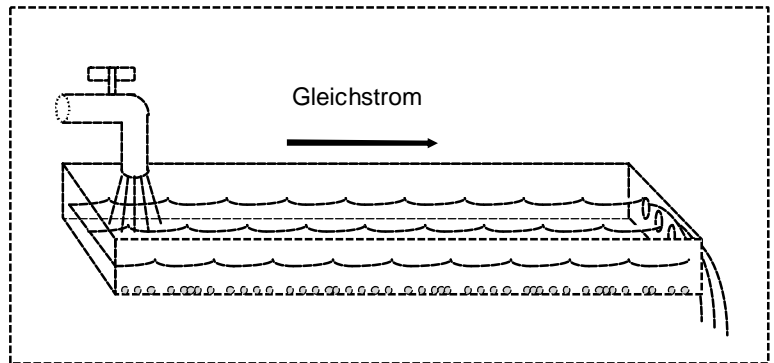


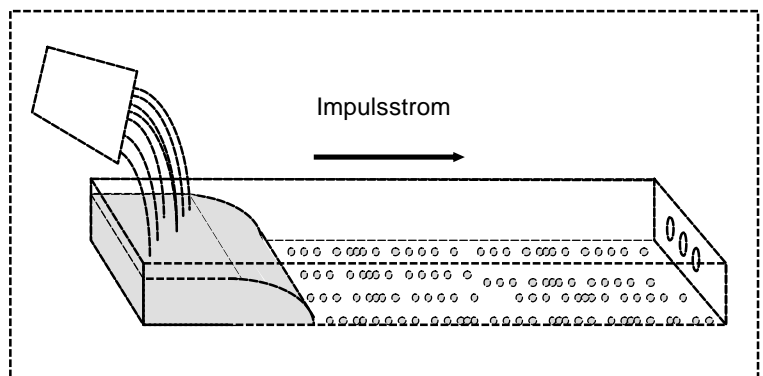
### Gleichstrom und Widerstand

Bei einer gleichförmig durchströmten Leitung hängt der Stromfluss fast nur vom **Widerstand am Leitungsende ab** (hier: Löcher). Die Form der Leitung oder eine kurze Verengung haben kaum einen Einfluss auf die Stromstärke. Wird ein gleichmäßig hoher Strom benötigt (Stromversorgung), muss die Leitung aber deutlich mehr durchlassen als am Ende benötigt wird - Sie muss einen geringen **Gleichstromwiderstand** haben.



### Impulsstrom und Impedanz

Wird dagegen der Strom plötzlich, also impulsartig benötigt, wird seine Stärke durch Breite und Oberfläche des Leiters bestimmt. Für einen Stromimpuls ist die Leitungseigenschaft entscheidend, das ist die **Impedanz der Leitung**. Bei noch leerer Leitung (Signalleitungen in Ruhe) ist das Leitungsende im ersten Moment ohne Bedeutung! Der Strom der in die Leitung hineinfließt wird nur durch die Impedanz der Leitung bestimmt !

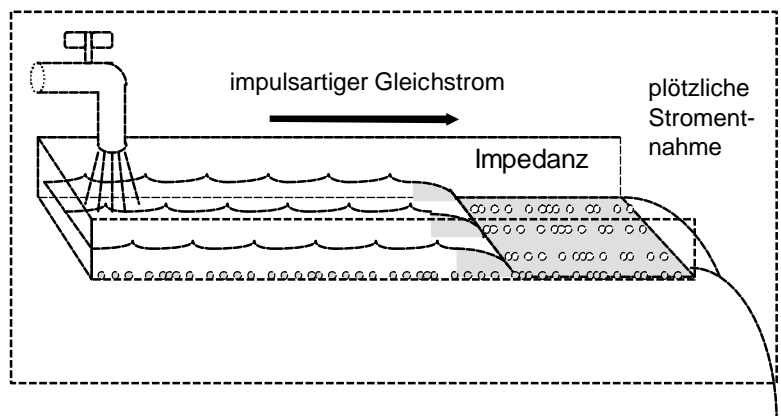


**Die Impedanz Z einer Leitung beschreibt den Widerstand den diese Leitung einem hineinfließenden Wechsel- oder Impulsstrom entgegensetzt. Dieser Wert ist eine Leitungseigenschaft und nimmt nicht mit der Leitungslänge zu ! Durch die Impedanz wird der Strom auf  $I = U / Z$  begrenzt.**

Wenn die Impulsfront das Ende erreicht, wird das Meiste reflektiert, falls der Strom nicht schnell genug abfließen kann. Das ist der Fall, wenn das Leitungsende einen wesentlich höheren Widerstand hat als die den Stromfluss bestimmende Leitungsimpedanz hat. Der Strom wird eine Zeit lang hin- und herpendeln (schwingen) und erst allmählich langsam abfließen.

### Auch bei Stromversorgungsleitungen ist die Leitungsimpedanz entscheidend !

Wird ganz plötzlich viel Gleichstrom am Ende benötigt (z.B. durch Schalten eines leistungsstarken Bauelementes  $\equiv$  Öffnen der Wand am Ende), spielen die Leitungseigenschaften eine Rolle. Wie schnell der Strom am Ende nachfließen kann, hängt jetzt von der Beschaffenheit der Leitung ab - ob sie viel gespeichert hat (Kapazität) und ob sie Verengungen oder eine große Trägheit (Induktivität) hat.

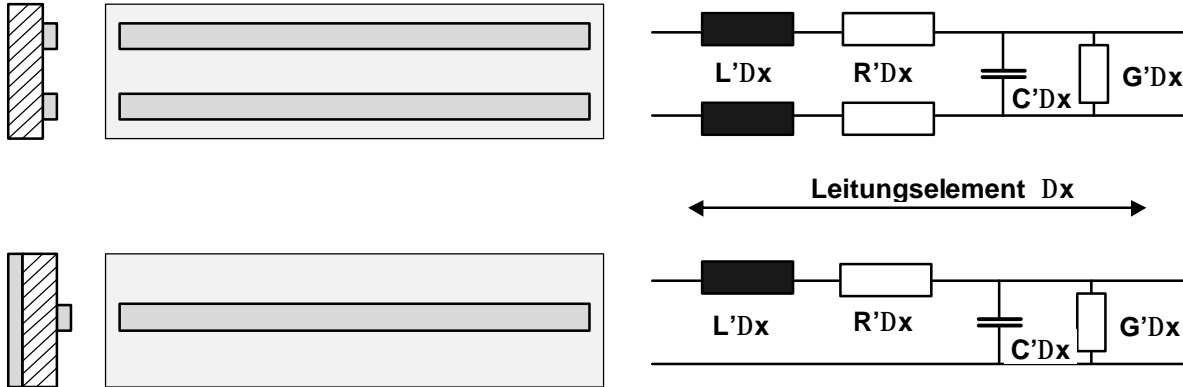


**Bei Stromversorgungsleitungen spielen sowohl der Gleichstromwiderstand als auch die Leitungsimpedanz eine Rolle. Beide sollten sehr gering im mOhm-Bereich sein.**

# Impedanz elektrischer Leitungen

Das Wassermodell hilft uns, das Prinzip zu verstehen. Für Berechnungen bei elektrischen Leitungen benötigen wir jetzt die wirklichen elektrischen Eigenschaften eines Leitungspaares (Hin- und Rückleiter) d.h. sein Ersatzschaltbild.

## Reale elektrische Eigenschaften von Leitungen (beide Anordnungen bilden ein Leitungspaar)



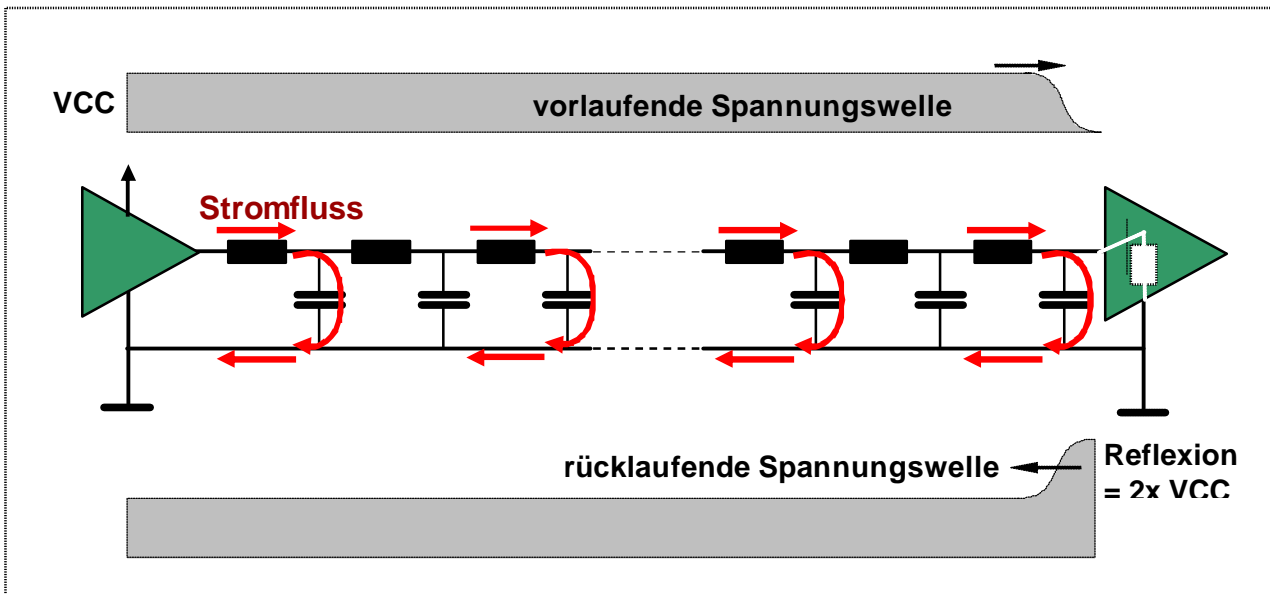
L= Induktivität   C= Kapazität   R= (Gleichstrom-)Widerstand   G= Querleitwert (Gleichstrom-Isolation)

L steht für die Trägheit des Stromanstieges, bedingt durch den Aufbau eines magnetischen Feldes um den Leiter herum; C steht für das Speichervermögen der Leitung (bzw. den Impulsleitwert zw. den Leitungen)

Für typ. Leiterbahnstrukturen auf Leiterplatten spielt der ohmsche Leitungs-Widerstand R für die Signalübertragung digitaler Logik mit >1ns-Anstiegszeit eine untergeordnete Rolle. Wichtig sind die Leitungsinduktivität L und die Leitungskapazität C, für die Stromversorgung auch die Lagen-Kapazität zwischen Potentiallagen.

## Elektrischer Impuls auf einer Impedanzleitung

Der Stromfluss in die Leitung hinein wird zum Laden der Leitungskapazität(en) benötigt. In jedem Moment fließt er auf der Rückleitung zum Sender zurück – also nicht erst, nachdem er am Leitungsende angekommen ist! Die Stromstärke wird bestimmt durch das Verhältnis von L und C der Lei-



tung. Die Längsinduktivität begrenzt die Stromstärke. Erreicht der Stromfluss das Leitungsende sind alle Kondensatoren aufgeladen. Die Leitungsinduktivität treibt ihn weiter, sodass sich - beginnend vom Leitungsende - die Leitungskapazitäten auf die doppelte Spannung aufladen und eine zum Sender rücklaufende Spannungs- und Stromwelle erzeugen. Diese unerwünschten Reflexionen können durch Abschlusswiderstände beseitigt werden.

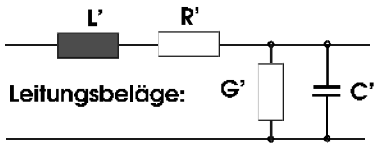
## Impedanzberechnung

Die Stromflusswelle in die Leitung hinein wird durch die Impedanz begrenzt. Daher spricht man auch vom sog. Wellenwiderstand der Leitung. Die Impedanz ist das Verhältnis von Spannung und Strom auf der Leitung, das an jeder Stelle konstant ist.

Aus den Leitungsgleichungen für elektrisch lange Leitungen errechnet sich die Impedanz wie folgt:

(Z ist dabei komplex und frequenzabhängig; s.Abb.)

### Wellenleiter-Ersatzschaltbild



L' : Induktivitätsbelag in nH/cm  
 C' : Kapazitätsbelag in pF/cm  
 R' : Widerstandsbelag in Ω/cm  
 G' : Querleitbelag in S/cm  
 ω = 2πf Kreisfrequenz des Wechselstromes

Impedanz Z = Scheinwiderstand

$$Z = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}}$$

Widerstand einer Leitung / eines Leitungspaares für Wechselstrom bzw. Impulsstrom

FH-Gießen/Dr.Thüringer
Vb-rech\IMP\_LP1A

In der Leiterplattenpraxis kann man 2 typ. Fälle unterscheiden. Zum einen eine „einzelne“ Leiterbahn, deren Rückleiter nicht parallel sondern i.Vgl. zur Leiterbahnbreite weit weg verläuft oder auf mehrere Maschen verteilt ist. Diese Leitungen sind als Wellenleiter unbrauchbar, da die starke Frequenzabhängigkeit schnelle digitale Signale verzerrt (1.Formel).


Demgegenüber sind bei Doppelleitungen in der Praxis die ohmschen Verluste im Bereich 1MHz bis 1GHz vernachlässigbar gegenüber dem induktiven Widerstand. Das Gleiche gilt für den Querleitwert G.

(Anm.: Für höhere Frequenzen muss die Signaldämpfung infolge des Skineffektes und durch dielektrische Verluste im Isolationsmaterial berücksichtigt werden).

Damit vereinfacht sich die Impedanzberechnung der verlustlosen bzw. verlustarmen Leitung ganz entscheidend (2.Formel).

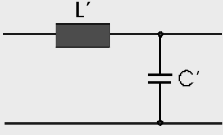
### Impedanzen realer Leiterstrukturen

Für einzelne Leiterbahnen:



$$Z(\omega) = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

Für Leitungspare (ab einige MHz):



$$Z = \sqrt{\frac{L'}{C'}}$$

ωL' >> R'  
ωC' >> G'

FH-Gießen/Dr.Thüringer
Vb-rech\IMP\_LP2A

Die Impedanz ist jetzt unabhängig von der Frequenz, sodass bei dieser idealen Wellenleitung alle im Signal enthaltenen Oberwellenfrequenzen identisch d.h. signalgetreu übertragen werden.

Aus den typischen Leiterbahnmaßen auf Leiterplatten einer Leiterbahn über einer Massefläche ergibt sich z.B. für die Impedanz einer Leiterbahn mit den Belägen: L'= 5nH/cm ; C'= 1pF/cm

$$\Rightarrow Z = \sqrt{\frac{5nH/cm}{1pF/cm}} = \sqrt{\frac{5 \cdot 10^{-9} \cdot Vs/A}{1 \cdot 10^{-12} \cdot As/V}} = \sqrt{5 \cdot 10^3 \cdot \frac{V^2}{A^2}} = 71\Omega$$

Durch diesen Wert wird bei gegebenem Spannungshub am Ausgang eines Gatters der zu treibende Ausgangsstrom direkt festgelegt, ganz unabhängig von der Last am Leitungsende! Bei z.B. 3,3V Spannungshub sind das 46 mA pro Leitung, die zu schalten ist. Ein Bustreiber, der 16 oder 32 Leitungen gleichzeitig schalten muss, benötigt dann bis zu 1,5 A Impulsstrom aus dem Stromversorgungssystem der Leiterplatte!