

Dynamische eigenschappen van een meetsysteem: De RC en RLC keten

A.1 Inleiding

In dit practicum worden de RC en RLC ketens beschouwd, en hun analogie met of functie als respectievelijk eerste en tweede orde elementen wordt bestudeerd. Hiervoor zullen deze elektronische circuits geconstrueerd worden, en zal de respons van zowel (quasi-) transiente als periodische signalen bekeken worden. De theorie en terminologie gehanteerd in het practicum is die van (meet)systemen (m.a.w. er wordt eeningangssignaal beschouwd, dat geattenuëerd wordt door een systeem met bepaalde transferfuncties, dat zorgt voor een bepaald uitgangssignaal). De wiskundige 'tool' om dit efficiënt te vatten, is die van de Laplace transformatie.

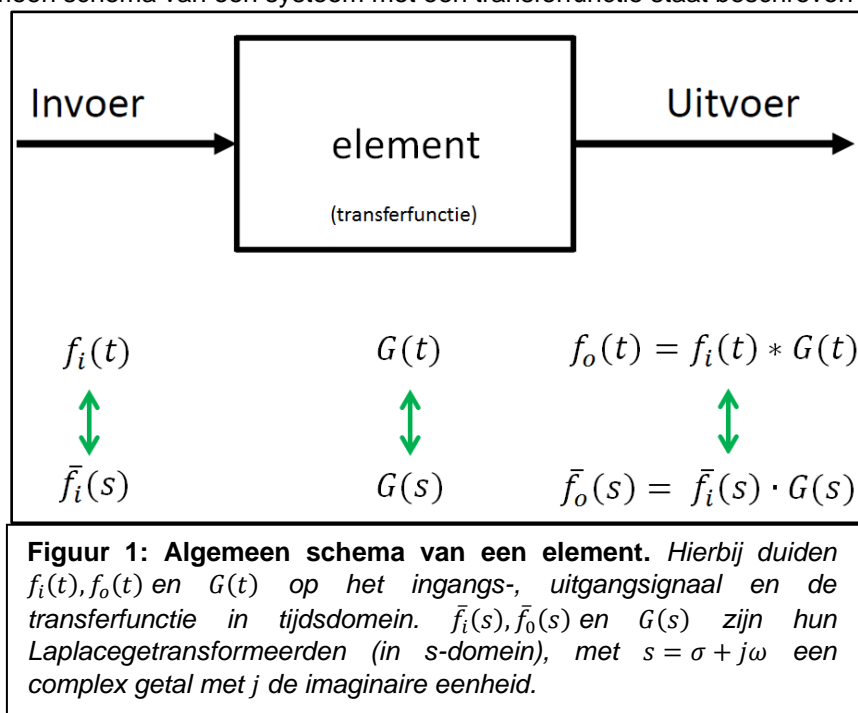
A.2. Referenties

[1] 'Inleiding tot meetsystemen II', Experimentele Basistechnieken in de Natuurkunde 2020-2021 (G0P32A), Joris Van de Vondel, cursus nota's, Leuven (2021)

B.1. Theorie en fysische achtergrond

Systemen en transferfuncties

Een algemeen schema van een systeem met een transferfunctie staat beschreven in figuur 1.



Laplace transformatie

Zoals reeds aangehaald in de inleiding, wordt gebruik gemaakt van de Laplace transformatie (en de eigenschappen van complexe getallen) om op een efficiënte manier om te gaan met signalen en transferfuncties, doordat de bewerkingen in het s -domein gemakkelijker uit te voeren zijn, en de interpretatie ervan (denk b.v. aan amplituderespons) relatief eenvoudig is. Voor details, zie [1].

Circuits

In figuren 2,3 en 4 staan respectievelijk de (seriële) RC, CR en RLC ketens schematisch weergegeven, met R een weerstand [Ω], C een capaciteit [F] en L een spoel [H]. De ingangs- en uitgangssignalen zijn in dit geval de spanningen V_{in} en V_{uit} . Zie *Appendix 1* voor de tekenconventie m.b.t. het faseverschil tussen twee periodische signalen. Merk op dat er het enige verschil tussen de RC en CR ketens is, dat de uitgangsspanning gemeten wordt over verschillende componenten¹.

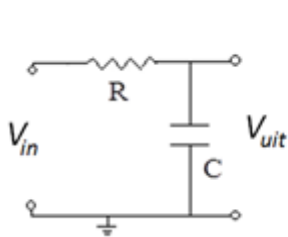


Fig. 2. RC- keten

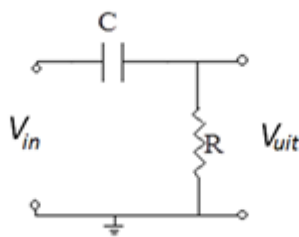


Fig. 3. CR- keten

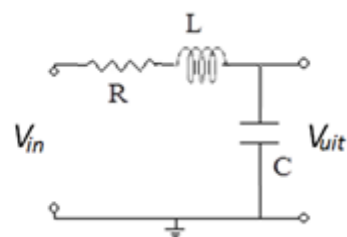
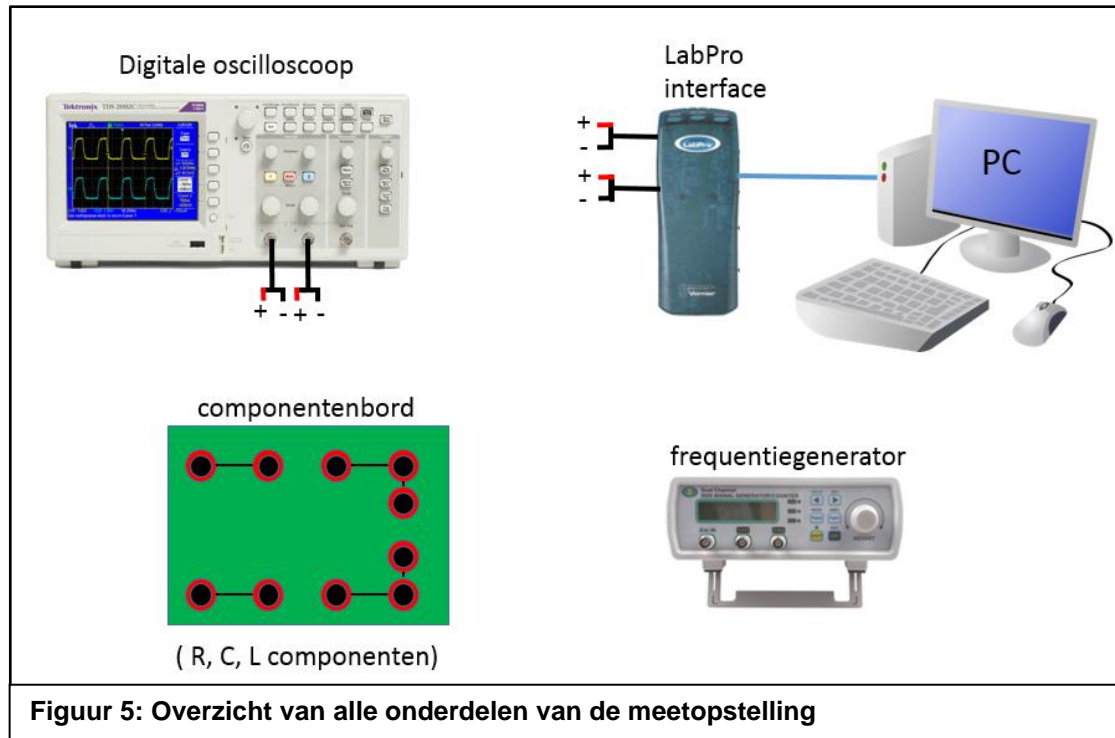


Fig. 4. RLC- keten

¹ Het is echter enerzijds gemakkelijk om deze twee ketens uit elkaar te houden op deze manier (als ‘RC’ en ‘CR’). Anderzijds is het (in principe afhankelijk van de details van het meetcircuit) belangrijk om de aardingspolen van de spanningscontacten waarmee V_{in} en V_{uit} gemeten worden, op dezelfde potentiaal te hebben. In figuren. 2,3 en 4 wordt dit expliciet getoond.

B.2. De meetopstelling

B.2.1. Hardware



In figuur 5 staat een overzicht van alle onderdelen van de beschikbare meetopstelling. De verschillende onderdelen zijn:

- **Componentenbord.** Een bord waarop de verschillende elektronische componenten en signaalkabels gemakkelijk bevestigd kunnen worden. Beschikbaar zijn verschillende weerstanden $R = 100\text{ k}\Omega, 10\text{ k}\Omega, 1\text{ k}\Omega, 100\ \Omega, \dots$, condensatoren $C = 10\ \mu\text{F}, \dots$ en spoelen $L = 15\text{ nH}, 3.5\text{ nH}, \dots$.
- De **frequentiegenerator** laat toe om verschillende golfvormen (sinus, blokgolf) te genereren met frequenties tussen 0.2 Hz en 2 MHz. De amplitude kan ook aangepast worden.

Vervolgens zijn er 2 toestellen beschikbaar om zowel het in- en uitgangssignaal te bestuderen.

- De **LabPro interface** laat toe om signalen te registreren met de **PC**, waarna ze kunnen worden opgeslagen en bewerkt voor verdere data-analyse. In dit geval is het mogelijk om 2 signalen tegelijkertijd te registreren (bedoeld voor in- en uitgangssignaal). Deze worden doorgegeven aan de PC (zie volgende sectie voor een bespreking van de software). Er zijn twee belangrijke limitaties aan dit systeem:
 - o De maximale ingangsspanning van de LabPro is $\pm 10\text{V}$. Dit heeft tot gevolg, dat te grote signalen worden afgekapt op $\pm 10\text{V}$.

- De signalen ondergaan een ADC conversie (analog to digital conversion). De maximale samplefrequentie van dit toestel is 5 samples per ms. De samplefrequentie is de frequentie waarmee de LabPro interface datapunten verzameld (bijvoorbeeld, wanneer een sinus van 100 Hz wordt gesampled aan een samplefrequentie van 5 samples per ms, dan wil dat zeggen dat in een periode van de geregistreerde golf, 50 datapunten zitten). Wanneer de frequentie van de geregistreerde golf te hoog is, dan zal de interface deze niet goed kunnen samplen. Zonder te veel in details te treden, betekent dit voor de gebruikte LabPro interface, dat signalen boven ~ 500 Hz, niet meer geregistreerd kunnen worden.
- **De digitale oscilloscoop.** Dit is de moderne, digitale tegenhanger van de analoge oscilloscoop (zoals gebruikt in practicum 1). De manier om te werken met deze oscilloscoop is gelijkaardig aan het werken met de analoge oscilloscoop. Meerdere kanalen kunnen gebruikt worden om signalen weer te geven op het scherm van de oscilloscoop, waarbij de x-as (tijdsas) en de y-as (spanning) aangepast kunnen worden om het signaal weer te geven. Wederom is er een triggerfunctie die ervoor zorgt dat een stilstaand beeld verkregen worden (m.a.w., bij het verversen van het beeld, wordt steeds hetzelfde stuk van de golfvorm hertekend wordt). Op dit digitale toestel is ook een 'autoset' functie, die triggert en ervoor zorgt dat de tijds- en spanningsas met een redelijke divisie worden weergegeven. Een beknopte handleiding van dit toestel staat in *Appendix 2*.

Merk op dat de LabPro en de oscilloscoop tegelijkertijd gebruikt kunnen worden (door de kanalen in parallel te schakelen op de in- en uitgang van het element). De digitale oscilloscoop heeft dus het voordeel dat in real-time de signalen bestudeerd kunnen worden, en dat de bandbreedte groot genoeg is zodat alle mogelijke aangelegde signalen door de frequentiegenerator gevolgd kunnen worden – maar er kan geen data worden opgeslagen met dit toestel. De LabPro interface (+ PC) laat dit wel toe, maar deze geeft geen real-time informatie weer en kan geen signalen met een frequentie groter dan ongeveer 500 Hz registreren.

B.2.2 software

De bijbehorende Logger-Pro software laat ons toe om op een relatief eenvoudige wijze de data te registreren met de LabPro en te analyseren. Je vindt deze software door in de Windows zoekbalk te zoeken naar “**RC_Prof_Rogiers**”.

Data registreren:

- Zodra je op de knop “Collect” drukt, wordt data ingelezen door de computer en op het scherm weergegeven. Op de verticale as wordt de grootte van de spanning (in V) weergegeven. De horizontale as geeft de tijdsduur weer (in s).
- Men kan de eigenschappen van de assen aanpassen op de volgende manier: druk met de rechtermuisknop op de grafiek, en kies ‘Graph Options’. In de Axis-options, kun je b.v. het bereik van de x-as veranderen.
- Je kunt de data opslaan als .txt of .csv.

Data fitten. Mocht je geïnteresseerd zijn in een fit aan de data, dan is dat mogelijk met dit programma. Voor de uiteindelijke analyse, is het wellicht beter om dit met een ander programma te doen (waar je beter de fout of de fit(parameters) kent bijvoorbeeld).

- Je kan een deel van de data op de grafiek selecteren door de muiscursor op een bepaalde plaats te zetten, vervolgens te klikken op de linkermuisknop, deze ingedrukt te houden en de muis te slepen van links naar rechts.
- Voor zo'n geselecteerde curve kan het programma zelf ook aan data-analyse doen
- Kies nu in de menubalk voor 'Analyse' en vervolgens voor 'Curve Fit' en dan het gewenste signaal (b.v. Potential 2).
- Je kunt de software opdracht geven de best passende functie met een bepaald voorschrift (die reeds gedefinieerd is, of die je zelf kun definiëren in 'Curve Fit Properties' en kies in het veld 'General equation' de vergelijking met als melding bijvoorbeeld : "define function A*exp(-C*(t-t0))")

Bij het fitten zullen de parameters A, B en C berekend worden zodat deze vergelijking een kromme geeft die het best past bij de opgemeten datapunten.

Kies voor het veld 'Perform Fit on' voor het gewenste signaal.

- Klik op 'Try fit'. De computer start de berekening. Even geduld dit kan enkele seconden duren. Op het scherm verschijnt de gekozen vergelijking met de berekende parameters ingevuld.

Het kan zijn dat je de parameters van de datacollectie moet aanpassen (b.v. de samplefrequentie, waarvan we weten dat deze maximaal 5 per ms is.). Doe dit bij 'experiment - data collection'.

C.1. Voorbereidende opgaven

1a. Bereken de output in tijdsdomein $f_o(t)$ van een RC keten (figuur 2) met als input de rechthoekige puls $P(t)$ zoals gegeven in fig C.1. Geef de volledige uitwerking! Doe dit door eerst $\bar{f}_o(s)$ te berekenen en daarvan de inverse Laplacetransformatie te bepalen². Voor het vereenvoudigen van de algebra, mag je $a = 0$ nemen (de puls heeft een stap naar amplitude 1 op $t=0$). Enkele tips en eigenschappen die je zult nodig hebben:

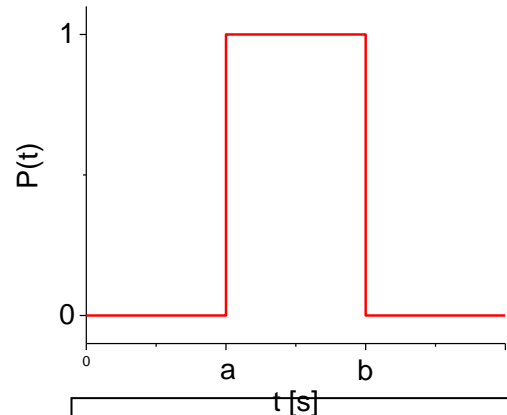


Fig. C.1. Rechthoekige puls $P(t)$ met hoogte 1.

- De rechthoekige puls $P(t)$ (met $a = 0$) kun je zien als de lineaire combinatie van de stapfunctie $\mu(t)$ (voor definitie, zie o.a. de Laplace tabel gezien in de les [1]) en een verschoven stapfunctie $\mu(t - b)$. Voor deze laatste geldt dat $\mu = 0$ voor $t < b$ en $\mu = 1$ voor $t > b$. Dus: $P(t) = \mu(t) - \mu(t - b)$
- De Laplace transformatie is lineair:
 $\mathcal{L}\{af(t) + bg(t)\} = a\bar{f}(s) + b\bar{g}(s)$
- De transferfunctie van de RC keten ken je ! [1]
- De Laplace transformatie van de verschoven stapfunctie is:

$$\mathcal{L}\{\mu(t - b)\} = \frac{e^{-bs}}{s}$$

- Om de inverse Laplace van $\bar{f}_o(s)$ te vinden, herschrijf je het resultaat zodat je de individuele termen kunt transformeren met behulp van de tabel van de les [1]. Voor producten van zulke gekende termen met e^{-bs} . Gebruik je de volgende eigenschap ('inverse shifting property' – met de definitie van de Laplace transformatie is deze eenvoudig te verifiëren):

$$\mathcal{L}^{-1}\{e^{-as}\bar{g}(s)\} = g(t - a) \cdot \mu(t - a)$$

1b. Voor grote waarde van b zal uit het resultaat van 1a duidelijke worden dat in de respons initieel de **volledige** oplading van de condensator plaatsvindt, en daarna volledig opgeladen condensator ontladtd. Laat dit zien aan de hand van je resultaat in 1a (m.a.w. laat zien wat de functie $f_o(t)$ beschrijft voor $(t \leq 0,)$ $0 \leq t \leq b$ en $t \geq b$). Ten opzichte van welke constante moet b groot zijn om een volledig oplading te verkrijgen (oftewel, wat bepaald hoe breed de puls moet zijn om volledig oplading te krijgen)? (Voor 'volledige' oplading mag je als criterium nemen dat de condensator $\geq 99\%$ van de maximale lading heeft).

² $\bar{f}_o(s)$ is de Laplace transformatie van $f_o(t)$: $\mathcal{L}\{f_o(t)\} = \bar{f}_o(s)$

2a. Bepaal de transferfunctie $G(s) = \frac{\bar{F}_o}{\bar{F}_i}$ van de **CR**-keten (figuur 3). Bepaal hierna voor een sinusgolf de amplitude en faserespons, te halen uit $G(s)$ (dus $|G(j\omega)|$ en $\arg G(j\omega)$)

2b. Bereken bij welke frequentie is de amplituderrespons $|G(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{2}}$. Dit is de zogenaamde 'cutoff'-frequentie ω_c [rad/s] (of $\frac{\omega_c}{2\pi} = f_c$ [Hz]): bij deze frequentie wordt het inkomende signaal verzwakt tot $\frac{1}{\sqrt{2}} \sim 71\%$ ³. In het geval van de berekende CR-keten, vertelt deze parameter dat signalen met frequenties lager dan ω_c sterk worden geattenuëerd door het systeem, maar dat signalen met frequenties hoger dan ω_c worden 'doorgelaten'.

3. In figuur 4 staat de RLC-resonantieketen getekend zoals deze ook bestudeerd is in het eerste practicum (metingen met de oscilloscoop). De respons van dit tweede-orde element is analoog aan die van het systeem van gedwongen oscillatie en resonantie (gezien in practicum 4). In de les [1] werd getoond dat voor de gedwongen oscillatie, de volgende differentiaalvergelijking opgesteld kan worden voor de tijdsevolutie van de uitwijking Δx :

$$\frac{1}{\omega_n^2} \frac{d^2 \Delta x}{dt^2} + \frac{2\xi}{\omega_n} \frac{d\Delta x}{dt} + \Delta x = \frac{1}{k} \Delta F$$

Hier is ΔF de aandrijving, ω_n de ongedempte natuurlijke frequentie en ξ de dempingsfactor. Stel nu de differentiaalvergelijking op voor het RLC circuit (maak gebruik van de spanningswet van Kirchhoff en gebruik de spanningskarakteristiek van ieder element), en herschrijf deze in de algemene vorm. Waarvan wordt nu de tijdsevolutie beschreven? Wat zorgt voor de aandrijving? Welke componenten bepalen nu ω_n en ξ ?

³ Amplitude wordt dikwijls uitgedrukt in de 'eenheid' decibel (dB), hetgeen strikt gezien geen eenheid is, maar een verhouding op logaritmische schaal (met als definitie: **amplitude in dB** = $20 \log_{10} \left(\frac{|x(\omega)|}{|x(\omega = 0)|} \right)$). Het is om die reden dat deze cutoff frequentie ook vaak de ' -3dB – frequentie' genoemd wordt, aangezien:

$$20 \log_{10} \left[\frac{1}{\sqrt{2}} \right] \approx -3dB$$



C.2. Opgaven

Hier staat beschreven welke systemen er met welke invoer bestudeerd moeten worden tijdens het practicum. In de volgende sectie (D) staat nog eens expliciet wat er in het verslag verwacht wordt. Denk aan het noteren van meetfouten tijdens het practicum indien nodig!

Houd de beperkingen van het de meetapparatuur in het oog. Voor de eerste 2 opgaven gaat het mogelijk zijn om de LabPro interface te gebruiken voor het registreren van signalen – Voor de derde opgave niet. Dit heeft ermee te maken dat de sampling frequentie van de LabPro interface te laag is om signalen rond de typische resonantiefrequenties van de RLC keten te registreren⁴.

C.2.1: De RC keten: respons van een rechthoekige puls

In de voorbereidende opgave heb je de respons van een rechthoekige puls door de RC-keten (figuur 2) berekend. Je hebt ook onderzocht dat het resultaat vrij eenvoudig te interpreteren is als het op- en ontladen van de condensator.

Gebruik nu de frequentiegenerator om een blok golf aan te leggen door het RC circuit. Registreer het in- en uitgangssignaal. Kies de verschillende parameters van het systeem zo, zodat de condensator van het systeem volledig oplaadt tijdens 1 rechthoekige puls van de blok golf (een halve periode), en dus ook volledig ontladt na de rechthoekige puls. Zie sectie D voor de verdere analyse die we verwachten.

C.2.2: De CR keten: doorlaatkarakteristiek (d.m.v. een sinusgolf)

In voorbereidende opgave 2 heb je de amplitude en faserespons van de CR-keten berekend. Maak zelf zulk circuit en leg hier een sinusgolf op aan. Registreer het in- en uitgangssignaal bij een 15-tal goed gekozen frequenties (het is wellicht best om eerst 'snel' een frequentiesweep te doen om te zien of het systeem zich gedraagt zoals je verwacht, vooralleer je begint de uiteindelijke data op te slaan). Neem zeker frequenties op en rond de cutoff frequentie, en een aantal frequenties voldoende laag en hoog.

Het is de bedoeling dat je de data gaat gebruiken om een amplitude en faseplot te reconstrueren. Zie sectie D voor de verwerking die we verwachten.

Zie Appendix 1 voor het bepalen van het faseverschil en de tekenconventie

C.2.3: Systeemrepons van de RLC keten.

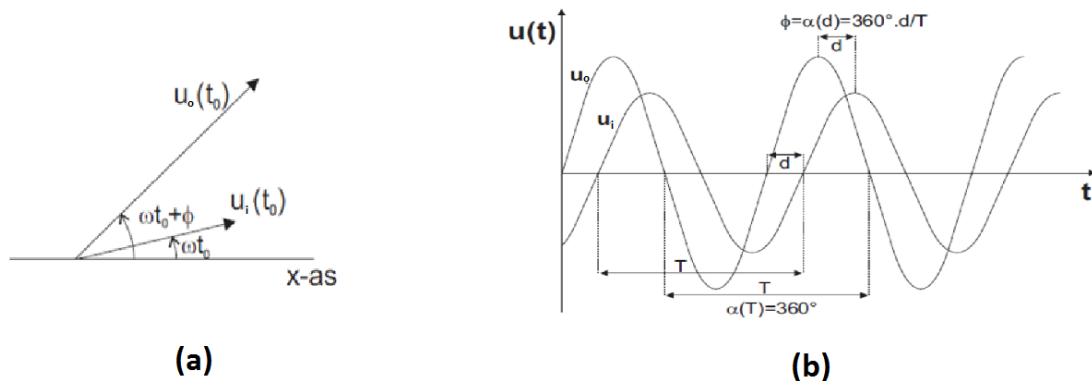
In voorbereidende opgave 3 hebben jullie de analogie aangetoond tussen de mechanische gedwongen oscillatie en de RLC keten. De resultaten die jullie in de les [1] berekend hebben gevonden voor de mechanische gedwongen oscillatie (transferfunctie, amplitude- en faserespons,...) zijn dus perfect toepasbaar op de RLC-keten. Bedenk zelf een twee- of drietal testen/experimenten (dit mogen 'korte' zijn) om dit te verifiëren (gebruik de beschikbare componenten om de resonantie, damping te veranderen,... etc.).

⁴ De resonantiefrequentie van een RLC keten wordt bepaald door de L en C. Aangezien deze componenten typisch van de grootteorde mH en μF zijn, is het moeilijk om de resonantiefrequentie beneden de $\sim 1\text{kHz}$ te verkrijgen (condensatoren en spoelen met grotere waarden zijn duur en/of redelijk groot, en dus niet beschikbaar in het practicum).

D. Opmerkingen voor het verslag

- Het is niet nodig is om dit op een rigoureuze statische methodes toe te passen (*hypothese*-testen,...) om 2 waarden zoals een theoretische en een experimentele met elkaar te vergelijken: het bespreken d.m.v. hun waarden en de foutmarges te vergelijken volstaat!
- De opgaven tijdens het practicum bouwen verder op de voorbereidende opgaves. De essentiële resultaten van deze opgaven mogen dus zeker terug aan bod komen in het verslag, maar afleidingen e.d. hoeven zeker niet herhaald te worden!
- Verder wordt concreet het volgende verwacht van de verschillende opgaven:
 - **Opgave C.2.1:**
 - o Een uiteenzetting over het circuit en je keuze van R,C en de periode van de blokgolf. Klopt de bekomen respons met de theorie (voorbereidende opgave 1)?
 - o Het bepalen van de karakteristieke tijd τ door middel van i) een fit aan de op- en ontladcurve, ii) de nominale waarden van de componenten R en C en iii) het bepalen van de tijd waar de genormaliseerde curves gelijk zijn aan $1 - e^{-1}$ (opladen) of e^{-1} (ontladen).
 - o Vergelijk de τ die bekomen zijn op verschillende manieren. Zijn ze consistent met elkaar?
 - o Hoe weet je wanneer de condensator volledig is opgeladen? (tip: spanningsbron)
 - **Opgave C.2.2:**
 - o Geef de amplitude en faseplot die je bekomen bent uit de data. Komt dit overeen met de theorie (voorbereidende opgave 2)?
 - o Duid zeker de cutoff-frequentie aan (berekend op basis van de waarde van de componenten). Komt deze overeen met het punt waar de (genormaliseerde) amplitude gelijk is aan $1/\sqrt{2}$?
 - o Wat voor soort filter vormt dit circuit?
 - **Opgave C.2.3.**
 - o Toon aan dat je de analogie tussen de mechanische gedwongen oscillatie en de RLC keten begrepen hebt, door beknopt de test / het experiment dat je zelf heb bedacht uit te leggen met een duidelijke conclusie.

Appendix 1: Faseverschil en tekenconventie



Figuur App 1. Faseverschil en tekenconventie. A) Fazorendiagram van een in- en uitgangssignaal op tijd $t=t_0$, namelijk $u_i(t_0) = U_i \sin(\omega t_0)$ en $u_o(t_0) = U_o \sin(\omega t_0 + \phi)$ respectievelijk. **B)** $u_i(t)$ en $u_o(t)$ in functie van tijd. Middels het tijdsverschil d kan het faseverschil ϕ berekend worden voor een gekende periode T .

In Fig. App 1. Staat een illustratie van het faseverschil tussen een ingangssignaal $u_i(t) = U_i \sin(\omega t)$ en outputsignaal $u_o(t) = U_o \sin(\omega t + \phi)$ in zowel een fazorendiagram (a) als een tijdsweergave van de golven (b). Hier is U_k ($k=i,o$) de amplitude, $\omega=2\pi f = 2\pi/T$ de hoekfrequentie (met frequentie f en periode T), en ϕ het faseverschil. De conventie van het teken overeen met diegene uit de les [1]. Wanneer $\phi > 0$ ($\phi < 0$), ligt $u_o(t)$ voor (achter) op $u_i(t)$. Voor $\phi = 0$ zijn de twee signalen in fase.

Merk op dat voor het voorbeeld in Fig. App 1 $U_o > U_i$ hetgeen voor de bestudeerde systemen (filters,...) niet dikwijls het geval zal zijn!

Appendix 2: Beknopte handleiding digitale oscilloscoop.

In contrast to an analog oscilloscope, a digital oscilloscope uses an analog-to-digital converter (ADC) to convert the measured voltage into digital information. It acquires the waveform as a series of samples, and stores these samples until it accumulates enough to describe a waveform. The digital oscilloscope then re-assembles the waveform for display on the screen. The number of bits in an ADC affects both the resolution (i.e. de smallest change in the signal that can be detected) and the speed of the oscilloscope.

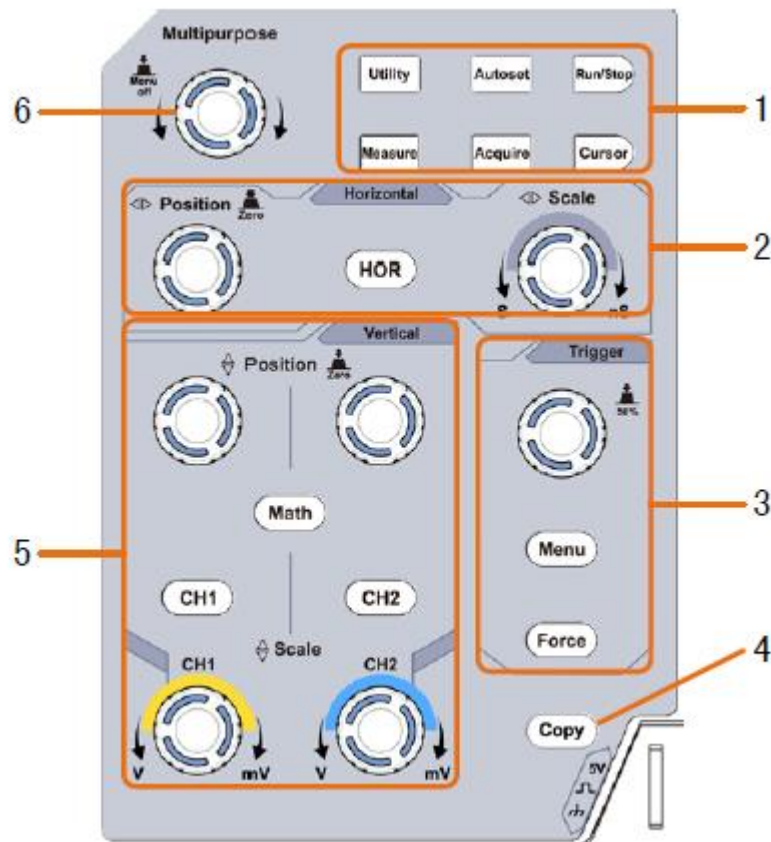


Figure App1: control area overview

The sections and controls of a digital oscilloscope

The display screen consists of a grid of horizontal and vertical lines. The space between horizontal lines is called the time division or time base. The time per division determines the resolution of the x-axis and can be adjusted using the horizontal system. In the same manner, we can define the space between vertical lines as voltage division. Each centimeter on the y-axis corresponds to the resolution we set. For instance, 1mV/div means that one centimeter (which is the size of one of the square divisions on the screen) will represent 1mV.

With the **vertical controls** (area 5 in figure App1) you can set the attenuation or amplification of the signal. It consists of two channels. The volts-per-division setting (usually written as volts/div) is a scaling factor that varies the size of the waveform on the screen. Use the CH1 and CH2 dial to adjust the amplitude of the signal to the desired measurement range. The volts/div setting for the two channels can be read from '18' in figure App2. The vertical POSITION control allows you to move the waveform up and down exactly where you want it on the screen.

The seconds-per-division (sec/div) setting lets you select the rate at which the waveform is drawn across the screen. It is also known as the time base setting or sweep speed. This setting is a scale factor. If the setting is 1ms, each horizontal division represents 1ms. Changing the sec/div setting enables you to look at longer and shorter time intervals of the input signal. It can be changed with the 'horizontal scale' dial, located in area 2 as indicated in figure App1. The sec/div setting for the two channels can be read from '19' in figure App2.

If no **trigger** is used the signal will not be stable and smeared. This is a consequence of the difference in frequency between the signal frequency and the sampling rate. The solution is that a trigger will be used to match the consecutive images and generate the illusion of a stable signal. An oscilloscope's trigger function is crucial for having a clear signal because it is synchronizing the horizontal sweep at the correct point of the signal. Trigger controls allow you to stabilize repetitive waveforms and capture single-shot waveforms. Edge triggering is the basic and most common type. Advanced trigger controls enable you to isolate specific events of interest to optimize the oscilloscope's sample rate and record length. If a signal is not stable on the screen you need to change the trigger level. However, if the signal level is too low with a lot of noise the oscilloscope will not be able to trigger correctly. Hence, always trigger on the strongest signal.

The oscilloscope needs to be **regulated** to properly visualize the signal generated by the function generator. By regulating the VOLTS/DIV and the SEC/DIV knobs, try to get a clear view of the waveform on the screen. Often, we want to visualize a signal, but we do not know the amplitude or the frequency. By pressing the **AUTOSET** button, the oscilloscope will automatically adjust the parameters to have the waveform of the channel properly displayed. It automatically sets the vertical and horizontal commands and the trigger. This is a very useful feature available only in the digital oscilloscope. This AUTOSET function however, might also put you for unwelcome surprises....

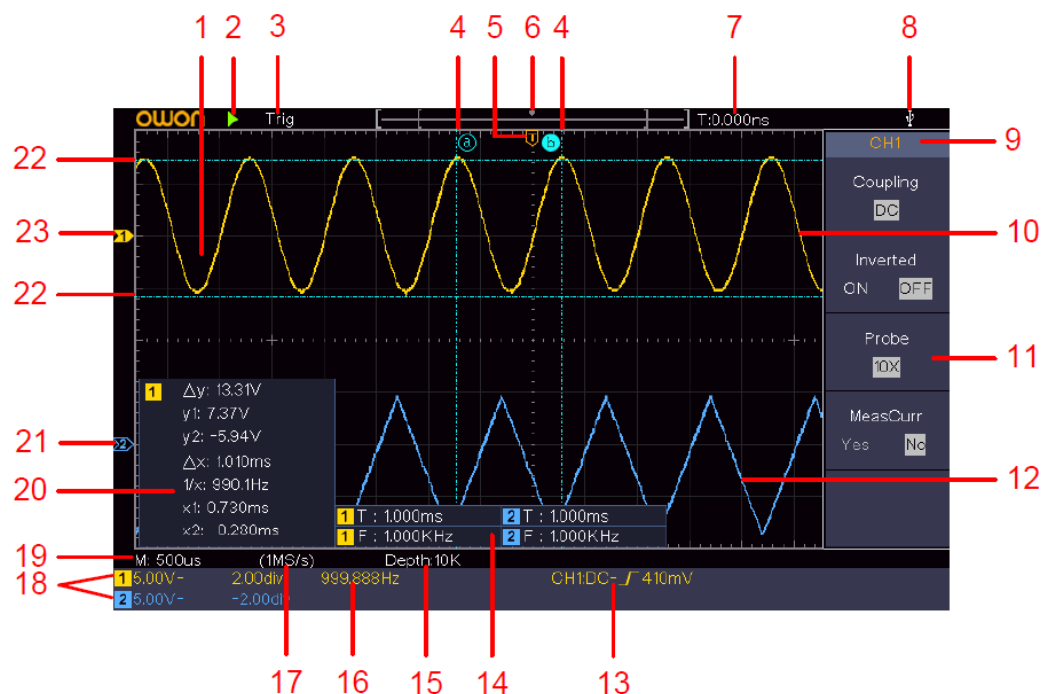


Figure App2: Illustrative Drawing of Display Interfaces

Measurements on signals:

- 1) First of all, you can **manually measure signals** (for example, determine the period or amplitude), by reading them using the divisions visible on the screen.

- 2) **Cursors** allow you to perform more accurate measurements of voltages and times. Press the CURSOR button (located in area 1, indicated in figure App1) to show the cursor measurement function menu on the oscilloscope display. To switch between time and voltage cursors, change the settings by pressing the first two button in area 2, as indicated in figure App1. The current position of the cursors is shown in the 'cursor measure window', indicated by 20 in figure App2. The cursor position can be adjusted with the 'Multipurpose' dial, indicated by '6' in figure App1. By pressing the fourth button in area 2, you can change the distance between the cursors. By pressing the fifth button in area 2, you can switch between CH1 and CH2.
- 3) In principle, the oscilloscope has an option to automatically perform certain measurements. You can find this using the MEASURE button to show the MEASURE menu. However, performing measurements with one of the above methods (i.e.1) or 2), thus manually or with cursors), proves to be more accurate.