

1. FILTERTECHNIEK

1.1. Soorten Filters

- Laagdoorlaatfilters
- Hoogdoorlaatfilters
- Banddoolaatfilters
- Bandsperfilters
- Wienbrug-filter

Alle filters kunnen zowel worden uitgevoerd met weerstanden en condensatoren als met weerstanden en spoelen en ook combinaties van zowel spoelen, condensatoren en weerstanden zijn mogelijk.

De besproken filters worden veelal in combinatie met operationele versterkers toegepast zoals later besproken zal worden. Hierdoor kunnen de eigenschappen van een filter aanzienlijk worden verbeterd.

1.2. Filterkarakteristieken

1.2.1. Transferkarakteristieken

De transferfunctie of de versterkingsfactor van een schakeling is gelijk aan de verhouding van de uitgangsspanning op de ingangsspanning.

$$\frac{u_o}{u_i}$$

Meestal wordt de transferkarakteristiek uitgedrukt in decibel:

$$A_v \text{ (dB)} = 20 \log \frac{u_o}{u_i}$$

1.2.2. Bodediagram

Uit de transferkarakteristiek werd voor filtertechniek in de elektronica het 'Bodediagram' afgeleid. Hierbij worden steeds twee typische karakteristieken gegeven:

- De amplitudekarakteristiek
- De fasekarakteristiek

NETWERKEN

1.2.2.1. Amplitudekarakteristiek

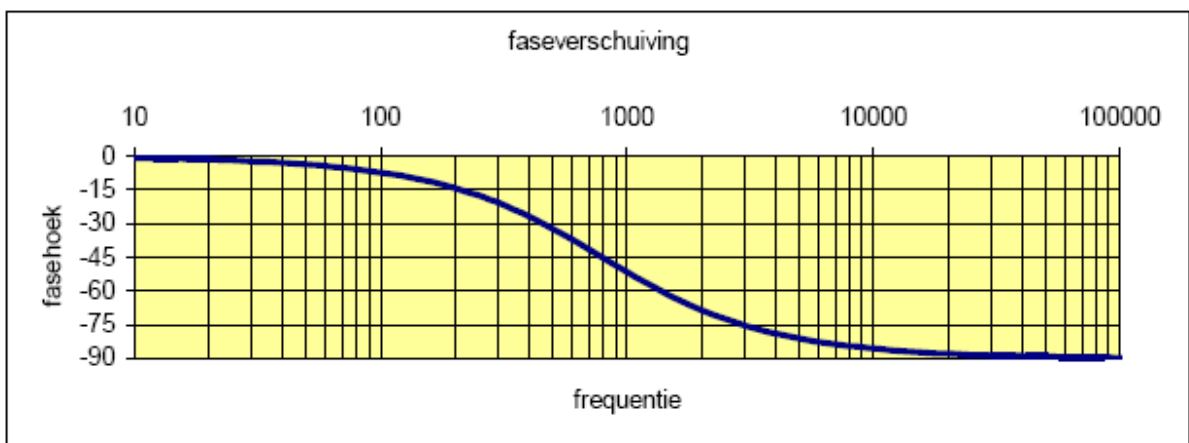
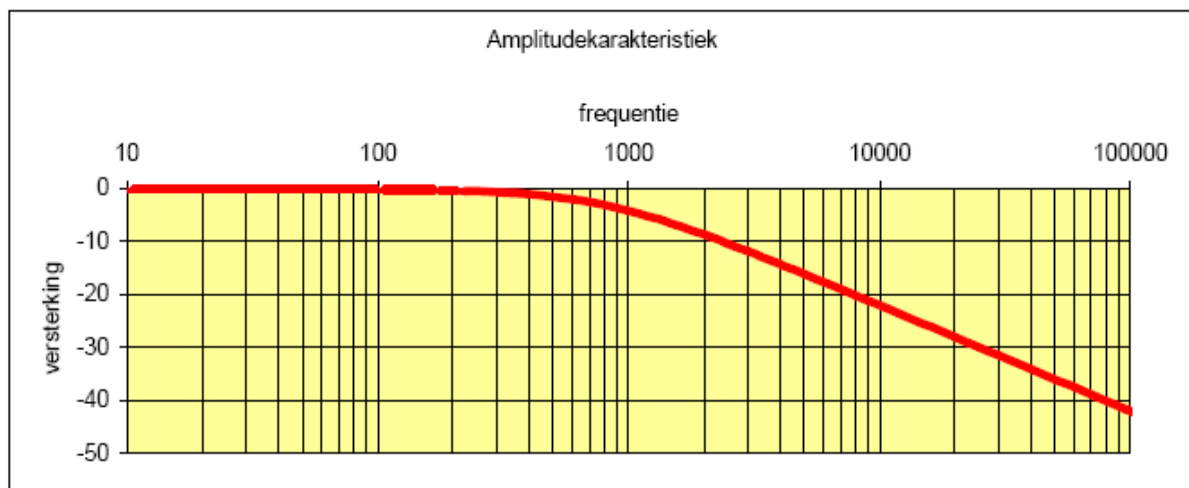
Op de x-as geven we de frequentie weer op een logaritmische schaal. Hierbij is dus de schaal weergegeven als machten van 10. Iedere vermenigvuldiging met 10 wordt hier aangegeven als een 'decade'. De y-as geeft de versterking weer uitgedrukt in decibel (dB).

Het bodediagram is de asymptotische (raaklijnen) weergave van de reële karakteristiek waarbij het snijpunt overeenkomt met het -3 dB punt.

1.2.2.2. Fasekarakteristiek

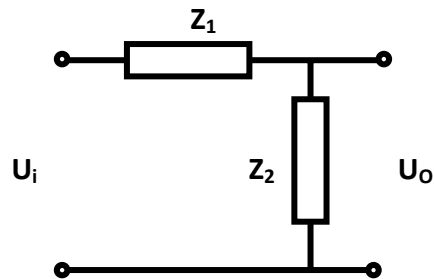
Ook bij de fasekarakteristiek wordt de frequentie op de x-as weergegeven op een logaritmische schaal. Op de y-as wordt hier nu de faseverschuiving

Voorbeeld van een bodediagram voor een laagdoorlaatfilter



1.3. De laagdoorlaatfilter

1.3.1. Principe

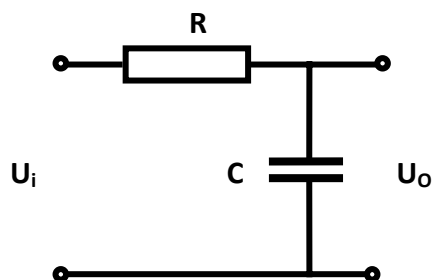


$$u_u = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

Een laagdoorlaatfilter zal principieel alle frequenties lager dan de drempelfrequentie onverzwakt doorlaten en vanaf een bepaalde frequentie verzwakken met 10 dB/decade. De drempelfrequentie, kantelfrequentie of breekfrequentie wordt bepaald door de waarde van de onderdelen van het frequentieafhankelijk netwerk (hier Z_1 en Z_2).

1.3.2. RC – filter

1.3.2.1. Schema



1.3.2.2. Transferfunctie

Door Z_1 te vervangen door een weerstand R en Z_2 door een condensator C bekommen we een laagdoorlaatfilter van de eerste orde.

$$u_o = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot u_i = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} \cdot u_i = \frac{1}{1 + j\omega RC} \cdot u_i$$

De transferfunctie wordt dan:

$$\frac{u_o}{u_i} = \frac{1}{1 + j\omega RC}$$

Daar dit een complexe vergelijking is zullen we deze weergeven in poolcoördinaten bestaande uit een modulus en een fasehoek.

$$\left| \frac{u_o}{u_i} \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}$$
$$\varphi = \varphi_T - \varphi_N = \left(\text{bgtg} \frac{0}{1} \right) - \left(\text{bgtg} \frac{\omega RC}{1} \right) = -\text{bgtg} \omega RC$$

Uit de modulus in functie van de frequentie ontstaat dan de 'amplitudekarakteristiek' en uit de fasehoek in functie van de frequentie ontstaat dan de 'fasekarakteristiek'.

Zoals reeds hiervoor (onder 1.2) besproken wordt de amplitudekarakteristiek uitgedrukt in dB, zodat:

$$A_v \text{ (dB)} = 20 \log \frac{u_o}{u_i} = 20 \log \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}$$

1.3.2.3. Berekening van het amplitude- en faseverloop

- Als de breekfrequentie gelijk is aan f_r en $\omega_r = 2\pi f_r$ dan geldt:

$$\omega_r = \frac{1}{RC}$$

Invullen van deze formule in de transferfunctie geeft:

$$A_v = 20 \log \frac{1}{\sqrt{1+(\omega RC)^2}} = 20 \log \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{1}{RC} \cdot RC\right)^2}} = 20 \log \frac{1}{\sqrt{1+(1)^2}} = 20 \log \frac{1}{\sqrt{2}} = -3\text{dB}$$

Voor een frequentie gelijk aan $f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$ bedraagt de verzwakking -3dB of is de uitgangsspanning gelijk aan 70% van de ingangsamplitude. Deze frequentie noemen we de afsnijfrequentie of kantelfrequentie.

De afsnijfrequentie is die frequentie waar de uitgangsspanning 70% is van de ingangsspanning

- Als nu defrequentie $f = 10 \cdot f_0$ of $\omega = 10 \cdot \omega_0 = \frac{10}{RC}$ dan is :

$$A_v = 20 \log \frac{1}{\sqrt{1+(\omega RC)^2}} = 20 \log \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{10}{RC} \cdot RC\right)^2}} = 20 \log \frac{1}{\sqrt{1+(10)^2}} \approx 20 \log 0,1 = -20\text{dB}$$

- Als nu defrequentie $f = 0,1 \cdot f_0$ of $\omega = 0,1 \cdot \omega_0 = \frac{0,1}{RC}$ dan is :

$$A_v = 20 \log \frac{1}{\sqrt{1+(\omega RC)^2}} = 20 \log \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{0,1}{RC} \cdot RC\right)^2}} = 20 \log \frac{1}{\sqrt{1+(0,1)^2}} \approx 20 \log 1 = 0\text{dB}$$

Met deze drie punten hebben we in feite genoeg om een karakteristiek te construeren want is $\omega = 100 \cdot \omega_0 = \frac{100}{RC}$ dan krijgen we een uitgang op -40 dB . Die betekent een verzwakking van 100 maal per decade of 100 dB/decade .

Is $\omega = 0,01 \cdot \omega_0 = \frac{0,01}{RC}$ dan blijft de verzwakking nog op 0dB dus een versterking van 1.

We moeten nu nog het verloop geven van de fasehoek.

Is $\omega = \omega_0 = \frac{1}{RC}$ dan is de fasehoek $\varphi = -\text{bgtg}\left(\frac{1}{RC} RC\right) = -\text{bgtg} 1 = -45^\circ$

Is $\omega = 10 \cdot \omega_0 = \frac{10}{RC}$ dan is de fasehoek $\varphi = -\text{bgtg}\left(\frac{10}{RC}RC\right) = -\text{bgtg}10 = -84,28^\circ$

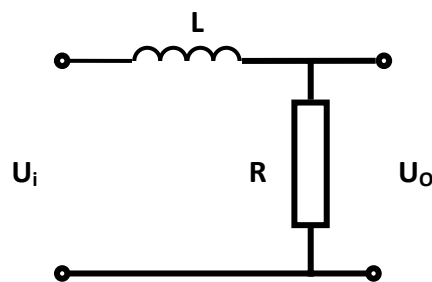
Is dan is de fasehoek $\varphi = -\text{bgtg}\left(\frac{0,1}{RC}RC\right) = -\text{bgtg}0,1 = -5,71^\circ$

Bij $\omega = 100 \cdot \omega_0 = \frac{100}{RC}$ zal de fasehoek φ nagenoeg 90° geworden zijn en bij nog hogere frequenties deze waarde behouden.

Als $\omega = 0,01 \cdot \omega_0 = \frac{0,01}{RC}$ en kleiner zal de fasehoek naderen naar 0° .

1.3.3. RL – filter

1.3.3.1. Schema



1.3.3.2. Transferfunctie

Door Z_1 te vervangen door een weerstand R en Z_2 door een condensator C bekommen we een laagdoorlaatfilter van de eerste orde.

$$u_o = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot u_i = \frac{R}{R + j\omega L} \cdot u_i = \frac{1}{1 + j\omega \frac{L}{R}} \cdot u_i$$

De transferfunctie wordt dan:

$$\frac{u_o}{u_i} = \frac{1}{1 + j\omega \frac{L}{R}}$$

Daar dit een complexe vergelijking is zullen we deze weergeven in poolcoördinaten bestaande uit een modulus en een fasehoek.

$$\left| \frac{u_o}{u_i} \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\omega \frac{L}{R} \right)^2}}$$

$$\varphi = \varphi_T - \varphi_N = \left(\text{bgtg} \frac{0}{1} \right) - \left(\text{bgtg} \omega \frac{L}{R} \right) = -\text{bgtg} \omega \frac{L}{R}$$

Uit de modulus in functie van de frequentie ontstaat dan de 'amplitudekarakteristiek' en uit de fasehoek in functie van de frequentie ontstaat dan de 'fasekarakteristiek'.

Zoals reeds hiervoor (onder 1.2) besproken wordt de amplitudekarakteristiek uitgedrukt in dB, zodat:

$$A_v \text{ (dB)} = 20 \log \frac{u_o}{u_i} = 20 \log \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\omega \frac{L}{R} \right)^2}}$$

1.3.3.3. Berekening van het amplitude- en faseverloop

Als de breekfrequentie gelijk is aan f_r en $\omega_r = 2\pi f_r$ dan geldt:

$$\omega_r = \frac{R}{L}$$

Invullen van deze formule in de transferfunctie geeft:

$$A_v = 20 \log \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\omega \frac{L}{R} \right)^2}} = 20 \log \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{R}{L} \cdot \frac{L}{R} \right)^2}} = 20 \log \frac{1}{\sqrt{1 + (1)^2}} = 20 \log \frac{1}{\sqrt{2}} = -3\text{dB}$$

Voor een frequentie gelijk aan $f_0 = \frac{R}{2\pi L}$ bedraagt de verzwakking -3dB of is de uitgangsspanning gelijk aan 70% van de ingangsamplitude. Deze frequentie noemen we weerop de afsnijfrequentie of kantelfrequentie.

Ook hier kunnen we de punten bepalen voor de frequentie die 1 decade hoger en 1 decade lager is dan de kantelfrequentie. Dit gebeurt op dezelfde wijze als onder .

Met deze drie punten hebben we weerom genoeg om een karakteristiek te construeren want.

We moeten nu nog het verloop geven van de fasehoek.

Is $\omega = \omega_0 = \frac{R}{L}$ dan is de fasehoek $\varphi = -\text{bgtg} \left(\frac{R}{L} \frac{L}{R} \right) = -\text{bgtg} 1 = -45^\circ$

Is $\omega = 10 \cdot \omega_0 = 10 \frac{R}{L}$ dan is de fasehoek $\varphi = -\text{bgtg} \left(10 \frac{R}{L} \frac{L}{R} \right) = -\text{bgtg} 10 = -84,28^\circ$

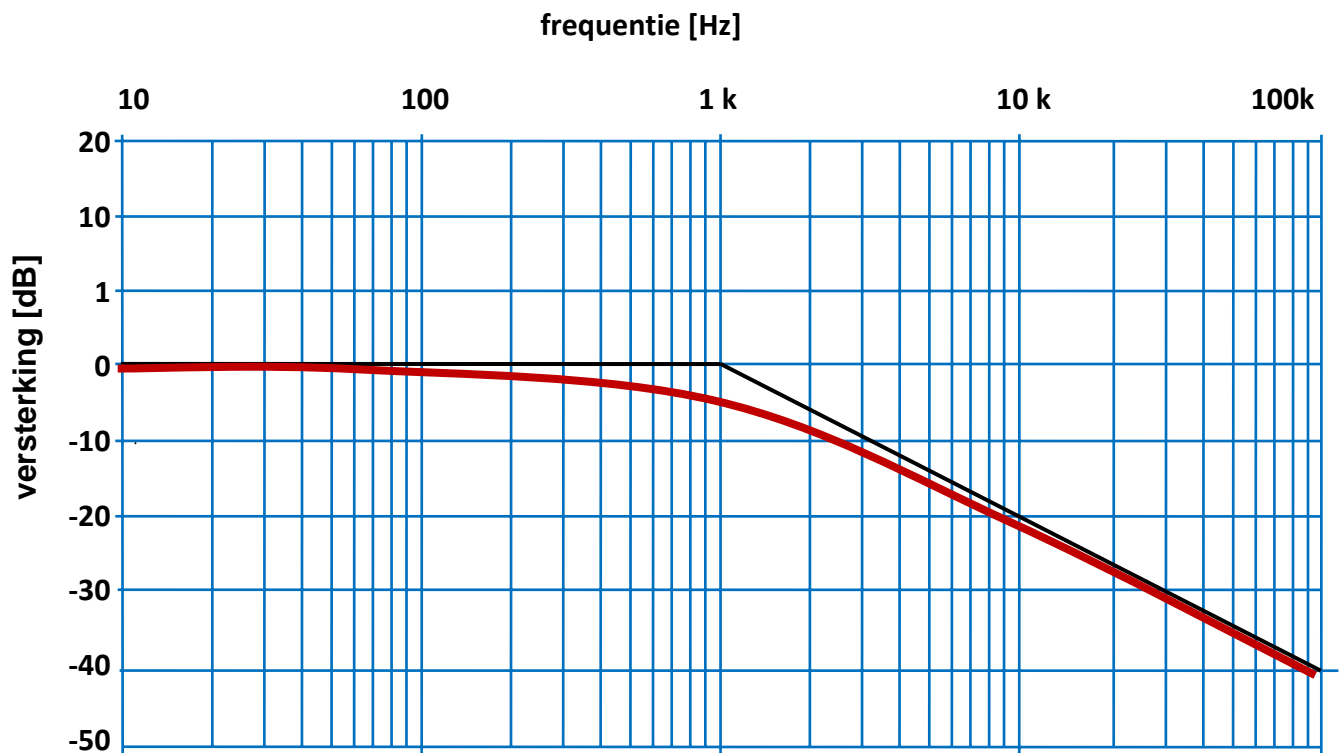
Is dan is de fasehoek $\varphi = -\text{bgtg} \left(0,1 \frac{R}{L} \frac{L}{R} \right) = -\text{bgtg} 0,1 = -5,71^\circ$

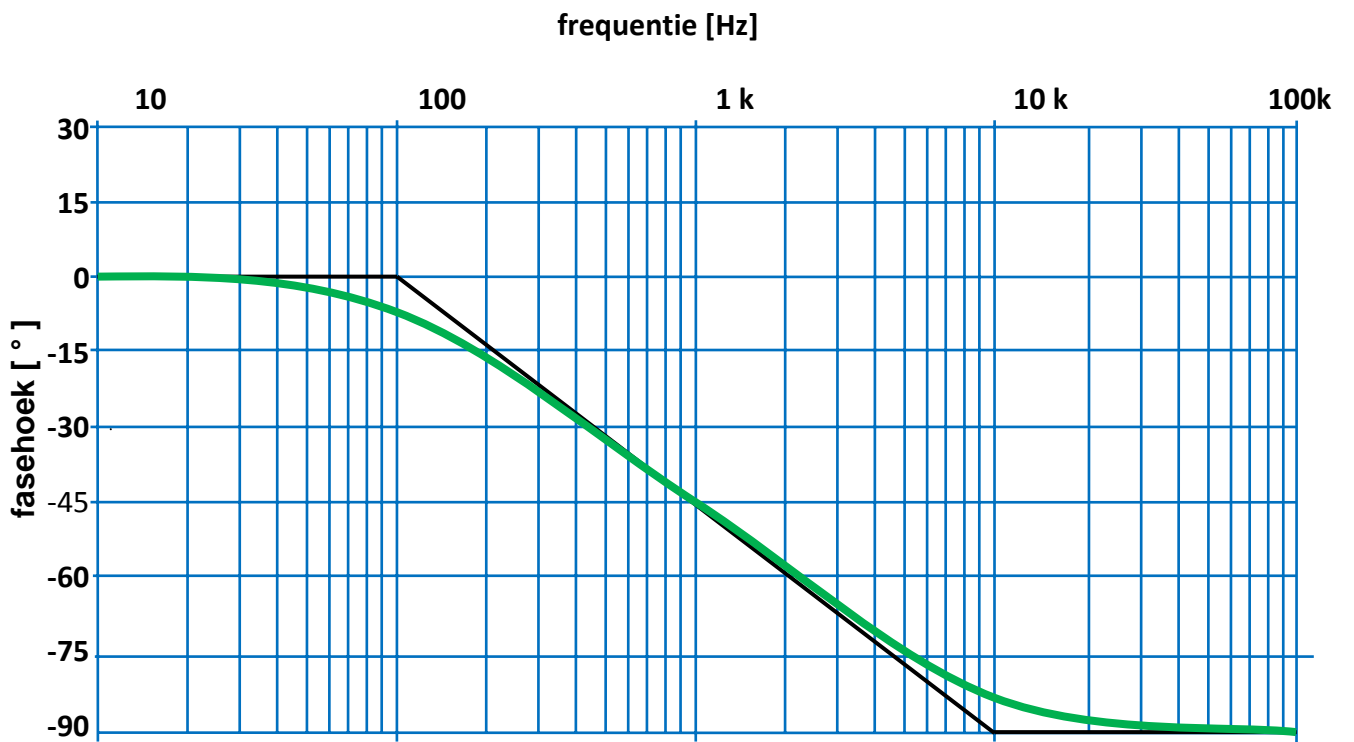
Bij $\omega = 100 \cdot \omega_0 = 100 \frac{R}{L}$ zal de fasehoek φ nagenoeg -90° geworden zijn en bij nog hogere frequenties deze waarde behouden.

Als $\omega = 0,01 \cdot \omega_0 = 0,01 \frac{R}{L}$ en kleiner zal de fasehoek naderen naar 0° .

1.3.4. Bodediagram

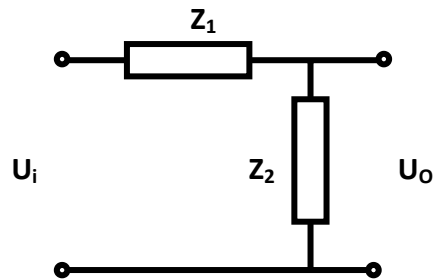
1.3.4.1. Amplitudekarakteristiek





1.4. De hoogdoorlaatfilter

1.4.1. Principe

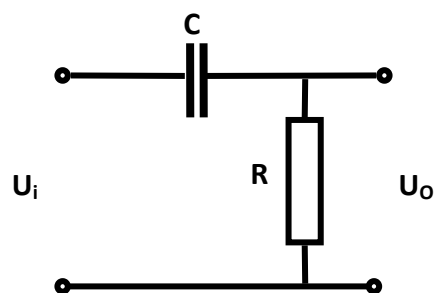


$$u_u = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

Een hoogdoorlaatfilter zal principieel alle frequenties hoger dan de drempelfrequentie onverzwakt doorlaten en beneden de drempelfrequentie verzwakken met 10 dB/decade. De drempelfrequentie, kantelfrequentie of breekfrequentie wordt bepaald door de waarde van de onderdelen van het frequentieafhankelijk netwerk (hier Z_1 en Z_2).

1.4.2. RC – filter

1.4.2.1. Schema



1.4.2.2. Transferfunctie

Door Z_1 te vervangen door een condensator C en Z_2 door een weerstand R bekomen we een hoogdoorlaatfilter van de eerste orde.

$$u_o = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot u_i = \frac{R}{\frac{1}{j\omega C} + R} \cdot u_i = \frac{1}{1 - j\omega RC} \cdot u_i$$

De transferfunctie wordt dan:

$$\frac{u_o}{u_i} = \frac{1}{1 - j\omega RC}$$

Daar dit een complexe vergelijking is zullen we deze weergeven in poolcoördinaten bestaande uit een modulus en een fasehoek.

$$\left| \frac{u_o}{u_i} \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega RC} \right)^2}} \quad \Rightarrow \quad A_v(\text{dB}) = 20 \log \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega RC} \right)^2}}$$
$$\varphi = \varphi_T - \varphi_N = \left(\text{bgtg} \frac{0}{1} \right) - \left(-\text{bgtg} \frac{1}{\omega RC} \right) = \text{bgtg} \frac{1}{\omega RC}$$

Uit de modulus in functie van de frequentie ontstaat dan de 'amplitudekarakteristiek' en uit de fasehoek in functie van de frequentie ontstaat dan de 'fasekarakteristiek'.

1.4.2.3. Berekening van het amplitude- en faseverloop

- Als de breekfrequentie gelijk is aan f_r en $\omega_r = 2\pi f_r$ dan geldt:

$$\omega_r = \frac{1}{RC}$$

Invullen van deze formule in de transferfunctie geeft:

$$A_v(\text{dB}) = 20 \log \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega RC}\right)^2}} = 20 \log \frac{1}{\sqrt{1 + \left(RC \cdot \frac{1}{RC}\right)^2}} = 20 \log \frac{1}{\sqrt{1 + (1)^2}} = 20 \log \frac{1}{\sqrt{2}} = -3 \text{dB}$$

Voor een frequentie gelijk aan $f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$ bedraagt de verzwakking -3dB of is de uitgangsspanning gelijk aan 70% van de ingangsamplitude. Deze frequentie noemen we de afsnijfrequentie of kantelfrequentie.

De afsnijfrequentie is die frequentie waar de uitgangsspanning 70% is van deingangsspanning

- Als nu de frequentie $f = 10 \cdot f_0$ of $\omega = 10 \cdot \omega_0 = \frac{10}{RC}$ dan is :

$$A_v(\text{dB}) = 20 \log \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{RC}{10} \cdot \frac{1}{RC}\right)^2}} = 20 \log \frac{1}{\sqrt{1 + (0,1)^2}} \approx 20 \log 1 = 0 \text{ dB}$$

- Als nu de frequentie $f = 0,1 \cdot f_0$ of $\omega = 0,1 \cdot \omega_0 = \frac{0,1}{RC}$ dan is :

$$A_v(\text{dB}) = 20 \log \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{RC}{0,1} \cdot \frac{1}{RC}\right)^2}} = 20 \log \frac{1}{\sqrt{1 + (10)^2}} \approx 20 \log 0,1 = -20 \text{ dB}$$

Met deze drie punten hebben we in feite genoeg om een karakteristiek te construeren want is $\omega = 0,01 \cdot \omega_0 = \frac{0,01}{RC}$ dan krijgen we een uitgang op -40 dB . Die betekent een verzwakking van 100 maal per decade of 100 dB/decade .

Is $\omega = 100 \cdot \omega_0 = \frac{100}{RC}$ dan blijft de verzwakking nog op 0 dB dus een versterking van 1.

We moeten nu nog het verloop geven van de fasehoek.

Is $\omega = \omega_0 = \frac{1}{RC}$ dan is de fasehoek $\varphi = \text{bgtg}\left(RC \cdot \frac{1}{RC}\right) = \text{bgtg} 1 = 45^\circ$

Is $\omega = 10 \cdot \omega_0 = \frac{10}{RC}$ dan is de fasehoek $\varphi = \text{bgtg} \left(RC \frac{10}{RC} \right) = \text{bgtg} 10 = 84,28^\circ$

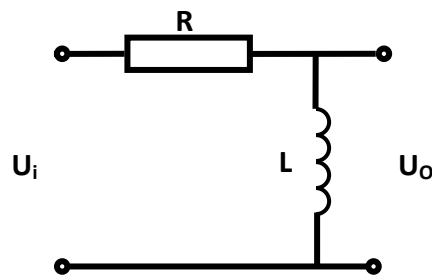
Is dan is de fasehoek $\varphi = \text{bgtg} \left(RC \frac{0,1}{RC} \right) = \text{bgtg} 0,1 = 5,71^\circ$

Bij $\omega = 100 \cdot \omega_0 = \frac{100}{RC}$ zal de fasehoek φ nagenoeg 90° geworden zijn en bij nog hogere frequenties deze waarde behouden.

Als $\omega = 0,01 \cdot \omega_0 = \frac{0,01}{RC}$ en kleiner zal de fasehoek naderen naar 0° .

1.4.3. RL – filter

1.4.3.1. Schema



1.4.3.2. Transferfunctie

Door Z_1 te vervangen door een weerstand R en Z_2 door een condensator C bekommen we een laagdoorlaatfilter van de eerste orde.

$$u_o = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot u_i = \frac{j\omega L}{R + j\omega L} \cdot u_i = \frac{1}{1 + \frac{R}{j\omega L}} \cdot u_i = \frac{1}{1 - j\frac{R}{\omega L}} \cdot u_i$$

De transferfunctie wordt dan:

$$\frac{u_o}{u_i} = \frac{1}{1 - j\frac{R}{\omega L}}$$

Daar dit een complexe vergelijking is zullen we deze weergeven in poolcoördinaten bestaande uit een modulus en een fasehoek.

$$\left| \frac{u_o}{u_i} \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{R}{\omega L} \right)^2}}$$
$$\varphi = \varphi_T - \varphi_N = \left(\text{bgtg} \frac{0}{1} \right) - \left(-\text{bgtg} \frac{R}{\omega L} \right) = \text{bgtg} \frac{R}{\omega L}$$

Uit de modulus in functie van de frequentie ontstaat dan de 'amplitudekarakteristiek' en uit de fasehoek in functie van de frequentie ontstaat dan de 'fasekarakteristiek'.

Zoals reeds hiervoor (onder 1.2) besproken wordt de amplitudekarakteristiek uitgedrukt in dB, zodat:

$$A_v \text{ (dB)} = 20 \log \frac{u_o}{u_i} = 20 \log \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{R}{\omega L} \right)^2}}$$

1.4.3.3. Berekening van het amplitude- en faseverloop

Als de breekfrequentie gelijk is aan f_r en $\omega_r = 2\pi f_r$ dan geldt:

$$\omega_r = \frac{R}{L}$$

Ook hier kunnen we de punten bepalen bij de kantelfrequentie en voor de frequentie die 1 decade hoger en 1 decade lager is dan de kantelfrequentie. Dit gebeurt op dezelfde wijze als onder .

Met deze drie punten hebben we weerom genoeg om een karakteristiek te construeren want.

We moeten nu nog het verloop geven van de fasehoek.

Is $\omega = \omega_0 = \frac{R}{L}$ dan is de fasehoek $\varphi = \text{bgtg} \left(\frac{L R}{R L} \right) = \text{bgtg} 1 = 45^\circ$

Is $\omega = 0,1 \cdot \omega_0 = 0,1 \frac{R}{L}$ dan is de fasehoek $\varphi = \text{bgtg} \left(\frac{1}{0,1} \frac{L R}{R L} \right) = \text{bgtg} 10 = 84,28^\circ$

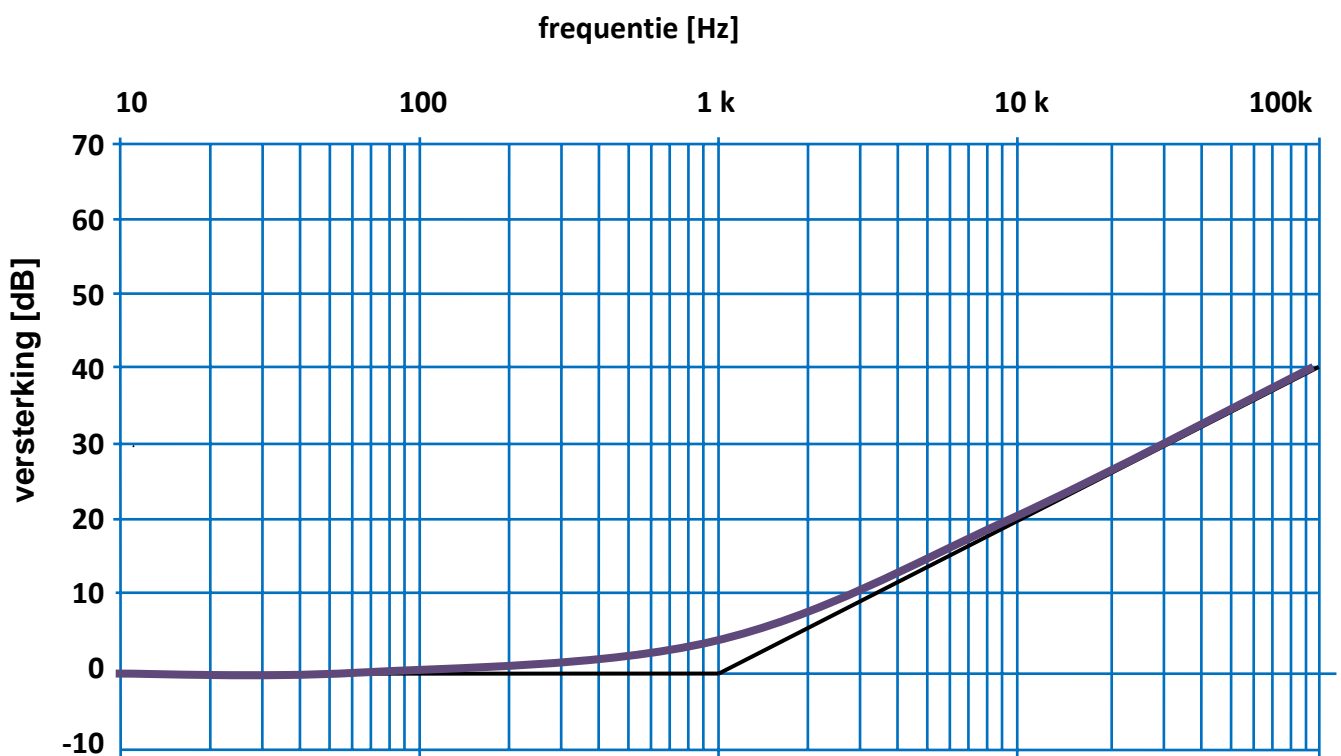
Is $\omega = 10 \cdot \omega_0 = 10 \frac{R}{L}$ dan is de fasehoek $\varphi = -\text{bgtg} \left(\frac{1}{10} \frac{R L}{R L} \right) = \text{bgtg} 0,1 = 5,71^\circ$

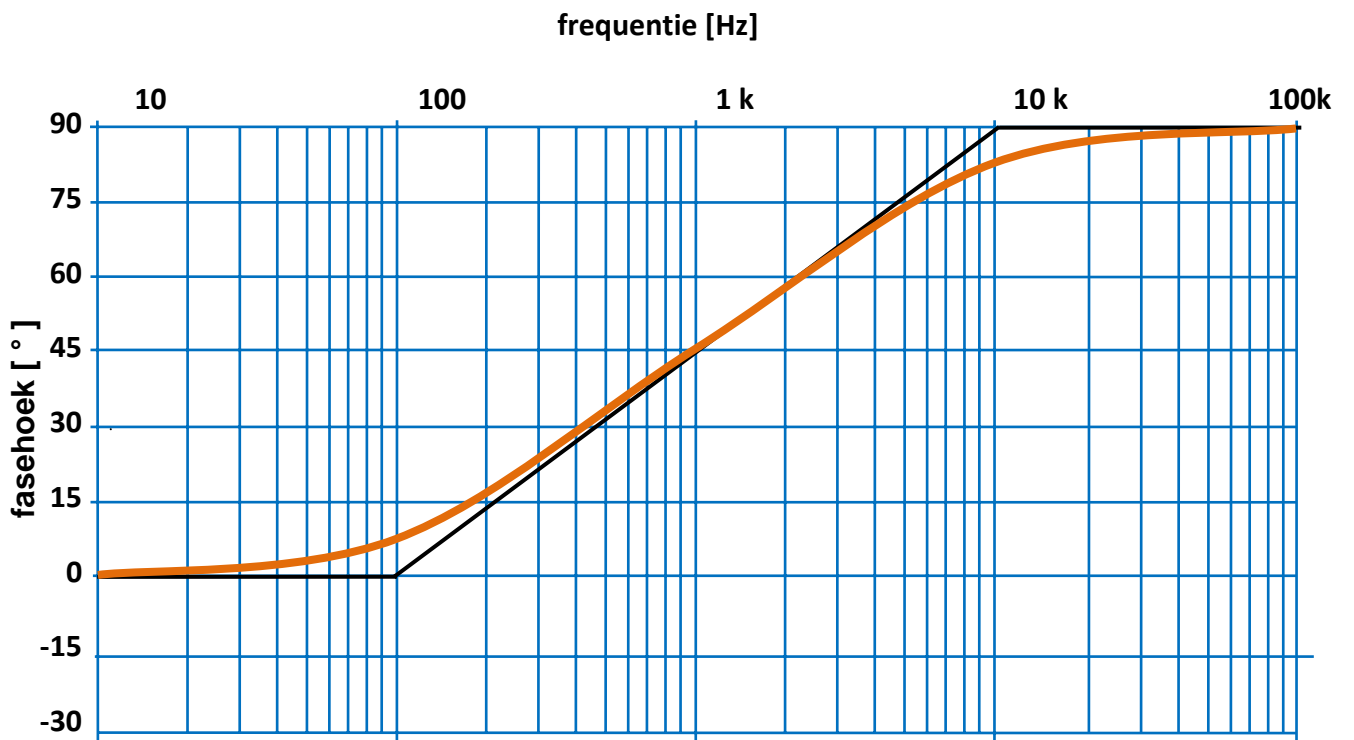
Bij $\omega = 100 \cdot \omega_0 = 100 \frac{R}{L}$ zal de fasehoek φ nagenoeg 90° geworden zijn en bij nog hogere frequenties deze waarde behouden.

Als $\omega = 0,01 \cdot \omega_0 = 0,01 \frac{R}{L}$ en kleiner zal de fasehoek naderen naar 0° .

1.4.4. Bodediagram

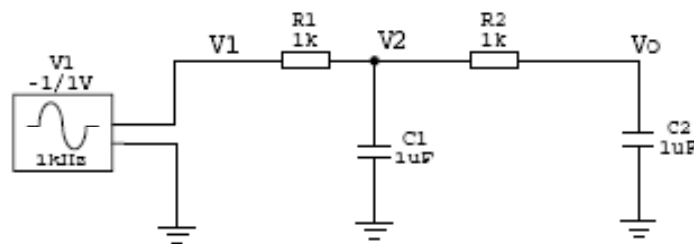
1.4.4.1. Amplitudekarakteristiek





1.5. Tweede orde systemen

De tot nu toe besproken schakelingen waren voorbeelden van eerste orde systemen en gaven een maximale faseverschuiving van 90° met een verzwakking van 20 dB per decade. Indien meer schakelingen in serie geschakeld worden dan kunnen sterkere verzwakkingen bekomen worden en faseverschuivingen groter dan 90° . Zetten we zoals in de figuur twee RCnetwerken na mekaar, dan zie je onmiddellijk dat de twee netwerken mekaar gaan beïnvloeden. De tweede kring vormt een belasting voor de eerste waardoor van onze verhoopte 40 dB verzwakking niets van in huis komt. Als we zo'n kring gebruiken plaatsen we een buffer of een emittervolger tussen beide.



1.5.1. De Transfertfunctie

Onder die voorwaarde kan men schrijven :

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{1 + j\omega R_1 C_1} \quad \text{en} \quad \frac{V_0}{V_2} = \frac{1}{1 + j\omega R_2 C_2}$$

ook: $\frac{V_2}{V_1} \cdot \frac{V_0}{V_2} = \frac{1}{1 + j\omega R_2 C_2} \cdot \frac{1}{1 + j\omega R_1 C_1}$ of:

$$\frac{V_0}{V_1} = \frac{1}{(1 + j\omega R_1 C_1)(1 + j\omega R_2 C_2)} = \frac{1}{1 + (j\omega R_1 C_1 + j\omega R_2 C_2) - \omega^2 R_1 R_2 C_1 C_2}$$

$$\frac{1}{(1 - \omega^2 R_1 R_2 C_1 C_2) + j\omega(R_1 C_1 + R_2 C_2)}$$

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{1}{1 + j\omega(R_1 C_1 + R_2 C_2) + j^2 \omega^2 R_1 R_2 C_1 C_2}$$

Stellen we $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1 C_1 R_2 C_2}}$ dan wordt de vorige formule :

$$\left| \frac{V_0}{V_i} \right| = \frac{1}{1 + j\omega(R_1 C_1 + R_2 C_2) + j^2 \frac{\omega^2}{\omega_0^2}}$$

En stellen we $2d = \frac{C_1 R_1 + C_2 R_2}{\sqrt{C_1 R_1 C_2 R_2}}$ dan wordt de transfertfunctie

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{1}{1 + j\omega \frac{2d}{\omega_0} + j^2 \frac{\omega^2}{\omega_0^2}}$$

❖ Is $\omega = 10 \omega_0$ dan wordt

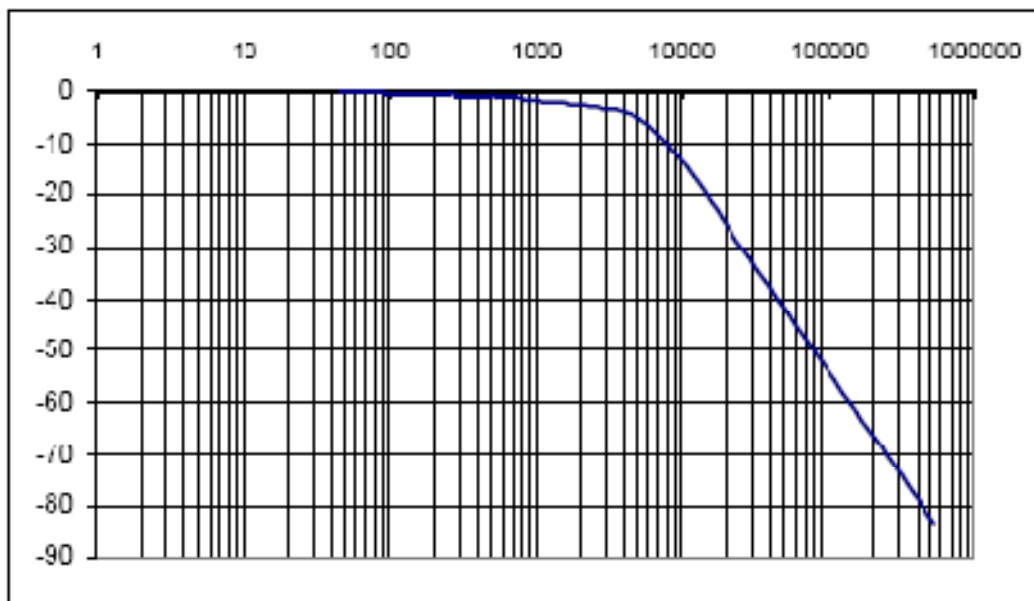
$$\left| \frac{V_o}{V_i} \right| = \frac{1}{1 + j\omega \frac{2d}{\omega_0} - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{100\omega_0^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \left(10\omega_0 \frac{2d}{\omega_0}\right)^2}} = \frac{1}{100} \text{ of uitgedrukt in dB}$$

$$20 \log 0.01 = -40 \text{ dB}$$

❖ Is $\omega = 0.1 \omega_0$ dan wordt $\left| \frac{V_o}{V_i} \right| = \frac{1}{1 + j\omega \frac{2d}{\omega_0} - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{0.001\omega_0^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \left(0.1\omega_0 \frac{2d}{\omega_0}\right)^2}} = \frac{1}{1}$

of uitgedrukt in dB $20 \log 1 = 0 \text{ dB}$

❖ Is $\omega = \omega_0$ dan wordt $\left| \frac{V_o}{V_i} \right| = \frac{1}{1 + j\omega \frac{2d}{\omega_0} - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \left(\omega_0 \frac{2d}{\omega_0}\right)^2}} = \frac{1}{2d}$



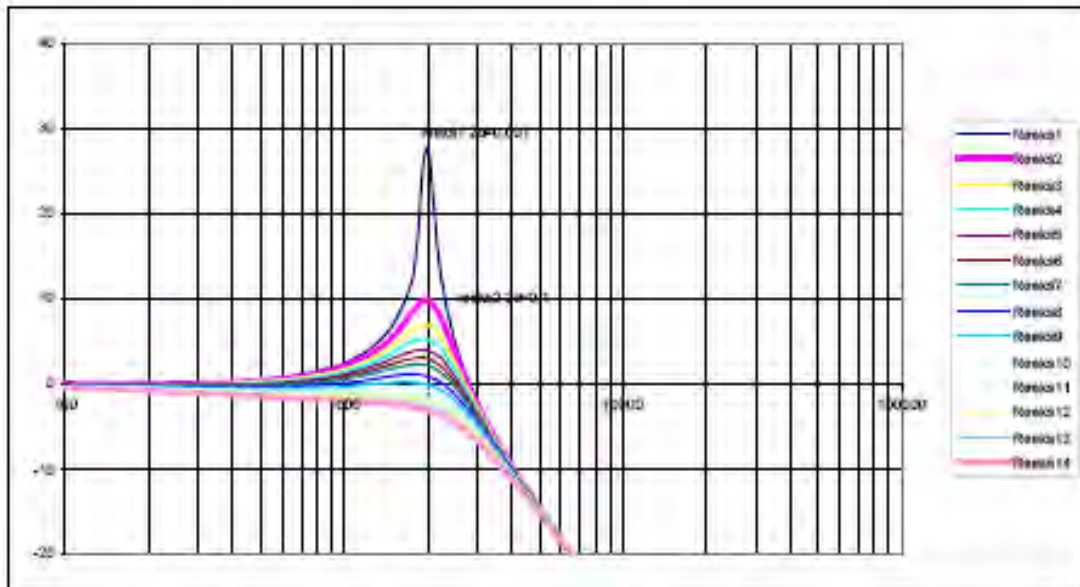
We zien dat de uitdrukking afhankelijk wordt van de gebruikte componenten. De waarde d noemt met de dempingsfactor van een tweede orde systeem. d zal ook het verloop rond de afsnijfrequentie bepalen.

❖ Is $d = 1$ dan wordt $20 \log \left| \frac{V_o}{V_i} \right| = 20 \log 0.5 = -6 \text{ dB}$

❖ Is $d = 0.707$ dan wordt $20 \log \left| \frac{V_o}{V_i} \right| = 20 \log 0.707 = -3 \text{ dB}$

❖ Is $d = 0.5$ dan wordt $20 \log \left| \frac{V_o}{V_i} \right| = 20 \log 1 = 0 \text{ dB}$

- ❖ Is $d = 0.2$ dan wordt $20 \log \frac{|V_o|}{|V_i|} = 20 \log 2.5 = +2 \text{ dB}$
- ❖ Is $d = 0.1$ dan wordt $20 \log \frac{|V_o|}{|V_i|} = 20 \log 5 = +14 \text{ dB}$



- Reeks1 heeft een waarde voor $2d = 0.001$
- Reeks2 heeft een waarde voor $2d = 0.1$
- Reeks3 heeft een waarde voor $2d = 0.2$
- Reeks4 heeft een waarde voor $2d = 0.3$
- Reeks5 heeft een waarde voor $2d = 0.4$
- Reeks6 heeft een waarde voor $2d = 0.5$
- Reeks7 heeft een waarde voor $2d = 0.6$
- Reeks8 heeft een waarde voor $2d = 0.8$
- Reeks9 heeft een waarde voor $2d = 1$
- Reeks10 heeft een waarde voor $2d = 1.2$
- Reeks11 heeft een waarde voor $2d = 1.4$
- Reeks12 heeft een waarde voor $2d = 1.6$
- Reeks13 heeft een waarde voor $2d = 1.8$
- Reeks14 heeft een waarde voor $2d = 2$

1.5.2. De fasehoek

Uitgaande van de transfertfunctie kunnen we zonder moeite de fasehoek bepalen, want de fasehoek van een complex getal in een breukvorm is de fasehoek van de teller min de fasehoek van de noemer. De fasehoek is de boogtangens van het imaginaire gedeeld door het reële.

$$\varphi = b \operatorname{gtg} \varphi_T - \varphi_N$$

$$\varphi = \varphi_T - \varphi_N = b \operatorname{gtg} \frac{0}{1} - \left(-b \operatorname{gtg} \frac{\frac{\omega 2d}{\omega_0}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} \right) = -b \operatorname{gtg} \frac{\frac{\omega 2d}{\omega_0}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}$$

$$\text{Is } \omega = 10 \omega_0 \text{ dan wordt } \varphi = -bgtg \frac{\frac{10\omega_0 2d}{\omega_0}}{1 - \left(\frac{10\omega_0}{\omega_0}\right)^2} = -bgtg \frac{2d}{-10}$$

$$\text{Is } \omega = 0.1 \omega_0 \text{ dan wordt } \varphi = -bgtg \frac{\frac{0.1\omega_0 2d}{\omega_0}}{1 - \left(\frac{0.1\omega_0}{\omega_0}\right)^2} = -bgtg \frac{2d}{10}$$

$$\text{Is } \omega = \omega_0 \text{ dan wordt } \varphi = -bgtg \frac{\frac{\omega_0 2d}{\omega_0}}{1 - \left(\frac{\omega_0}{\omega_0}\right)^2} = -bgtg \frac{2d}{0}$$

Het verloop ziet er als volgt uit :

