

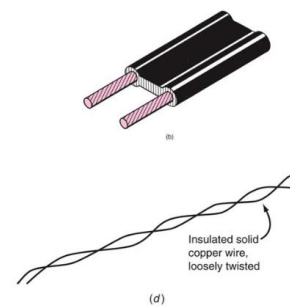
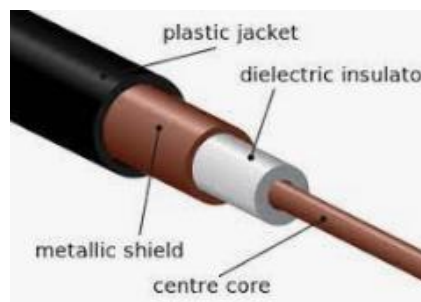


( Version 1 )

I dette dokument ses lidt på forholdene omkring at sende data via et kabel. Hvad skal man tage højde for.

Hvad betyder egentligt begrebet ” et 50 Ohms kabel ?? ”

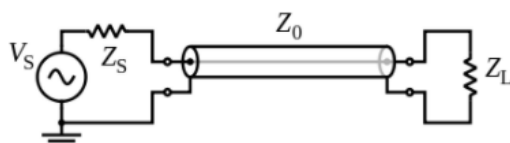
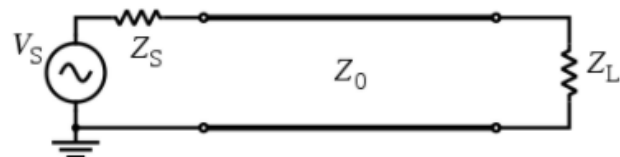
Hvorfor er det vigtigt: ?? Hvordan udbredes pulser i ledninger ? Sker det momentant ?? eller hvad er udbredelseshastigheden ??



*Forskellige signal-ledninger*

Vi starter med at se på en almindelig lang to-leder. Der tilsluttes et batteri på fx 10 Volt i den ene ende, - og i den anden ende er der en belastning på 100 Ohm.

Der vil flyde en strøm gennem ledningen. Ohms lov kan bruges,  $I = U/R$ .



Kablet kunne også se sådan ud. Men herom senere !!



Hvert punkt på den øverste – positive – leder har spændingen 10 Volt, og der er 0 Volt på den nederste.

Der vil være et elektrisk felt mellem de to ledere. Dvs. der er en kapacitet mellem dem. Hvis kapaciteten for en længdeenhed – fx 1 meter – er  $c$ , fås en ladning på  $Q = c \text{ gange } V$

Og for hver længdeenhed – fx 1 meter – vil der være opmagasineret energi gemt i det elektriske felt.

$$E_{kondensator} = \frac{1}{2} \cdot c \cdot U^2$$

Ligeledes er rummet mellem lederne fyldt af magnetfelt som omkranser hver af de to ledere.

Energien i et magnetfelt for hver enhedslængde fx 1 meter er

$$E_{magnetfelt} = \frac{1}{2} \cdot l \cdot I^2 \quad (\text{hvor } l \text{ er selvinduktionen})$$

Derfor bliver energien gemt i kablet pr enhedslængde summen af de to:

Som vi kender det er det jo modstanden i enden af kablet, der definerer strømmens størrelse.

Men lige i det øjeblik, der tilsluttes en spænding, vil der gå en (spændings) – bølgefront mod den anden ende af kablet med omkring  $2/3$  af lysets hast. (dog afhængig af kablets konstruktion !!) Men det tager jo så nogle få nanosekunder.

I denne tid vil batteriet levere den nødvendige energi til at opbygge energien i det elektriske og det magnetiske felt.

Indtil strømmen kan defineres af den tilsluttede modstand, dvs. at ændringen, - at der er påtrykt en spænding - vil strømmen være styret af netop opbygningen af energi i det elektriske og magnetiske felt – enhedslængde efter enhedslængde.

Energien i kablet opbygges efterhånden som fronten når ud mod enden, og det tager jo tid.

En kondensator kan ganske vist oplades på ingen tid, - men det sløves ned af kablets selvinduktion.

Derfor er startstrømmen ikke uendelig stor.

Batteriet vil opleve det som en modstand, (en kompleks modstand). Strømmen begrænses af en ”modstand”, der kan udregnes af:  $I = \frac{U}{Z_0}$

$Z_0$  kan så kaldes kablets karakteristiske impedans

Det kan vises, at  $Z_0 = \sqrt{\frac{l}{c}}$



Hvor  $l$  er kablets selvinduktion, og  $c$  er kablets kapacitet pr enhedslængde.

Formlen gælder for en enhed af kablet, fx 10 cm. Men de næste 10 cm osv. øger jo bare ledningens selvinduktion ( i serie – så de skal adderes ) – og dens kapacitet ( i parallel, så de skal også blot adderes )

Der fås: 
$$Z_0 = \sqrt{\frac{x \cdot l}{x \cdot c}} \text{ som jo stadig giver } Z_0 = \sqrt{\frac{l}{c}}$$

*The characteristic impedance of coaxial cable or any type of transmission line is constant, regardless of its length. This metric is expressed in ohms but **cannot be measured by an ohmmeter.***

Altså er kablets  $Z_0$  ikke afhængig af dets længde !!

Ps:

Egentlig er formlen for  $Z_0$  mere korrekt også afhængig af kobberets modstand og isoleringens modstand.

Men kobbermodstanden er ret lille – og isoleringsmodstanden er ret stor med moderne isoleringsmaterialer, så de kan blot udelades !

Characteristic impedance of the cable is defined by the cable's size and shape. This results in four parameters that define it's characteristic impedance  $Z_0$ :

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$$

Where

- R is the series resistance per metre (or per unit length)
- L is the series inductance per metre (or per unit length)
- G is the parallel conductance per metre (or per unit length) and
- C is the parallel capacitance per metre (or per unit length)

In audio/telephony spheres the cable characteristic impedance is usually approximated to:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R}{j\omega C}}$$

This is reasonable up to about 100 kHz because series R is usually much bigger than  $j\omega L$  and G is usually negligible.

At RF, usually 1MHz and higher, the cable is regarded as having a characteristic impedance of:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Because  $j\omega L$  dominates R and as mentioned previously, G is regarded as negligible, however, dielectric losses at frequencies above 100MHz start to increase and G is sometimes used in the formula.

## Enheder:

På nettet er fundet følgende omskrivninger af Henry og Farad

$$H = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2 \cdot \text{A}^2} = \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{A}^2} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} = \frac{\text{J}}{\text{A}^2} = \frac{\text{T} \cdot \text{m}^2}{\text{A}} = \frac{\text{Wb}}{\text{A}} = \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A}} = \frac{\text{s}^2}{\text{F}} = \frac{\Omega}{\text{Hz}} = \Omega \cdot \text{s},$$

$$F = \frac{\text{s}^4 \cdot \text{A}^2}{\text{m}^2 \cdot \text{kg}} = \frac{\text{s}^2 \cdot \text{C}^2}{\text{m}^2 \cdot \text{kg}} = \frac{\text{C}}{\text{V}} = \frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{V}} = \frac{\text{W} \cdot \text{s}}{\text{V}^2} = \frac{\text{J}}{\text{V}^2} = \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{V}^2} = \frac{\text{C}^2}{\text{J}} = \frac{\text{C}^2}{\text{N} \cdot \text{m}} = \frac{\text{s}}{\Omega} = \frac{1}{\Omega \cdot \text{Hz}} = \frac{\text{s}^2}{\text{H}}$$

Spørger man google hvad enheden for kvadratroden af ( Henry / Farad ) fås

$$\text{sqrt}((1 \text{ H}) / (1 \text{ F})) = 1 \text{ ohm}$$

Henry is the unit of inductance.

The inductance is 1 Henry when an electric current, changing at the rate of 1 ampere/second results in an emf of 1 volt across the inductor.

$$\Rightarrow \text{Henry} = \frac{\text{voltage}}{\frac{\text{current}}{\text{time}}} = \frac{\text{voltage} \times \text{time}}{\text{current}}$$

Farad is the unit of capacitance.

The capacitance is 1 Farad when a charge of 1 coulomb creates potential difference of 1 volt across the plates of the capacitor.

$$\Rightarrow \text{Farad} = \frac{\text{charge}}{\text{voltage}}$$

$$\Rightarrow \frac{\text{Henry}}{\text{Farad}} = \frac{\text{voltage} \times \text{time}}{\text{current}} \times \frac{\text{voltage}}{\text{charge}}$$

$$= \frac{(\text{voltage})^2}{\text{current}} \times \frac{1}{\frac{\text{charge}}{\text{time}}} = \frac{(\text{voltage})^2}{\text{current}} \times \frac{1}{\text{current}}$$

$$= \left( \frac{\text{voltage}}{\text{current}} \right)^2 = (\text{resistance})^2 = (\text{ohm})^2$$

Kilde: <https://www.quora.com/Is-the-relation-Henry-divided-by-farad-equals-to-ohm-squared-true-If-yes-how>

$$X_c = 1 / 2 (\pi) fC \text{ in ohms}$$

$$X_l = 2 (\pi) fL \text{ in ohms}$$

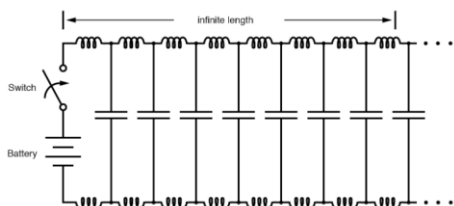
$$X_c \times X_l = L / C \text{ in (ohms)}^2$$

C is in Farads, L is in Henry. Hence going by unit equalities-

$$(\text{Henry} / \text{Farad}) = (\text{Ohms})^2$$

Vi kender også at modstanden i en kondensator og i en spole måles er i Ohm

(Og er frekvensafhængig)



Model af et uendeligt langt kabel

The impedance is composed of resistance and capacitive or inductive reactance, calculated vectorially.

Kilde: <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/alternating-current/chpt-14/characteristic-impedance/>

Man taler om 50- eller 75-Ω coax kabel.

Karakteristisk impedans for et Twisted pair er fx 120 Ohm

### Eksempel:

Et RG8A/U coax-kabel er målt til at ha en induktans på 241.9nH og en kapacitans på 6.76pF pr meter. 241.9nH divideret med 96.76pF er lig 2500, og kvadratroden af 2500 er 50, altså er kablets karakteristiske impedans 50-ohm.

### Opgave:

Kablens Z<sub>0</sub> er også opgivet i datablade.

Tjek karakteristisk impedans for kablet med RS-varenummer: 111-8944

Side med formler for udregning af karakteristisk impedans for forskellige kabeltyper:

<https://www.allaboutcircuits.com/textbook/alternating-current/chpt-14/characteristic-impedance/>

### **Termineringsmodstanden:**

Hvis kablet var ” uendeligt ” langt, ville der blive ved med at opbygges energi i kablet.

Men det er kabler jo typisk ikke:

Derfor, når spændingsfronten når frem til terminerings-modstanden, er energien i kablet fyldt op, og der skal leveres energi til modstanden.

Først nu begynder den tilsluttede belastning at blive interessant.

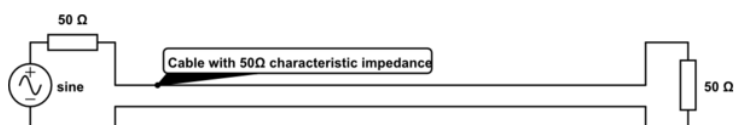
Hvis nu termineringsmodstanden har samme størrelse som kablets karakteristiske modstand  $Z_0$  vil batteriet ” tro ” at kablet har uendelig længde. Der sker ingen ændring i den strøm, batteriet skal levere !!

### **Refleksioner:**

Hidtil har vi set på energiens vej frem i kablet. Men hvad sker, når energien, - eller spændingsfronten når frem til enden af kablet?

Hvis kablet er afsluttet med en belastningsmodstand på samme størrelse som kablets  $Z_0$ , vil modstanden, - og dermed strømmen - set fra batteriet jo ikke ændre sig.

Kablet er termineret korrekt.



Her er vist et 50 ohms kabel med en terminerings-modstand på 50 ohm.

Kilde: <https://electronics.stackexchange.com/questions/93232/how-is-x%E2%84%A6-impedance-cable-defined>  
<https://electronics.stackexchange.com/plugins/schematics?image=http%3a%2f%2fi.stack.imgur.com%2f9HrS.png>

( på de to kilder er der mulighed for at simulere forholdene, - men for ORCAD-simulering, se senere!! )

Belastningen kan absorbere al energien i bølge-fronten. Men hvis belastningen ikke passer, kan der være overskud ( ved for stor modstand ) – eller for lidt energi – ved for lille termineringsmodstand.

Ved for stor belastningsmodstand ankommer der for meget energi i forhold til det, der absorberes. - og der opbygges et ”energi-overskud”, - så der reflekteres energi tilbage imod batteriet.

Størrelsen er afhængig af hvor meget tilpasningen er fra det ideelle.

De to værste tilfælde er at der enten ingen modstand er, - dvs. uendelig stor modstand, - og at der er en kortslutning.

Ingen energi kan absorbers, og konsekvensen er, at al energi reflekteres. Se kilde:<sup>1</sup>

Ved en åben terminering reflekteres signalet med samme polaritet, dvs. – positiv.<sup>2</sup>  
Og ved kortslutning vil reflektionen ha negativ polaritet !.

Ved mistilpasning vil kun en del reflekteres !!

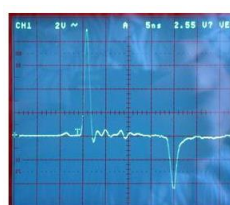
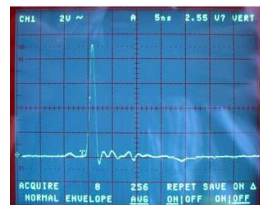
Refleksion ved 3 situationer:

Kilde:

<https://electronics.stackexchange.com/questions/171557/what-and-why-of-termination>

På siden er der også en animation!

Terminering: Korrekt afslutning      For lille      For stor



## Refleksionskoefficient

Hvordan ved kablet og termineringen så, hvor meget, der skal reflekteres. Og med hvilken polaritet? Det kan udregnes som en refleksionskoefficient.

$$\Gamma = \frac{Z_t - Z_0}{Z_t + Z_0}$$

$\Gamma$  står for refleksionskoefficient.

Hvor  $Z_t$  er termineringsmodstanden og  $Z_0$  er kablets karakteristiske modstand.

$Z_t$  og  $Z_0$  er typiske rent ohmske, men der bruges typisk  $Z$  for Impedans, just in case.

Ved korrekt terminering findes fx:  
Altså ingen refleksion.

$$R_c = \frac{50 - 50}{50 + 50} = 0$$

Ved kortslutning, dvs.  $Z_t$  er 0 Ohm fås:  
Dvs. reflektionen er 100 % men med negativ fortegn !!

$$R_c = \frac{0 - 50}{0 + 50} = -1$$

Og ved ingen terminering, dvs.  $Z_t$  er uendelig fås:

<sup>1</sup> <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/radio-frequency-analysis-design/real-life-rf-signals/understanding-reflections-and-standing-waves-rf-circuit-design/>

<sup>2</sup> <https://www.physicsclassroom.com/mmedia/waves/free.cfm>

$$R_c = \frac{\infty - 50}{\infty + 50} = +1$$

Og tilsvarende for fx 100 ohms terminering af et 50 Ohms kabel:

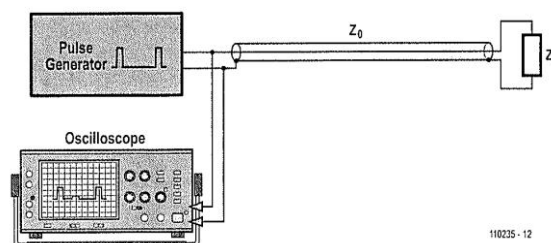
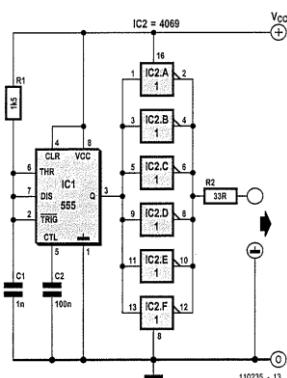
$$R_c = \frac{100 - 50}{100 + 50} = \frac{50}{150} = \frac{1}{3}$$

Kilde: elektor, 10-2011

## Fejlfinding i kabler:

Det kan faktisk bruges til at fejlfinde i kabler. Og hvis man kender puls-udbredelsehastigheden kan man udregne hvor langt ude i kablet, der evt. er en afbrydelse eller kortslutning !

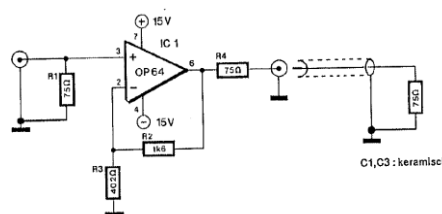
Her ses et eksempel på en pulsgenerator til at teste kabler.



Og hvordan et scop kan bruges til at vise pulserne og evt. refleksion.

Et eksempel på udgangsmodstand – 75 ohms kabel , - og 75 ohms belastning.

Modtagerens høje indgangs-impedans kobles på over modtager-termineringsmodstanden.



Kender man ikke et kables impedans, kan opstillingen også bruges til at finde den. Man kan blot prøve sig frem med forskellige termineringsmodstande, indtil der ikke reflekteres energi !!

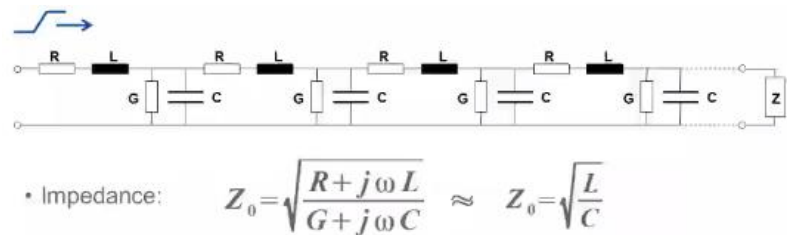
## ORCAD Simulering af transmissionslinje

En ledning er ikke bare en ledning. Vi ved godt, der er modstand i en ledning, men ud over ledningsmodstanden er der også kapaciteter mellem lederne ( og til omgivelserne ) – og hvis der skal løbe en strøm i en ledning, vil der jo opstå et magnetfelt om lederen.

Magnetfeltet kan ikke opbygges momentant, - dvs. at strømmen heller ikke kan ændres momentant. Lederen vil opføre sig som en spole.

Og kablets selvinduktion bevirker jo også, at kablets kapacitive virkning ikke kan oplades på ”no time”

Her er et ækvivalentdiagram for et kabel.



Et kables karakteristiske impedans kan måles med et RCL-måleapparat.

Man måler kapaciteten med kablets modsatte enders terminaler åbne. Og kablets induktion med de modsatte ender kortsluttet.

For en given leder kan der findes en karakteristisk impedans som kaldes  $Z_0 = \sqrt{\frac{l}{c}}$

Kablets længde er underordnet.

Det indses også, at hvis et kabel klemmes, ændres dets karakteristisk !!

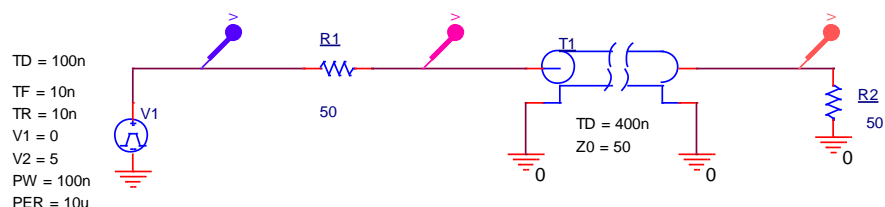
En transmissionslinje bestående af en enkelt tråd har ingen karakteristisk impedans, men er kun afhængig af omgivelserne.

## Impedanstilpasning.

For at den energi, der sendes gennem en leder, ikke skal reflekteres, skal udgangsimpedansen i afsenderen, dvs. generatoren og indgangsimpedansen i modtageren have samme værdi som kablets impedans  $Z_0$ .

## Simulering:

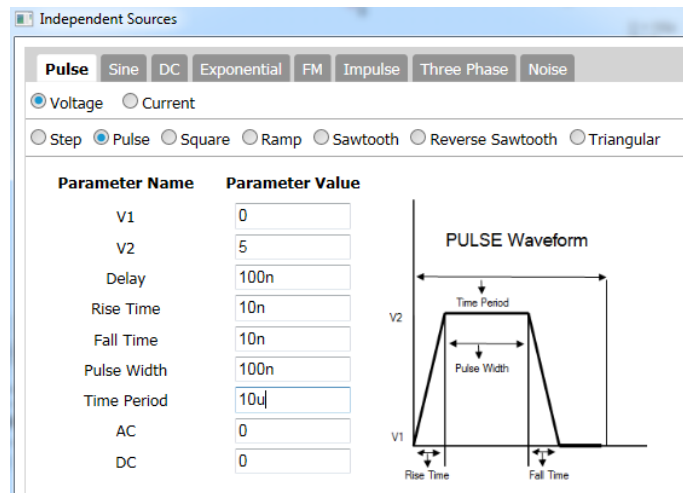
Opbyg dette kredsløb:





Pulsgeneratoren indstilles således:

Place/ Pspice component / Source / Independent Source

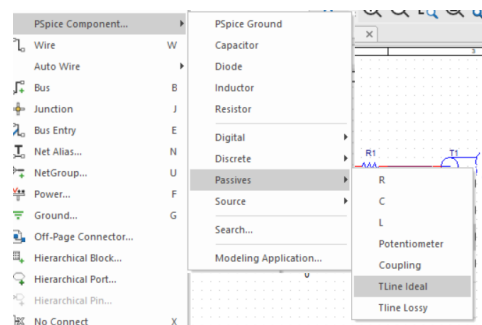


Transmissionsledningen placeres og forbindes:

Indstil dens værdier:

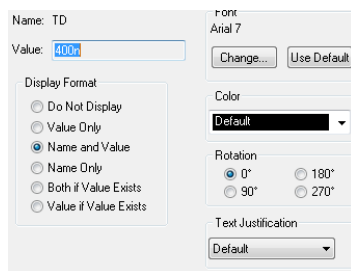
Dobb. Klik på den for at åbne dens properties:

Scroll hen og indtast Delay-time og Zout.



TD	Value	Z0
400n	T	50

Højreklik på værdierne og vælg Display:



Klik i display Name and Value.

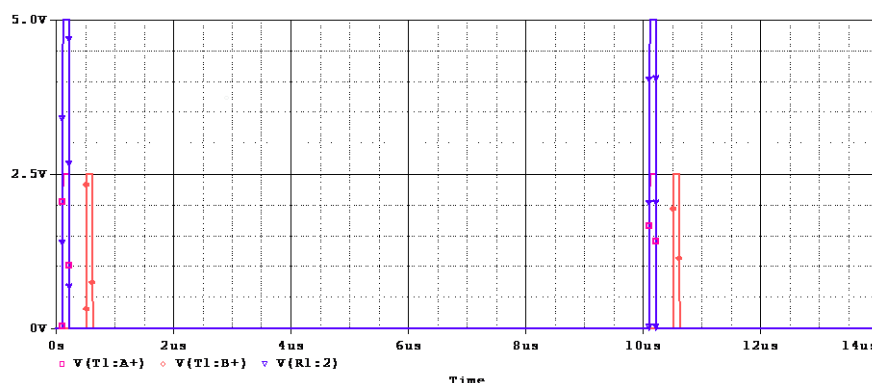
Gentag for Zout.

På samme måde kan man få vist indstillingerne for pulsgeneratoren.



Simuler nu i 14 uS.

Resultatet ser således ud:



Der overføres størst energi ved signaltilpasning.

Er der ikke korrekt tilpasning af impedanser, kan kablet ikke komme af med energien, og den uafsatte energi vil vandre tilbage gennem kablet og give en stående bølge. Det reflekterede signal adderes eller subtraheres fra det fremadgående signal og vil resultere i en varierende spænding langs kablet.

Det reflekterede signal vil være forsinket i forhold til det fremadgående signal, og der kan derfor på lange kabler fremkomme skygger på fx et tv-billede. ( i den gamle analoge verden ).

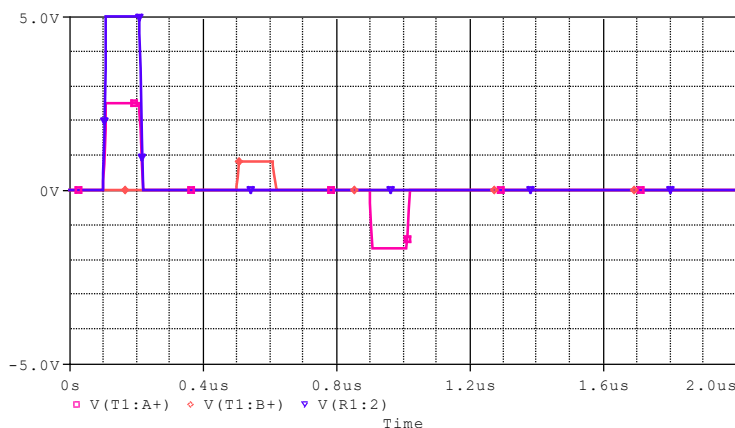
Kablets impedans ændres ikke med længden af kablet, men det gør dæmpningen af signalet.

Kabeldæmpningen angives normalt i dB/100 m ved en bestemt frekvens.

Hvis nu indgangsimpedansen ( R1 ) ændres,

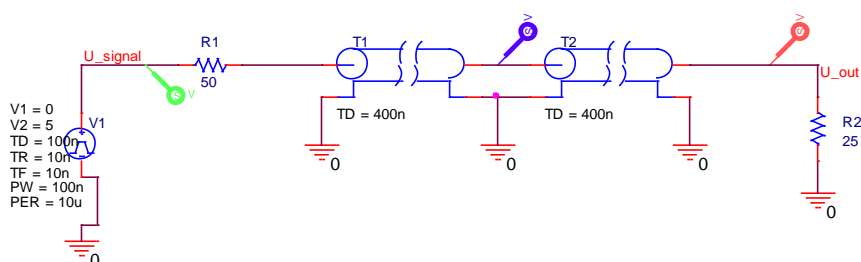
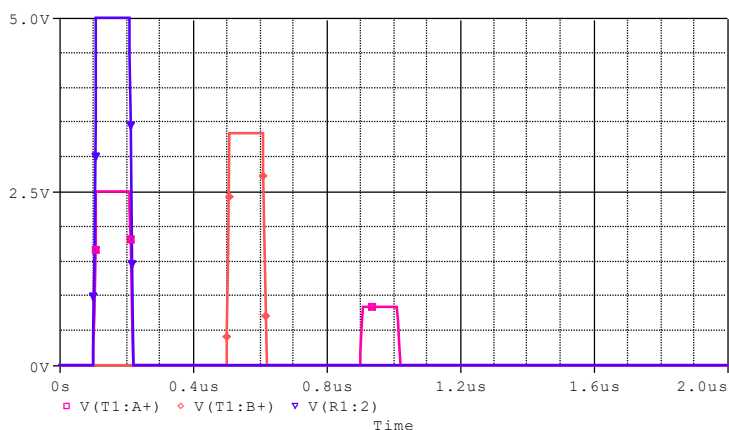
10 Ohm:

Bemærk reflektionen.

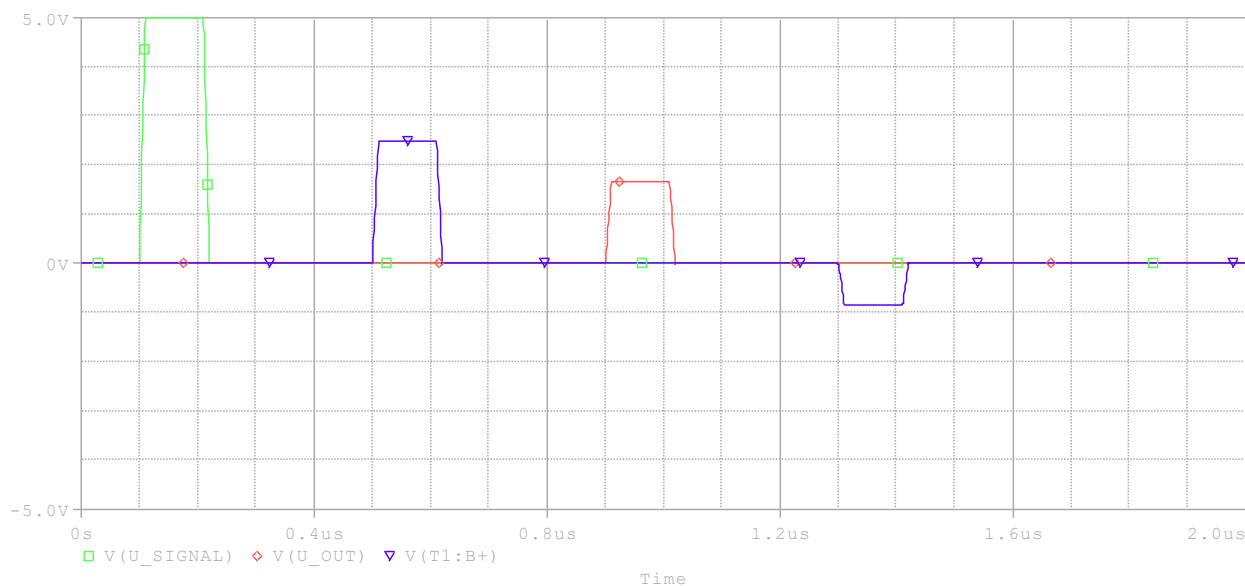


Og hvis modstanden ændres til 100 Ohm

Tjek også for uendelig stor, ( 100meg ) og for kortslutning



Hvis R1 ikke er 50 Ohm, vil det reflekterede signal reflekteres igen !!!



## Dæmpning, dB( $\mu$ V).

Det signal, der kommer i et kabel, fx et antennekabel, er meget lille målt i Volt.

Man bruger normalt at angive et signal i decibel, dB, der er et størrelsesforhold.

Et signal angivet i dB betyder, at det er X dB større end 1 $\mu$ V.

Eks.: et signal er på 56 dB $\mu$ V.

$$dB = 20 \cdot \log(x)$$

$$\frac{56}{20} = \log(x) \rightarrow 10^{\left(\frac{56}{20}\right)} = 10^{\log(x)} = x = 631$$

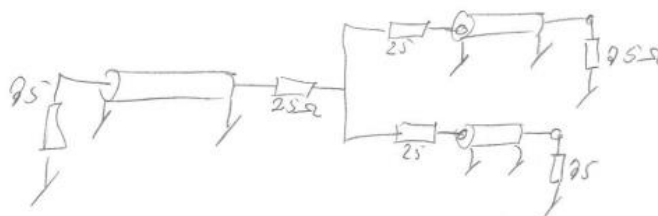
Signalet er altså på 631  $\mu$ Volt.

Ligeledes angives et signals dæmpning i dB. Eks: ved et modtagerapparat er signalet 0,8 mV. Kablets dæmpning er 10dB. Hvad var signalet før kablet ??

### Impedanstilpasning ved opsplitting af et kabel til 2 kabler:

Her er vist et eksempel på et 75 ohms kabel, der skal splittes op i 2 – også 75 Ohms kabler.

Det er vigtigt, at det første – venstre – kabel ”ser ind i” 75 Ohm for at undgå refleksioner.



De højre kabler er hver især 75 Ohm + 25 Ohm, dvs. 100 Ohm. De er i parallel, og derfor 50 Ohm tilsammen. Og med en 25 ohms modstand foran, vil det første kabel ”se” 75 Ohm.

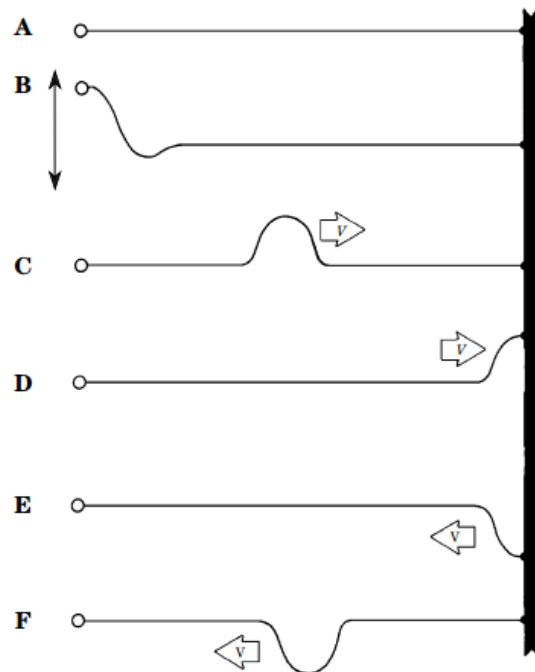
Modsatte vej er ikke et problem, da der jo ikke sker refleksion !!

### Analogi:



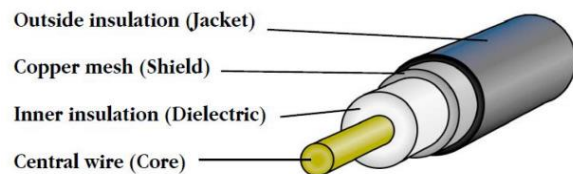
Et reb er fastgjort til en væg i en glideskinne.

[Se Kilde:](#)



The speed of light in vacuum is  $2.998 \times 10^8$  m/s. In coaxial cable, the speed of an electrical signal is about 2/3 of this. Se scop-billeder af reflekteret signal [her](#):

Opbygningen af et Coax kabel



Kilde: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:830371/FULLTEXT01.pdf>

Links:

God side: <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/alternating-current/chpt-14/characteristic-impedance/>

<https://electronics.stackexchange.com/questions/93232/how-is-x%E2%84%A6-impedance-cable-defined>

[https://www.wikiwand.com/en/Characteristic\\_impedance](https://www.wikiwand.com/en/Characteristic_impedance)

<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/characteristic-impedance>

Refleksion ved forkert terminering: <https://electronics.stackexchange.com/questions/171557/what-and-whys-of-termination>

<https://www.physicsclassroom.com/mmedia/waves/fix.cfm>

<https://www.physicsclassroom.com/mmedia/waves/free.cfm>

Og se her, med animation af både åben og kortsluttet:

<https://electronics.stackexchange.com/questions/171557/what-and-whys-of-termination>



Animation:

[https://www.youtube.com/watch/ozeYaikI11g?&ab\\_channel=LecturesbyWalterLewin.Theywillmakeyou%E2%99%A5Physics](https://www.youtube.com/watch/ozeYaikI11g?&ab_channel=LecturesbyWalterLewin.Theywillmakeyou%E2%99%A5Physics).

Sim: med LTSpice: <https://iexploresiliconvalley.com/2019/08/27/ltspice-lesson-3-transmission-lines-part-1/>