



# Inhoudsopgave

---

5	Wisselstroom en wisselspanning.....	3
5.1	Wat leer je in dit hoofdstuk.....	3
5.2	Wat is wisselstroom en wisselspanning.....	3
5.2.1	Stroom die heen en weer gaat en spanning die van teken wisselt.....	3
5.2.2	Vormen van wisselstroom en -spanning.....	3
5.3	Periodiciteit en kenmerkende grootheden.....	5
5.4	Wisselstroomgedrag van een condensator of spoel met een weerstand.....	8
5.4.1	Inleiding.....	8
5.4.2	Reactantie.....	8
5.4.3	Weerstand en reactantie samen.....	9
5.4.4	Betekenis van de verschillen.....	11
5.5	Impedantie, filters en resonantie.....	12
5.5.1	Impedantie.....	12
5.5.2	Laag- en hoogdoorlaatfilters.....	13
5.5.3	Frequentiefilters zonder weerstanden.....	18
5.5.4	Berekening van de resonantiefrequentie: vergelijking van Thomson.....	22
5.5.5	Verliesweerstand.....	22
5.5.6	Samengevat.....	24
5.6	Schemasymbolen voor verschillende soorten filters.....	25
5.7	Niet-sinusvormige signalen.....	26
5.7.1	Ontbinding in sinusvormige signalen.....	26
5.7.2	Laagdoorlaatfilters en harmonischen.....	27
5.8	Opgaven.....	28
5.8.1	Opgave 5-1.....	28
5.8.2	Opgave 5-2.....	29
5.8.3	Opgave 5-3.....	30
5.8.4	Opgave 5-4.....	31
5.8.5	Opgave 5-5.....	32
5.8.6	Opgave 5-6.....	33



5.8.7	Opgave 5-7.....	34
5.8.8	Opgave 5-8.....	35
5.8.9	Opgave 5-9.....	36
5.8.10	Opgave 5-10.....	37
5.8.11	Opgave 5-11.....	38
5.8.12	Opgave 5-12.....	39
5.8.13	Opgave 5-13.....	40
5.8.14	Opgave 5-14.....	41
5.8.15	Opgave 5-15.....	42
5.8.16	Opgave 5-16.....	43
5.8.17	Opgave 5-17.....	44
5.8.18	Opgave 5-18.....	45
5.9	Uitwerkingen bij de opgaven .....	46
5.9.1	Uitwerking van Opgave 5-1 .....	46
5.9.2	Uitwerking van Opgave 5-2 .....	47
5.9.3	Uitwerking van Opgave 5-3 .....	48
5.9.4	Uitwerking van Opgave 5-4 .....	49
5.9.5	Uitwerking van Opgave 5-5 .....	50
5.9.6	Uitwerking van Opgave 5-6 .....	51
5.9.7	Uitwerking van Opgave 5-7 .....	52
5.9.8	Uitwerking van Opgave 5-8 .....	53
5.9.9	Uitwerking van Opgave 5-9 .....	54
5.9.10	Uitwerking van Opgave 5-10 .....	55
5.9.11	Uitwerking van Opgave 5-11 .....	56
5.9.12	Uitwerking van Opgave 5-12 .....	57
5.9.13	Uitwerking van Opgave 5-13 .....	58
5.9.14	Uitwerking van Opgave 5-14 .....	59
5.9.15	Uitwerking van Opgave 5-15 .....	60
5.9.16	Uitwerking van Opgave 5-16 .....	61
5.9.17	Uitwerking van Opgave 5-17 .....	62
5.9.18	Uitwerking van Opgave 5-18 .....	63

## 5 Wisselstroom en wisselspanning

### 5.1 Wat leer je in dit hoofdstuk

Tot nu toe hebben we het alleen gehad over gelijkstroom en -spanning. Dat is stroom of spanning die steeds dezelfde richting heeft of iets technischer: die steeds dezelfde polariteit houdt. In dit hoofdstuk komen wisselstroom en wisselspanning aan bod. Die wisselen van richting, respectievelijk polariteit. Voor het gemak praten we in deze inleidende sub-paragraaf ook over wisselstroom als we de combinatie van stroom en spanning bedoelen. Dat schrijft en leest gemakkelijker. Onderdelen als spoelen en condensatoren gedragen zich met wisselstroom anders dan met gelijkstroom. Daar gaan we uitvoerig op in.

Geluid is trillende lucht. Om daarvan een radiosignaal te maken, wordt die trilling in een microfoon omgezet in wisselstroom. Voordat radiosignalen ‘de lucht ingaan’ zijn ze een vorm van wisselstroom waarin de wisselstroom uit de microfoon op de één of andere manier is verwerkt.

Ontvangen radiosignalen worden weer in wisselstroom omgezet, zodra we ze in een ontvanger hebben ‘gevangen’. Pas dan kunnen we de oorspronkelijke wisselstroom van de microfoon er weer uit terughalen en via een luidspreker of koptelefoon omzetten in vrijwel dezelfde geluidstrillingen als er in de zender zijn ingestopt.

Voor ‘microfoon’ mag je hier ook seinsleutel, geluidskaart van een computer of iets anders dat signalen produceert, lezen. In dit hoofdstuk leer je wat weerstanden, spoelen en condensatoren met wisselstroom doen en hoe je daarvan gebruik kunt maken.

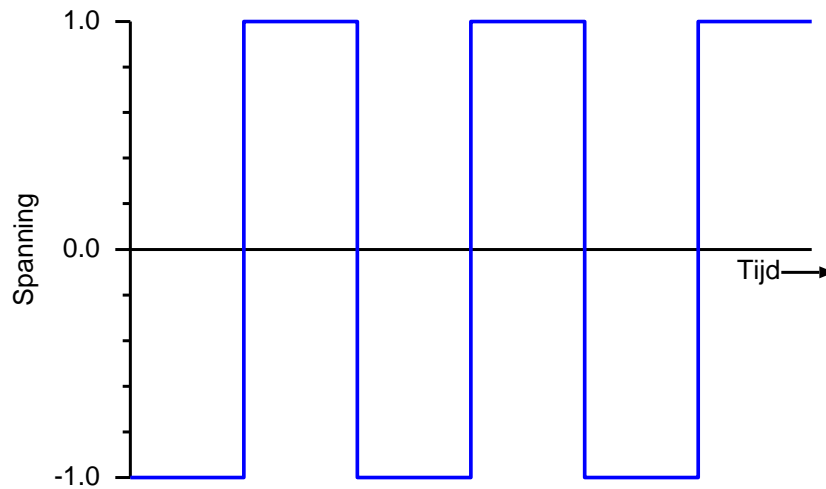
### 5.2 Wat is wisselstroom en wisselspanning

#### 5.2.1 Stroom die heen en weer gaat en spanning die van teken wisselt

Wisselstroom is stroom die heen en weer gaat. Het is dus geen gelijkstroom, want gelijkstroom gaat (gemiddeld) steeds dezelfde kant op, wisselstroom wisselt van richting en is gemiddeld 0. Vandaar de naam. *Wisselspanning* wisselt van teken, dus van + naar – en van – naar +. Op een wandcontactdoos (‘stopcontact’) voor wisselspanning, onze vanouds bekende 220 V die nu bijna ongemerkt 230 V is geworden, zul je dus nooit een + of een – zien. Op een aansluiting voor gelijkspanning of –stroom, bijvoorbeeld van een accu, zie je die wel.

#### 5.2.2 Vormen van wisselstroom en -spanning

De eenvoudigste vorm van wisselspanning en -stroom is de blokgolf. Die ziet er op grafiek uit zoals zijn naam doet vermoeden (Figuur 5.2-1). De *blokspanning* springt van -1 (de eenheid doet er nu even niet toe) naar + 1, blijft daar een tijdje op staan, springt naar -1, blijft daar precies even lang op staan, en zo vervolgens. Je kunt dit ook zien als een gelijkspanning die met vaste regelmaat wordt omgepoold. Blokstroom is een gelijkstroom die met dezelfde vaste regelmaat van richting wisselt.

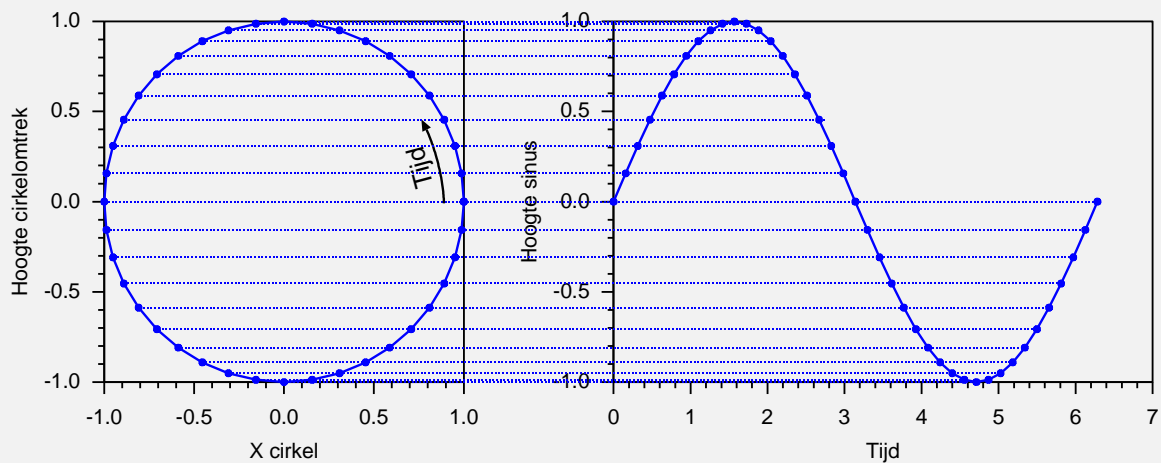


*Figuur 5.2-1. Blokgolf. Op de verticale as staat de grootte spanning, maar er kan evengoed stroom staan.*

Niet de blokgolf, maar de sinusvorm (Figuur 5.2-3) is de meest algemene vorm van wisselspanning of -stroom. De sinus is afgeleid van de cirkel. Stel je iemand voor die een gewicht aan een touwtje rondslingert. Je ziet het van opzij. Op afstand lijkt het dan of het touwtje afwisselend naar de ene en de andere kant beweegt, langer en weer korter wordt en het gewicht alleen heen en weer gaat. Middenin is de snelheid het grootst. Op de uiteinden neemt de snelheid af tot 0 en neemt dan in tegengestelde richting weer toe.

### Voor de liefhebbers, géén examenstof!

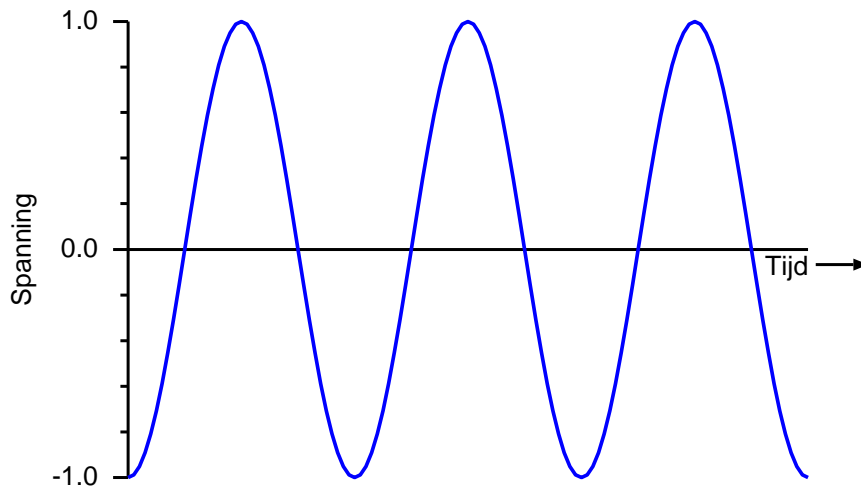
Figuur 5.2-2 laat het op een wiskundig iets meer verantwoorde manier zien.



*Figuur 5.2-2. Van cirkelbeweging naar sinusgrafiek*

Links in de figuur de cirkelbeweging. Op de cirkelomtrek links staan 40 stippen op gelijke onderlinge afstand. De rechtergrafiek geeft de hoogte van de overeenkomstige stippen, uitgezet tegen de tijd. Zo kom je van cirkelbeweging naar sinus.

Figuur 5.2-3 toont drie sinusvormige golven achter elkaar.

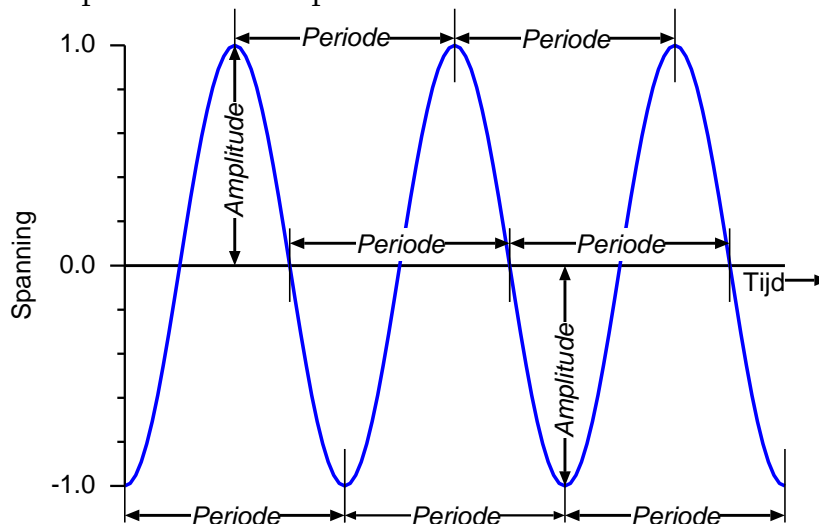


Figuur 5.2-3. Sinusgolf. Op de verticale as staat de grootte spanning, maar er kan evengoed stroom staan.

### 5.3 Periodiciteit en kenmerkende grootheden

Het hoofdkenmerk van periodieke golven is dat dezelfde vorm voortdurend terugkomt. Daar hoort een aantal grootheden bij. We bespreken ze stuk voor stuk.

1. **De periodeduur** is de tijd waarin één volledige vorm of golf wordt gevormd. De periodeduur is ook de tijd tussen overeenkomstige punten op twee opeenvolgende golven. De periodeduur wordt aangegeven met de hoofdletter  $T$  van tijd. Hoe je  $T$  in een grafiek kunt vaststellen, is weergegeven in Figuur 5.3-1, waarin de golf figuur drie volle perioden doorloopt.



Figuur 5.3-1. De sinusgolf van Figuur 5.2-3 en enkele manieren om de duur van een periode aan te geven. De figuur toont drie volle perioden. Dat is het best te zien op de onderste punten. De amplitude (punt 3) kan alleen op de hoogste of laagste punten worden bepaald.

2. **De frequentie** is het aantal perioden per tijd. Het meest gebruikte symbool is  $f$ . De eenheid is de hertz (Hz). 1 Hz is één periode per seconde. Het lichtnet in Nederland en

omringende landen heeft een frequentie van 50 perioden per seconde, dus 50 Hz. Het verband tussen frequentie  $f$  en periodeduur  $T$  is

$$f = \frac{1}{T} \text{ en dus ook } T = \frac{1}{f} \quad (5.3-1)$$

$T$  en  $f$  zijn dus elkaars omgekeerde. Bij een frequentie van 50 Hz duurt één periode van de netspanning  $\frac{1}{50}$  s. Dat is hetzelfde als 20 ms. Foto 5.3-1..toont een oscilloscoopbeeld van een sinusvormige wisselspanning.

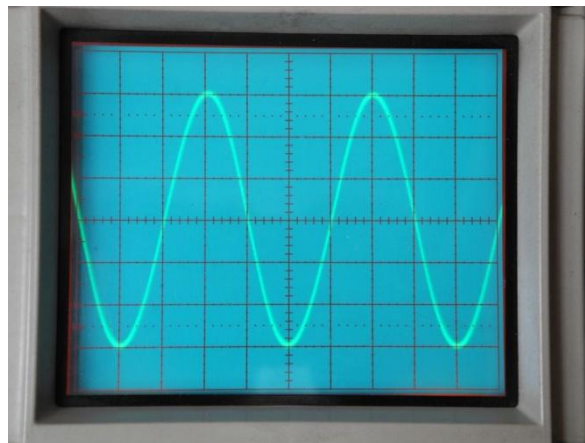


Foto 5.3-1. Oscilloscoopbeeld van een sinusgolf. Horizontale as: 0,5 ms per schaaldeel. Verticaal: 2 V per schaaldeel.

In hoofdstuk 4 hebben we bij het op- en ontladen van condensatoren en in het filmpje over *inductie* al met dit instrument kennis gemaakt. Meer erover komt in hoofdstuk 15.

Met Foto 5.3-1. kunnen we periode en frequentie bepalen als we weten hoeveel tijd een schaaldeel op de horizontale as voorstelt. In dit geval is dat 0,5 ms (af te lezen op een hier niet zichtbaar deel van het knoppenpaneel). Tussen opeenvolgende toppen, opeenvolgende dalen en opeenvolgende opwaartse of neerwaartse passages door de horizontale as zitten steeds 4 schaaldelen. Eén periode is dus  $4 \cdot 0,5 \text{ ms} = 2 \text{ ms}$  lang. De frequentie is dan  $\frac{1}{0,002} \text{ Hz} = 500 \text{ Hz}$ .

Andere grootheden naast periodeduur (punt 1) en frequentie (punt 2) zijn:

3. **De amplitude**, meestal met symbool  $A$ .  $A$  is de maximale uitwijking uit de nulstand (soms ruststand genoemd). Verwar deze cursieve  $A$  voor de grootheid amplitude niet met de rechtopstaande  $A$  van de eenheid ampère! In Foto 5.3-1. is de nulpositie de horizontale as midden door het beeld. De verticale schaal is 2 V per schaaldeel.  $A$  is drie schaaldelen en dus  $3 \cdot 2\text{V} = 6\text{V}$ . De amplitude heet bij de meeste golfvormen ook wel **maximale waarde**. Bekijk als je wilt Figuur 5.3-1 (niet Foto 5.3-1.!) nog een keer.
4. **De gemiddelde waarde** van een zuivere wisselstroom of –spanning is 0. Dat is goed te zien aan de blokspanning in Figuur 5.2-1. De blokken boven en onder de nullijn zijn

precies even groot. Bij een zuivere wisselstroom gaat lading heen en weer, maar na precies één periode is alles weer bij het oude. Daarna begint een nieuwe periode. Dat geldt voor alle zuivere wisselspanningen of –stromen, dus ook voor de sinus in Figuur 5.2-3 en op Foto 5.3-1..

**Maar...** De gemiddelde waarde van een **halve** sinusperiode is niet 0. Die is 2x de maximale waarde, gedeeld door het getal  $\pi$  (spreek uit: pi).  $\pi$  is afgerond 3,14.

5. **De effectieve waarde** van een wisselspanning of –stroom is niet 0. Een weerstand waar wisselstroom doorheen loopt, wordt warm door omzetting van elektrische energie in warmte-energie. De richting van de stroom maakt dan niets uit. Daarom heeft een blokspanning met amplitude  $A = 1$  V ook een effectieve waarde  $U_{eff} = 1$  V. In de vorm van een algemeen geldende vergelijking is dat:  $U_{eff} = A$  ( $U$  is een blokspanning). Bij een sinus is dat anders, omdat spanning en stroom) voortdurend van grootte veranderen. Voor een sinusvormige wisselspanning met maximum  $U_{max}$  die gelijk is aan de amplitude  $A$  geldt

$$U_{eff} = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}} = \frac{A}{\sqrt{2}} \text{ of iets minder precies: } U_{eff} \approx 0,7U_{max} \approx 0,7A \quad (5.3-2)$$

Het teken  $\approx$  in plaats van  $=$  betekent “is ongeveer gelijk aan”. Er geldt ook:

$$U_{max} = A = U_{eff}\sqrt{2} \text{ of iets minder precies: } U_{max} = A \approx 1,4U_{eff} \quad (5.3-3)$$

Wat voor de spanning  $U$  geldt, geldt ook voor de stroom  $I$ . Je mag in de vergelijkingen ( 5.3-2) en ( 5.3-3) dus zonder bezwaar elke  $U$  vervangen door  $I$ .  $A$  heeft dan de eenheid A (ampère) in plaats van V van volt. **Let op:**  $A$  cursief is wat anders dan A rechtop!)

6. **De fase** van een wisselspanning is het deel van een periode dat sinds het begin ervan is gerealiseerd. Denk bijvoorbeeld aan de bouw van een huis: “de bouw verkeert in de fase van het aanbrengen van de dakbedekking”.  
*Fase* is de mate van vordering van een periode. Omdat alle perioden gelijk zijn, hoeven we niet terug naar het inschakeltijdstip van de wisselspanning. Bij een frequentie van 1 Hz duurt een periode 1 s. Na 0,5 s zijn we halverwege de periode. Bij een frequentie van 1 kHz is dat al na 0,5 ms het geval. Dat je bij het bepalen van de fase zowel frequentie als tijd nodig hebt, is onhandig. Daarom wordt fase bij voorkeur als hoek opgegeven. We komen dan weer bij de cirkelbeweging. Een keer de cirkel rond is  $360^\circ$ . Dan betekent  $180^\circ$  voor iedere frequentie ‘halverwege de periode’ en  $90^\circ$  staat voor ‘op een kwart ( $\frac{1}{4}$ ) van een periode, enzovoort.
7. **De momentele waarde** is de waarde op een zeker moment, bijvoorbeeld 0,15 of 0,99 periode na het begin van een nieuwe periode.

## 5.4 Wisselstroomgedrag van een condensator of spoel met een weerstand

### 5.4.1 Inleiding

Als wisselstroom door een weerstand loopt, zijn stroom en spanning *in fase*. Anders gezegd: het faseverschil is 0. Stroom en spanning lopen gelijk op. Met spoelen en/of condensatoren in de schakeling is dat anders. Het gelijkstroomgedrag van condensatoren en spoelen hebben we in Hoofdstuk 4 besproken. Het wisselstroomgedrag komt in dit hoofdstuk aan bod. We laten dat zien aan de hand van een serieschakeling van weerstand met condensator en van een weerstand met condensator. Voor de vergelijking laten we eerst zien wat er in de serieschakeling van twee weerstanden gebeurt. Daarvoor is het nodig dat we iets vertellen over de schijnbare weerstand voor wisselstroom van condensatoren en spoelen. Die schijnweerstand heet *reactantie* met een hoofdletter  $X$  als symbool. De eenheid is dezelfde als voor weerstand, dus de ohm ( $\Omega$ ).

### 5.4.2 Reactantie

Als we een gelijkspanningsbron over een ongeladen condensator aansluiten, loopt er heel even een stroom, waarna de condensatorspanning gelijk is aan de aangesloten spanning. Daarna gedraagt de condensator zich als isolator. Als we een constante gelijkstroom zouden aansluiten, gesteld dat we die zouden kunnen maken, dan loopt de spanning over de condensator op, zolang de stroom loopt.

Met wisselspanning over de condensator loopt er een wisselstroom. De condensator wordt afwisselend geladen, ontladen, geladen met een tegengestelde lading, enzovoort. Onder invloed van een wisselspanning lijkt er een wisselstroom door de condensator te lopen. In werkelijkheid passeert de stroom het diëlektricum (nagenoeg) niet, want een diëlektricum is een isolator.

Dit gedrag lijkt op dat van een zeehaven met open verbinding naar zee. Bij opkomend getij loopt er een waterstroom de haven in (de vloedstroom); bij afgaand getij loopt er water de haven uit (de ebstroom). Het water stroomt wel, maar alleen in en uit. Ook een wisselstroom, maar dan met water. Hoe groter de haven, des te meer stroming.

Onder invloed van wisselspanning lijkt een condensator zo een weerstand te hebben. In tegenstelling tot een echte weerstand is de stroom evenredig met de verandering van de spanning, niet met de spanning zelf. Verandert de spanning niet, dan loopt er geen stroom. Verandert de spanning langzaam, dan loopt er een kleine stroom. Verandert de spanning snel, dan loopt er een sterke stroom. De reactantie van een condensator hangt dan ook af van de frequentie van de spanning. De bijbehorende vergelijking voor de reactantie  $X_C$  van een condensator is:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad (5.4-1)$$

De  $C$  van  $X_C$  geeft aan dat het om de reactantie van een condensator gaat. De frequentie  $f$  staat in de noemer. De reactantie is dus omgekeerd evenredig met  $f$ . Hoe hoger de



frequentie, des te kleiner de reactantie.  $\pi$  is het getal 3,14 met nog een oneindig aantal cijfers erachter. Het is het aantal keren dat de diameter van een cirkel op de omtrek past.  $2\pi$  is het aantal keren dat de straal op de cirkelomtrek past. Dit laatste is geen exameneis, vergelijking (5.4-1) wel. We zien de  $2\pi$  terug in de horizontale schaal van Figuur 5.2-2 (rechtergrafiek), want die loopt tot iets meer dan 6, nauwkeuriger: 6,28. Dat is gelijk aan  $2\pi$ , afgerond op twee cijfers achter de komma.

Als  $f = 0$ , dan is  $X_C = \infty$ . Deze omgevallen 8 betekent oneindig. Een frequentie van 0, betekent gelijkspanning en is de reactantie van een ideale condensator oneindig.

Dan nu de spoel, ofwel zelfinductie. Het symbool daarvoor is  $L$ , en de reactantie van een spoel heeft dan ook  $X_L$  als symbool. De vergelijking voor de reactantie is:

$$X_L = 2\pi fL \quad (5.4-2)$$

We zien een omkering van condensator (capaciteit) naar spoel (zelfinductie). Als  $f = 0$ , dan is de reactantie 0 in plaats van oneindig zoals bij de (ideale) condensator. Hoe groter  $f$ , des te groter  $X_L$ . Voor  $f$  en  $X_C$  geldt het omgekeerde (zie vergelijking (5.4-1)).

### 5.4.3 Weerstand en reactantie samen

We zullen nu aan de hand van enkele plaatjes van een digitale oscilloscoop (hulpstuk bij een PC) zien wat er met een wisselspanning gebeurt als een reactantie in serie wordt geschakeld met een weerstand van gelijke waarde. We vergelijken het effect van een serieschakeling van twee weerstanden op de spanning met dat van één met een weerstand en een reactantie. Foto 5.4-1. toont spanningen; rechts onderin de schakeling met twee gelijke weerstanden. De twee cirkels met zigzag staan voor de oscilloscoop aansluitingen.

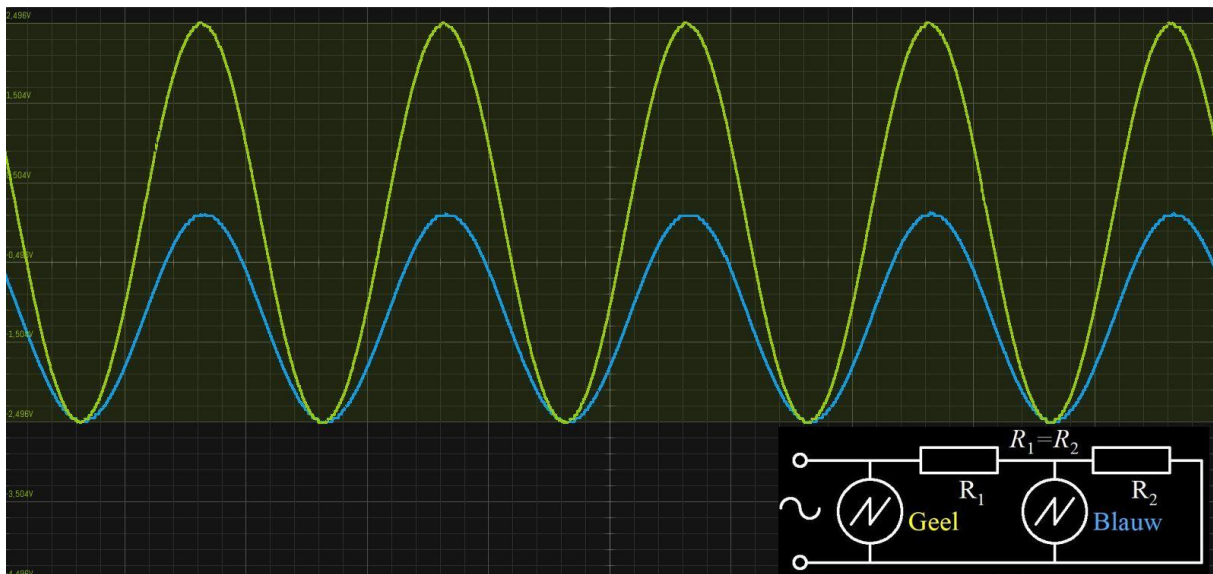


Foto 5.4-1. Oscillogram van een sinusvormige wisselspanning over twee gelijke in serie geschakelde weerstanden  $R_1$  en  $R_2$ . Geel is de wisselspanning over beide weerstanden, blauw die op het knooppunt van beide. De twee cirkels met zigzag erin stellen de beide oscilloscoop aansluitingen voor.

De blauwe sinus op het knooppunt van beide is, zoals te verwachten valt, half zo groot als de gele sinus van de spanning over de hele schakeling, Beide sinussen lopen gelijk op.

In de RC-schakeling in Foto 5.4-2 is  $R_2$  in het schema onderin van Foto 5.4-1. vervangen door een capaciteit C met een reactantie die even groot is als de weerstand, dus  $R = X_C$ .

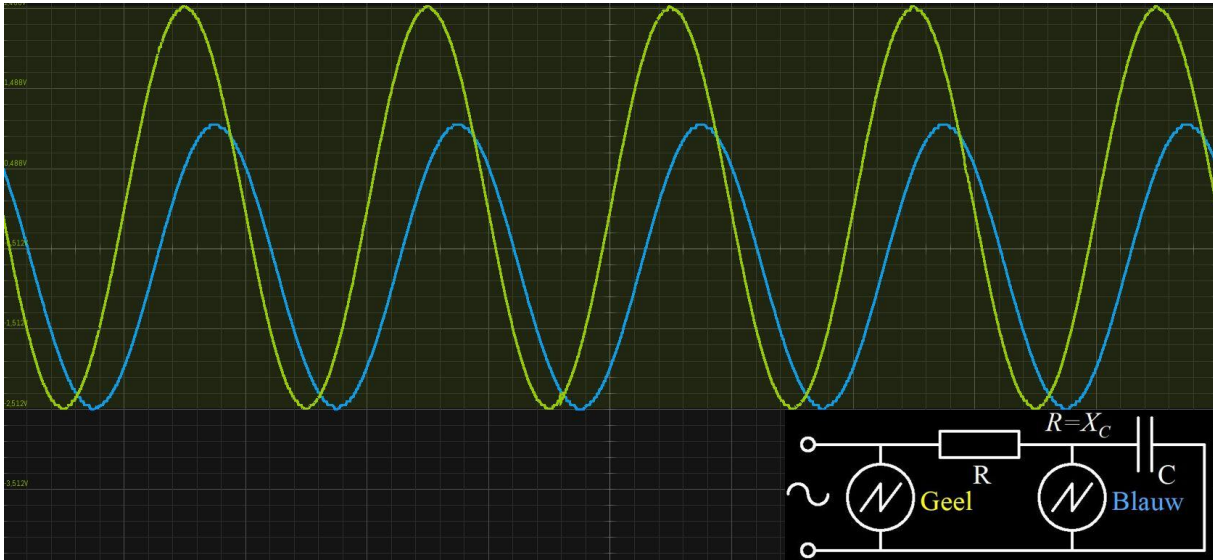


Foto 5.4-2. Golfvormen van een sinusvormige spanning in een serieschakeling van R en C (schema rechtsonder). De weerstand R is gelijk aan de reactantie  $X_C$ , De amplitude van de blauwe sinus is ongeveer 0,7 maal die van de gele. De gele sinus staat over de hele schakeling, de blauwe alleen over de condensator.

Foto 5.4-2 heeft twee verschillen met Foto 5.4-1.:

- De blauwe sinus in Foto 5.4-2 heeft een grotere amplitude dan die in Foto 5.4-1.. Om precies te zijn: 0,7x de gele tegen 0,5x in Foto 5.4-1..
- De blauwe sinus bereikt zijn maximum ongeveer 1/8 periode later dan de gele.

Nu Foto 5.4-3. Daarin is de condensator vervangen door een spoel. Opnieuw zijn weerstand en reactantie gelijk, Daarom staat nu  $R = X_L$  in het schema.

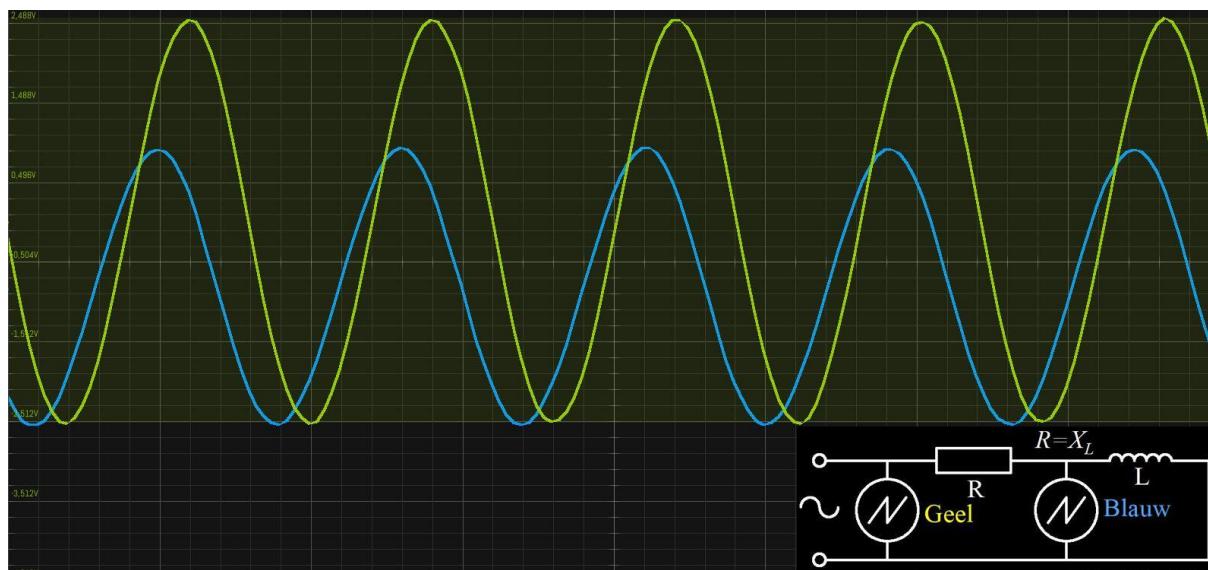


Foto 5.4-3. Golfvormen in een serieschakeling van  $R$  en  $L$  (schema rechtsonder). De weerstand  $R$  is gelijk aan de reactantie  $X_L$ . De amplitude van de blauwe sinus is ongeveer 0,7 maal die van de gele. De gele sinus staat over de hele schakeling, de blauwe alleen over de spoel.

De verhouding van de twee amplitudes is dezelfde als in Foto 5.4-2, ongeveer 1:0,7. Maar de blauwe sinus bereikt nu zijn maximum ongeveer 1/8 periode eerder dan de gele. In Foto 5.4-2 was dat ongeveer 1/8 periode later.

#### 5.4.4 Betekenis van de verschillen

**In een serieschakeling is de stroom door alle elementen gelijk.**

In de drie voorbeelden betekent de serieschakeling dat de stroom door beide elementen, respectievelijk twee weerstanden, weerstand & condensator en weerstand & spoel, dezelfde is.

##### Weerstand en weerstand in serie (Foto 5.4-1.)

De sinusvormige spanning (blauw) op het knooppunt van de twee weerstanden in de eerste schakeling loopt in de pas met de sinusvormige spanning (geel) over beide weerstanden. De blauwe spanning is half zo groot als de gele. Het gaat er net zo aan toe als met gelijkspanning.

##### Weerstand en capaciteit in serie (Foto 5.4-2)

De amplitude van blauwe spanning is nu 0,7x die van de gele in plaats van 0,5x. Tegelijkertijd zijn beide spanningen niet meer in fase zoals in Foto 5.4-1.. De blauwe sinus bereikt zijn maximum en minimum ongeveer 1/8 periode later dan de gele. De spanning over een capaciteit loopt achter op de stroom. Het gevolg van dit verschil in fase is het verschil tussen de blauwe spanningen in Foto 5.4-1. en Foto 5.4-2. De details zijn geen examenstof, maar dit spanningsverschil heeft alles te maken met het faseverschil. Omdat weerstand en reactantie even groot zijn, is het gemeten faseverschil het gemiddelde van de twee: 0 voor de weerstand, 1/4 periode voor de condensator, gemiddeld 1/8 periode omdat weerstand en reactantie even groot zijn.

### Weerstand en zelfinductie in serie (Foto 5.4-3)

Ook hier is de amplitude van de blauwe spanning 0,7x die van de gele, maar bereikt de blauwe spanning zijn maxima en minima ongeveer 1/8 periode eerder dan die van de gele in plaats van 1/8 periode later. Ook hier heeft het verschil in amplitude met Foto 5.4-1. alles te maken met dit faseverschil. Bij een spoel loopt de spanning 1/4 periode vóór op de stroom. Met de weerstand erbij wordt het verschil op het knooppunt 1/8 periode. Dit faseverschil komt terug bij de zogenoemde afgestemde kringen.

**Conclusie: Het wisselstroomgedrag van spoel en condensator verschilt alleen in de verwisseling van stroom en spanning.**

En eigenlijk konden we dat wel vermoeden, omdat tot nu toe, inclusief wat we zagen in hoofdstuk 4, tussen capaciteit en zelfinductie alles al omgekeerd bleek te zijn.

## 5.5 Impedantie, filters en resonantie

### 5.5.1 Impedantie

Impedantie is de schijnbare weerstand van de combinatie van weerstand en reactantie. Strikt genomen heeft elke schakeling een impedantie, want er is naast weerstand altijd wel ergens een beetje zelfinductie (een stukje draad) en capaciteit (bedrading of een metalen kast om een schakeling). Naarmate frequenties hoger zijn, spelen impedanties een grotere rol. Kijk nog eens naar vergelijking (5.4-1) en vergelijking (5.4-2) en je weet het eigenlijk al. De frequentie staat er prominent in: bij de één onder de deelstreep, bij de ander erboven.

Bij heel hoge frequenties kunnen bijvoorbeeld de aansluitdraden van een condensator al een zodanige inductieve reactantie hebben en de condensator zelf zo'n lage reactantie, dat zo'n ding zich als een spoel gaat gedragen. Omgekeerd kunnen de windingen van een spoel onderling een capaciteit hebben die veroorzaakt dat de spoel zich capacitief gaat gedragen. In deze cursus blijven we uit de buurt van zulke extremen.

Voor het berekenen van de impedantie  $Z$  van een schakeling met weerstand en spoel of van weerstand en condensator zijn er twee vergelijkingen, één voor de serieschakeling en één voor de parallelschakeling. De oplettende lezer zal zich nu afvragen, hoe dat dan zit met het verschil tussen condensator en spoel. Antwoord: achter de vergelijkingen (5.4-1) en (5.4-2) zit wiskunde die we in deze cursus vermijden. De F-cursus gaat er dieper op in, want voor het F-examen is het examenstof. Voor het N-examen zijn de twee vergelijkingen die nu volgen, voldoende.

Voor de serieschakeling geldt niet de som van weerstand en reactantie, maar:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (5.5-1)$$

En voor de parallelschakeling:

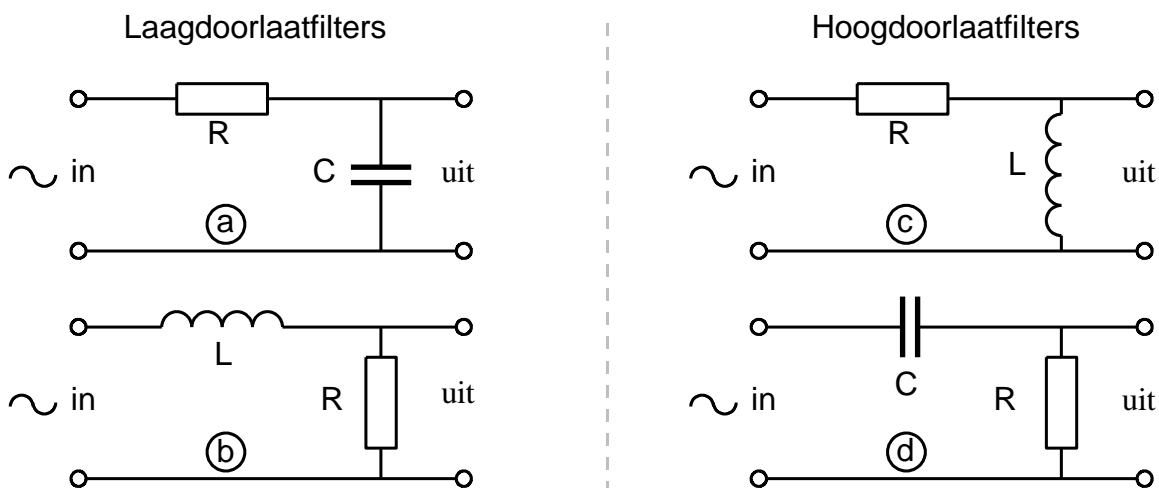
$$\frac{1}{Z} = \sqrt{\frac{1}{R^2} + \frac{1}{X^2}} \quad (5.5-2)$$

Dit lijkt allemaal een beetje op wat er bij weerstanden gebeurt, maar nu worden de waarden gekwadrateerd, opgeteld en wordt de wortel uit de som getrokken. Dat hangt samen met faseverschil van de blauwe sinussen in Foto 5.4-2 en Foto 5.4-3 met de blauwe sinus in Foto 5.4-1. Die laatste geldt voor een schakeling met twee weerstanden.

### 5.5.2 Laag- en hoogdoorlaatfilters

In heel veel schakelingen wordt gebruik gemaakt van filters die vooral lage of hoge frequenties doorlaten en de andere verzwakken. Eigenlijk hebben we er in paragraaf 5.1 al kennis mee gemaakt zonder dat die eigenschap werd genoemd. Het gaat om de schakelingen in Foto 5.4-2 en Foto 5.4-3 met een weerstand plus reactantie. De reactantie bestond uit òf een condensator, òf een spoel.

Een weerstand gedraagt zich onafhankelijk van de frequentie. Reactantie is frequentieafhankelijk. Figuur 5.5-1 laat twee laag- en twee hoogdoorlaatfilters zien.



Figuur 5.5-1. Laagdoorlaatfilters (links) en hoogdoorlaatfilters (rechts), elk met 2 componenten.

De schakeling van Foto 5.4-2 vinden we als laagdoorlaatfilter terug in Figuur 5.5-1a en -b en die van Foto 5.4-3 bij de hoogdoorlaatfilters in Figuur 5.5-1c en -d.

#### Hoe onderscheid je een laagdoorlaatfilter van een hoogdoorlaatfilter?

- Een laagdoorlaatfilter laat vooral lage frequenties door en verwijdert vooral hoge;
- Een hoogdoorlaatfilter laat vooral hoge frequenties door en verwijdert vooral lage.

Er zijn in de filters van Figuur 5.5-1 steeds twee routes:

- De signaalroute: van het bovenste aansluitpunt links naar het bovenste aansluitpunt rechts. Onderweg zit één object: een weerstand, spoel of condensator.

- Na het object is er een 'ontsnappingsroute' naar de nulleiding (beneden), weer met een object, bestaande uit een weerstand, spoel of condensator.

Het object in de ontsnappingsroute is het meest aantrekkelijk voor frequenties waarbij dit een kleinere hindernis vormt dan het object in de signaalroute. Die frequenties worden via de ontsnappingsroute gemakkelijker afgevoerd dan de andere. We bekijken ze alle vier (Figuur 5.5-1):

De laagdoorlaatfilters:

- R in de signaalroute, C in de ontsnappingsroute. De weerstand van R is voor alle frequenties gelijk. De ontsnapping via C wordt gemakkelijker naarmate frequenties hoger zijn. De lagere blijven over. Een laagdoorlaatfilter dus.
- L in de signaalroute, R in de ontsnappingsroute. De reactantie van L wordt hoger voor hogere frequenties; de moeilijkheidsgraad van de ontsnappingsroute via R verandert niet. Een laagdoorlaatfilter dus.

Het recept voor laagdoorlaatfilters is dan ook òf bemoeilijken van de signaalroute òf vergemakkelijken van de ontsnappingsroute. Dat geldt ook voor de hoogdoorlaatfilters:

- R in de signaalroute, L in de ontsnappingsroute. Hoe lager de frequentie, des te gemakkelijker de ontsnapping.
- C in de signaalroute, R in de ontsnappingsroute. Hoe hoger de frequentie, des te gemakkelijker de signaalroute.

Voor deze vier filtersoorten geldt: vervang C door L of omgekeerd en je maakt van een hoog- een laagdoorlaatfilter of omgekeerd.

Foto 5.5-1 toont het gedrag van een laagdoorlaatfilter; Foto 5.5-2 doet dit op dezelfde manier voor een hoogdoorlaatfilter. De gele grafiek is de wisselspanning aan de ingang, de blauwe die aan de uitgang. Kijk eventueel nog een keer naar Figuur 5.5-1 om te zien waar in- en uitgang zitten. Per filtersoort staan drie oscilloscoopplaatjes onder elkaar:

- In het midden de amplitudes waarin reactantie en weerstand dezelfde waarde hebben;
- Erboven de amplitudes voor de frequentie 4x zo laag als die in het middenplaatje;
- Eronder de amplitudes voor de frequentie 4x zo hoog als die in de middenplaatje.

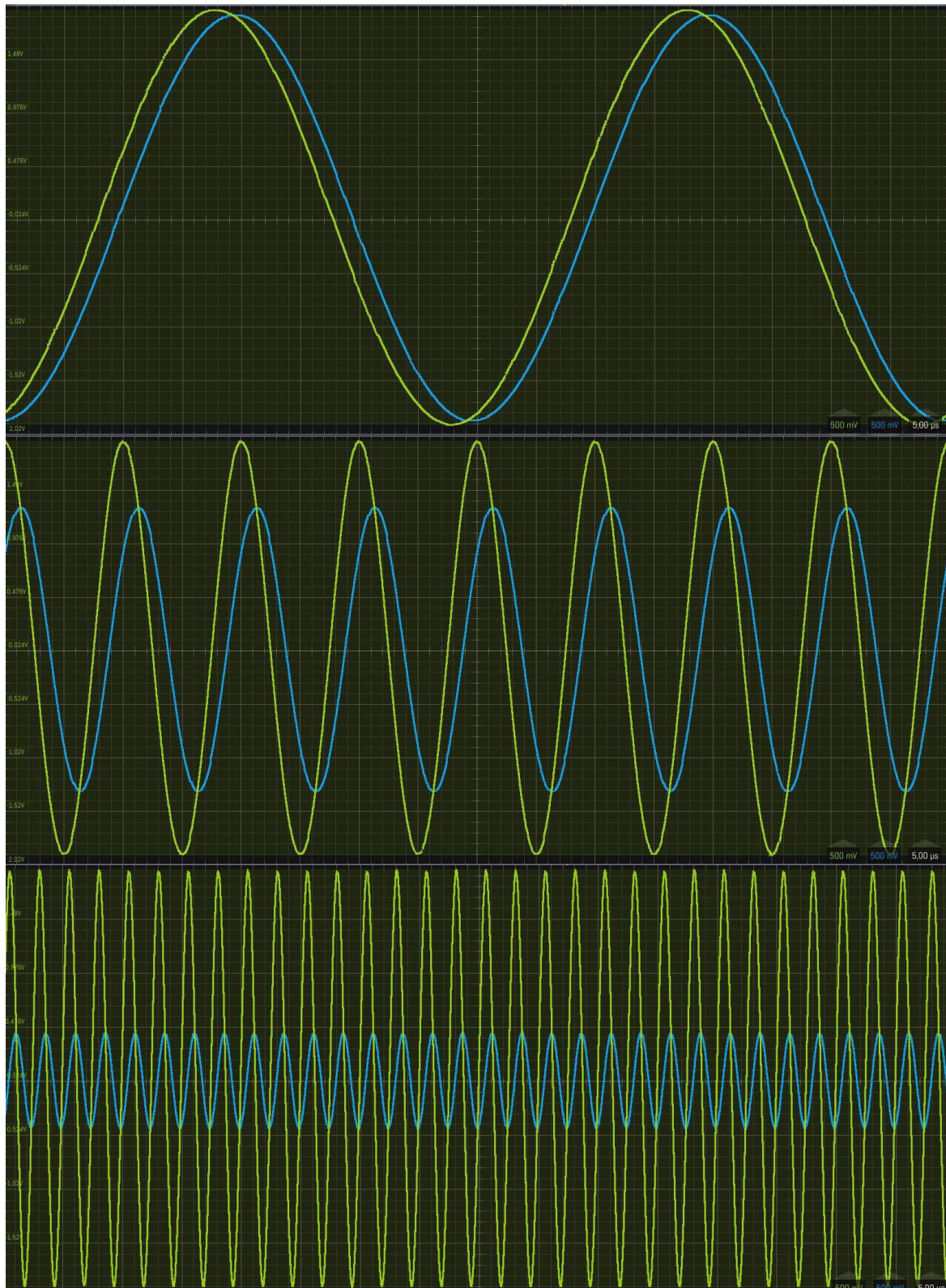


Foto 5.5-1. Gedrag van een **RC-laagdoorlaatfilter** als in Figuur 5.5-1. Midden: gedrag bij weerstand gelijk aan reactantie. Boven: frequentie 4x zo laag; onder: frequentie 4x zo hoog. De amplitudes bij een filter met spoel zijn gelijk aan die voor een filter met een condensator. Er is alleen het in sub-paragraaf 5.4.4 al besproken verschil in fase.

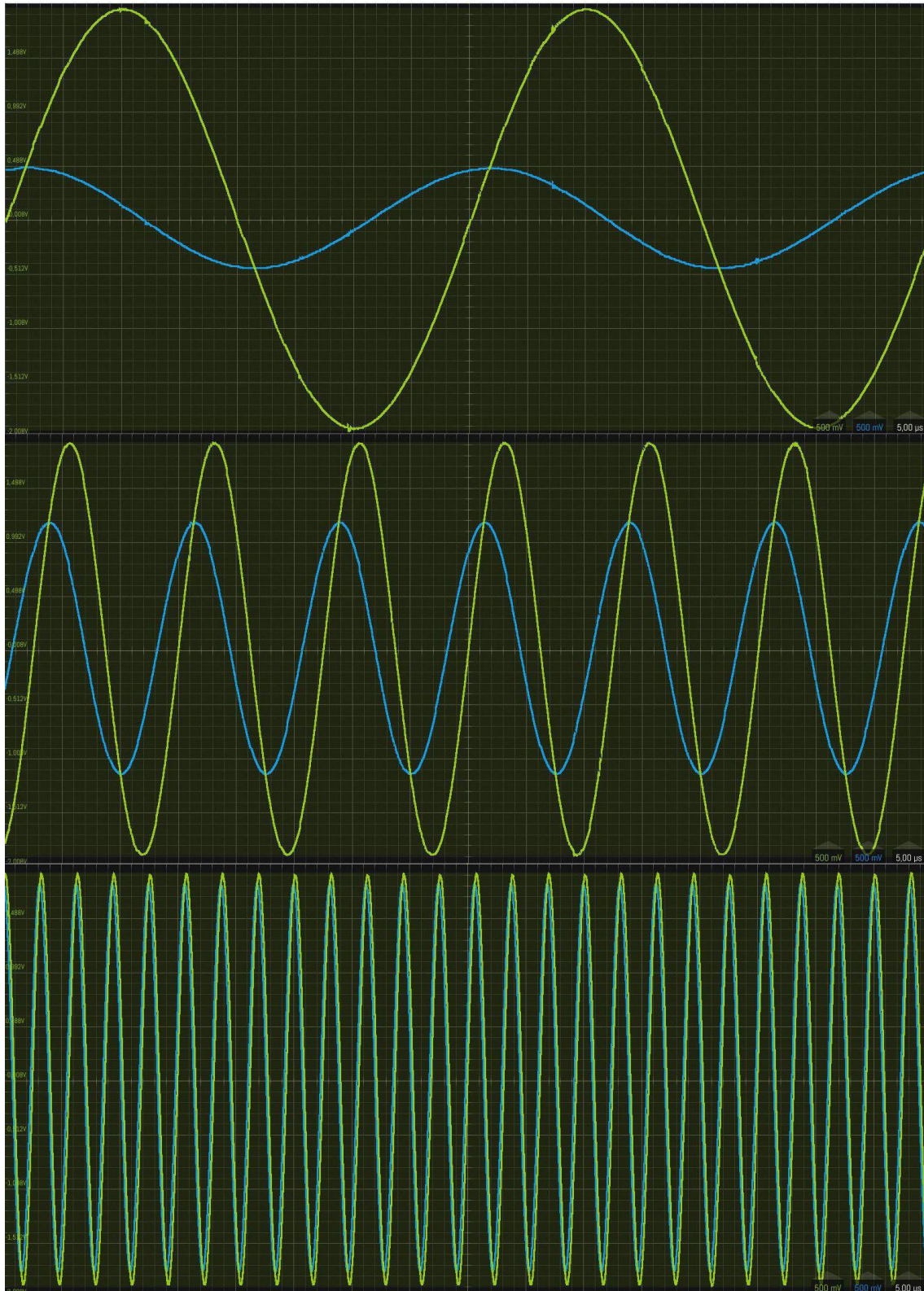
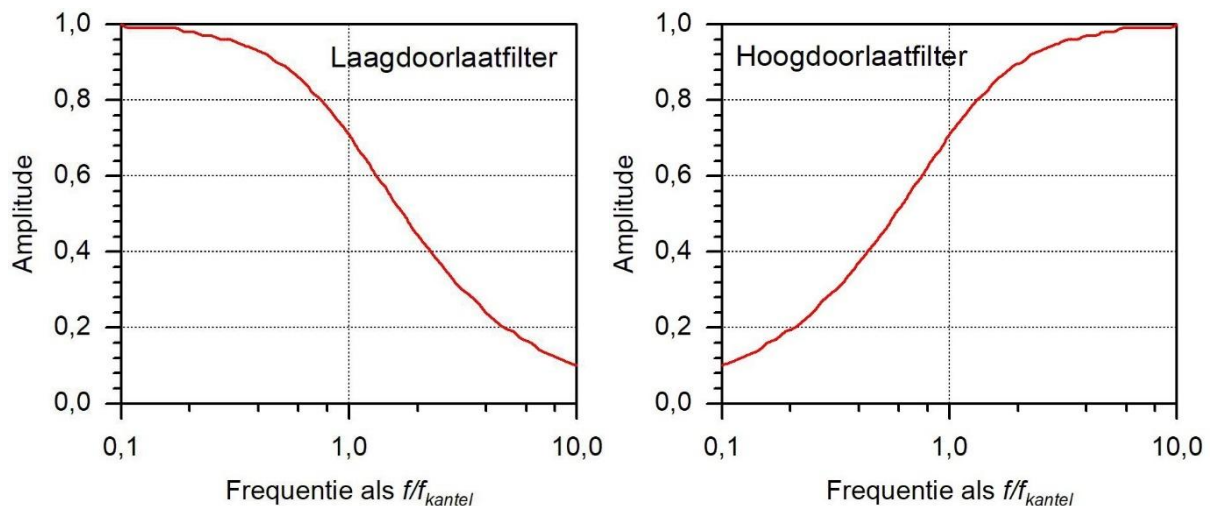


Foto 5.5-2. Gedrag van een **RL-hoogdoorlaatfilter** als in Figuur 5.5-1. Midden: gedrag bij R-reactantie. Boven: frequentie 4x zo laag; onder: frequentie 4x zo hoog. De amplitudes bij een filter met spoel zijn gelijk aan die voor een filter met een condensator. Er is alleen het in sub-paragraaf 5.4.4 besproken verschil in fase.



Op Foto 5.5-1 laat het filter lage frequenties goed door en de hoge slecht. Op Foto 5.5-2 is het omgekeerd: de lage slecht en de hoge goed. Deze filters zijn verplichte kennis. De grafieken zul je op het examen niet tegenkomen. Die zijn bedoeld om hier te laten zien, wat de filters doen. Leer vooral de schema's van Figuur 5.5-1. Je wordt verondersteld, te weten wat ze doen.

Ook worden grafieken gevraagd die de doorlaat in afhankelijkheid van de frequentie laten zien. Ze worden vaak **doorlaatdiagrammen** of **frequentiekarakteristieken** genoemd. We laten er één zien van een laag- en één van een hoogdoorlaatfilter (LDF, resp. HDF) in Figuur 5.5-2. Een belangrijke grootheid daarbij is de *kantelfrequentie*  $f_k$ . Dat is geen term die op het N-examen een rol speelt, maar het leest gemakkelijker als we er een woord voor hebben. We kennen hem al. Het is de frequentie waarbij de doorgelaten spanning een amplitude heeft van  $1/\sqrt{2} \approx 0,7$  maal de ingangsspanning. Dat zijn de middelste grafieken in Foto 5.5-1 en Foto 5.5-2. In Figuur 5.5-2 heet de frequentie  $f_{kantel}$ , van *kantelfrequentie*. De kantelfrequentie wordt gemarkeerd met de verticale stippellijn boven het getal 1,0 op de twee horizontale assen.



*Figuur 5.5-2. Doorlaatdiagrammen, ook wel **frequentiekarakteristieken** genoemd, voor een LDF (links) en een HDF (rechts). Op de verticale as staat de amplitude, waarbij het getal 1 de amplitude aan de ingang voorstelt en de grafiek die aan de uitgang. Zo geldt de grafiek voor alle amplitudes. Het getal 1 op de horizontaler as stelt het kantelpunt voor. Daarbij is de reactantie gelijk aan de weerstand.*

De afbeeldingen laten zien dat de afsnijding van de frequentie niet scherp is. Tussen de laagste en de hoogste frequentie in beide grafieken zit een factor 100. Om de werking van dit type filters te versterken, kunnen 2 of meer gelijke filters achter elkaar worden geschakeld. Een plaatje met twee van die filters ziet er ingewikkelder uit dan één met een enkel filter, maar is als je goed kijkt, een herhaling van twee dezelfde dingen. Wees erop bedacht bij het examen.

### 5.5.3 Frequentiefilters zonder weerstanden

#### Inleiding

Weerstanden in filters verminderen de onderscheidende werking van die filters. Na het lezen van de tekst en het zien van de oscilloscoopbeelden konden we dat al een beetje vermoeden. De filters met weerstanden die we zagen, filteren frequenties niet heel scherp.

Filters kunnen ook bestaan uit alleen reactanties. Hun werking is gebaseerd op het faseverschil tussen spanning en stroom. Op Foto 5.4-2 en Foto 5.4-3 zagen we een verschil van ongeveer  $1/8$  periode bij gelijke weerstand en reactantie. Zonder weerstand in de schakeling zou dat  $2x$  zoveel zijn, dus  $1/4$  periode. Bij de spoel de ene kant op, bij de condensator de andere. Als die samen in een schakeling (vrijwel) zonder weerstand zitten, wordt het verschil een halve periode. Dan is bij gelijke reactanties de momentele waarde van de overeenkomstige golven, bijvoorbeeld de spanningen, bij de één evenveel positief als bij de ander negatief. Samen zijn ze steeds 0. Dat heet *resonantie*. In de praktijk is er natuurlijk altijd wel ergens een weerstand(je).

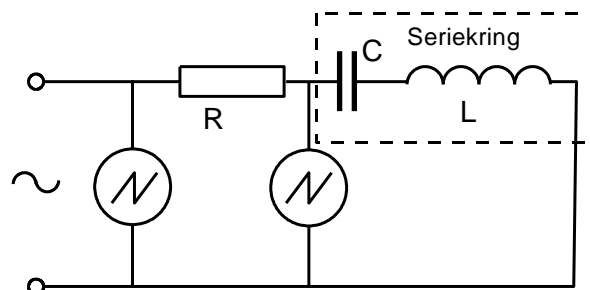
Voor het maken van een resonantiefilter kun je een spoel en een condensator behalve in serie ook parallel schakelen. De eigenschappen van beide schakelingen zijn weer eens tegengesteld. We bekijken bij de foto's eerst de serieschakeling, daarna de parallelschakeling. Meestal wordt zo'n LC-schakeling *kring* of *afgestemde kring* genoemd. Een serieschakeling van spoel en condensator heet ook wel *seriekring* en de parallelschakeling *parallelkring*.

In een parallelkring zijn de spanningen over spoel en condensator gelijk, de stromen tegengesteld. Als die laatste even groot zijn, heffen ze elkaar op. Het lijkt dan of er een wisselspanning over de schakeling staat, zonder dat er stroom loopt. De gezamenlijke reactantie is dan -alweer in theorie- oneindig.

We zullen van beide weer oscilloscoopbeelden zien.

#### Serieresonantie: het bandspfilter

Eerst het schema waaraan we gaan meten (Figuur 5.5-3).



Figuur 5.5-3. Seriekring met spoel, condensator, wisselspanning op de ingang en oscilloscoop aansluitingen.

We gaan weer uit van de opzet met 3 oscillogrammen in één plaatje (Foto 5.5-3)

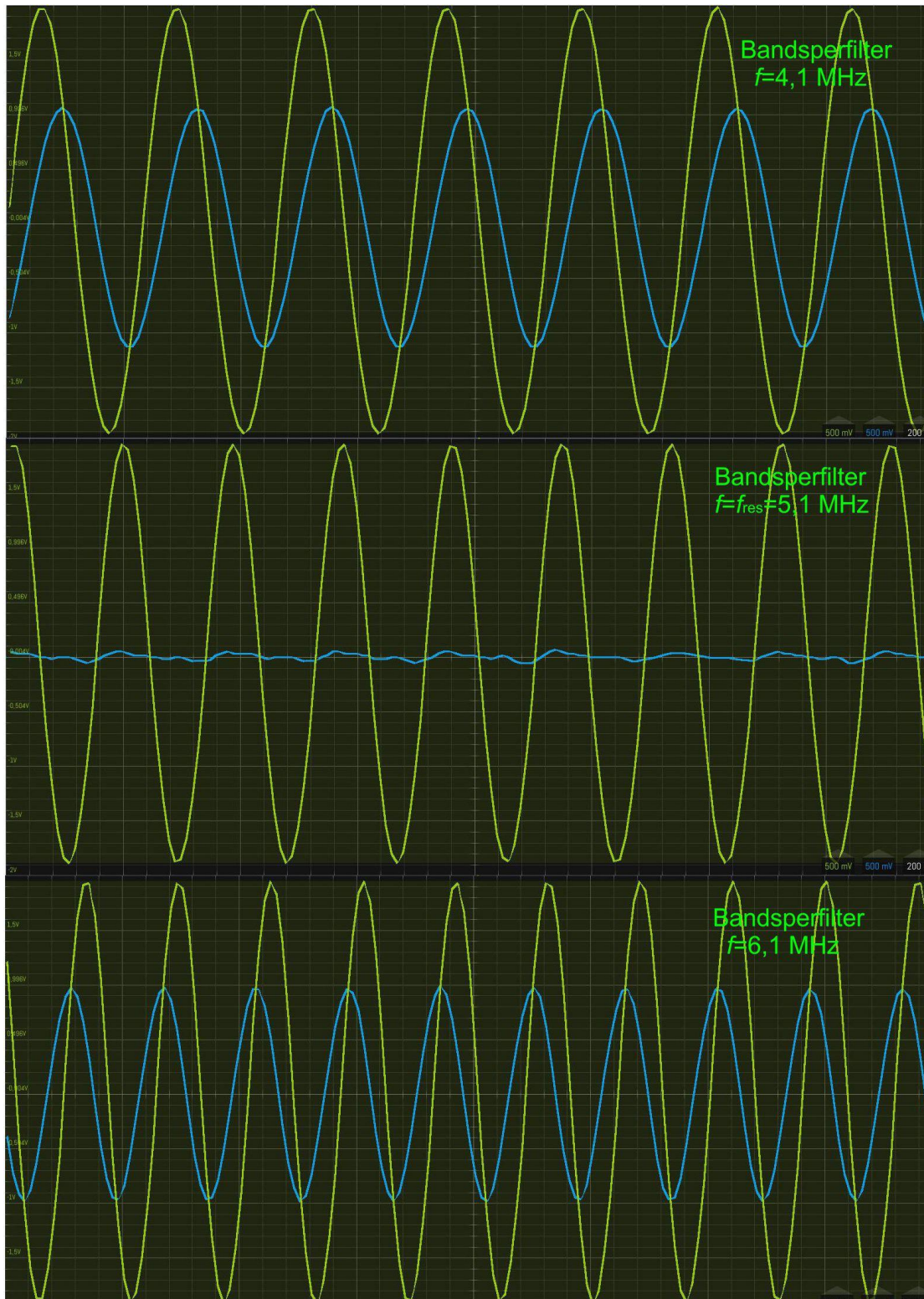


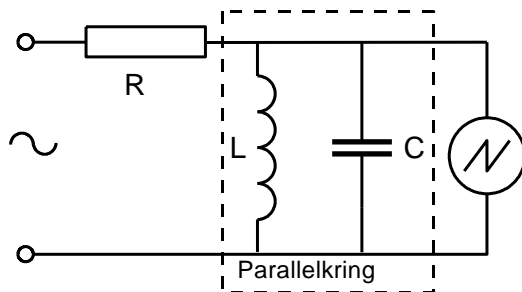
Foto 5.5-3. Gedrag van een serieresonantiefilter (bandsperfilter) volgens Figuur 5.5-3. Gele sinus: spanning op de aansluitklemmen; blauw: spanning over de kring. Midden: gedrag bij resonantie (5,1 MHz). Boven: frequentie 4,1 MHz, dus 1 MHz lager. Onder: frequentie 6,1 MHz, dus 1 MHz hoger. Bij resonantie is de oorspronkelijke frequentie als gevolg van storende frequenties uit de omgeving nog maar net te herkennen.

Let op het veel kleinere verschil in frequentie, vergeleken met de oscillogrammen van de laag- en hoogdoorlaatfilters (Foto 5.4-2 en Foto 5.4-3). Op nog grotere frequentie-afstand van het resonantiepunt wordt de amplitude van de blauwe sinus uiteindelijk bijna even groot als die van de gele.

Dit soort filters wordt gebruikt om een bepaald frequentiegebied (*frequentieband*) uit een signaal dat uit vele frequenties bestaat, te verwijderen. Het heet daarom ook wel *bandsperfilter* of -heel toepasselijk- *zuigkring*.

### Parallelresonantie: het banddoorlaatfilter

Om te beginnen het schema in Figuur 5.5-4, daarna in Foto 5.5-4 de oscilloscoopplaatjes met de uitkomsten van het meetwerk aan de schakeling bij de figuur.



Figuur 5.5-4. Parallelkring met spoel, condensator, wisselspanning op de ingang en oscilloscoop aansluiting.

Op Foto 5.5-4 zien we alleen een grafiek van de doorgelaten frequentie, omdat er niet hoeft te worden vergeleken met de amplitude van de ingangsfrequentie. Op Foto 5.5-3 moest de verzwakking van dat signaal zichtbaar worden gemaakt, op Foto 5.5-4 is dat niet aan de orde.

Bij grotere frequentie-afstanden tot de resonantiefrequentie dan de getoonde 0,4 MHz naderen de amplitudes van het bovenste en onderste oscillogram (oscilloscoopplaatje) naar 0.

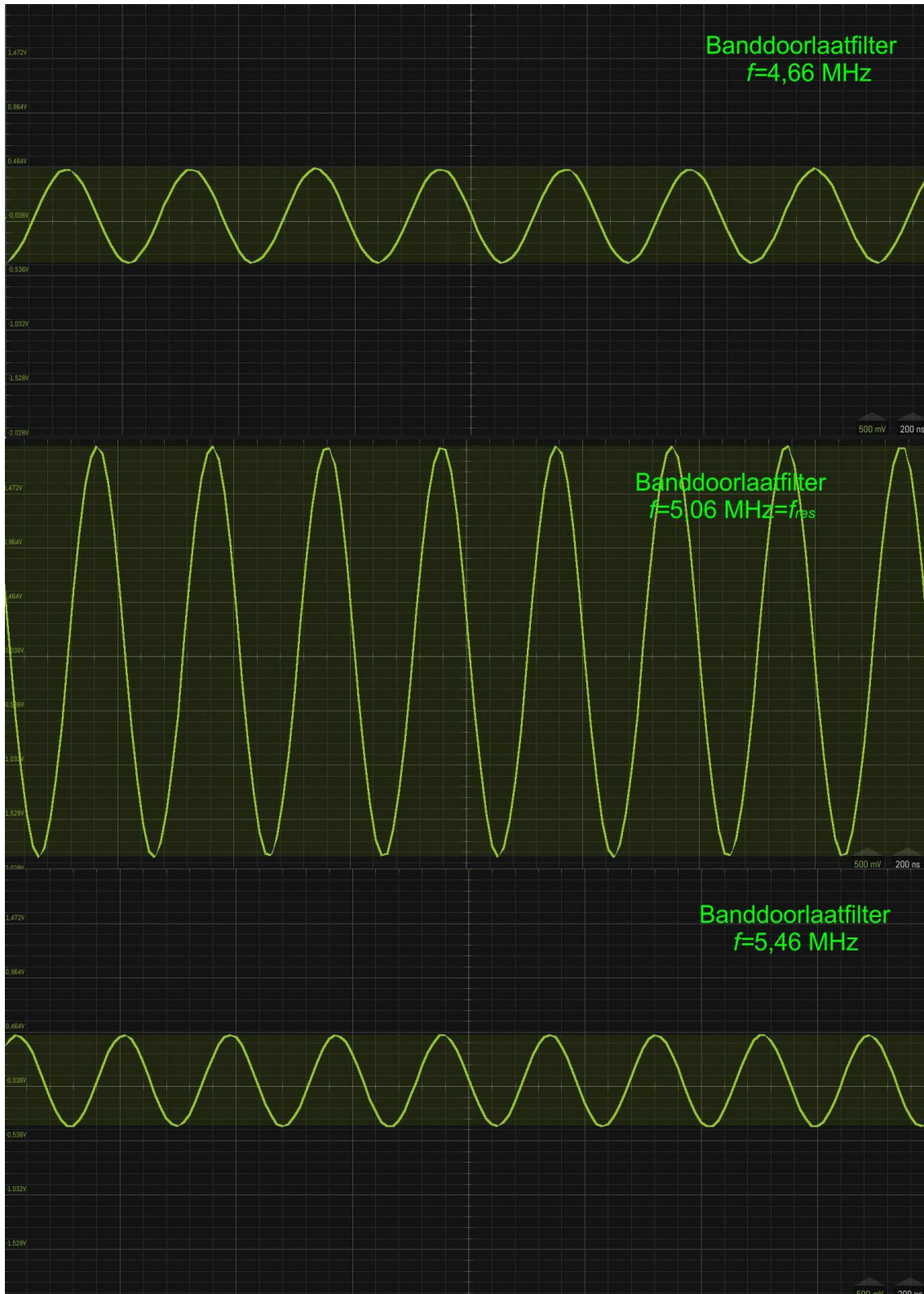


Foto 5.5-4. Gedrag van een parallelresonantiefilter (banddoorlaatfilter) volgens Figuur 5.5-4. Midden: gedrag bij resonantie (5,06 MHz). Boven: frequentie 4,66 MHz. Onder: frequentie 5,46 MHz, De amplitude in het bovenste plaatje loopt bij verder afnemende frequentie naar bijna 0. In het onderste plaatje gebeurt hetzelfde bij toenemende frequentie

#### 5.5.4 Berekening van de resonantiefrequentie: vergelijking van Thomson

Bij de resonantiefrequentie zijn de reactantie van condensator en spoel gelijk. Met behulp van de vergelijkingen (5.4-1) en (5.4-2) is een vergelijking af te leiden waarmee de resonantiefrequentie kan worden berekend. Dat is deze:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (5.5-3)$$

Vergelijking (5.5-3) staat bekend als de vergelijking van Thomson. Om de frequentie te berekenen, moeten de waarden  $L$  en  $C$  worden omgezet in henry en farad. Met machten van 10 werkt dat het gemakkelijkst. Het tellen van al die nullen leidt (te) gemakkelijk tot fouten.

Vergelijking (5.5-3) geldt voor alle resonantiekeringen met spoel en condensator, of ze nu in serie of parallel zijn geschakeld.

#### 5.5.5 Verliesweerstand

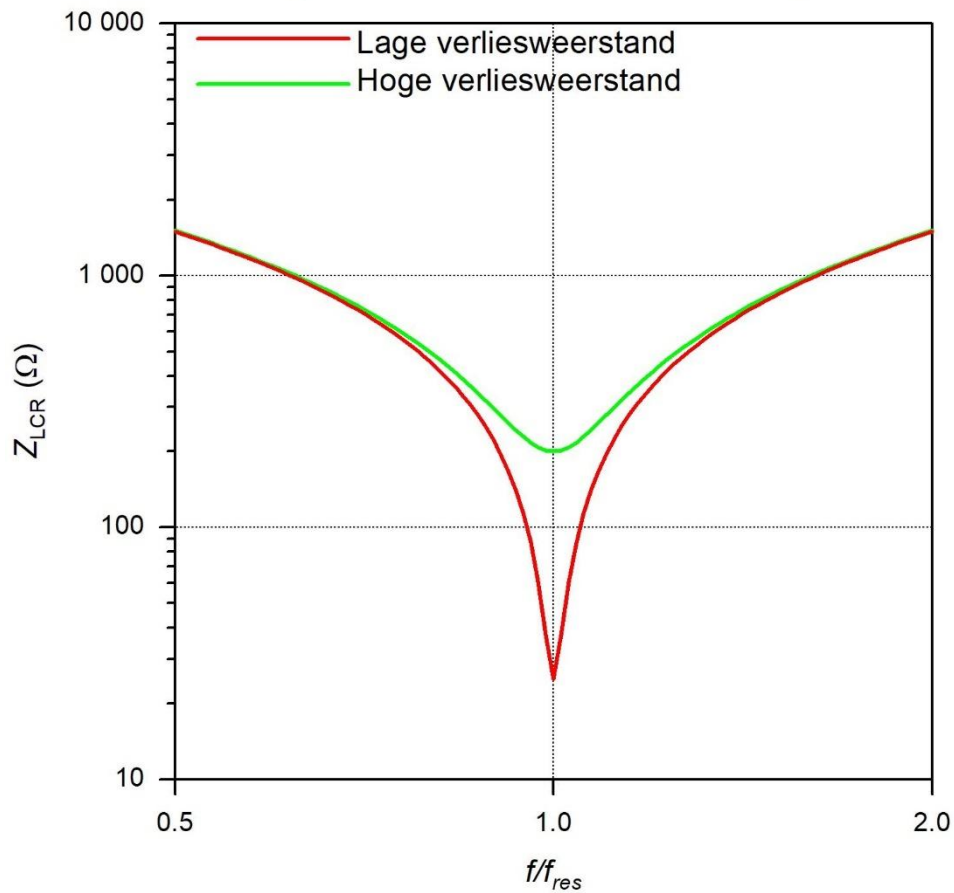
Ideale condensatoren en spoelen dissiperen niets. Dat wil zeggen dat ze geen vermogen verliezen door die in warmte om te zetten. In werkelijkheid doen ze dat natuurlijk wel een beetje. Weerstand is de echte dissipator.

Iedere resonantiekering verliest vermogen. Dat komt deels doordat overal in zo'n kring wel weerstand schuilt of een stukje magnetisch veld wordt uitgestraald dat niet in de kring terugkomt. Een ander deel wordt verloren doordat een afgestemde kring altijd in een schakeling is ingebed waarin verliezen optreden.

Al die verliezen zijn samen te vatten als een (niet werkelijk bestaande) weerstand die dezelfde verliezen oplevert. Een naam daarvoor is *verliesweerstand*. Dit is geen examenonderwerp, maar nuttig om de volgende twee figuren te begrijpen. Die tonen de frequentie-afhankelijkheid van de impedantie van een serie- en een parallelkring.

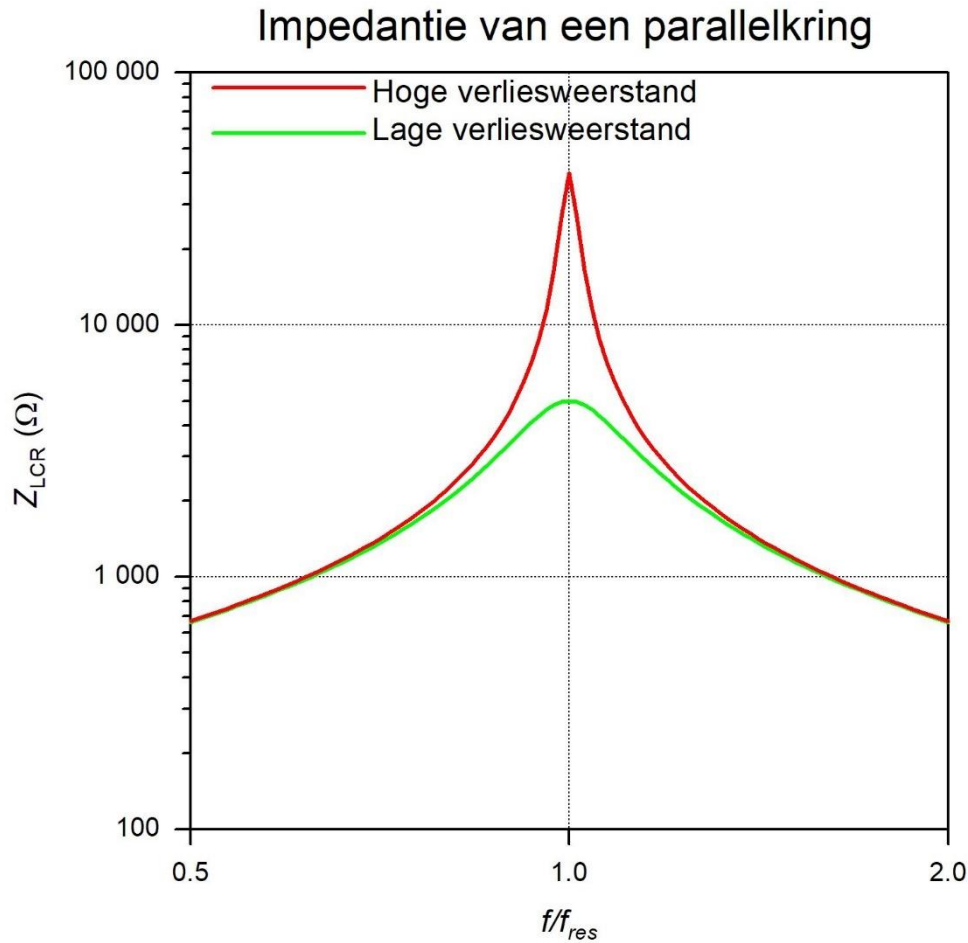
Ook met betrekking tot de verliesweerstand gedraagt een seriekring zich anders dan een parallelkring. De verliesweerstand wordt bij een seriekring in serie verondersteld met  $L$  en  $C$ , bij een parallelkring parallel. Bij een seriekring geeft een kleine serieweerstand kleine verliezen en bij een parallelkring is het een grote parallelweerstand die tot de kleinste verliezen leidt. De grafieken staan in Figuur 5.5-5 (seriekring) en Figuur 5.5-6 (parallelkring).

## Impedantie van een seriekring



*Figuur 5.5-5. Impedantie van een seriekring op basis van reactanties ( $L$  en  $C$ ) en verliesweerstand, afhankelijk van de frequentie. Een hoge verliesweerstand in de kring {groene grafiek} geeft grotere verliezen en een vlakkere doorlaat dan een kleine verliesweerstand die een scherpere grafiek geeft (rode grafiek).*

De frequentie is weergegeven als de werkelijke frequentie gedeeld door de resonantiefrequentie. De grafiek geeft daardoor ook een beeld voor andere resonantiefrequenties.



*Figuur 5.5-6. Impedantie van een parallelkring op basis van reactanties ( $L$  en  $C$ ) en verliesweerstand, afhankelijk van de frequentie. Een hoge verliesweerstand in de kring (rode grafiek) geeft kleinere verliezen en een steilere doorlaat dan een kleine verliesweerstand die een vlakke grafiek geeft (groene grafiek).*

De frequentie is ook hier weergegeven als de werkelijke frequentie gedeeld door de resonantiefrequentie. De grafiek geeft daardoor ook hier een beeld voor andere resonantiefrequenties.

### 5.5.6 Samengevat

#### Reactantie

De weerstand van een condensator is in theorie oneindig bij een gelijkspanning. Voor een spoel is die in theorie nul. De schijnbare weerstand bij een wisselspanning van beide heet *reactantie*, meestal aangeduid met het symbool  $X$ . Voor een condensator wordt die meestal geschreven als  $X_C$  en voor een spoel als  $X_L$ .

Een reactantie (schijnbare weerstand) is afhankelijk van de frequentie. Bij een condensator neemt de reactantie af met toenemende frequentie, bij een spoel neemt de reactantie juist toe naarmate de frequentie hoger is. De vergelijking voor de reactantie van een condensator is vergelijking (5.4-1) die hieronder nog een keer is weergegeven.



$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (5.4-1)$$

Die voor een spoel is vergelijking (5.4-2) die hier ook nog eens is weergegeven.

$$X_L = 2\pi fL \quad (5.4-2)$$

Een gemeenschappelijke eigenschap van reactanties is dat stroom en spanning niet gelijk op lopen. We kennen het ezelsbruggetjes LUI (bij een spoel komt  $U$  vóór  $I$ ; bij een condensator is het andersom), maar het verband is ook te begrijpen als we bedenken dat

- In een condensator stroom een spanning opbouwt. Stroom loopt dus vóór op spanning.
- In een spoel spanning een stroom opbouwt. Spanning loopt dus vóór op stroom.

In een weerstand lopen stroom en spanning gelijk op.

### Resonantie in een seriekring

Bij een serieschakeling van spoel en condensator is de stroom dezelfde en zijn de spanningen over spoel en condensator tegengesteld. In tegenfase heet dat.

Als beide spanningen even groot zijn, heffen ze elkaar precies op. De schakeling is dan in *resonantie*.

### Resonantie in een parallelkring

Bij een parallelschakeling is de spanning dezelfde en zijn de stromen tegengesteld, ofwel in tegenfase.

Zijn de stromen gelijk van grootte, dan heffen ze elkaar precies op. Er loopt er wel stroom in de kring, maar niets erin of eruit. De parallelkring is dan *in resonantie*.

### Impedantie

Een impedantie  $Z$  is de schijnbare weerstand van een weerstand en een reactantie. Zijn ze in serie geschakeld, dan geldt

$$Z = \sqrt{X^2 + R^2} \quad (5.5-4)$$

Is de reactantie  $X$  capacitief, dan is  $X=X_C$ , is deze inductief, dan is  $X=X_L$ .

Zijn weerstand en reactantie parallel geschakeld, dan geldt

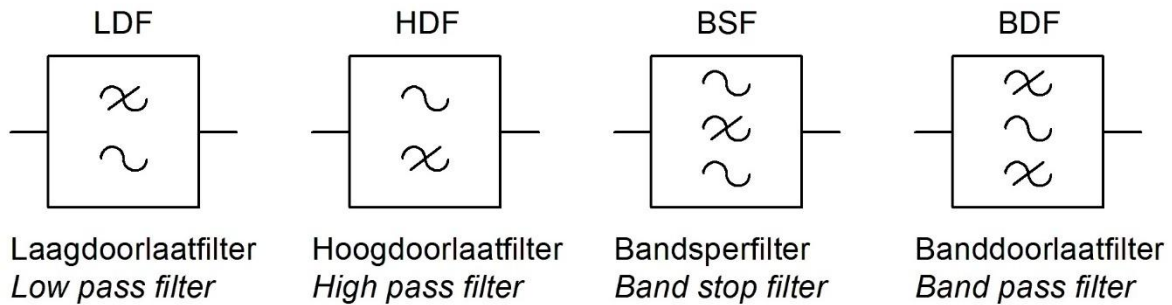
$$\frac{1}{Z} = \sqrt{\frac{1}{X^2} + \frac{1}{R^2}} \quad (5.5-5)$$

Is de reactantie  $X$  capacitief, dan is  $X=X_C$ , is deze inductief, dan is  $X=X_L$ .

## 5.6 Schemasymbolen voor verschillende soorten filters.

Foto 5.5-2 geeft de schemasymbolen voor de filters die we in dit hoofdstuk hebben behandeld.

### Standardsymbolen



### Alternatieve symbolen



Figuur 5.6-1. Schemasymbolen en gebruikelijke afkortingen voor verschillende soorten frequentiefilters in twee variaties. De bijbehorende namen staan in het midden, Cursief: de Engelse termen.

## 5.7 Niet-sinusvormige signalen

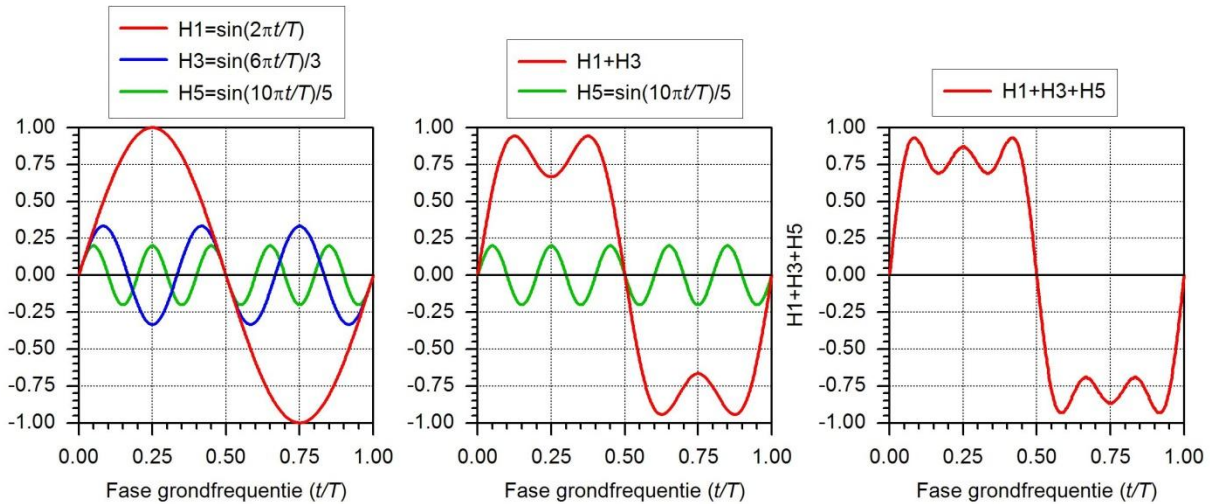
### 5.7.1 Ontbinding in sinusvormige signalen

We hebben kennis gemaakt met één niet-sinusvormige golfvorm: de blokgolf. Een niet-sinusvormige golf blijkt te bestaan uit een –meestal oneindig- aantal wèl sinusvormige golven. De frequenties van die sinusvormige golven zijn steeds een geheel veelvoud van de frequentie van de oorspronkelijke golf, die we ook wel de *grondgolf* noemen. Die veelvouden worden vaak aangeduid met de term *harmonischen*. Harmonischen van een golf met frequentie  $f$  zijn dus sinusgolven met frequentie  $2f$ ,  $3f$ , enzovoort. De amplitudes daarvan zijn vrijwel altijd kleiner dan die van de grondgolf.

Je kunt ook zeggen dat een golf met één frequentie per definitie een zuivere sinusvorm heeft. Alle afwijkingen van de sinusvorm zijn bijmengingen van harmonischen. Een blokgolf met periode  $T$  en amplitude  $A$  bestaat bijvoorbeeld uit alle oneven harmonischen van de grondgolf volgens de vergelijking

$$\text{Blokgolf} = A \sin(2\pi ft) + \frac{A \sin(3.2\pi ft)}{3} + \frac{A \sin(5.2\pi ft)}{5} + \frac{A \sin(7.2\pi ft)}{7} + \dots \quad (5.7-1)$$

Daarin is  $A$  de amplitude van de grondgolf. Hoe dat in zijn werk gaat, laat Figuur 5.7-1 zien.



Figuur 5.7-1. Optelling van drie oneven harmonischen (grondfrequentie en harmonischen 3 en 5) waarbij de blokgolf min of meer zichtbaar wordt.

Wie het proces verder wil volgen, kan kijken naar [dit filmpje](#), dat doorgaat tot en met de 25<sup>e</sup> harmonische.

We zagen tot nu toe *oneven* harmonischen. Dat zijn frequenties met een oneven (1, 3, 5, enz.) veelvoud van de grondfrequenties (nummer 1 is de grondfrequentie zelf). Er zijn ook golfvormen met even en oneven harmonischen en met alleen even harmonischen.

### 5.7.2 Laagdoorlaatfilters en harmonischen

Een zender moet zo min mogelijk harmonische uitzenden. Een zender die veel harmonischen uitzendt, heeft een vervormd signaal. Daardoor kan de ontvangst van andere zenders worden gestoord. Er zijn daarom voorschriften voor de maximale hoeveelheid harmonischen die een uitgezonden signaal mag bevatten.

Omdat in elke hoogfrequent versterker vervorming optreedt, ontstaan er ook altijd harmonischen. Die moeten zoveel mogelijk worden onderdrukt. Een laagdoorlaatfilter is daarbij een onmisbaar hulpmiddel. Als het goed is ontworpen, wordt de grondgolf netjes doorgelaten en worden harmonischen voldoende verzwakt.

Een laagdoorlaatfilter in een zendereindtrap bevat praktisch nooit weerstanden, wel spoelen en condensatoren. Over de reden hebben we het al gehad. Weerstand zet kostbare zenderenergie om in warmte, wat niet de bedoeling is. Spoelen en condensatoren van goede kwaliteit doen dat (bijna) niet, zoals eerder gezegd. Op laagdoorlaatfilters voor zendereindtrappen komen we bij de zenders terug.



## 5.8 Opgaven


De drie soorten pijlen bij de opgaven hebben dezelfde betekenis als in de vorige hoofdstukken (2, 3 en 4).

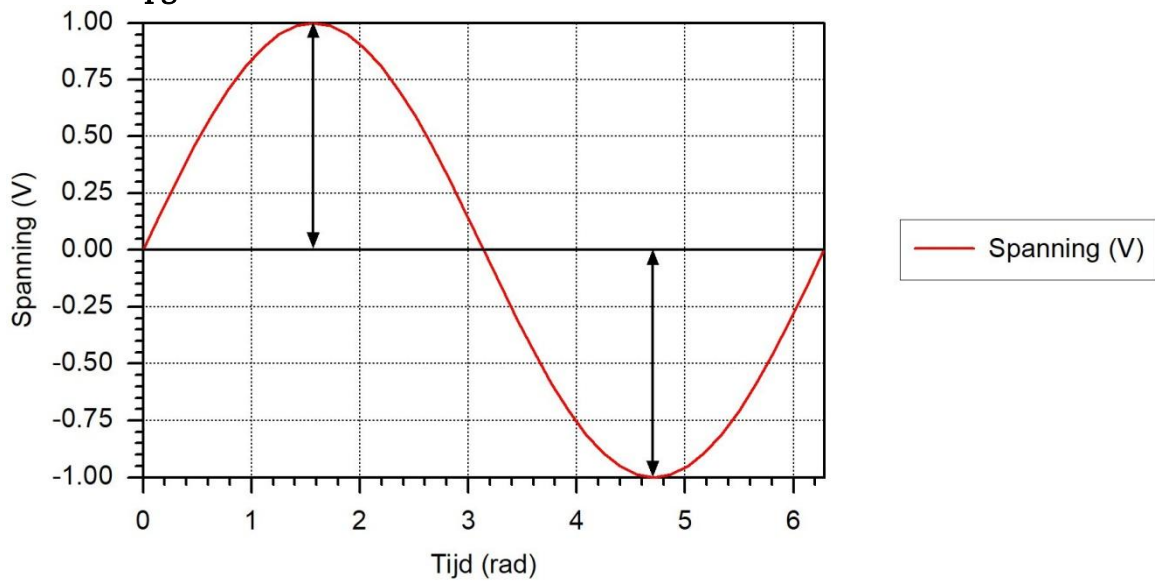
### 5.8.1 Opgave 5-1

Een sinusvormige wisselspanning heeft een amplitude van 10 volt.

De effectieve waarde is ongeveer


- A. 5 V
- B. 7 V
- C. 1,4 V
- D. 0,7 V

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking 

**5.8.2 Opgave 5-2**

De tweepuntige pijlen in de afbeelding geven elk aan

- A. De amplitude
- B. De effectieve waarde
- C. De gemiddelde waarde
- D. De halve amplitude


Antwoord gevonden? Naar de uitwerking 



### 5.8.3 Opgave 5-3

Een sinusvormige spanning met  $U_{max} = 10 \text{ V}$  wordt aangesloten op een weerstand van  $10 \text{ } \Omega$ . De effectieve stroom door de weerstand is ongeveer

- A. 1 A
- B. 0,7 A
- C. 1,4 A
- D. 10 A

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking 



#### 5.8.4 Opgave 5-4

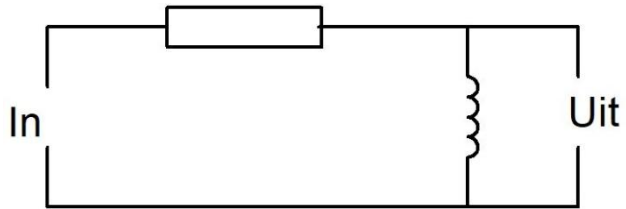
Een sinusvormige spanning met  $U_{max} = 10 \text{ V}$  wordt aangesloten op een weerstand van  $10 \text{ }\Omega$ . Het opgenomen vermogen is

- A. 5 W
- B. 7,07 W
- C. 10 W
- D. 100 W

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking

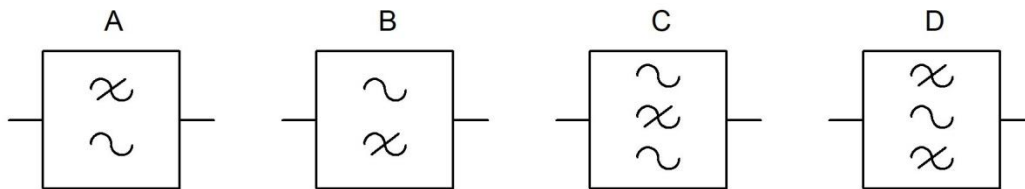



## 5.8.5 Opgave 5-5



Welk schemasymbool hoort bij deze schakeling?

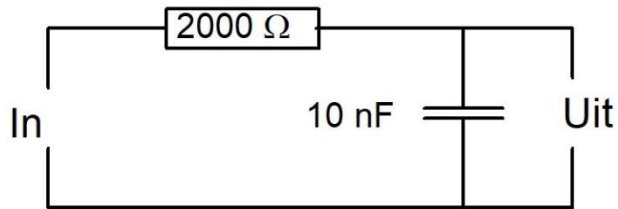
- A. Symbool A
- B. Symbool B
- C. Symbool C
- D. Symbool D



Antwoord gevonden? Naar de uitwerking 

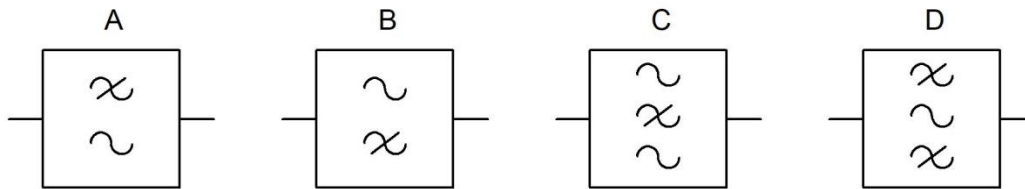


## 5.8.6 Opgave 5-6



Welk schemasymbool hoort bij deze schakeling?

- A. Symbool A
- B. Symbool B
- C. Symbool C
- D. Symbool D



Antwoord gevonden? Naar de uitwerking






### 5.8.7 Opgave 5-7

De frequentie van een wisselspanning bedraagt 100 Hz. Het aantal perioden gedurende 1 minuut bedraagt

- A. 600
- B. 100
- C. 60
- D. 6000


Antwoord gevonden? Naar de uitwerking 



### 5.8.8 Opgave 5-8

De periodeduur van een wisselspanning van 100 Hz bedraagt

- A. 100 ms
- B. 0,1 s
- C. 10 ms
- D. 6000 s

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking 

### 5.8.9 Opgave 5-9

Een spoel met een coëfficiënt van zelfinductie van 382 mH is aangesloten op een sinusvormige wisselspanning van 260 V en een frequentie van 50 Hz. De spoel neemt daarbij een stroom op van 2 A. De spoel heeft een onbekende verliesweerstand.

De impedantie bedraagt ongeveer

- A. 720  $\Omega$
- B. 120  $\Omega$
- C. 1910  $\Omega$
- D. 130  $\Omega$


Antwoord gevonden? Naar de uitwerking



**5.8.10 Opgave 5-10**

Een spoel met een coëfficiënt van zelfinductie van 382 mH is aangesloten op een sinusvormige wisselspanning van 260 V en een frequentie van 50 Hz. De spoel neemt daarbij een stroom op van 2 A. De reactantie van de spoel is ongeveer

- A. 8,3 m $\Omega$
- B. 720  $\Omega$
- C. 120  $\Omega$
- D. 1910  $\Omega$


Antwoord gevonden? Naar de uitwerking 

### 5.8.11 Opgave 5-11

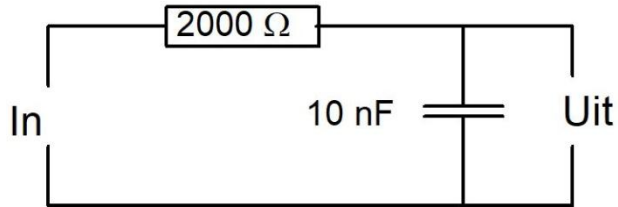
Een spoel met een coëfficiënt van zelfinductie van 1,27 H staat in serie met een weerstand van 300 ohm. De schakeling is aangesloten op een sinusvormige wisselspanning met een frequentie van 50 Hz.

De impedantie van de schakeling bedraagt ongeveer

- A. 500  $\Omega$
- B. 400  $\Omega$
- C. 700  $\Omega$
- D. 300  $\Omega$

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking 

## 5.8.12 Opgave 5-12



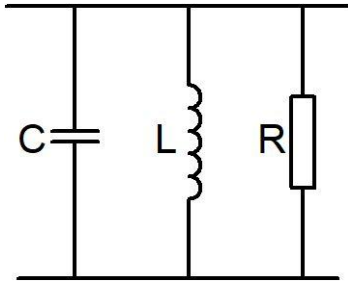
Bij welke frequentie zijn weerstand en reactantie even groot?

- A. Ongeveer 5000 Hz
- B. Ongeveer 8000 Hz
- C. Ongeveer 10000 Hz
- D. Ongeveer 50000 Hz

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking




### 5.8.13 Opgave 5-13



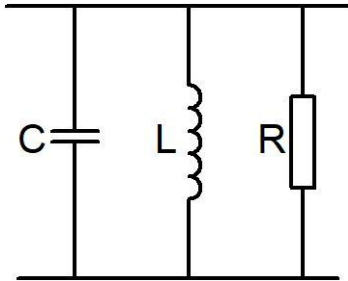
In de parallelkring wordt C vervangen door een 2x zo kleine capaciteit. Daardoor wordt de resonantiefrequentie ongeveer

- A. 2x zo groot
- B. 2x zo klein
- C. 1,4 x zo groot
- D. 1,4 x zo klein

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking 



### 5.8.14 Opgave 5-14



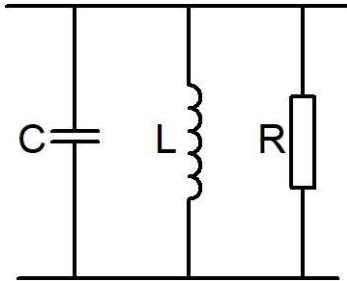
In de parallelkring wordt R vervangen door een 2x zo grote weerstand. Daardoor wordt de frequentie ongeveer

- A. 2x zo groot
- B. 2x zo klein
- C. 1,4 x zo groot
- D. Blijft gelijk

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking




## 5.8.15 Opgave 5-15

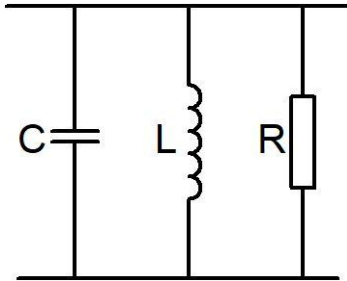


In de parallelkring wordt L vervangen door een spoel met 2x zo hoge zelfinductie. Daardoor wordt de resonantiefrequentie ongeveer

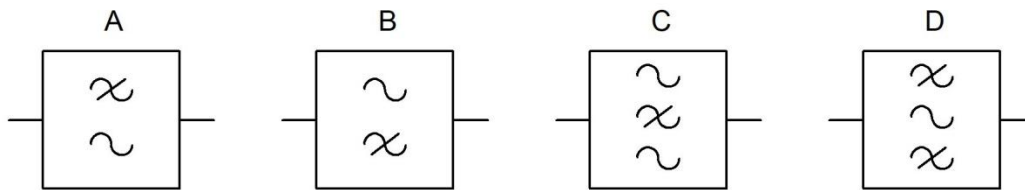
- A. 2x zo groot
- B. 2x zo klein
- C. 1,4 x zo groot
- D. 1,4 x zo klein


Antwoord gevonden? Naar de uitwerking 

## 5.8.16 Opgave 5-16

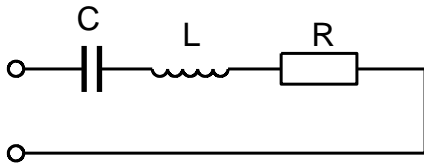


Bij dit filter hoort het schemasymbool:




Antwoord gevonden? Naar de uitwerking 

## 5.8.17 Opgave 5-17



De reactanties van de ideale condensator C en de ideale spoel L zijn beide 500 ohm. De weerstand van R bedraagt 100 ohm. De impedantie tussen de aansluitklemmen bedraagt:

- A. 100  $\Omega$
- B. 600  $\Omega$
- C. 1000  $\Omega$
- D. 1100  $\Omega$


Antwoord gevonden? Naar de uitwerking 



### 5.8.18 Opgave 5-18

Een seriekring met  $L=20$  mH en  $C=1$  nF is in resonantie. De verliesweerstand bedraagt ongeveer  $50\ \Omega$ . De impedantie van de kring bedraagt ongeveer

- A.  $71\ \Omega$
- B.  $29\ \Omega$
- C.  $50\ \Omega$
- D.  $55\ \Omega$

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking 

## 5.9 Uitwerkingen bij de opgaven

### 5.9.1 Uitwerking van Opgave 5-1

Een sinusvormige wisselspanning heeft een amplitude van 10 volt.

De effectieve waarde is ongeveer

- A. 5 V
- B. 7 V
- C. 1,4 V
- D. 0,7 V

#### **Uitwerking**

De effectieve waarde van een sinusvormige wisselspanning is de amplitude gedeeld door  $\sqrt{2}$ . Dat is hetzelfde als vermenigvuldigen met  $1/\sqrt{2} \approx 0,7$ .

$$0,7 * 10 \text{ V} = 7 \text{ V} .$$

Dat komt neer op antwoord B.

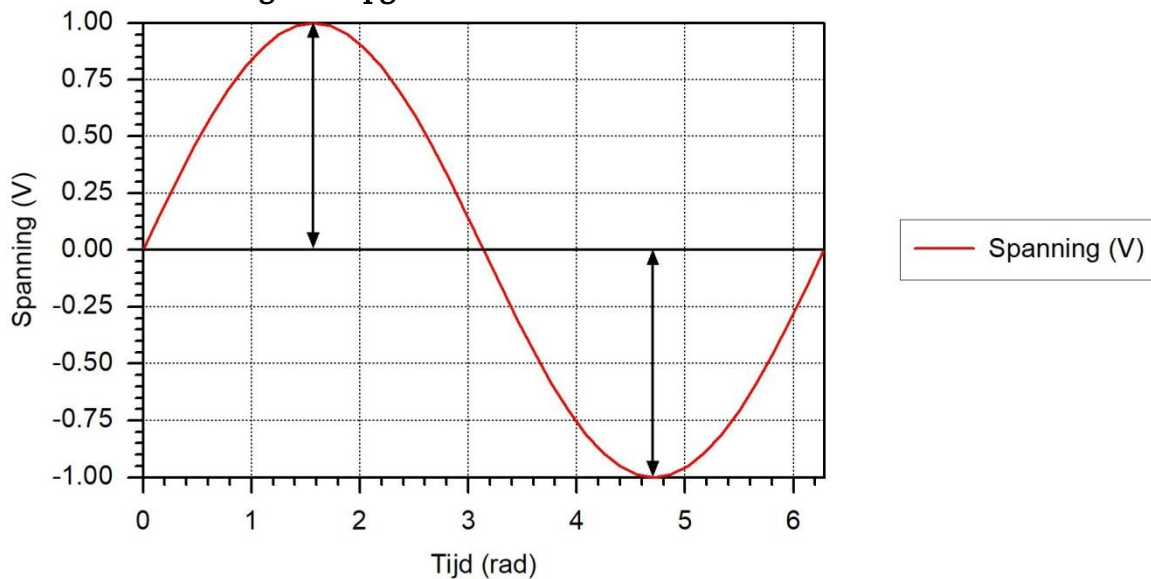


Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave



### 5.9.2 Uitwerking van Opgave 5-2



De tweepuntige pijlen in de afbeelding geven elk aan

- A. De amplitude
- B. De effectieve waarde
- C. De gemiddelde waarde
- D. De halve amplitude

#### Uitwerking

De zwarte tweepuntige pijlen geven de amplitude aan. De effectieve waarde is amplitude gedeeld door  $\sqrt{2}$ , de gemiddelde waarde is 0 en de halve amplitude is een halve pijllengte. Die laatste heeft geen praktische betekenis.

Antwoord A.



Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave



### 5.9.3 Uitwerking van Opgave 5-3

Een sinusvormige spanning met  $U_{max} = 10 \text{ V}$  wordt aangesloten op een weerstand van  $10 \text{ } \Omega$ . De effectieve stroom door de weerstand is ongeveer

- A. 1 A
- B. 0,7 A**
- C. 1,4 A
- D. 10 A

#### Uitwerking

Als bij een sinusvormige spanning  $U_{max} 10 \text{ V}$  is, is  $U_{eff} = 10 \text{ V} / \sqrt{2} \approx 7,07 \text{ V}$ . Die spanning over een weestand van  $10 \text{ } \Omega$  leidt tot een stroom van  $0,707 \text{ A}$  is ongeveer  $0,7 \text{ A}$ . Antwoord B.



Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave





### 5.9.4 Uitwerking van Opgave 5-4

Een sinusvormige spanning met  $U_{max} = 10 \text{ V}$  wordt aangesloten op een weerstand van  $10 \text{ }\Omega$ . Het opgenomen vermogen is

- A. 5 W
- B. 7,07 W
- C. 10 W
- D. 100 W

#### Uitwerking

Als  $U_{max} = 10 \text{ V}$  is, dan is  $U_{eff} = 10 \text{ V} / \sqrt{2}$ . (In dit geval niet verder uitwerken, daarvan wordt het alleen maar moeilijker). Vermogen  $P$  volgt uit de effectieve spanning en de weerstand volgens

$$P = \frac{U_{eff}^2}{R} \text{ W} = \left(\frac{10}{\sqrt{2}}\right)^2 * \frac{1}{10} \text{ W} = \frac{100}{20} \text{ W} = 5 \text{ W}$$

Antwoord A.

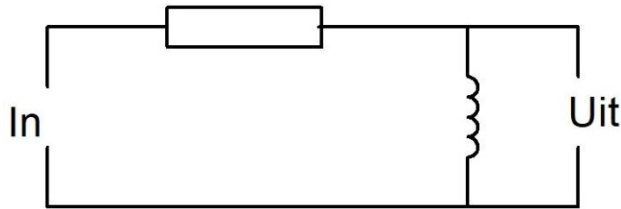


Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave

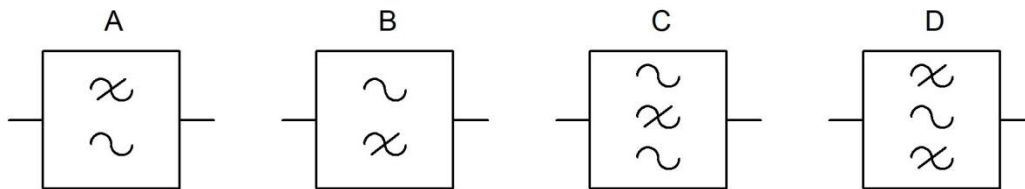


### 5.9.5 Uitwerking van Opgave 5-5



Welk schemasymbool hoort bij deze schakeling?

- A. Symbool A
- B. Symbool B**
- C. Symbool C
- D. Symbool D



#### Uitwerking

Naarmate de frequentie hoger is, wordt de reactantie van de spoel hoger en worden de verliezen langs dit zijpad kleiner, De schakeling is daarom een hoogdoorlaatfilter, symbool B en antwoord B.

#### Opmerking

Een andere benadering is deze. De schakeling is door de zelfinductie een verzwakker voor lage frequenties. Dat is hetzelfde als een hoogdoorlaatfilter, dus inderdaad: antwoord B.

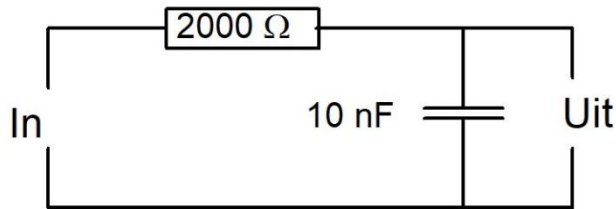


Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave

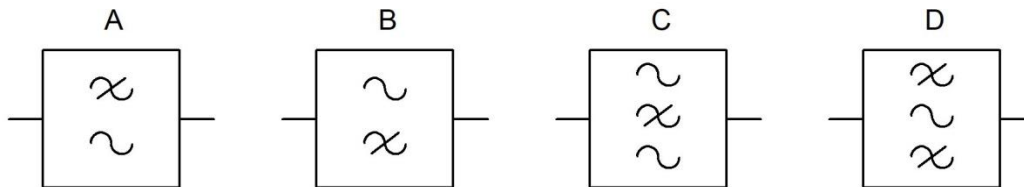


### 5.9.6 Uitwerking van Opgave 5-6



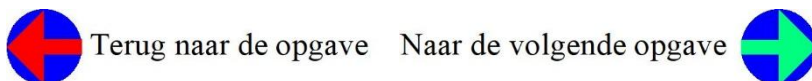
Welk schemasymbool hoort bij deze schakeling?

- A. Symbool A
- B. Symbool B
- C. Symbool C
- D. Symbool D



#### Uitwerking

De waarden van de componenten doen voor de beantwoording niet ter zake, wel dat het om een weerstand en een condensator gaat. Naarmate de frequentie hoger wordt, wordt de reactantie van de condensator kleiner en lekt steeds meer signaal via de condensator weg. Daarom gaat het hier om een laagdoorlaatfilter: symbool A en antwoord A.



Terug naar de opgave    Naar de volgende opgave



### 5.9.7 Uitwerking van Opgave 5-7

De frequentie van een wisselspanning bedraagt 100 Hz. Het aantal perioden gedurende 1 minuut bedraagt

- A. 600
- B. 100
- C. 60
- D. **6000**

#### Uitwerking

100 Hz betekent 100 perioden per seconde. In één minuut gaan 60 seconden. Dat wordt dus  $60 \cdot 100$  perioden = 6000 perioden in 1 minuut: antwoord D.



Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave





### 5.9.8 Uitwerking van Opgave 5-8

De periodeduur van een wisselspanning van 100 Hz bedraagt

- A. 100 ms
- B. 0,1 s
- C. 10 ms**
- D. 6000 s

#### Uitwerking

100 Hz betekent 100 perioden per seconde. Per periode betekent dat een duur van  $\frac{1}{100}$  seconde, dat is hetzelfde als 0,01 s en dat is 10 ms. Antwoord C.



Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave



### 5.9.9 Uitwerking van Opgave 5-9

Een spoel met een coëfficiënt van zelfinductie van 382 mH is aangesloten op een sinusvormige wisselspanning van 260 V en een frequentie van 50 Hz. De spoel neemt daarbij een stroom op van 2 A. De spoel heeft een onbekende verliesweerstand.

De impedantie bedraagt ongeveer

- A. 720  $\Omega$
- B. 120  $\Omega$
- C. 1910  $\Omega$
- D. 130  $\Omega$

#### Uitwerking

We berekenen de impedantie  $Z$  uit stroom  $I = 2$  A en spanning  $U = 260$  V volgens

$$Z = \frac{U}{I} = \frac{260 \text{ V}}{2 \text{ A}} = 130 \Omega$$

De waarde van de zelfinductie voegt hier niets toe. Op het zendexamen komen zulke dingen meer voor, dus wen er maar aan. Het is een test om te zien of je stevig genoeg in je schoenen staat. Het goede antwoord is D.



Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave



### 5.9.10 Uitwerking van Opgave 5-10

Een spoel met een coëfficiënt van zelfinductie van 382 mH is aangesloten op een sinusvormige wisselspanning van 260 V en een frequentie van 50 Hz. De spoel neemt daarbij een stroom op van 2 A. De reactantie van de spoel is ongeveer

- A. 8,3 mΩ
- B. 720 Ω
- C. **120 Ω**
- D. 1910 Ω

Dit is Opgave 5-9, maar met een andere vraagstelling. Het gaat nu niet om de impedantie  $Z$  maar om de reactantie van de spoel. Nu is de spanning overbodig. De reactantie  $X_L$  volgt uit zelfinductie  $L$  en frequentie  $f$  volgens

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi \cdot 50 \cdot 0,382 \Omega \approx 120 \Omega$$

Antwoord C is het juiste antwoord.



Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave



### 5.9.11 Uitwerking van Opgave 5-11

Een spoel met een coëfficiënt van zelfinductie van 1,27 H staat in serie met een weerstand van 300 ohm. De schakeling is aangesloten op een sinusvormige wisselspanning met een frequentie van 50 Hz.

De impedantie van de schakeling bedraagt ongeveer

- A. 500  $\Omega$
- B. 400  $\Omega$
- C. 700  $\Omega$
- D. 300  $\Omega$

#### Uitwerking

Laten we beginnen met het berekenen van de reactantie van de spoel. Die bedraagt  $2\pi fL$ . Dat wordt  $22\pi * 50 * 1,27 \Omega \approx 399 \Omega$ , af te ronden op 400 ohm. Die moet in serie staan met 300 ohm.

Omdat het hier om een serieschakeling gaat van een reactantie en een weerstand, moet de uitkomst een impedantie zijn. Die bereken je niet als een simpele optelling, maar zo:

$$Z = \sqrt{300^2 + 400^2} \Omega = 500 \Omega$$

Antwoord A.

#### Opmerkingen

Het rijtje 3, 4, 5 kun je vaker tegenkomen als er kwadraten moeten worden opgeteld. Het zijn de enige drie getallen op rij waarvan de kwadraten van de eerste twee na optelling het kwadraat van het volgende getal opleveren. Bij het N-examen is dit drietal niet heel algemeen, maar bij het F-examen komt het vrij vaak voor.

Met een gelijk aantal nullen erachter, leveren ze eenzelfde resultaat. Iets om te onthouden.

De instinker bij deze vraag is natuurlijk antwoord C:  $400 + 300$ .



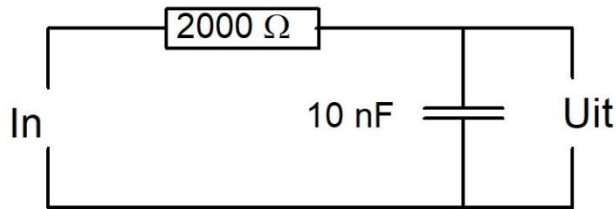
Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave





### 5.9.12 Uitwerking van Opgave 5-12



Bij welke frequentie zijn weerstand en reactantie ongeveer even groot?

- A. Ongeveer 5000 Hz
- B. Ongeveer 8000 Hz
- C. Ongeveer 10000 Hz
- D. Ongeveer 50000 Hz

#### Uitwerking

Anders geformuleerd is de vraag: bij elke frequentie is de reactantie van de condensator 2000 ohm?

Voor de reactantie geldt (vergeet niet, de capaciteit om te rekenen in farad):

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad \text{dus} \quad 2000 \, \Omega = \frac{1}{2\pi f \cdot 10^{-8} \text{F}}$$

Alles vermenigvuldigen met  $f$  en delen door 2000 ohm geeft:

$$f = \frac{1}{2\pi \cdot 2000 \cdot 10^{-8}} \text{Hz} = \frac{10^8}{4000\pi} \text{Hz} = \frac{25000}{\pi} \text{Hz} \approx 7958 \text{Hz}$$

De dichtstbijzijnde waarde in het rijtje antwoorden is B: 8000 Hz. In de vraag staat niet voor niets 'ongeveer'.

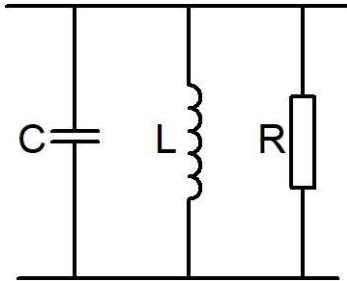


Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave



### 5.9.13 Uitwerking van Opgave 5-13



In de parallelkring wordt C vervangen door een 2x zo kleine capaciteit. Daardoor wordt de resonantiefrequentie ongeveer

- A. 2x zo groot
- B. 2x zo klein
- C. 1,4 x zo groot**
- D. 1,4 x zo klein

#### Uitwerking

We zien een parallelkring van L en C met een parallelweerstand R. De vergelijking voor de resonantiefrequentie  $f$  (vergelijking van Thomson) luidt

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

De resonantiefrequentie is dus omgekeerd evenredig met (onder meer)  $\sqrt{C}$ . Wordt  $C$  2x zo klein, dan wordt de frequentie  $f$  niet 2 keer, maar  $\sqrt{2}$  keer zo groot.  $\sqrt{2}$  is bij benadering gelijk aan 1,4. Dan is antwoord C goed.

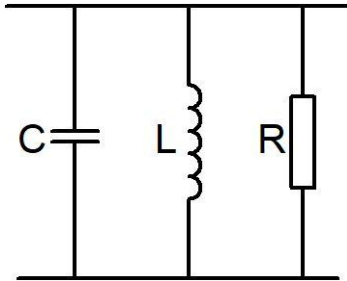


Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave



### 5.9.14 Uitwerking van Opgave 5-14



In de parallelkring wordt R vervangen door een 2x zo grote weerstand. Daardoor wordt de frequentie ongeveer

- A. 2x zo groot
- B. 2x zo klein
- C. 1,4 x zo groot
- D. **Blijft gelijk**

#### Uitwerking

Een weerstand is niet van invloed op de resonantiefrequentie (wel op de doorlaatkarakteristiek, maar die wordt niet gevraagd). Antwoord D is dus juist.

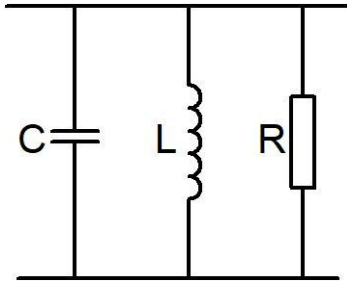


Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave



### 5.9.15 Uitwerking van Opgave 5-15



In de parallelkring wordt L vervangen door een spoel met 2x zo hoge zelfinductie. Daardoor wordt de resonantiefrequentie ongeveer

- A. 2x zo groot
- B. 2x zo klein
- C. 1,4 x zo groot
- D. 1,4 x zo klein

#### Uitwerking

Hier geldt vrijwel hetzelfde verhaal als bij de condensator in de uitwerking van Opgave 5-13. Spoel en condensator staan niet voor niets op dezelfde positie in de vergelijking van Thomson die we hier voor het gemak herhalen:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Uit de vergelijking blijkt dat als  $L$  2x zo groot wordt, de frequentie  $\sqrt{2} \approx 1,4$  maal zo klein wordt, want  $L$  staat in de noemer en onder een wortelteken. Dat betekent antwoord D.

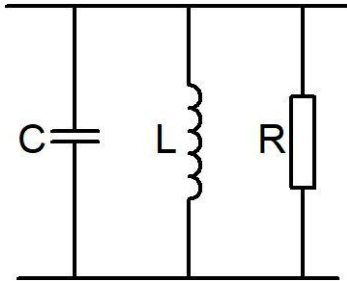


Terug naar de opgave

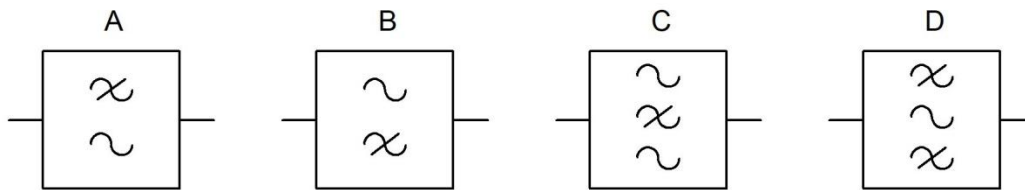
Naar de volgende opgave



### 5.9.16 Uitwerking van Opgave 5-16



Bij dit filter hoort het schemasymbool:



#### Uitwerking

Dit is een banddoorlaatfilter (parallelresonantiekring) Daar hoort symbool D bij.

#### Opmerking

A is een laagdoorlaatfilter, B een hoogdoorlaatfilter, C een bandsperfilter (seriekring) en D dus een banddoorlaatfilter.

Veelgebruikte alternatieven voor de symbolen A-D zijn (in dezelfde volgorde):



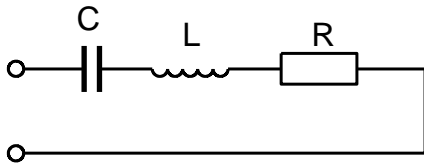
Ook die komen in examens voor.



Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave



**5.9.17 Uitwerking van Opgave 5-17**

De reactanties van de ideale condensator C en de ideale spoel L zijn beide 500 ohm. De weerstand van R bedraagt 100 ohm. De impedantie tussen de aansluitklemmen bedraagt:

- A. 100  $\Omega$
- B. 600  $\Omega$
- C. 1000  $\Omega$
- D. 1100  $\Omega$

**Uitwerking**

Omdat de reactanties van R en C gelijk zijn, is de seriekring van L en C in resonantie en vertegenwoordigt die een reactantie van 0 ohm.

Dan blijft in de serieschakeling alleen de weerstand van R over: 100 ohm. Antwoord A.



Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave



### 5.9.18 Uitwerking van Opgave 5-18

Een seriekring met  $L=20$  mH en  $C=1$  nF is in resonantie. De verliesweerstand bedraagt ongeveer  $50\ \Omega$ . De impedantie van de kring bedraagt ongeveer

- A.  $71\ \Omega$
- B.  $29\ \Omega$
- C.  **$50\ \Omega$**
- D.  $55\ \Omega$

#### Uitwerking

Deze opgave kan verleiden tot een heleboel rekenwerk. Maar met wat inzicht ben je zo bij het antwoord. Een ideale seriekring heeft bij resonantie 0 reactantie, want de reactanties van spoel en condensator heffen elkaar op. Als je dat weet, blijft er praktisch niets te rekenen over. Dan houd je alleen de verliesweerstand over en die is gegeven:  $50\ \Omega$ , antwoord C



Terug naar de opgave