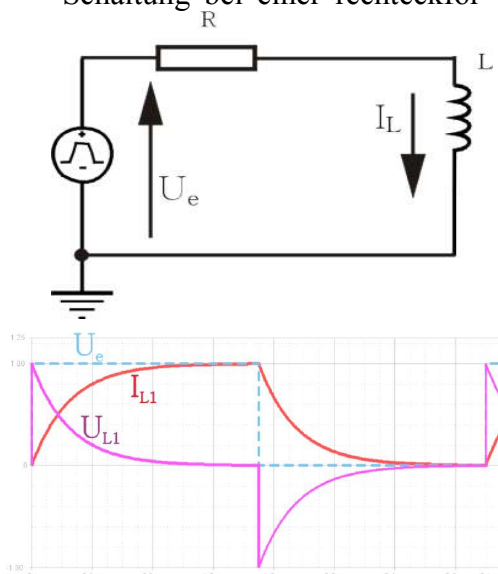


## 2. Der L-C-Schwingkreis

Jeder stromdurchflossene Leiter ist von einem elektromagnetischen Wechselfeld umgeben, das durch die ständige Änderung der Stromstärke induziert wird. Nach dem Lenzschen Gesetz wirkt die Selbstinduktionsspannung der Feldänderung entgegengerichtet. Betrachten wir den Stromverlauf in der dieser Schaltung bei einer rechteckfö-



mige Eingangsspannung. Dieser Puls wurde verwendet, damit der Verlauf besser erkennen zu können. Wir sehen sofort, dass sich der Strom nicht direkt proportional zur angelegten Spannung ändert. Zum Aufbau des Magnetfeldes ist eine zusätzliche Energie notwendig. Dies ist der bereits genannte Blindwiderstand. Die Änderung des Stromes verringert sich und der Strom nähert sich einem konstanten Endwert, dadurch wird auch das Magnetfeld entsprechend langsamer aufgebaut. Nach dem Abschalten der Eingangsspannung nimmt es mit der gleichen Zeitkonstante wieder ab und lässt so den Strom vorübergehend weiterfließen, bis es vollständig abgebaut ist.

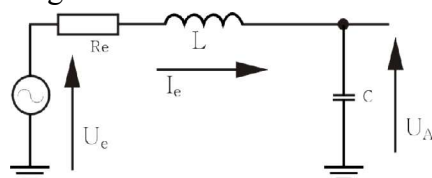
### Induktivität

In der Umgebung eines elektrischen Stromes bildet sich ein magnetisches Feld aus. Man kann es durch Kraftlinien veranschaulichen. Sie bilden sich in sich geschlossene Kurven, die mit dem Stromkreis, der sie erzeugt, verknüpft sind. Da nach dem Durchflutungsgesetz die magnetische Induktion (Flussdichte) proportional zur Stromstärke im Leiter ist, muss auch der ganze vom Stromkreis erzeugte magnetische Fluss dem Strom proportional sein. Die Proportionalitätskonstante ist die Induktivität:  $\Phi_g = L \cdot i$

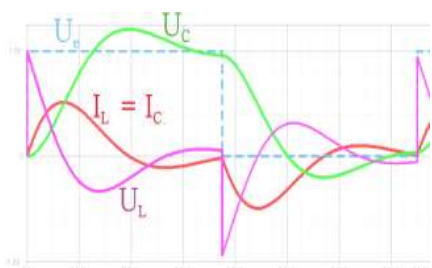
Weiterhin wird nach dem Induktionsgesetz in einer geschlossenen Drahtschleife eine Spannung im Magnetfeld induziert, die der Änderung des magnetischen Flusses proportional ist:  $u_i = - d\Phi/dt$ .

Wird der magnetische Fluss durch einen Strom erzeugt, dann ist  $u_i = - L di/dt$ . Das negative Vorzeichen besagt, dass bei einer Zunahme des Stromes eine induzierte Spannung entsteht, die einen Strom in der entgegengesetzten Richtung verursacht.

Nicht ganz so einfach sieht es aus, wenn wir jetzt die nicht zu vermeidende Kapazität in das Ersatzschaltbild unseres Leitungsstückes einbeziehen.



Da der Kondensator C am Anfang entladen ist ( $U_C=0V$ ), beginnt der Strom- und Spannungsverlauf vorerst so wie in der vorherigen Schaltung. Der Kondensator wird aufgeladen,



wodurch die Spannung an der Induktivität L zusätzlich ver-

ringert wird, das wiederum eine weitere Reduzierung des Stromes bewirkt, bis die Spannung an der Induktivität  $U_L = 0$  wird. Der Strom fließt jedoch solange weiter, bis das Magnetfeld vollständig abgebaut ist,  $U_L$  und  $U_C$  schwingen mit einer deutlichen Spannungsüberhöhung auf ihre Endwerte  $U_L=0$  und  $U_C=U_e$  ein. L und C stellen einen mit R bedämpften Serienschwingkreis mit der Resonanzfrequenz  $f_0$  dar, wenn  $Z_L = Z_C$  ist, wobei

$$Z_L = 2\pi f_0 L \text{ und}$$

$$Z_C = \frac{1}{2\pi f_0 C} \text{ ist.}$$

Wird  $R_e = 0\Omega$ , dann reicht ein kurzer Impuls, um eine ungedämpfte Schwingung zu erzeugen, die Leitung wird zum Oszillator.

Fassen wir die Komponenten in

Betrachten wir diesen Vorgang noch einmal im Detail, indem wir in vier Phasen unterteilen.

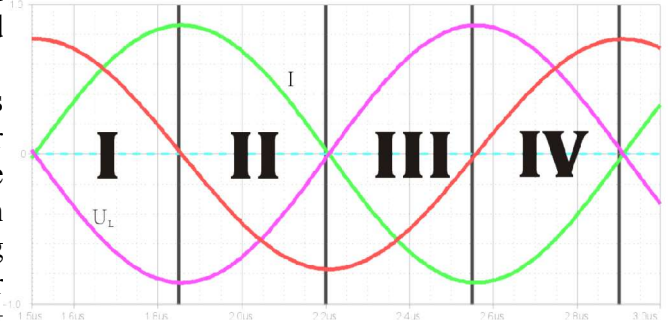
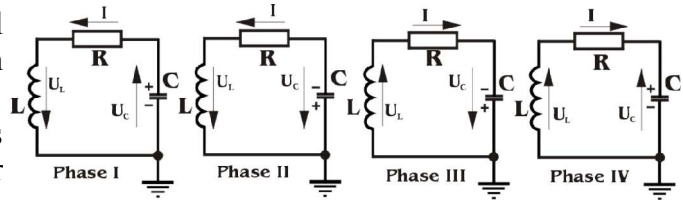
**Phase I:** Nach dem Abschalten des Pulses wird sich der aufgeladene Kondensator über die Spule entladen und ein mit dem Strom verkettetes elektromagnetisches Feld wird aufgebaut.

**Phase II:** Die Entladung des Kondensators ist beendet. Das bestehende Feld in der Spule baut sich wieder ab, wodurch eine Selbstinduktions-EMK entsteht, die einen Strom erzeugt, der in die gleiche Richtung fließt, wie der Entladestrom in Phase I. Der Kondensator wird wieder geladen, aber jetzt im entgegengesetzten Sinne.

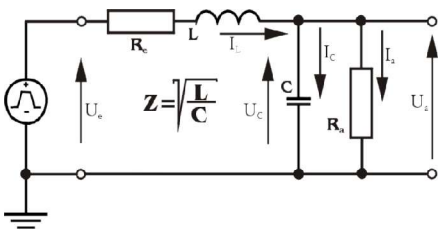
**Phase III:** Es folgt der gleiche Entladevorgang und Feldaufbau wie in Phase I, aber mit entgegengesetzter Stromrichtung.

**Phase IV:** Das Feld und die damit verbundene Induktion der EMK wird wieder abgebaut und der Kondensator geladen.

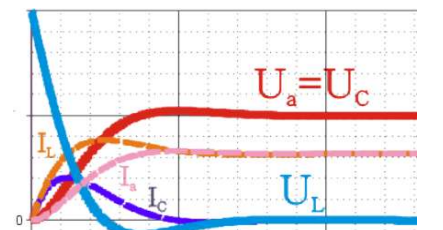
Während einer Periode vollziehen sich also zwei Entladungen des Kondensators, wobei dieser als Generator und die Spule als Verbraucher wirken. Dazwischen wird der Kondensator sinngemäss zwei mal aufgeladen, wobei er der Verbraucher und die Spule der Stromerzeuger ist.



und C zusammen und schliessen die Leitung an den Enden mit den Widerständen  $R_e$  und  $R_a$  ab, erhalten wir das dieses Ersatzschaltbild. Wenn beide Widerstände mit dem



Wellenwiderstand der Leitung übereinstimmen, also  $Z=R_e=R_a$ , werden sich Strom und Spannung optimal auf den Endwert  $U_a=U_e/2$  einschwingen. Um allerdings den

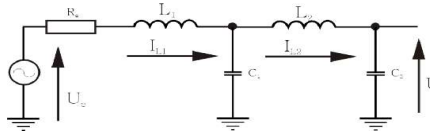


genauen Verlauf innerhalb der

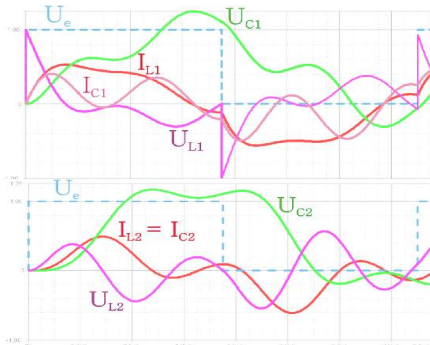
Leitung zu erhalten, muss diese in viele kleine Teilstücke unterteilt werden.

Gehen wir also einen Schritt weiter und schalten zwei LC-Glieder hintereinander.

Wir sehen, dass auch hier die

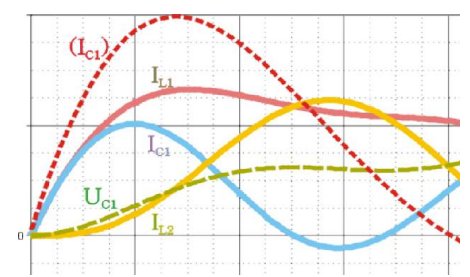


Anfangszustände wieder die gleichen sind, wie bei einem L und C. Die Kondensatoren sind entladen und so fließt auch hier erst der Strom durch  $L_1$  und  $C_1$ .



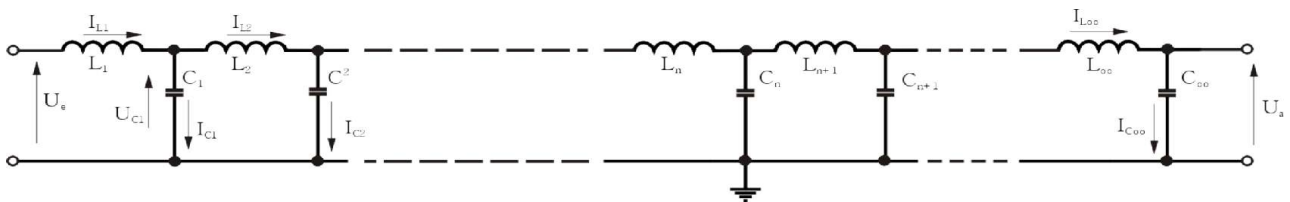
Sobald jedoch die Spannung an

ansteigt, beginnt sich der Stromes aufzuteilen. Die folgende Grafik zeigt den Vergleich des Stromverlaufes beim einfachen L-C-Glied ( $I_{L1}$ ) und beim doppelten  $I_{L1} = I_{C1} + I_{L2}$ . Der durch  $L_2$  fließende Strom nimmt im gleichen Masse zu, wie die



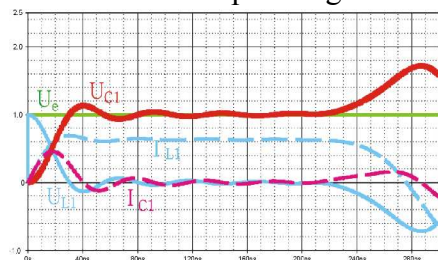
Spannung an  $C_1$  ansteigt und lädt damit, wenn auch verzögert,  $C_2$  auf. Eine höhere Spannung an  $C_2$  bedeutet aber eine Reduzierung von  $U_{L2}$ ,  $I_{L2}$  fließt infolge der EMK in  $L_2$  weiter und die Spannung  $U_{C2}$  steigt weiter an, usw.

Wir erkennen in diesem Schaltbild einer unendlich langen



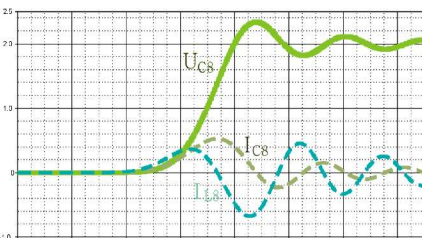
Leitung die gegenseitige Beeinflussung von Strom und Spannung sowohl innerhalb eines L-C-Gliedes, also auch der Glieder untereinander. Die Ladungsträger werden sozusagen nach und nach von einem Glied der Kette zum nächsten weiter gegeben. Der Energietransport ist vergleichbar einer Eimerkette. Wir sehen aber auch eine rückwirkende Beeinflussung, wenn wir uns den Strom- bzw. Spannungsverlauf des ersten Gliedes anschauen.

Wie sofort auffällt, beginnt der Strom- und Spannungsverlauf



wieder fast gleich, wie in allen vorhergegangenen Beispielen. Die Kurven nähern sich jedoch wesentlich früher ohne grosse Überschwingen ihren Endwert. Bereits am Ende des achten Gliedes ist die Ausgangsspan-

nung fast identisch mit der Eingangsspannung, nur eben um die Laufzeit der Kette



verschoben. In einer unendlich langen Leitung mit unendlich vielen kurzen Leitungsstücken werden die Ladungsträger das Ende nie erreichen. Demzufolge wird sich der Abschluss der Leitung auch nicht auf den Eingang auswirken, es kommt zu keiner 'Reflexion'. Diese Leitung verhält sich demnach wie ein ohm'scher Widerstand mit dem Wert ihres Wellenwiderstandes:  $Z = R_e$  wobei

$$R_e = \frac{U_e}{I_e} \text{ und } Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \text{ ist.}$$

Der Wellenwiderstand  $Z$  einer Leitung ist immer reell und von ihrer Länge unabhängig. Die

vom Generator abgegebene Leistung in Form von Ladungsträgern wird in einer unendlich langen Leitung nie das Leitungsende erreichen. Eine endliche Leitung, die auf beiden Seiten mit einem Widerstand  $Z = R_e = R_a$  abgeschlossen ist, verhält sich wie eine unendlich lange Leitung, in der die übertragene Energie im Abschlusswiderstand  $R_a$  umgesetzt wird. Weicht dieser vom Wellenwiderstand ab, im Extremfall Kurzschluss oder Leerlauf, oder ist er komplex, werden die Ladungsträger nicht oder nur zum Teil von  $R_a$  aufgenommen, es kommt zum Rückstau. Diese Rückwirkung auf die davor liegenden Glieder der Leitungskette, die sich bis zum Eingang auswirkt, nennen wir Reflexion. Um es auf den Punkt zu bringen:

Auch bei reellen, aber von  $Z$  abweichenden Abschlusswiderständen kommt es beim Ladungsträgertransport infolge der Laufzeit innerhalb der einzelnen Leitungsglieder zur Phasenverschiebung, also zu Reflexionen.