            : Double; {Federsteifigkeit der Federn zwischen den Kondensatorplatten}
    m            : Double; {(mechanische) Masse der Aluminium-Kondensatorplatten}
    omfol,fFol   : Double; {Eigenkreisfrequenz und Eigenfrequenz der Kondensatorplatten-Schwingung}
    F            : Double; {Anziehungskraft zwischen den Kondensatorplatten}
    Stern1       : Double; {Hilfsvariable}
    FC,Fd        : Double; {Kräfte: Coulombkraft und Federkraft}
    Flast,Fges   : Double; {Kraft zur mechanischen Leistungsentnahme und Gesamtkraft}
    MacheFiles   : Boolean; {Sollen die Ergebnisse auf die Magnetplatte geschrieben werden ?}
    om           : Double; {Kreisfrequenz Omega}
    Rlast        : Double; {Elektrischer Lastwiderstand}
    Uo4,OmE4     : Double; {Spannungsamplitude und Anregungsfrequenz für erzwungene Schwingung, Teil4}
    R4,L4,C4     : Double; {Werte spezielle für Teil4}
    Uin          : Double; {Input-Spannung von Teil 5}
    dtmerk       : Double; {Zum Merken der Parameter-Eingabe-Werte}
    Nmerk        : LongInt; {Zum Merken der Parameter-Eingabe-Werte}
    Teil7        : Boolean; {Sollen wir gleich Teil_7 rechnen ?}
    etamech,etael : Double; {Wirkungsgrade}
    Pentmittel   : Double; {Mittlere mechanischen Leistungs-Entnahme}
    ES,xx        : Double; {Hilfsvariablen für Energie im Schwinger und Mechanische Lastermittlung}
    obUm,unUm    : LongInt; {Umkehrpunkte oben und unten für die Triggerung der Input-Signale}
    Reibung      : Boolean; {Ist Reibung eingeschaltet ?}
    Ianf         : Integer; {Anfang der Leistungsentnahme}
    Rv           : Double; {Verbraucher-Widerstand zur Leistungsentnahme aus der Spule}
    Psekmittel   : Double; {Mittlere Leistungs-Entnahme über die Sekundär-Spule}

```

Label Raus;

Procedure Wait;

Var Ki : Char;

begin

Write('<W>'); Read(Ki); Write(Ki);

If Ki='e' then Halt;

end;

Procedure Excel\_Datenausgabe(Name:String);

Var fout : Text; {Daten-File zum Aufschreiben der Ergebnisse}

Zahl : String;

lv,j : Integer; {Laufvariable}

A0 : Double; {abklingende Amplitude der gedämpften Schwingung}

begin {Daten für Excel aufbereiten und ausgeben:}

Assign(fout,Name); Rewrite(fout); {File öffnen}

For lv:=0 to N do {von "plotanf" bis "plotend"}

begin

If (lv mod Abstd)=0 then

begin

{ Zuerst die Zeit als Argument:}

Str(lv\*dt\*1e6{nano\_sec.}:14:10,Zahl);

For j:=1 to Length(Zahl) do

begin {Keine Dezimalpunkte verwenden, sondern Kommata}

If Zahl[j]<>'.' then write(fout,Zahl[j]);

If Zahl[j]='.' then write(fout,',');

end;

Write(fout,chr(9)); {Daten-Trennung}

{ Dann als (erste) Funktion die Spannung über dem Kondensator:}

Str(Q[lv]:14:7,Zahl);

If (Name='Teil\_04.dat') then Str(Q[lv]/C4{Volt}:14:7,Zahl); {Bei Teil 4 ist durch "C4" zu teilen}

If (Name='Teil\_05.dat') then Str(Q[lv]/C{Volt}:14:7,Zahl); {Bei Teil 5 ist durch "C" zu teilen.}

If (Name='Teil\_06.dat') then Str(Q[lv]/C{Volt}:14:7,Zahl); {Bei Teil 6 ist durch "C" zu teilen.}

If (Name='Teil\_07.dat') then Str(Q[lv]/C{Volt}:14:7,Zahl); {Bei Teil 7 ist durch "C" zu teilen.}

For j:=1 to Length(Zahl) do

begin {Keine Dezimalpunkte verwenden, sondern Kommata}

```

    If Zahl[j]<>'.' then write(fout,Zahl[j]);
    If Zahl[j]='.' then write(fout,',');
end;
Write(fout,chr(9)); {Daten-Trennung}
{
Dann als (zweite) Funktion die Einhüllende der abklingenden Schwingung:}
A0:=Q[0]/C/sin(arctan(sqrt(1/L/C-R*R/4/L/L)/(R/2/L))); {klassische}
Str(A0*exp(-R/2/L*lv*dt){Volt}:20:10,Zahl); {Formeln}
If (Name='Teil_04.dat') then Str(Pin[lv]{Watt}:14:7,Zahl); {Bei Teil 5: Input-Leistung anschauen}
If (Name='Teil_05.dat') then Str(Pin[lv]{Watt}:14:7,Zahl); {Bei Teil 5: Input-Leistung anschauen}
If (Name='Teil_06.dat') then Str(Pin[lv]{Watt}:14:7,Zahl); {Bei Teil 6: Input-Leistung anschauen}
If (Name='Teil_07.dat') then Str(Pin[lv]{Watt}:14:7,Zahl); {Bei Teil 7: Input-Leistung anschauen}
For j:=1 to Length(Zahl) do
begin {Keine Dezimalpunkte verwenden, sondern Kommata}
    If Zahl[j]<>'.' then write(fout,Zahl[j]);
    If Zahl[j]='.' then write(fout,',');
end;
Writeln(fout,''); {Zeilen-Trennung}
end;
end;
Close(fout);
end;

Procedure Excel_Ausgabe_Teil3(Name:String);
Var fout : Text; {Daten-File zum Aufschreiben der Ergebnisse}
    Zahl : String;
    lv,j : Integer; {Laufvariable}
begin {Daten für Excel aufbereiten und ausgeben:}
    Assign(fout,Name); Rewrite(fout); {File öffnen}
    For lv:=0 to N do {von "plotanf" bis "plotend"}
    begin
        If (lv mod Abstd)=0 then
        begin
            {
            Kolumne A: Zuerst die Zeit als Argument:}
            Str(lv*dt*1e6{nano_sec.}:14:10,Zahl);
            If (Name='Teil_07.dat') then Str(Pent[lv]{Volt}:14:7,Zahl); {Bei Teil 8: mechanische Entnahme.}
            {##} If (Name='Teil_07.dat') then Str(x[lv]:14:7,Zahl); {Bei Teil 9: mechanische Auslenkung.}
            For j:=1 to Length(Zahl) do
            begin {Keine Dezimalpunkte verwenden, sondern Kommata}
                If Zahl[j]<>'.' then write(fout,Zahl[j]);
                If Zahl[j]='.' then write(fout,',');
            end;
            Write(fout,chr(9)); {Daten-Trennung}
            {
            Kolumne B: Erste Funktion}
            Str(x[lv]-0.001{Volt}:20:14,Zahl); {-0.001 Offset zur besseren Darstellung}
            If (Name='Teil_05.dat') then Str(Q[lv]/C{Volt}:14:7,Zahl); {Bei Teil 5 ist durch "C" zu teilen.}
            If (Name='Teil_06.dat') then Str(Q[lv]/C{Volt}:14:7,Zahl); {Bei Teil 6 ist durch "C" zu teilen.}
            If (Name='Teil_07.dat') then Str(Q[lv]/C{Volt}:14:7,Zahl); {Bei Teil 7 ist durch "C" zu teilen.}
            For j:=1 to Length(Zahl) do
            begin {Keine Dezimalpunkte verwenden, sondern Kommata}
                If Zahl[j]<>'.' then write(fout,Zahl[j]);
                If Zahl[j]='.' then write(fout,',');
            end;
            Write(fout,chr(9)); {Daten-Trennung}
            {
            Kolumne C: Zweite Funktion}
            Str(Q[lv]*1e6*0.25{Volt}:20:14,Zahl); {*0.25 Skalierung zur besseren Darstellung}
            If (Name='Teil_05.dat') then Str(Pin[lv]{Watt}:14:7,Zahl); {Bei Teil 5: Input-Leistung anschauen}
            If (Name='Teil_06.dat') then Str(Pin[lv]{Watt}:14:7,Zahl); {Bei Teil 6: Input-Leistung anschauen}
            If (Name='Teil_07.dat') then Str(Pin[lv]{Watt}:14:7,Zahl); {Bei Teil 7: Input-Leistung anschauen}
            For j:=1 to Length(Zahl) do
            begin {Keine Dezimalpunkte verwenden, sondern Kommata}
                If Zahl[j]<>'.' then write(fout,Zahl[j]);
                If Zahl[j]='.' then write(fout,',');
            end;
            Write(fout,chr(9)); {Daten-Trennung}
            {
            Kolumne D: Dritte Funktion: mechanische Energie}
            Str(Emech[lv]{Joule}:20:14,Zahl);
            For j:=1 to Length(Zahl) do
            begin {Keine Dezimalpunkte verwenden, sondern Kommata}
                If Zahl[j]<>'.' then write(fout,Zahl[j]);
                If Zahl[j]='.' then write(fout,',');
            end;
            Write(fout,chr(9)); {Daten-Trennung}
            {
            Kolumne E: Vierte Funktion: elektrische Energie}
            Str(Eel[lv]{Joule}:20:14,Zahl);
            For j:=1 to Length(Zahl) do
            begin {Keine Dezimalpunkte verwenden, sondern Kommata}
                If Zahl[j]<>'.' then write(fout,Zahl[j]);
                If Zahl[j]='.' then write(fout,',');
            end;
            Write(fout,chr(9)); {Daten-Trennung}
            {
            Kolumne F: Fünfte Funktion: Energiesumme}
            Str(Emech[lv]+Eel[lv]{Joule}:20:14,Zahl);
            If (Name='Teil_05.dat') then Str(Esum[lv]{Watt}:14:7,Zahl); {Bei Teil 5: Zugeführte Energiesumme anschauen}
            If (Name='Teil_06.dat') then Str(Esum[lv]{Watt}:14:7,Zahl); {Bei Teil 6: Zugeführte Energiesumme anschauen}
            If (Name='Teil_07.dat') then Str(Esum[lv]{Watt}:14:7,Zahl); {Bei Teil 7: Zugeführte Energiesumme anschauen}
            {##} If (Name='Teil_07.dat') then Str(Utrig[lv]/100{Watt}:14:7,Zahl); {Bei Teil 9: Input-Spannung}
            For j:=1 to Length(Zahl) do
            begin {Keine Dezimalpunkte verwenden, sondern Kommata}
                If Zahl[j]<>'.' then write(fout,Zahl[j]);
                If Zahl[j]='.' then write(fout,',');
            end;
            Writeln(fout,''); {Zeilen-Trennung}
        }
    end;
end;

```

```

end;
end;
Close(fout);
end;

Procedure Excel_Raumenergieausgabe(Name:String);
Var fout : Text; {Daten-File zum Aufschreiben der Ergebnisse}
    Zahl : String;
    lv,j : Integer; {Laufvariable}
begin {Daten für Excel aufbereiten und ausgeben;}
    Assign(fout,Name); Rewrite(fout); {File öffnen}
    For lv:=0 to N do {von "plotanf" bis "plotend"}
    begin
        If (lv mod Abstd)=0 then
        begin
            {Zuerst die Zeit als Argument;}
            Str(lv*dt*1e6{nano_sec.}:14:10,Zahl);
            For j:=1 to Length(Zahl) do
            begin {Keine Dezimalpunkte verwenden, sondern Kommata}
                If Zahl[j]<>'.' then write(fout,Zahl[j]);
                If Zahl[j]='.' then write(fout,',');
            end;
            Write(fout,chr(9)); {Daten-Trennung}
            {Dann als (erste) Funktion die Spannung über dem Kondensator;}
            Str(x[lv]{Volt}:14:7,Zahl);
            For j:=1 to Length(Zahl) do
            begin {Keine Dezimalpunkte verwenden, sondern Kommata}
                If Zahl[j]<>'.' then write(fout,Zahl[j]);
                If Zahl[j]='.' then write(fout,',');
            end;
            Writeln(fout,''); {Zeilen-Trennung}
        end;
    end;
    Close(fout);
end;

Procedure Excel_eine_Kolumne(Name:String);
Var fout : Text; {Daten-File zum Aufschreiben der Ergebnisse}
    Zahl : String;
    lv,j : Integer; {Laufvariable}
begin {Daten für Excel aufbereiten und ausgeben;}
    Assign(fout,Name); Rewrite(fout); {File öffnen}
    For lv:=0 to N do {von "plotanf" bis "plotend"}
    begin
        If (lv mod Abstd)=0 then
        begin
            Str(x[lv]{Volt}:20:14,Zahl); {Hier trage ich das zu plottende Feld ein.}
            For j:=1 to Length(Zahl) do
            begin {Keine Dezimalpunkte verwenden, sondern Kommata}
                If Zahl[j]<>'.' then write(fout,Zahl[j]);
                If Zahl[j]='.' then write(fout,',');
            end;
            Writeln(fout,''); {Zeilen-Trennung}
        end;
    end;
    Close(fout);
end;

Function Plapos(z:LongInt):Double; {Iterative Ermittlung der Position der Kondensatorplatten.}
Var xs : Double; {Startwert}
    sw : Double; {Schrittweite}
    an,ab : Boolean;
begin
    xs:=0;
    If z=0 then xs:=CD/2; {Die Position der beiden Platten liegt bei +/-xs.}
    If z>0 then xs:=x[z-1]; {Dies kann ggf. vom vorigen Arbeitsschritt übernommen werden.}
    sw:=xs/20;
    Repeat
        sw:=sw/10;
        an:=false; ab:=false;
        Repeat
            Fc:=1/4/pi/epo*q[z]*q[z]/(2*xs)/(2*xs);
            Fd:=D*(xs-CD/2); {Die Feder wird gegenüber CD ausgelenkt.}
            If Fc+Fd>0 then begin xs:=xs-sw; an:=true; end;
            If Fc+Fd<0 then begin xs:=xs+sw; ab:=true; end;
            If xs<=1e-10 then
            begin
                Writeln ('Plattenberuehrung. Coulombkraft ist zu stark. Algorithmus abgebrochen. ');
                Wait; Wait; Halt;
            end;
        Until (an and ab);
    Until (sw<xs/1e14);
    Plapos:=xs;
end;

Procedure Leistung_berechnen; {Über dem Lastwiderstand "Rlast", als Integralmittelwert}
Var i : Integer;
    P : Double; {Leistung im Zeitintervall dt}
    Eges: Double; {Gesamtenergie über den gesamten Zeitraum}
begin
    Eges:=0;
    For i:=0 to N do

```

```

begin
  P:=+Rlast*Qp[i]*Qp[i];
  Eges:=Eges+P*dt;
end;
Writeln('Eges= ',Eges, ' Joule in ',N*dt,' sec. ');
Writeln('=> Leistung Pmittel= ',Eges/(N*dt),' Watt am Lastwiderstand');
etael:=Eges/(N*dt);
end;

Procedure EnergieMaxima;
Var i : Integer;
    EgesM1,EgesOO,EgesP1 : Double;
    Erste,Letzte : Double;
    Neu : Boolean;
begin
  Writeln(' Amplituden-Zunahme: '); Neu:=true; Erste:=0; Letzte:=0;
  For i:=1 to N-1 do
    begin
      EgesM1:=Emech[i-1]+Eel[i-1];
      EgesOO:=Emech[i+0]+Eel[i+0];
      EgesP1:=Emech[i+1]+Eel[i+1];
      If (EgesM1<=EgesOO)and(EgesOO>=EgesP1) then
        begin
          Writeln(i,' : ',x[i],' => ',EgesOO);
          If Neu then begin Erste:=EgesOO; Neu:=false; end;
          Letzte:=EgesOO;
        end;
      end;
    end;
  Writeln; Writeln('Gewonnene mechanische Schwingungsenergie: ');
  Writeln(Letzte-Erste,' Joule => Leistung: ',(Letzte-Erste)/(N*dt),' Watt. ');
  etamech:=(Letzte-Erste)/(N*dt);
end;

Procedure Zugefuehrte_Leistung_mitteln;
Var lv : LongInt;
    Psum : Double;
begin
  Psum:=0;
  For lv:=0 to N do Psum:=Psum+Pin[lv];
  Writeln('Leistungs-Mittel: ',Psum/(N+1),' Watt, Input aus Spannungsquelle');
  etamech:=etamech/(Psum/(N+1));
  etael:=etael/(Psum/(N+1));
end;

Function U5(t:Double):Double;
Var merk : Double;
    Pulsform : String;
begin
  Pulsform:='Sinus'; merk:=0;
  If Pulsform='Sinus' then
    begin
      Uo4:=12;{Volt} OmE4:=8680;{s^-1} {Werte zum Testen}
      merk:=Uo4*sin(OmE4*t);
    end;
  If Pulsform='Rechteck' then
    begin
      Uo4:=12;{Volt} OmE4:=8680;{s^-1} {Werte zum Testen}
      merk:=0;
      If (0<sin(OmE4*t))and(sin(OmE4*t)<0.1) then merk:=Uo4;
    end;
  U5:=merk;
end;

Procedure Spannung_auf_Oszi;
Var fout : Text; {Daten-File zum Aufschreiben der Ergebnisse}
    Zahl : String;
    lv,j : Integer; {Laufvariable}
begin {Daten für Excel aufbereiten und ausgeben;}
  Assign(fout,'U_von_t.dat'); Rewrite(fout); {File öffnen}
  For lv:=0 to N do {von "plotanf" bis "plotend"}
    begin
      { Zuerst die Zeit als Argument;}
      Str(lv*dt{sec.}:14:10,Zahl);
      For j:=1 to Length(Zahl) do
        begin {Keine Dezimalpunkte verwenden, sondern Kommata}
          If Zahl[j]<>'.' then write(fout,Zahl[j]);
          If Zahl[j]='.' then write(fout,',');
        end;
      Write(fout,chr(9)); {Daten-Trennung}
    end;
  { Dann als (erste) Funktion die Input-Spannung;}
  Str(U5(lv*dt){Volt}:14:7,Zahl);
  For j:=1 to Length(Zahl) do
    begin {Keine Dezimalpunkte verwenden, sondern Kommata}
      If Zahl[j]<>'.' then write(fout,Zahl[j]);
      If Zahl[j]='.' then write(fout,',');
    end;
  Writeln(fout,''); {Zeilen-Trennung}
end;
Close(fout);
end;

Function U6(t:Double):Double;

```

```

Var merk : Double;
    Pulsform : String;
begin
    Pulsform:='Rechteck';    merk:=0;
    If Pulsform='Sinus' then
    begin
        Uo4:=12;{Volt}      OmE4:=8680;{s^-1}      {Werte zum Testen}
        merk:=Uo4*sin(OmE4*t);
    end;
    If Pulsform='Rechteck' then
    begin
        Uo4:=12;{Volt}      OmE4:=8680;{s^-1}      {Werte zum Testen}
        merk:=0;
        If (0<sin(OmE4*t))and(sin(OmE4*t)<0.1) then merk:=Uo4;
    end;
    U6:=merk;
end;

Procedure Spannung_auf_Oszi_6;
Var fout : Text;      {Daten-File zum Aufschreiben der Ergebnisse}
    Zahl : String;
    lv,j : Integer; {Laufvariable}
begin {Daten für Excel aufbereiten und ausgeben;}
    Assign(fout,'U_von_t.dat'); Rewrite(fout); {File öffnen}
    For lv:=0 to N do {von "plotanf" bis "plotend"}
    begin
        {Zuerst die Zeit als Argument;}
        Str(lv*dt{sec.}:14:10,Zahl);
        For j:=1 to Length(Zahl) do
        begin {Keine Dezimalpunkte verwenden, sondern Kommata}
            If Zahl[j]<>'.' then write(fout,Zahl[j]);
            If Zahl[j]='.' then write(fout,',');
        end;
        Write(fout,chr(9)); {Daten-Trennung}
    end;
    {Dann als (erste) Funktion die Input-Spannung;}
    Str(U6(lv*dt){Volt}:14:7,Zahl);
    For j:=1 to Length(Zahl) do
    begin {Keine Dezimalpunkte verwenden, sondern Kommata}
        If Zahl[j]<>'.' then write(fout,Zahl[j]);
        If Zahl[j]='.' then write(fout,',');
    end;
    Writeln(fout,''); {Zeilen-Trennung}
end;
Close(fout);
end;

Function U7(t:Double):Double;
Var Umerk : Double; {Spannung merken}
    Pulsform : String;
    Pulsdauer : LongInt;
    Phasenshift : Double; {Phasendifferenz zwischen obUm und Spannungs-Impuls}
begin
    Pulsform:='Trigger';    Umerk:=0;
    Phasenshift:=8;      Phasenshift:=(100*dt);
    If Reibung then Phasenshift:=Phasenshift*1.00; {zur Anpassung der Phasenlage an die Bewegung mit Reibung}
    If Pulsform='Trigger' then
    begin
        Uo4:=0.1;{Volt}      Pulsdauer:=500;      {Wert zum Testen}
        If i<=Pulsdauer then Umerk:=Uo4/10;      {Start-Impuls geben}
        If i>=Pulsdauer then      {Getriggerte Pulse im Betrieb geben}
        begin
            If xp[i-1]*xp[i]<0 then      {Umkehrpunkte der Bewegung bestimmen}
            begin
                If x[i]>SP3 then begin obUm:=i; Writeln(i,' obUM bei ',x[i]); end;
                If x[i]<SP3 then begin unUm:=i; Writeln(i,' unUM'); end;
            end;
            If (i>=obUm+Phasenshift)and(i<=(obUm+Pulsdauer+Phasenshift)) then
            begin
                Umerk:=Uo4;      {Spannung anlegen}
            end;
        end;
    end;
    If Pulsform='Sinus' then
    begin
        Uo4:=0.05;{Volt}      OmE4:=4.6;{s^-1}      {Werte zum Testen}
        Umerk:=Uo4*sin(OmE4*t);
    end;
    If Pulsform='Rechteck' then
    begin
        Uo4:=12;{Volt}      OmE4:=34.6;{s^-1}      {Werte zum Testen}
        Umerk:=0;
        If (0<sin(OmE4*t))and(sin(OmE4*t)<0.25) then Umerk:=Uo4;
    end;
    { If i>N/2 then Umerk:=0; {Kann bei Bedarf zugeschaltet werden: Nur den Anfang der Bewegung anregen.}
    U7:=Umerk;
end;

Procedure Spannung_auf_Oszi_7;
Var fout : Text;      {Daten-File zum Aufschreiben der Ergebnisse}
    Zahl : String;
    lv,j : Integer; {Laufvariable}
begin {Daten für Excel aufbereiten und ausgeben;}

```

```

Assign(fout,'U_von_t.dat'); Rewrite(fout); {File öffnen}
For lv:=0 to N do {von "plotanf" bis "plotend"}
begin
  If (lv mod Abstd)=0 then
  begin
    {Zuerst die Zeit als Argument:}
    Str(lv*dt(sec.):14:10,Zahl);
    For j:=1 to Length(Zahl) do
    begin {Keine Dezimalpunkte verwenden, sondern Kommata}
      If Zahl[j]<>'.' then write(fout,Zahl[j]);
      If Zahl[j]='.' then write(fout,',');
    end;
    Write(fout,chr(9)); {Daten-Trennung}
  end;
  {Dann als (erste) Funktion die Input-Spannung:}
  Str(U7(lv*dt){Volt}:14:7,Zahl);
  For j:=1 to Length(Zahl) do
  begin {Keine Dezimalpunkte verwenden, sondern Kommata}
    If Zahl[j]<>'.' then write(fout,Zahl[j]);
    If Zahl[j]='.' then write(fout,',');
  end;
  Writeln(fout,''); {Zeilen-Trennung}
end;
end;
Close(fout);
end;

Procedure Mechanische_Energie_Entnahme;
Var lv : LongInt;
begin
  Pentmittel:=0;
  For lv:=Ianf to N do Pentmittel:=Pentmittel+Pent[lv];
  Pentmittel:=Pentmittel/(N-Ianf);
end;

Procedure Insgesamt_zugefuehrte_Energie_berechnen;
Var lv : LongInt;
begin
  Esum[0]:=Pin[0]*dt;
  For lv:=1 to N do Esum[lv]:=Esum[lv-1]+Pin[lv]*dt;
end;

Procedure Leistungsmittel_ueber_Sekundaerspule;
Var lv : LongInt;
begin
  Psekmittel:=0;
  For lv:=Ianf to N do Psekmittel:=Psekmittel+Pse[lv];
  Psekmittel:=Psekmittel/(N-Ianf);
end;

Begin {Hauptprogramm}
{ Initialisierung - Vorgabe der Werte: }
{ Allgemeine Werte: }
epo:=8.854187817E-12{As/Vm}; {Magnetische Feldkonstante}
muo:=4*pi*1E-7{Vs/Am}; {Elektrische Feldkonstante}
v:=Sqrt(1/muo/epo){m/s}; {Zunächst Lichtgeschw. als Bewegungsgeschw. der Ladungen}
Abstd:=8; {Jeder wievielte Punkte soll geplottet werden}
{ Kondensator: }
CA:=1.0; {0.1*0.1 m²}; CD:=0.002{m}; {Kondensator-Geometrie, Plattenfläche, Plattenabstand}
epr:=3; {Dielektrikum im Kondensator}
C:=epo*epr*CA/CD; {Kapazität des unverformten Platten-Kondensators}
{ Spule: }
SN:=34600; SL:=0.08{m}; SR:=0.05{m}; SA:=pi*SR*SR{m²}; {Spulen-Geometrie}
mur:=1200; {Spulenkern ist nötig, zur Abstimmung der Frequenz}
L:=muo*mur*SN*SN*SA/SL; {Induktivität}
rho:=1.7E-8{Ohm*m}; {Spez. Widerstand von Kupfer, je nach Temperatur, Kohlrausch,T193}
AD:=pi*0.0002*0.0002{m²}; {Querschnittsfläche des Spulendrahtes}
R:=rho*2*pi*SR*SN/AD{Ohm}; {Ohm'scher Widerstand des Spulendrahtes}
DL:=SN*2*pi*SR; {Drahtlänge des Spulendrahtes}
{ Mechanische Schwingung der Kondensatorplatten: }
rhoAL:=2700{kg/m³}; {19300 für Wolfram, ansonsten: 2700 für Aluminium}
rhoFol:=2000{kg/m³}; {Dichte der Kunststoff-Folie}
dAL:=5000E-6{m}; {Dicke der Metall-Kondensatorplatten}
dFol:=1E-6{m}; {Dicke der Kunststoff-Folie}
D:=12000{N/m}; {Federsteifigkeit der Federn zwischen den Kondensatorplatten}
m:=CA*dAL*rhoAL+CA*dFol*rhoFol; {(mechanische) Masse der Aluminium-Kondensatorplatten}
omFol:=Sqrt(D/m); {Schwingungs-Eigenkreisfrequenz der Kondensatorplatten_Folie}
fFol:=omFol/2/pi; {Schwingungseigenfrequenz der Kondensatorplatten_Folie}
{ Bewußte Erzeugung von Leistung: }
Rlast:=1E-10; {früher 10 kiloOhm} {Elektrischer Lastwiderstand}
Rv:=300E6; {Verbraucher-Widerstand zur Leistungsentnahme aus der Spule}
{ Start der elektrischen Schwingung: }
Q[0]:=1E-20; {160.2E-10{Coulomb}; Qp[0]:=0; Qpp[0]:=0; {Ladung auf dem Kondensator zu Beginn}
UC:=Q[0]/C{V}; {Spannung über dem Kondensator zu Beginn, das Dielektrikum isoliert}
dt:=100E-6{sec.}; {Zeitschritte}
N:=200000; {Anzahl der Zeitschritte insgesamt}
dtmerk:=dt; Nmerk:=N; {Merken der Input-Werte}
{ Start der mechanischen Schwingung: }
x[0]:=Plapos(0); {Iterative Ermittlung der Position der Kondensatorplatten.}
GG3:=x[0]; {Gleichgewichtsposition der flexiblen Platten, Teil 3, Federkraft=Coulombkraft}
SP3:=CD/2; {Vorgabe:Plattenabstand mit flexiblen Platten, Teil 3, mechanische Vorspannung}
F:=1/4/pi/epo*Q[0]*Q[0]/(2*x[0])/(2*x[0]); {Anziehung nach dem Coulomb-Gesetz}
{Der Ort jeder Platte liegt bei CD/2+x[i]}

```

```

xp[0]:=0; xpp[0]:=0; {Festhalten der Platten bis zum Zeitpunkt t=0}
MacheFiles:=true; {Sollen die Ergebnisse auf die Magnetplatte geschrieben werden ?}
Teil7:=true;
obUm:=0; unUm:=0; {Initialisierung der Umkehrpunkte für die Triggerung der Input-Impulse}
Reibung:=false;

{ Anzeigen der Startwerte:}
Writeln('DFEM-Berechnung des LC - Schwingkreises:'); Writeln;
Writeln('epo=',epo:20,'; muo=',muo:20,'; v=',v:20);
Writeln('C=',C:20,' Farad; L=',L:20,' Henry');
Writeln('Klass. Schwingkreis, Eigenfrequ. fo=2*pi/Sqrt(L*C)=',2*pi/Sqrt(L*C),' Hz');
Writeln('=> Schwingungsdauer T=1/fo=',2*pi*Sqrt(L*C),' sec. ');
Writeln('Ohm'scher Widerstand des Spulendrahtes:',R,' Ohm');
Writeln('Drahtlaenge des Spulendrahtes:',DL,' Meter');
Writeln('Querschnittsfläche des Spulendrahtes:',AD*1e6:10:5,' mm^2');
Writeln('Volumen der Spule: ',DL*AD*1E6:10:5,' cm^3');
Writeln('Gewicht der Spule: ',DL*AD*1E6*8.92:10:5,' Gramm'); {Dichte Cu: 8.92 g/cm^3}
Writeln('Spannung ueber dem Kondensator zu Beginn:',UC:12:5,' Volt');
Writeln('Ges. Zeitspanne der Berechnung: ',N*dt,' sec. in ',N,' Schritten');
Writeln; Writeln('Daten der mechanischen Schwingung der Kondensatorplatten:');
Writeln('Masse der Kondensatorplatten m= ',m*1000:10:5,' Gramm');
Writeln('Schwingungseigenfrequenz der Kondensatorplatten: fFol= ',fFol:10:7,' Hz. ');
Writeln('Anziehung jeder Kondensatorplatte zu Beginn: Kraft F= ',F,' N');
Writeln('Verformung jeder Kondensatorplatte zu Beginn: F/D= ',F/D,' m');
Writeln('Plattenposition der ungeladenen Kondensatorplatten: ',CD/2);
Writeln('Plattenposition, geladen, zu Beginn: X[0]: ',X[0]);
Writeln('Genauigkeit der Plattenposition => Differenzkraft: ',Fc+Fd,' N');
Writeln('Startposition der Platten für die Schwingg, Teil 3: ',SP3:10:7,' m');
Writeln('Kapazitaet des unverformten Kondensators: C= ',epo*epr*CA/CD,' Farad');
Writeln('Kapazitaet des verformten Kondensators: C[0]= ',epo*epr*CA/(2*x[0]),' Farad');
Writeln('Dabei: Erhöhung der Kapazitaet um ',epo*epr*CA*(1/2/x[0]-1/CD),' Farad');
Writeln('Gesamtdauer der Berechnung: ',N*dt,' sec. ');
Writeln; {Wait;}

{ Beginn des Rechenprogramms.}
If Not(Teil7) then
begin
Writeln('1. Teil -> Klassische Harmonische Schwingung, ohne Dämpfung:');
Writeln(' t/[sec.] | Uc/[V] | ');
For i:=1 to N do
begin
UC:=Q[i-1]/C; UL:=-UC;
Qpp[i]:=UL/L;
Qp[i]:=Qp[i-1]+Qpp[i]*dt;
Q[i]:=Q[i-1]+Qp[i]*dt;
{ Writeln(i*dt:11:9,' | ',Q[i]/C:7:2,' | '); }
end;
If MacheFiles then Excel_Datenausgabe('Teil_01.dat'); Writeln;
end;
{-----}

If Not(Teil7) then
begin
Writeln('2. Teil -> Klassische Gedaempfte Schwingung, mit Ohm'schem Widerstand:');
Writeln(' t/[sec.] | Uc/[V] | '); { R:=2000; {Erhöhter Widerstandswert zum Testen} }
For i:=1 to N do
begin
Qpp[i]:=-1/L/C*Q[i-1]-R/2/L*Qp[i-1];
{ Qp[i]:=(Qp[i-1]+Qpp[i]*dt)/(1+R/L*dt); } {alternative einfachere Näherung}
Qp[i]:=Qp[i-1]+(Qpp[i]-R/2/L*Qp[i-1])*dt; {vgl. s=1/2*a*t^2}
Q[i]:=Q[i-1]+Qp[i]*dt;
{ Writeln(i*dt:11:9,' | ',Q[i]/C:7:2,' | '); }
end;
If MacheFiles then Excel_Datenausgabe('Teil_02.dat'); Writeln;
end;
{-----}

If Not(Teil7) then
begin
Writeln('3. Teil -> Schwingung mit geladenem Kondensator noch ohne Raumenergie-Wandlung');
{ Writeln(' t/[sec.] | x/[m] | Q[i]'); }
x[0]:=SP3; {Startposition der Kondensatorplatten für die mechanische Schwingung}
For i:=1 to N do
begin
Fd:=-D*(x[i-1]-CD/2); {Federkraft gegenüber CD}
Fc:=-Q[i-1]*Q[i-1]/4/pi/epo/(2*x[i-1])/(2*x[i-1]); {Coulombkraft}
xpp[i]:=(Fc+Fd)/m; {Beschleunigung}
xp[i]:=xp[i-1]+xpp[i]*dt;
x[i]:=x[i-1]+xp[i]*dt;
Emech[i]:=1/2*D*(x[i]-CD/2)*(x[i]-CD/2); {Federspann-Energie}
Emech[i]:=Emech[i]+1/2*(2*m)*xp[i]*xp[i]; {Kinetische Energie}
If x[i]<=1e-10 then
begin
Writeln ('Plattenberuehrung. Coulombkraft ist zu stark. Algorithmus abgebrochen. ');
Wait; Halt;
end;
C:=epo*epr*CA/(2*x[i]);
Qpp[i]:=-1/L/C*Q[i-1]-(R+Rlast)/2/L*Qp[i-1];
Qp[i]:=Qp[i-1]+(Qpp[i]-(R+Rlast)/2/L*Qp[i-1])*dt;
Q[i]:=Q[i-1]+Qp[i]*dt;
Eel[i]:=1/2*Q[i]*Q[i]/C; {elektrische Energie des Kondensators}
Eel[i]:=Eel[i]+1/2*L*Qp[i]*Qp[i]; {elektrische Energie der Spule}

```

```

{
    Writeln(i*dt:11:9, ' | ', x[i], ' | ', Q[i]);
end;
Emech[0]:=Emech[1]; Eel[0]:=Eel[1]; {In Näherung, damit es beim Plotten nicht stört.}
If MacheFiles then Excel_Ausgabe_Teil3('Teil_03.dat'); Writeln;
EnergieMaxima; Writeln; Writeln(' UND AM LASTWIDERSTAND:');
Leistung_berechnen;
end;
{-----}

If Not(Teil7) then
begin
    Writeln;
    Writeln('4.Teil -> Klass. erzwungene Schwingung, Ohm-Widerstand und Sinus-Anregung');
    R4:=70;{Ohm}      Uo4:=12;{Volt}      Ome4:=8680;{s^-1}      {Werte zum Testen}
    L4:=10E-3;{Henry}      C4:=1E-6;{Farad}      {Werte zum Testen}
    Pin[0]:=0;      {Initialisierung für Leistungsmessung}
    For i:=1 to N do
    begin
        Qpp[i]:=-1/L4/C4*Q[i-1]-R4/2/L4*Qp[i-1]+Uo4/L4*sin(Ome4*i*dt);
        { Qp[i]:=(Qp[i-1]+Qpp[i]*dt)/(1+R4/L4*dt); }      {alternative einfachere Näherung}
        Qp[i]:=Qp[i-1]+(Qpp[i]-R4/2/L4*Qp[i-1])*dt;      {vgl. s=1/2*a*t^2}
        Q[i]:=Q[i-1]+Qp[i]*dt;
        { Writeln(i*dt:11:9, ' | ', Q[i]/C:7:2, ' | '); }
        Pin[i]:=Uo4*sin(Ome4*i*dt)*Qp[i];      {Berechnung der zugeführten Leistung}
    end;
    If MacheFiles then Excel_Datenausgabe('Teil_04.dat'); Writeln;
    Zugefuehrte_Leistung_mitteln;      Writeln;
end;
{-----}

If Not(Teil7) then
begin
    Writeln('5.Teil -> Erzwungene Schwingung mit Energie-Kontrolle. ');
    Pin[0]:=0;      {Initialisierung für Leistungsmessung}
    R:=70;{Ohm} L:=10E-3;{Henry} C:=1E-6;{Farad} dt:=1E-7{sec.}; N:=30000; {Werte zum Testen}
    If MacheFiles then Spannung_auf_Oszi;      {Graphisches Anzeigen des Spannungs-Input-Signals}
    For i:=1 to N do
    begin
        Uin:=U5(i*dt);
        Qpp[i]:=-1/L/C*Q[i-1]-R/2/L*Qp[i-1]+Uin/L; {Hier kann U(t) eine beliebige Signalform haben}
        { Qp[i]:=(Qp[i-1]+Qpp[i]*dt)/(1+R/L*dt); }      {alternative einfachere Näherung}
        Qp[i]:=Qp[i-1]+(Qpp[i]-R/2/L*Qp[i-1])*dt;      {vgl. s=1/2*a*t^2}
        Q[i]:=Q[i-1]+Qp[i]*dt;
        { Writeln(i*dt:11:9, ' | ', Q[i]/C:7:2, ' | '); }
        Pin[i]:=Uin*Qp[i];      {Berechnung der zugeführten Leistung}
        Eel[i]:=1/2*Q[i]*Q[i]/C;      {Elektrische Energie des Kondensators}
        Eel[i]:=Eel[i]+1/2*L*Qp[i]*Qp[i];      {Elektrische Energie der Spule}
        If Eel[i]<0 then begin Writeln('Da timmt wat nich !?'); Wait; Halt; end;
    end;
    Zugefuehrte_Leistung_mitteln;
    Insgesamt_zugefuehrte_Energie_berechnen;
    If MacheFiles then Excel_Ausgabe_Teil3('Teil_05.dat'); Writeln;
end;
{-----}

If Not(Teil7) then
begin
    Writeln('6.Teil -> Erzwungene Schwingung mit beliebigem Signal-Input (Impulsbetrieb)');
    Pin[0]:=0;      {Initialisierung für Leistungsmessung}
    R:=70;{Ohm} L:=10E-3;{Henry} C:=1E-6;{Farad} dt:=1E-7{sec.}; N:=30000; {Werte zum Testen}
    If MacheFiles then Spannung_auf_Oszi_6;      {Graphisches Anzeigen des Spannungs-Input-Signals}
    For i:=1 to N do
    begin
        Uin:=U6(i*dt);
        Qpp[i]:=-1/L/C*Q[i-1]-R/2/L*Qp[i-1]+Uin/L; {Hier kann U(t) eine beliebige Signalform haben}
        { Qp[i]:=(Qp[i-1]+Qpp[i]*dt)/(1+R/L*dt); }      {alternative einfachere Näherung}
        Qp[i]:=Qp[i-1]+(Qpp[i]-R/2/L*Qp[i-1])*dt;      {vgl. s=1/2*a*t^2}
        Q[i]:=Q[i-1]+Qp[i]*dt;
        { Writeln(i*dt:11:9, ' | ', Q[i]/C:7:2, ' | '); }
        Pin[i]:=Uin*Qp[i];      {Berechnung der zugeführten Leistung}
        Eel[i]:=1/2*Q[i]*Q[i]/C;      {Elektrische Energie des Kondensators}
        Eel[i]:=Eel[i]+1/2*L*Qp[i]*Qp[i];      {Elektrische Energie der Spule}
        If Eel[i]<0 then begin Writeln('Da timmt wat nich !?'); Wait; Halt; end;
    end;
    Zugefuehrte_Leistung_mitteln;
    Insgesamt_zugefuehrte_Energie_berechnen;
    If MacheFiles then Excel_Ausgabe_Teil3('Teil_06.dat'); Writeln;
end;
{-----}

Writeln('8.Teil -> Mein Raumenenergie-LCR-Kreis, Zeit-stabil durch Leistungsentnahme. ');
Pin[0]:=0;      {Initialisierung für Leistungsmessung}      Fges:=0;      Pse[0]:=0;
R:=rho*2*pi*SR*SN/AD{Ohm};      {Widerstand wieder nach den Vorgaben einstellen.}
L:=muo*mur*SN*SN*SA/SL;{Henry}      {Induktivität wieder nach den Vorgaben einstellen.}
C:=epo*epR*CA/CD;      {Kapazität wieder nach den Vorgaben einstellen.}
Q[0]:=0;      Qp[0]:=0;      Qpp[0]:=0;      {Keine Anfangs-Ladung bei Impulsbetrieb}
dt:=dtmerk;      N:=Nmerk;      {Wiederherstellen der Input-Werte-Vorgaben}
If MacheFiles then Spannung_auf_Oszi_7;      {Graphisches Anzeigen des Spannungs-Input-Signals}
x[0]:=SP3;      {Startposition der Kondensatorplatten für die mechanische Schwingung}
{##}Utrig[0]:=0;
For i:=1 to N do
begin

```

```

Fd:=-D*(x[i-1]-CD/2); {Federkraft gegenüber CD}
Fc:=-Q[i-1]*Q[i-1]/4/pi/epo/(2*x[i-1])/(2*x[i-1]); {Coulombkraft}
{ Jetzt kommt die antreibende Kraft und außerdem die Kraft zur mechanischen Leistungsentnahme : }
Fges:=Fc+Fd; {Zuerst hier die antreibende Systemkraft}
{ Es folgt eine (mehrzeilige) Vorgabe einer geeigneten Last-Kraft: }
ES:=(1/2*D*(x[i-1]-CD/2)*(x[i-1]-CD/2)+1/2*(2*m)*xp[i-1]*xp[i-1]); {Leistung, Hilfsvariable}
If x[i-1]<0.75*CD/2 then begin Reibung:=true; Ianf:=i-1; end;
Flast:=0; If Reibung then Flast:=0.88*Fges; {Wir ziehen einen Anteil der Gesamtkraft heraus.}
{Die Leistungsentnahme soll später elektrisch als der Spule über einen Trafo geschehen.}
Fges:=Fges-Flast;
{ Ende der Kraft-Berechnung. Es wurden die Systemkräfte und die Last-Kraft berechnet.}
{ Jetzt beginnt die Lösung des gekoppelten Differentialgleichungs-Systems: }
xpp[i]:=Fges/m; {Beschleunigung}
xp[i]:=xp[i-1]+xpp[i]*dt;
x[i]:=x[i-1]+xp[i]*dt;
Pent[i]:=Flast*Abs(xp[i]);
Eent[i]:=Pent[i]*dt;
Emech[i]:=1/2*D*(x[i]-CD/2)*(x[i]-CD/2); {Federspann-Energie}
Emech[i]:=Emech[i]+1/2*(2*m)*xp[i]*xp[i]; {Kinetische Energie}
If x[i]<=1e-10 then
begin
  Writeln('Plattenberuehrung. Coulombkraft ist zu stark. Algorithmus abgebrochen');
  Writeln('in Schritt Nr. ',i,' von ',N);
  For j:=i to N do
  begin
    x[j]:=0; xp[j]:=0; xpp[j]:=0; Q[j]:=0; Qp[j]:=0; Qpp[j]:=0;
    Eel[j]:=0; Emech[j]:=0; Esum[j]:=0; Pin[j]:=0;
    N:=i-1; {Weiter soll ich nicht anzeigen.}
  end;
  Wait; Wait; {Halt;} Goto Raus;
end;
{ Hier beginnt die Berechnung der elektrischen Schwingung}
C:=epo*epr*CA/(2*x[i]);
Uin:=U7(i*dt); {Diese Spannung soll die Schwingung anregen.}
{##}Utrig[i]:=Uin;
{ Qpp[i]:=-1/L/C*Q[i-1]-(R+Rlast)/2/L*Qp[i-1]+Uin/L; {Früher, ohne Leistungsentnahme aus der Spule}
  Qpp[i]:=-1/C/(R+Rlast+Rv)*Qp[i-1]-1/L/C/Rv/(R+Rlast+Rv)*Q[i-1]-(R+Rlast)/L/2*Rv/(R+Rlast+Rv)*Qp[i-1]+1/L*Rv/(R+Rlast+Rv)*Uin;
  {Jetzt mit Leistungsentnahme aus der
Spule}
{ Qp[i]:=(Qp[i-1]+Qpp[i]*dt)/(1+R/L*dt); } {uralter Test: alternative einfachere Näherung}
  Qp[i]:=Qp[i-1]+(Qpp[i]-(R+Rlast)/2/L*Qp[i-1])*dt; {vgl. s=1/2*a*t^2}
  Q[i]:=Q[i-1]+Qp[i]*dt;
  Pin[i]:=Uin*Qp[i]; {Berechnung der zugeführten Leistung}
  Eel[i]:=1/2*Q[i]*Q[i]/C; {elektrische Energie des Kondensators}
  Eel[i]:=Eel[i]+1/2*L*Qp[i]*Qp[i]; {elektrische Energie der Spule}
  Pse[i]:=Abs(L*Qp[i]*Qpp[i]); {Über Joch und Sekundärspule entnommene Leistung}
  If Eel[i]<0 then begin Writeln('Da timmt wat nich !?'); Wait; Halt; end;
{ Writeln(i*dt:11:9,' | ',x[i], ' | ',Q[i]);}
end;
Raus:
  Emech[0]:=Emech[1]; Eel[0]:=Eel[1]; {In Näherung, damit es beim Plotten nicht stört.}
  Writeln('Nachfolgend die Datenkontrolle analog zu Teil_03:');
  EnergieMaxima; Writeln; Writeln('AM LASTWIDERSTAND ENTNOMMEN:');
  Leistung_berechnen;
  Writeln; Writeln('Zugfuehrte Leistung aus dem Spannungs-Input:');
  Zugfuehrte_Leistung_mitteln;
  Insgesamt_zugfuehrte_Energie_berechnen; Writeln;
  Writeln('Wirkungsgrad mechanisch Eta_mech: ',etamech:10:4,' (* 100 %) gespeichert');
  Writeln('Wirkungsgrad elektrisch Eta_el: ',etael:10:4,' (* 100 %)');
  Mechanische_Energie_Entnahme; Writeln;
  Writeln('Mittlere mechanische Leistungs-Entnahme in Teil 8: ',Pentmittel,' Watt');
  If MacheFiles then Excel_Ausgabe_Teil3('Teil_07.dat'); Writeln;
  Ianf:=1; Leistungsmittel_ueber_Sekundaerspule;
  Writeln('Mittlere Leistungs-Entnahme ueber Sekundaerspule : ',Psekmittel,' Watt');
  {-----}
  Wait; Wait;
End.

```

Mechanism kann ist die Leistung schlecht entnehmen, elektrod ist zu wenig da.  
 Hier dient der elektrische Teil nur dazu, die Mechanik aufzuwickeln.

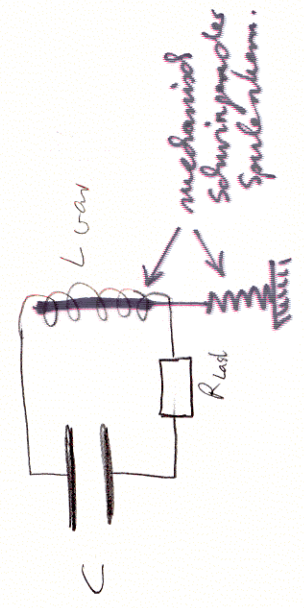
Wenn ist das anders haben will, muß ist den elektrischen Schwingkreis so bauen, daß er mehr Energie aufnehmen kann

Spule:  $E_L = \frac{1}{2} L I^2$  in meinem Bsp ist  $C = 8 \cdot 10^{-8} F$  } das paßt überhaupt nicht zusammen,  
 Kondensator:  $E_C = \frac{1}{2} C U^2$  in meinem Bsp ist  $L = 7.4 \cdot 10^{-4} H$  } da Brauche ist nicht mehr weiterrechnen.

Man muß nicht den Kondensator schwingen lassen, sondern den Spulenstrom!

Achse: Größere Kondensator  
 Aber: Kondensatorband kann nicht mit variabler Kapazität schwingen

lgg: Kso: Wir müssen den Spulenstrom in der Spule schwingen lassen, damit das L variabel wird.  
 Zwecks Leistungsentnahme muß man dann die Spule bifilar wickeln, oder: Ich kann die elektr. Leistung vielleicht aus irgendwie anders abgreifen.



Dann muß ich allerdings den Algorithmus neu entwerfen, weil die mechanische Schwingung vom hin- und her anders ist und nicht mehr den Kondensator "C" verändert.

Mit dem ganzen Zeug gehe ich also elementar zurück bis zur harmonischen Schwingung mit Dämpfung und Anregung

Die Spl setzt also an bei (\* von S. 10).

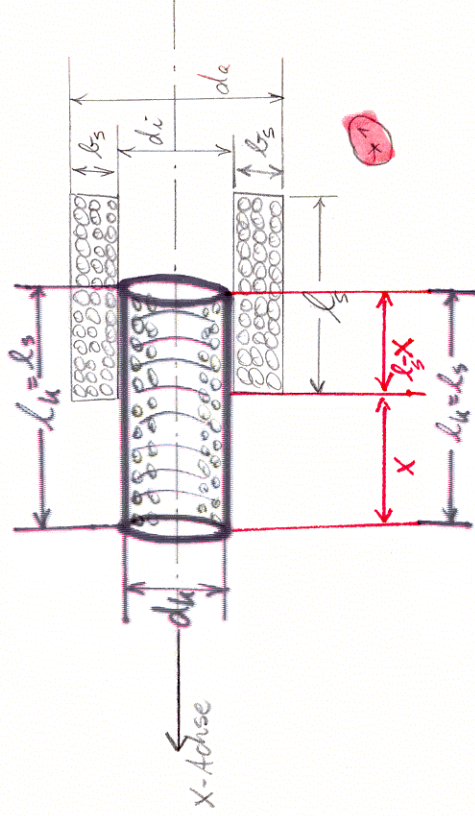
Aber ich muß jetzt nicht ein variables "C" verwenden, sondern ein variables "L"

Im der Spule schwingt ein Kern, den zieht die Spule an.

Welches Feld erzeugt die Spule?

Wie groß ist die Anziehungskraft (als Fkt der Kern-Position)?

Was Feld der Spule kann man in Lehrbüchern finden: Zylinderspule



Spulendraht:

$l_s$  = Spulenlänge

$b_s$  = Spulenkörper-Breite

$d_i$  = Innendurchmesser des Spulenkörpers

$d_a$  = Außendurchmesser des Spulenkörpers

$d_{ad}$  = Drahtdurchmesser

$n = \frac{l_s}{d_{ad}} = \text{Windungszahl radial}$  } insgesamt also  $n \cdot m$  Windungen

$m = \frac{l_s}{d_{ad}} = \text{Windungszahl axial}$

Spulenkern:

$d_k$  = Kerndurchmesser

$l_k$  = Kernlänge,  $l_k = l_s$ , so fangen wir an.

$x$  = Auslenkung des Kerns aus der Ruhelageposition

$\Rightarrow l_s - x$  = Einbautiefe des Spulenkerns in die Spule

Die simple Lehrsatzformel  $H = \frac{nI}{L}$  ist zu primitiv für unsere Zwecke  
 Wir muß also die Felder aller einzelnen Windungen einzeln berechnen und addieren.  
 Das Feld einer Windung, also eines kreisförmigen Leiterschleife berechnet in meinem Physik-  
 Klausurtrainer berechnet, S. 229, Aufgabe 3.39



mit  $r$  = Leiterbahnenradius  
 und  $x$  = Aufpunkt

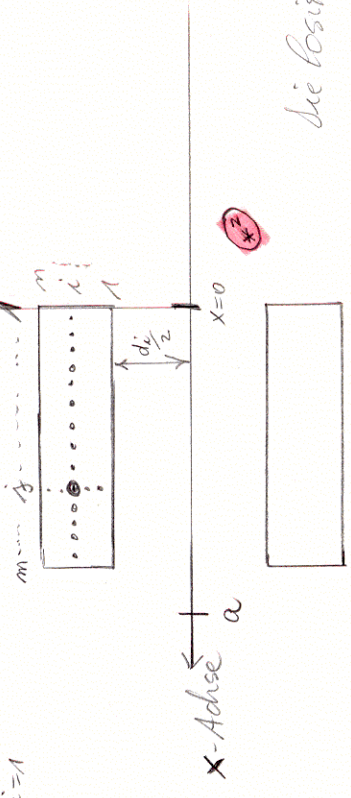
$$H_{i,j} = \frac{I \cdot r^2}{2 \cdot (a^2 + r^2)^{3/2}}$$

mit  $I = \dot{q}$  = Strom

Feldinhomogenitäten im Inneren der Zylinderspule wollen wir in nur mäßig guter Näherung vernachlässigen  
 Dieses Feldmuß nun über alle Leiterschleifen der Zylinderspule summieren:

$$H_{ges} = \sum_{j=1}^m H_{i,j}$$

mit (Zylinderkoordinaten)



Die Position der Windung  $i, j$  liegt bei

$$x = \frac{d_i}{2} + (i - \frac{1}{2}) \cdot d_d, \text{ da läuft } i = 1 \dots m$$

$$r = (j - \frac{1}{2}) \cdot d_d, \text{ da läuft } j = 1 \dots m$$

An der Position "a" entlang der x-Achse produziert diese Windung das Feld

Das entsteht einfach durch Einsetzen der Geometrie  
 nach  $(*)^2, (*)^3$  in die Formel  $(*)^1$ .

$$H_{i,j}(a) = \frac{I \cdot \left[ \frac{d_i}{2} + (i - \frac{1}{2}) \cdot d_d \right]^2}{2 \cdot \left[ a^2 - (j - \frac{1}{2})^2 d_d^2 + \left( \frac{d_i}{2} + (i - \frac{1}{2}) \cdot d_d \right)^2 \right]^{3/2}}$$

Und das gesamte Feld am Ort  $x = a$  ist dann  $|\vec{H}(a)| = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m H_{i,j}$

Wie groß: Wegen der (angenähernten) Homogenität der Feldstärke verwenden wir diese Feldstärke im dem gesamten vom Magnet-Kern überstrichenen Volumen.

## Sind eine Lose bleen-Sammlung Kraft auf den Magneten im Feld

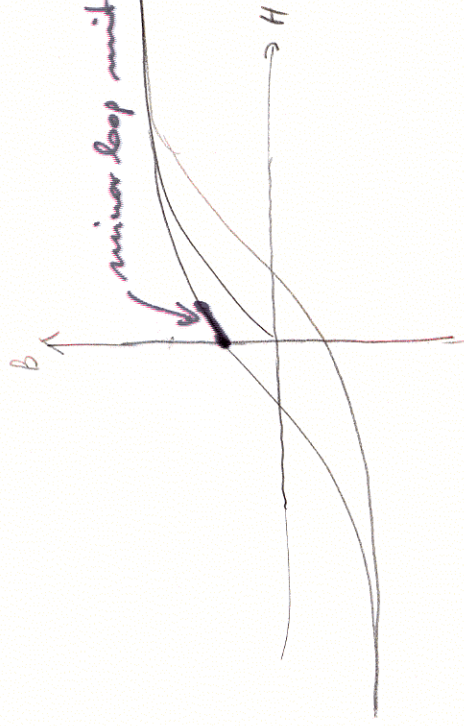
(S.38)

→ entweder als Lorentzkraft

Am besten: 2<sup>14</sup>  
Jackson S.215!  
[→ oder nach dem Ampère'schen Gesetz (zwischen 2 Stromverteilungen)  
→ oder über die Polstärken  $P$  (Berthson S.370) der Magneten  $P = \frac{\Phi}{\mu_0}$ ]

Besser: S.202 Gg S.12  
Jackson

Aber Achtung: Bei Magnetfeld im Spulenkern mit Hystereseschleife



$$\Rightarrow \mu_r = \mu_r(H)$$

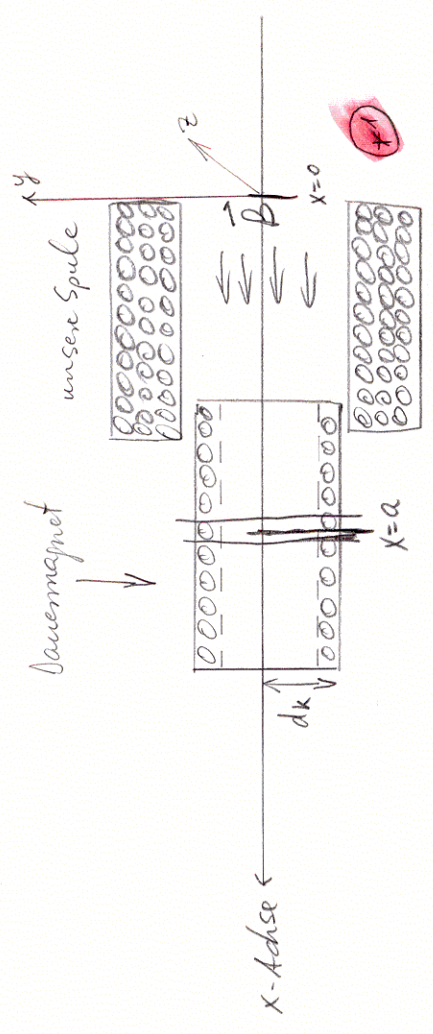
echt nicht(!) in Sättigung fahren  
sonst aber nicht zu verplanen 80 sein

Auch beachten  
Und: Welche Spannung induziert der bewegte Magnet in die Spule?

Nach Betrachtung des Buches und S. 38 entscheidet sich mich, ganz "einfach" die Lorentz-Kraft des Stroms im Magnetfeld zu berechnen. Das soll mich zur Kraft auf den Magnet-Spulenarm in Feld führen.

Der Dauermagnet macht ein Magnetfeld wie eine Zylinderkugel

Wie stehen also vor folgender Situation: Das Feld des Dauermagneten berechnet sich aus einer einlagigen Spule an der Stelle des Dauermagneten



Das enthält das alles im MathCAD-File "Lorentzkraft-auf-Leiterschleife.mcd"

Lorentzkraft  $\vec{F} = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B})$  oder auf infinitesimale Stromelemente:

$$d\vec{F} = I \cdot (d\vec{l} \times \vec{B}) \quad (\text{siehe Tipler, S. 1039})$$

- Das "Magnetfeld"  $\vec{B}$  aus unserer Spule kenne ich. Für jede einzelne Leiterschleife des Dauermagneten hat  $\vec{B}$  einen vektoriellen (konstanten) Wert, den ich nach (\*, \* von S. 37) bereits berechnet habe:

$$\vec{B} = \begin{pmatrix} B_x \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

- Die Leiterschleife an der Position  $x=a$  (Aufpunkt) parametrisiere ich mit

$$\vec{r}(t) = \begin{pmatrix} a \\ d_k \cdot \sin(t) \\ d_k \cdot \cos(t) \end{pmatrix}$$

ein coil Kreis ergibt sich für  $t=0 \dots 2\pi$

- Das infinitesimale Schleifen-Element ist also nun

$$d\vec{l} = \begin{pmatrix} a \\ d_k \cdot \sin(t_0 + dt) \\ d_k \cdot \cos(t_0 + dt) \end{pmatrix} \quad \text{Es geht von } t_0 \text{ bis } (t_0 + dt)$$

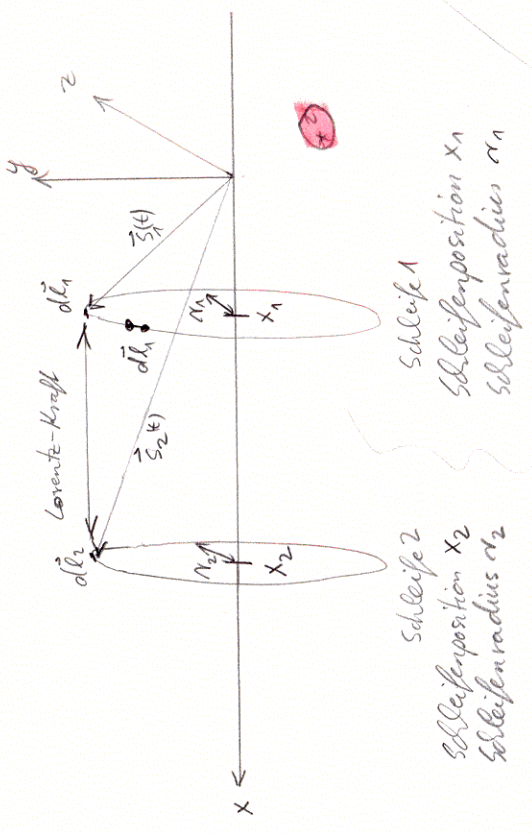
- Somit kann ich die Lorentz-Kraft als Kreuzprodukt berechnen

$$d\vec{F} = I \cdot \begin{pmatrix} a \\ d_k \cdot \sin(t_0 + dt) \\ d_k \cdot \cos(t_0 + dt) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} B_x \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ B_x \cdot d_k \cdot \cos(t_0 + dt) \\ B_x \cdot d_k \cdot \sin(t_0 + dt) \end{pmatrix}$$

Die Kraft zeigt nicht in x-Richtung. Genau das müsste sie aber! -> irgendwas stimmt da nicht.

Mit den Überlegungen von S. 39 geht es nicht - und trotzdem über zwei parallele Leiter Kräfte aufeinander aus  $\rightarrow$  Tipler S. 1061: Je nach Stromflussrichtung ziehen sie sich an oder stoßen sich ab.

Was bei Tipler für die Ampère-Definition für gerade Leiter geht, müßte auch für ringförmige Leiterschleifen gelten



- Und nun müßte die WW jedes infinitesimalen Leiterschleifen-Elements der einen Schleife mit jedem infinitesimalen Leiterschleifen-Element der anderen Schleife berechnen.

- Gute Näherung: Jedes infinitesimale Leiterschleifen-Element betrachte ich dabei als ein gerades Leiterstück.

Dann ist die Vorgehensweise die folgende:

- (1) Erst das Feld jedes Elements der Spule 1 am Ort der Spule 2 ausrechnen
- (2) Ist die Kraft auf das Leiterstück von Spule 2 ausrechnen
- (3) Die Kräfte dann über alle Spulenstücke summieren.

(1) Das geht so: Um Rechnung im Algorithmus zu sparen, kann ich gleich das gesamte Feld der Leiterschleife 1 an einem beliebigen Ort  $\vec{r}$  ausrechnen, und das tue ich in Erweiterung an Aufgabe 9.22 aus meinem Mathe.-Klausurtrainer. Die Leiterschleife steht senkrecht zur x-Achse an der Position  $x_1$ . Das ist ein bißchen anders als in meinem Mathe.-Klausurtrainer (auf S. 338 dort). Deshalb parametrisiere ich die Leiterschleife 1 gemäß

$$\vec{r}_1(t) = \begin{pmatrix} x_1 \\ r_1 \cdot \sin(\omega_1 t + \varphi) \\ r_1 \cdot \cos(\omega_1 t + \varphi) \end{pmatrix}$$

für die Spule 1

Analog kann ich auf die Spule 2 parametrisieren gemäß

$$\vec{r}_2(t) = \begin{pmatrix} x_2 \\ r_2 \cdot \sin(\omega_2 t + \varphi) \\ r_2 \cdot \cos(\omega_2 t + \varphi) \end{pmatrix}$$

Um dann das infinitesimale Feldelement jedes Leiterstücks aufzukleben (anwenden wir Biot-Savart

zur Umrechnung in Strom:  $v \cdot q = I \cdot \Delta t$ , weil die Gesamtladung  $q$  homogen auf dem Leiterstück der Länge  $\Delta s = 2\pi r_n$  verteilt ist  $\Rightarrow v \cdot q = I \cdot 2\pi r_n$  (\*)

D.h.:  $v$  kann irgendwie gewählt werden und  $q$  muß dann so eingestellt werden, daß der nötige Strom  $I$  herauskommt.

mit  $\vec{r}$  = Abstand =  $|\vec{r}|$ , an dem das Magnetfeld berechnet werden soll

$$d\vec{H} = \frac{q \cdot \vec{v} \times (\vec{r}_1 - \vec{r}_2)}{4\pi |\vec{r}_1 - \vec{r}_2|^3} \cdot \frac{d\varphi}{2\pi}$$

Feld der Solenoid am  $0,1 \vec{z}_2$

$$\vec{U}_1(t) = \vec{z}_1(t) = \begin{pmatrix} 0 \\ r_n \cdot \omega_1 \cdot \cos(\omega_1 t + \varphi) \\ -r_n \omega_1 \cdot \sin(\omega_1 t + \varphi) \end{pmatrix}$$

Dabei ergibt sich  $\vec{U}_1$  aus der Parametrisierung (\*) von  $S_1(t)$  zu

Es ist also  $|\vec{U}_1| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} = r_n \cdot \omega_1$  (\*), und  $\omega$  ist die Kreisfrequenz, mit der die Ladung kreist

$$\Rightarrow v_1 \cdot q_1 = I_1 \cdot 2\pi r_n = r_n \omega_1 q_1 \text{ dem Betrag nach}$$

$$\Rightarrow I_1 = \frac{r_n \omega_1 q_1}{2\pi r_n} = \frac{\omega_1 \cdot q_1}{2\pi}$$

so kann man bei der gegebenen Parametrisierung und dem  $|\vec{U}_1|$  von (\*) diejenige Ladungsmenge  $q_1$  ausrechnen, die fließen muß (mit des Betrag  $v_1$ ), damit der Strom  $I$  herauskommt.

Wir machen das im File Biot-Savart.mcd

Nun bilde ich das Kreuzprodukt, das ist nach Biot-Savart werde, ungenüß (\*) des Magnetfeld ausrechnen zu können:

$$\vec{U}_1 \times (\vec{z}_1 - \vec{z}_2) = \begin{pmatrix} 0 \\ r_n \omega_1 \cdot \cos(\omega_1 t + \varphi) \\ -r_n \omega_1 \cdot \sin(\omega_1 t + \varphi) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x_1 - x_2 \\ r_n \cdot \sin(\omega_1 t + \varphi) - s_{2y} \\ r_n \cdot \cos(\omega_1 t + \varphi) - s_{2z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_n \omega_1 \cdot \cos(\dots) \cdot (r_n \omega_1 \cdot \cos(\dots) - s_{2z}) + r_n \omega_1 \cdot \sin(\dots) \cdot (r_n \sin(\dots) - s_{2y}) \\ -r_n \omega_1 \cdot \sin(\dots) \cdot (x_1 - x_2) \\ -r_n \omega_1 \cdot \cos(\dots) \cdot (x_1 - x_2) \end{pmatrix}$$

MathCAD

Dazu kommt jetzt der Betrag  $|\vec{s}_1 - \vec{s}_2|^3 = \left( |x_1 - x_2|^2 + |r_1 \sin(\dots) - s_{2y}|^2 + |r_1 \cos(\dots) - s_{2z}|^2 \right)^{3/2}$  (\*)

MathCAD

$$\Rightarrow d\vec{H} = \frac{q_1}{4\pi} \cdot \frac{\vec{r}_1 \times (\vec{s}_1 - \vec{s}_2)}{|\vec{s}_1 - \vec{s}_2|^3} \cdot \frac{d\varphi}{2\pi} = \frac{q_1}{2\omega_1} \cdot \frac{\vec{r}_1 \times (\vec{s}_1 - \vec{s}_2)}{|\vec{s}_1 - \vec{s}_2|^3} \cdot \frac{d\varphi}{2\pi}$$

mit MathCAD (\*)

siehe  $(\vec{r}_1 \cos 5.41)$  und  $(*)$  (\*)

$$\Rightarrow \vec{H} = \int_{\text{Schleife}} d\vec{H} = \frac{q_1}{2\omega_1} \int_0^{2\pi} \frac{\vec{r}_1 \times (\vec{s}_1 - \vec{s}_2)}{|\vec{s}_1 - \vec{s}_2|^3} \cdot \frac{d\varphi}{2\pi}$$

$$\Rightarrow \vec{H} = \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{pmatrix}$$

Ich integriere über  $\varphi$  und setze einen beliebigen Zeitpunkt ein, welches egal ist, zu welchem Zeitpunkt  $t$  ist die Sache betrachte.

Das gibt im MathCAD sogar vernünftige Werte, die ich nun ins Pascal einprogrammieren will.

Die Kraft auf die zweite Leiterschleife kann man dann aus Symmetriegründen auf ein einziges Element dieser Schleife beschränken und nur die x-Komponente dieser Kraft ausrechnen:

Betrachten wir den höchsten Punkt dieser 2. Leiterschleife bei  $\vec{s}_2 = \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix}$ , also  $s_{2y} = r_2$  und  $s_{2z} = 0$

Sod fließe ein Strom  $I_2$ , sodaß ist die Lorentz-Kraft auf dieses Leitersegment ansetzen kann mit

$$d\vec{F} = I_2 \cdot (d\vec{l}_2 \times \vec{B}), \text{ wo } \vec{B} = \mu_0 \vec{H} \text{ nach (*) id.}$$

Nehme ich den Anteil  $\frac{1}{5}$  dieser 2. Leiterschleife, so erhalte ich  $d\vec{l}_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{5} \cdot 2\pi r_2 \end{pmatrix}$  (\*)

Setzen wir  $(*)$  und  $(*)$  in das Lorentz-Kraft-Element von  $(*)$  ein, so erhalten wir:

$$d\vec{F} = \mu_0 I_2 \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{5} \cdot 2\pi r_2 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{pmatrix} = \mu_0 I_2 \cdot \begin{pmatrix} -\frac{1}{5} \cdot 2\pi r_2 \cdot H_y \\ +\frac{1}{5} \cdot 2\pi r_2 \cdot H_x \\ 0 \end{pmatrix}$$

siehe File "Biot-Savart.mcd"

Aus Symmetriegründen heben sich bei der Integration über der Leiterschleife die y-Komponenten der Kraft gegenseitig auf, und es bleiben nur die x-Komponenten übrig. Somit erhalten wir die Gesamtkraft nach Multiplikation mit 5 gemäß

$$\vec{F}_{\text{ges}} = \mu_0 I_2 \cdot \begin{pmatrix} -2\pi r_2 \cdot H_y \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Ich brauche also von  $(*)$  nur die y-Komponente berechnen und erhalte die Kraft-Komponente in x-Richtung

$$\Rightarrow F_x = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{4\pi \omega_1} \cdot (-2\pi r_2) \cdot H_y = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2 \cdot \omega_1} \cdot H_y$$

Kreuzprodukt:

$$v := \begin{bmatrix} 0 \\ r1 \cdot \text{oml} \cdot \cos(\text{oml} \cdot t + \text{phi}) \\ -r1 \cdot \text{oml} \cdot \sin(\text{oml} \cdot t + \text{phi}) \end{bmatrix} \quad \text{s1ms2} := \begin{bmatrix} x1 - x2 \\ r1 \cdot \sin(\text{oml} \cdot t + \text{phi}) - s2y \\ r1 \cdot \cos(\text{oml} \cdot t + \text{phi}) - s2z \end{bmatrix}$$

$$v \times \text{s1ms2} \rightarrow \begin{bmatrix} r1 \cdot \text{oml} \cdot \cos(\text{oml} \cdot t + \text{phi}) \cdot (r1 \cdot \cos(\text{oml} \cdot t + \text{phi}) - s2z) + r1 \cdot \text{oml} \cdot \sin(\text{oml} \cdot t + \text{phi}) \cdot (r1 \cdot \sin(\text{oml} \cdot t + \text{phi}) - s2y) \\ -r1 \cdot \text{oml} \cdot \sin(\text{oml} \cdot t + \text{phi}) \cdot (x1 - x2) \\ -r1 \cdot \text{oml} \cdot \cos(\text{oml} \cdot t + \text{phi}) \cdot (x1 - x2) \end{bmatrix}$$

$$(|\text{s1ms2}|)^3 \rightarrow \left[ (|(x1 - x2)|)^2 + (|(r1 \cdot \sin(\text{oml} \cdot t + \text{phi}) - s2y)|)^2 + (|(r1 \cdot \cos(\text{oml} \cdot t + \text{phi}) - s2z)|)^2 \right]^{\frac{3}{2}}$$

zu S. 42 B

r1 := 0.2      r2 := 0.2      K := 1.0      om1 := 1      x1 := 0.05      x2 := 0.15      s2y := 0.2      s2z := 0      t := 0

67989619872473087998

$$H_x := \frac{I_l}{4 \cdot \pi \cdot om1} \cdot \int_0^{2 \cdot \pi} \frac{(r1 \cdot om1 \cdot \cos(om1 \cdot t + phi) \cdot (r1 \cdot \cos(om1 \cdot t + phi) - s2z) + r1 \cdot om1 \cdot \sin(om1 \cdot t + phi) \cdot (r1 \cdot \sin(om1 \cdot t + phi) - s2y))}{\left[ (| (x1 - x2) |)^2 + (| (r1 \cdot \sin(om1 \cdot t + phi) - s2y) |)^2 + (| (r1 \cdot \cos(om1 \cdot t + phi) - s2z) |)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} dphi \rightarrow$$

1.3104466365863673675

$$H_y := \frac{I_l}{4 \cdot \pi \cdot om1} \cdot \int_0^{2 \cdot \pi} \frac{-r1 \cdot om1 \cdot \sin(om1 \cdot t + phi) \cdot (x1 - x2)}{\left[ (| (x1 - x2) |)^2 + (| (r1 \cdot \sin(om1 \cdot t + phi) - s2y) |)^2 + (| (r1 \cdot \cos(om1 \cdot t + phi) - s2z) |)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} dphi \rightarrow$$

-(4.8671959192974402085 \cdot 10^{-20})

$$H_z := \frac{I_l}{4 \cdot \pi \cdot om1} \cdot \int_0^{2 \cdot \pi} \frac{-r1 \cdot om1 \cdot \cos(om1 \cdot t + phi) \cdot (x1 - x2)}{\left[ (| (x1 - x2) |)^2 + (| (r1 \cdot \sin(om1 \cdot t + phi) - s2y) |)^2 + (| (r1 \cdot \cos(om1 \cdot t + phi) - s2z) |)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} dphi \rightarrow$$