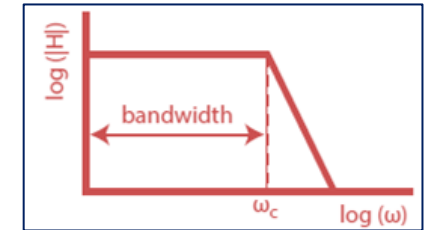
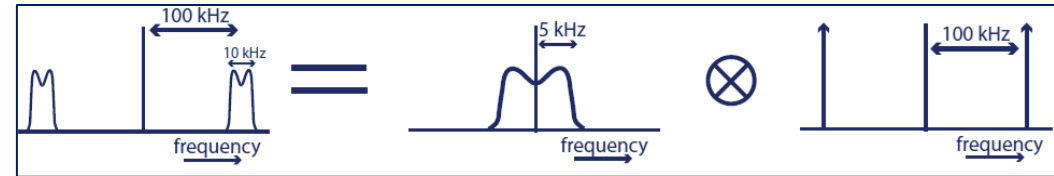
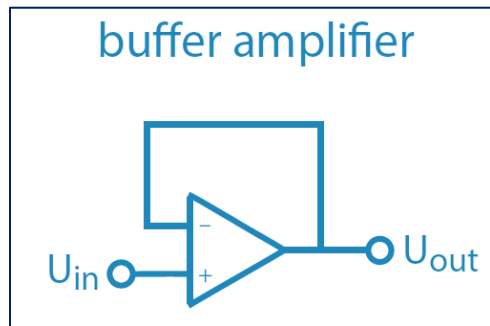
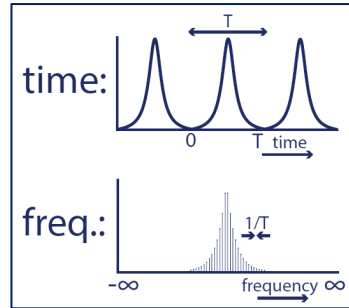
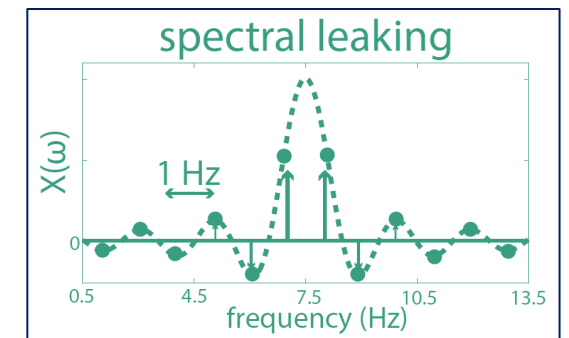
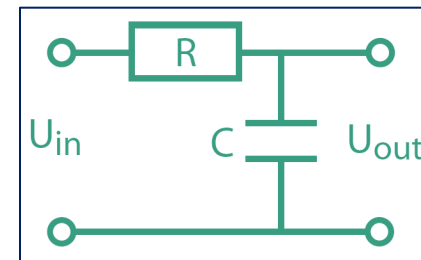


# Physics Experiments 2 - 2026



**stability criterium**  
*a LTI-system is stable when the real parts of the transfer function's poles are all smaller than zero*



# PE2 gezichten



**Bas Hensen**  
Colleges + tentamen



**Paul Logman**  
Practica



**Loek van Everdingen & Richard Wagner**  
Lead TA's



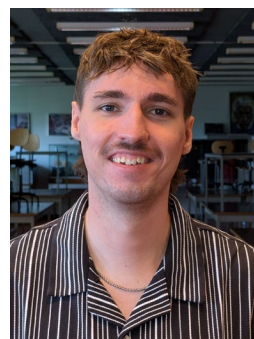
**En nog meer TA's:**



**Lucia Ruiz Olalla**



**Alexey Sverdlov**



**Sam Lamboo**



**Ben Schellevis**

Ook docent-ambitie?  
Meld je aan als  
docentassistent!

Voor vragen mail  
**[PE2@physics.leidenuniv.nl](mailto:PE2@physics.leidenuniv.nl)**

# Opbouw van het vak



## Colleges

- Overzicht stof
- logica achter de methoden
- voorbeelden uit het onderzoek en toepassingen

## Werkcolleges

- Direct over collegestof
- benaderd niveau tentamen
- samen met docentassistenten en elkaar

## Practica

- Theorie in de praktijk, maar ook praktijk naast theorie!
- Apparaten leren gebruiken, labjournaal goed leren bijhouden, aansluiting met typisch labwerk bacheloronderzoek.
- Meer programmeer ervaring opdoen

**Aanmelden bij Paul Logman,  
groep A of groep B, met eventueel je  
lab-partner**

# Opbouw van het vak: becijfering



## Colleges

## Werkcolleges

## Practica

Theorie: tentamen 60% cijfer

- Elke werkcollege sessie zijn er een of twee opgaven die kunnen worden ingeleverd (inleveren einde van het werkcollege of begin van de volgende werkcollege): 0.05 bonuspunt op eindcijfer per ingeleverd werkcollege
- Aanwezigheid bij het computer-werkcollege: 0.1 bonuspunt op eindcijfer

Practicumcijfer: 40% cijfer

# Toetsing van het vak



- **Brightspace informatie over becijfering kan worden geupdate**
  
- **Cijfer:**
  - Er is een practicumcijfer (labjournaal gestructureerd bijhouden!)
  - Er is een tentamencijfer
  - Voor beide onderdelen (P en T) moet een 5.5 gehaald worden
  - Eindcijfer wordt bepaald door
    - **60% tentamencijfer** (wordt eerst afgerond op tienden voordat het wordt gemiddeld)
    - **40% practicumcijfer** (wordt eerst afgerond op tienden voordat het wordt gemiddeld)
    - + 0.05 per ingeleverd werkcollege
    - + 0.1 voor aanwezigheid bij computerpracticum
  
- **Aanvullende eisen:**
  - Aanwezigheid bij de practicummiddagen verplicht

Practicum is 40%  
van je cijfer

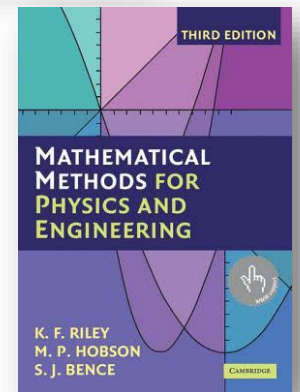
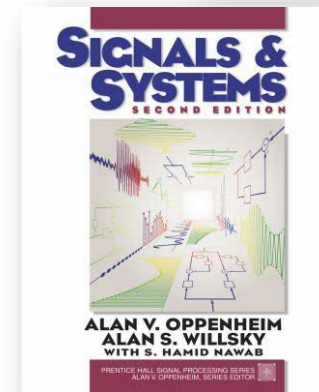
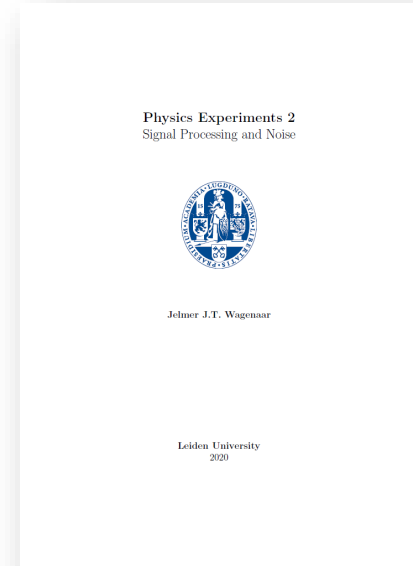
# Tijdsinvestering PE2 → best ruim gerekend!

Onderdeel	Aantal sessies	Aantal uur per sessie	Totaal aantal uur	EC	standaarduren
Vorbereiding colleges	10	1	10		
Colleges	10	2	20		
Vorbereiding werkcolleges	10	1	10		
Werkcolleges	10	2	20		
Vorbereiding practica	4	<b>8</b>	32		
Practica	4	4	16		
Vorbereiding tentamen	1	17	17		
Tentamen	1	3	3		
<b>Totaal practicumdeel</b>	<b>40%</b>		<b>48</b>	<b>2</b>	<b>56</b>
<b>Totaal tentamendeel</b>	<b>60%</b>		<b>80</b>	<b>3</b>	<b>84</b>
<b>Totaal</b>			<b>128</b>	<b>5</b>	<b>140</b>

Gebruik weken zonder practicum sessie om voor te bereiden voor volgende practicum!

# Reader en boeken

- Belangrijkste te tentamineren stof in PE2 reader\*
- Waarom deze reader:
  - Elk onderwerp heeft zijn eigen boek
    - Ieder boek een eigen factor  $2\pi$
    - Wiskundeboeken en Natuurkundeboeken niet op 1 lijn
    - Soms te veel wiskunde, soms te weinig wiskunde
  - Naslagwerk bacheloronderzoek, master en PhD
  - Reader is **géén** compleet didactisch leerboek
- Voor meer achtergrond/afleidingen (maar pas op andere conventies voor  $2\pi$ ):
  - Oppenheim, Willsky **Signals and Systems** 2nd edn.
  - Riley, Hobson, Bence: **Mathematical Methods for Physics and Engineering**, 3<sup>rd</sup> edition



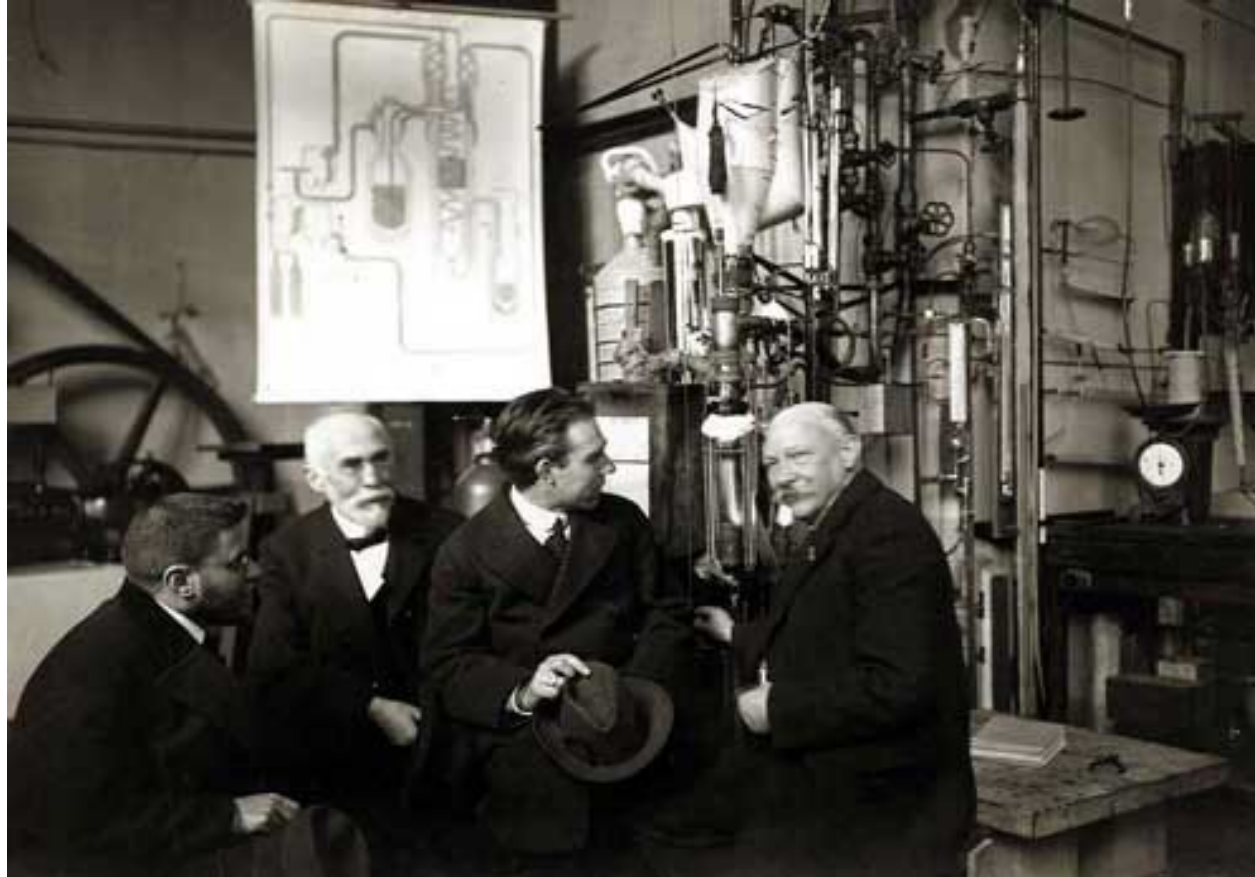
\* Aangevuld met stof in colleges en werkcolleges

- De hoorcolleges van vorig jaar, en waar mogelijk van dit jaar worden opgenomen en komen online.
  - Kwaliteit/zichtbaarheid wordt niet gegarandeerd!
- Het is voor mij en voor jezelf het leukst als je naar de live hoorcolleges komt.
- Als je naar het hoorcollege komt kan je verwachten:
  - Een belangrijk deel van de lesstof behandeld.
  - Interactieve les, waarbij ik vragen stel aan de zaal, direct of via online poll.
- Als je naar het hoorcollege komt verwacht ik:
  - Dat je actief meedoet (dus niet kletsen, slapen, gamen, tiktok, snapchat etc).



# Physics Experiments:

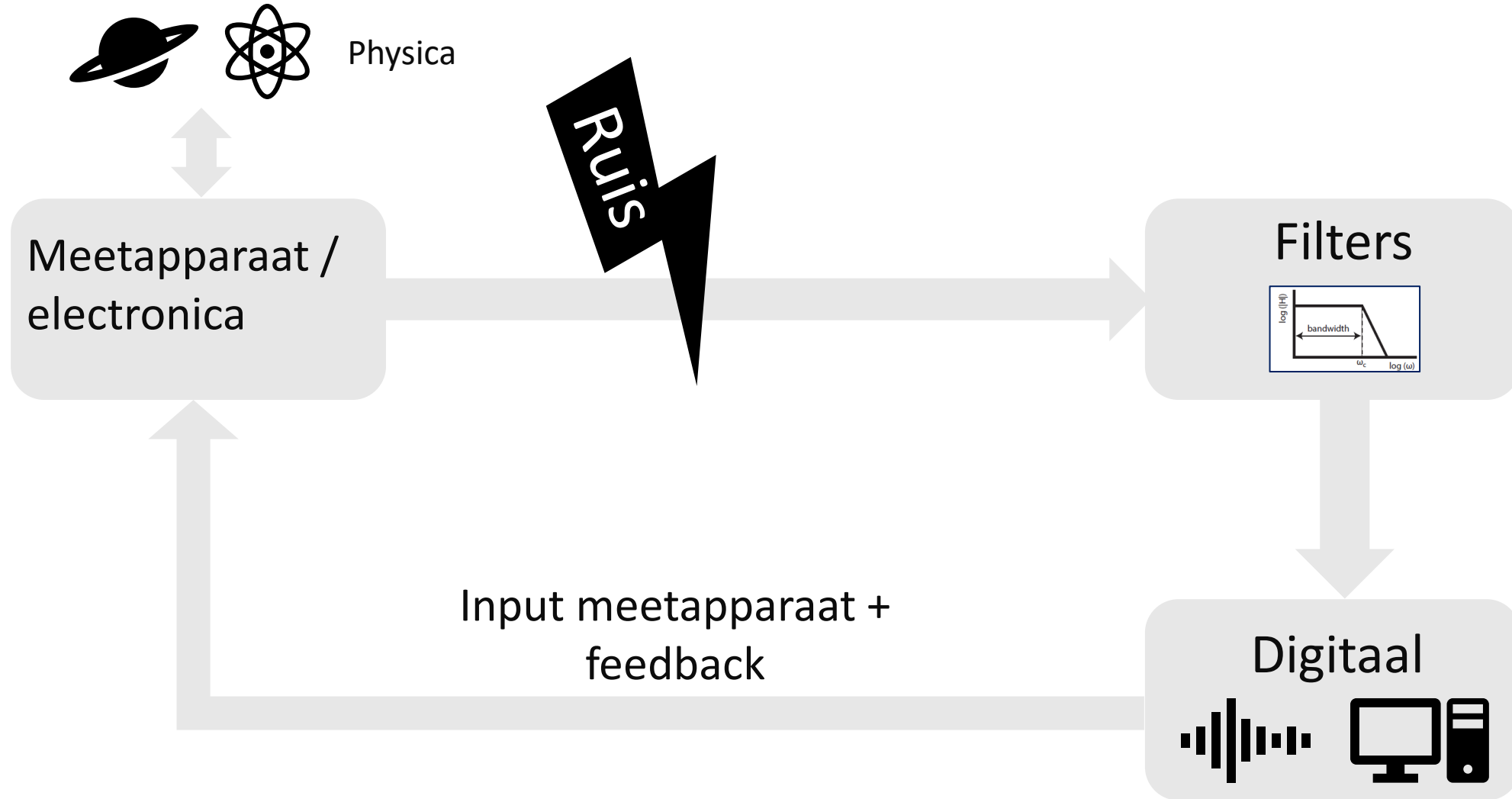
## “Door meten tot weten” (Kamerlingh Onnes)



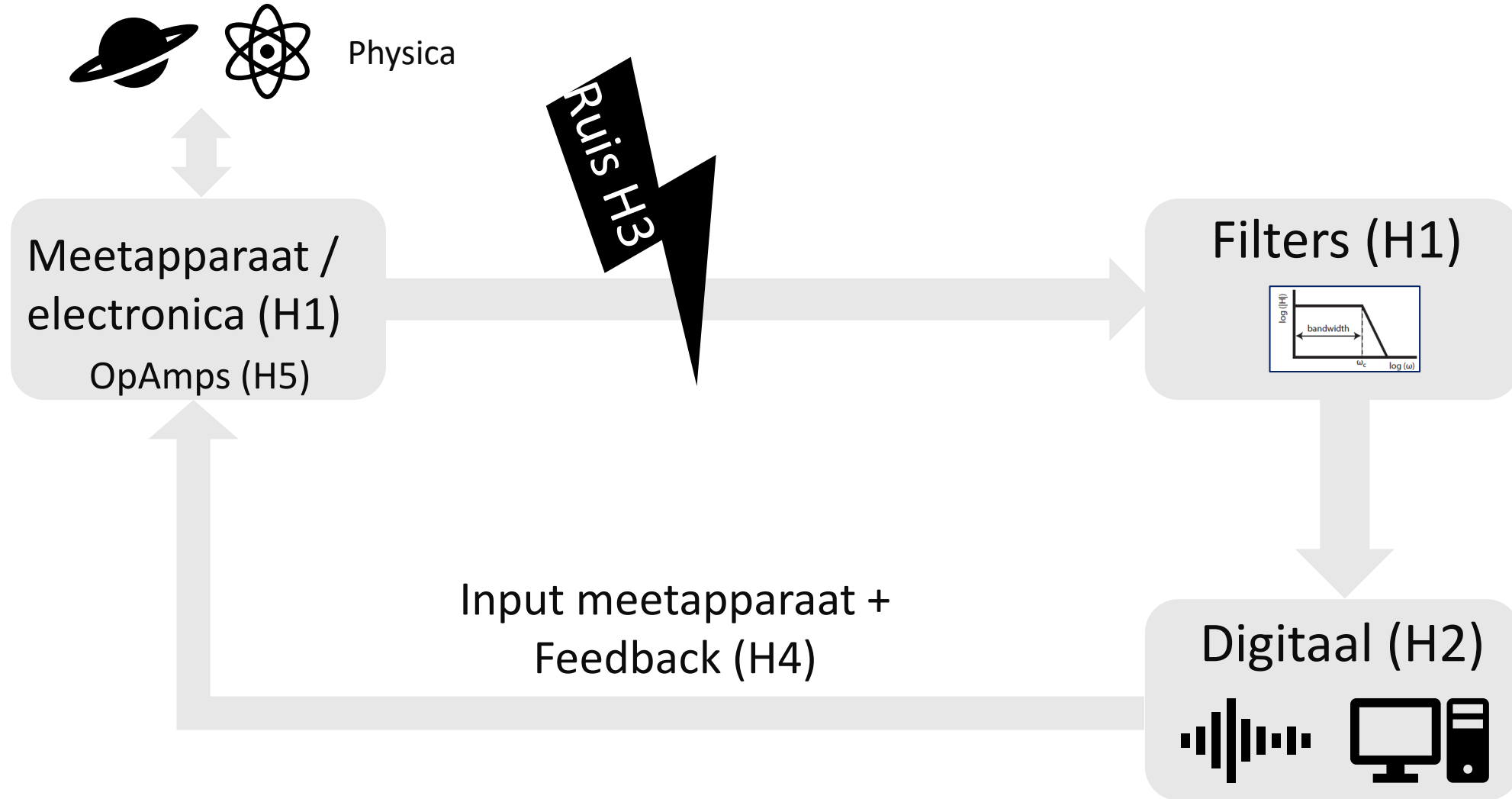
# Doel Physics Experiments

- Natuurkundebachelor in Leiden een van de **meest experimentele** van Nederland (24 punten experimenteel onderzoek BSc thesis. Delft: 12 punten, Utrecht: 15 punten etc.)
  - Je bent een onderzoeker → bachelor-onderzoek kan gepubliceerd worden
- Onderzoek doen is geen “opgavetje” oplossen
  - Theorie, creativiteit, meten, interpreteren, hypothesen, nieuwsgierigheid, plannen en organiseren, moed + nog tientallen andere vaardigheden
- Physics Experiments (1,2,3) is bedoeld als brug tussen de meer “klassieke vakken” en experimenteel onderzoek → Doel: zelfstandig experimenteel kunnen doen

# Physics Experiments 2: onderdelen van meetsystemen



# Physics Experiments 2: onderdelen van meetsystemen



# PE2 onderdelen

1. LTI systemen & elektrische circuits
2. Fouriertransformaties en signaalverwerking
3. Stochastische signalen: Ruis
4. Feedback
5. OpAmps

Date	Lecture	Accompanying exercise class	Related chapter(s) in reader	Topics (preliminary)
14 jan	C1	W1	H1 Electronic circuits	Repeat of PE1 plus loading filters, impulse response, step response
16 jan	C2	W2	H2 Signal Processing	Convolution, aliasing, spectral leakage, frequency resolution
6 feb	C3	Python	H1/H2 Applications Start H3	Force microscopy, (lockin amplifier), (2D transformaties), Start Noise <b>Exercise class: In Python 2D transformations using Python, important for practicals!</b>
13 feb	C4	W4	H3 Noise	Characterizing noise, noise spectrum, auto-correlation, Wiener-Khinchin, Thermal noise, shot noise
20 feb	C5	W5	H3 Noise: Applications	Improving SNR
27 feb	C6	W6	H4 Feedback	Open loop, closed loop, (in)stability
6 mar	C7	W7	H4 Applications	Applications / repeat and deepening: Nyquist stability criterion
13 mar	C8	W8	H5 OpAmp	Golden Rules
20 mar	C9	W9	H5 OpAmp	Non Ideal OpAmp, Applications OpAmp
27 mar	C10	W10	Repeat	
	T		<b>Exam</b>	<b>Study material:</b> Reader H1-5 incl. exercise classes and materials discussed during lectures (unless communicated otherwise).



- Session 1: Digital Artefacts
- Session 2: Noise Characterization and Reduction
- Session 3: Feedback systems
- Session 4: OpAmp feedback circuits

# Voorbeelden in onderzoek bij LION

## Een Scanning Tunneling Microscope



## Noise meting - Science

### Regendruppel-op-het-dak-techniek verraadt nieuwe quantumvloeistof

28 oktober 2021

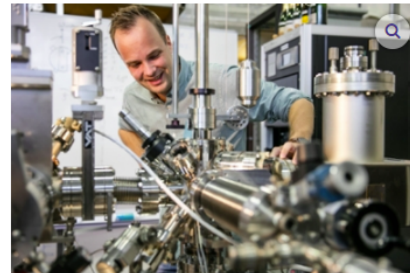
Natuurkundige Koen Bastiaans en collega's hebben een nieuwe quantumvloeistof ontdekt. Dat is ze gelukt met een techniek die te vergelijken is met luisteren naar regendruppels die op het dak vallen. Publicatie in Science, 29 oktober 2021.

Wie herinnert zich nog die ouderwetse gloeilampen? Ze gaven een gezellige warme gloed, maar ze werden wel erg warm en zouden tegenwoordig je elektriciteitsrekening flink doen oplopen. Waarom? Omdat ze gemaakt zijn van een materiaal met een grote elektrische weerstand. Alle materialen hebben een zekere weerstand tegen elektriciteit.

Alle materialen? Nee, een kleine klasse van veel bestudeerde materialen die supergeleiders heten niet. Daar kan elektrische stroom doorheen lopen zonder weerstand, als ze tenminste afgekoeld worden naar (extreem lage) temperaturen. Hoe dat precies werkt is een van de hardnekkige geheimen van de natuurkunde.

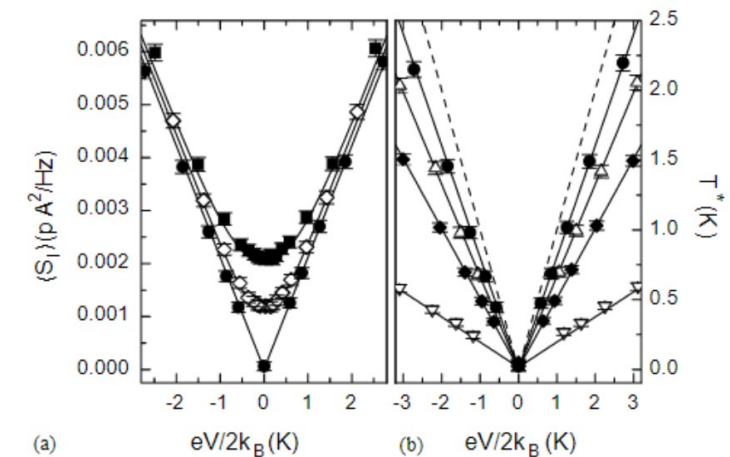
#### Theorie uit de leerboeken

Er is een theorie die verklaart waarom sommige materialen supergeleidend worden: als ze afgekoeld worden tot onder de overgangstemperatuur, vormen de elektronen in het materiaal paren, de zogeheten Cooperparen. Vervolgens condensereren deze Cooperparen tot een quantumvloeistof die zonder weerstand door het materiaal vloeit. Dit veroorzaakt de supergeleiding.



eerste auteur Koen Bastiaans

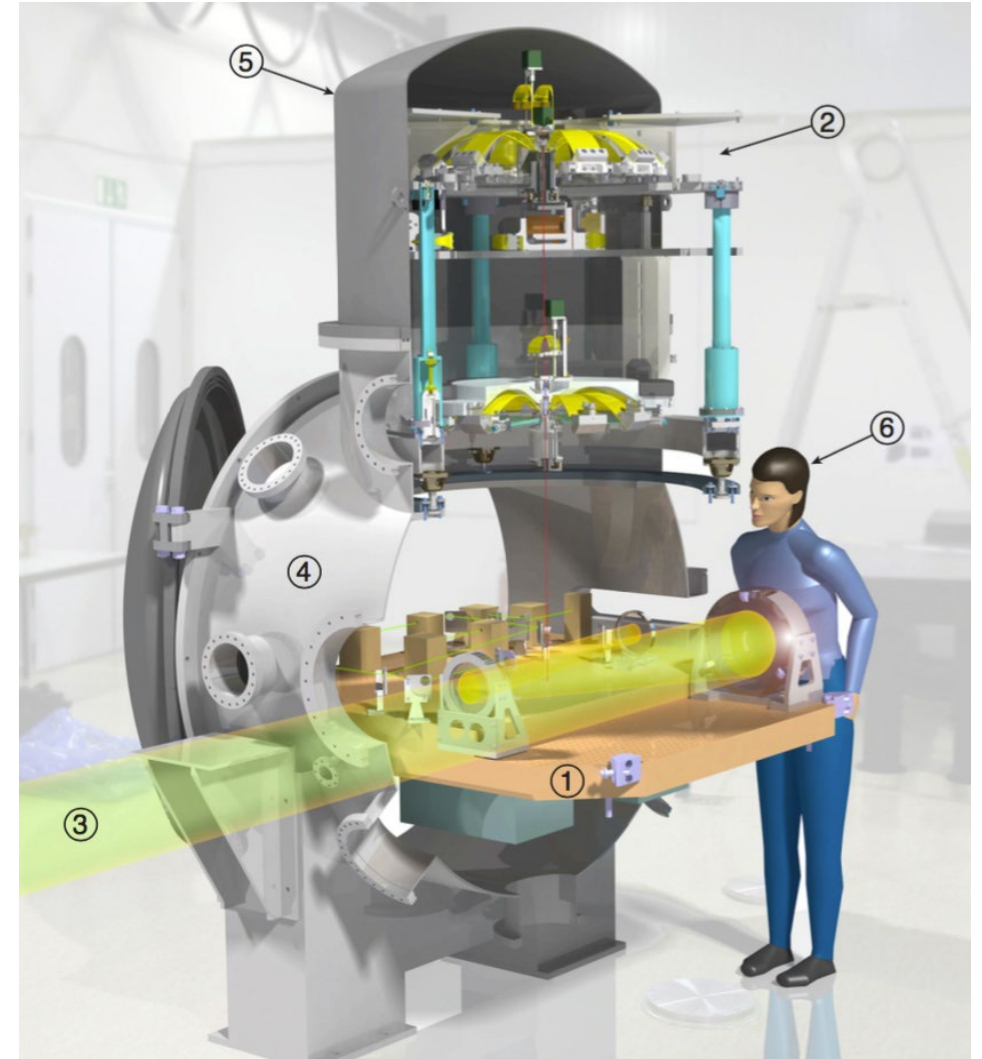
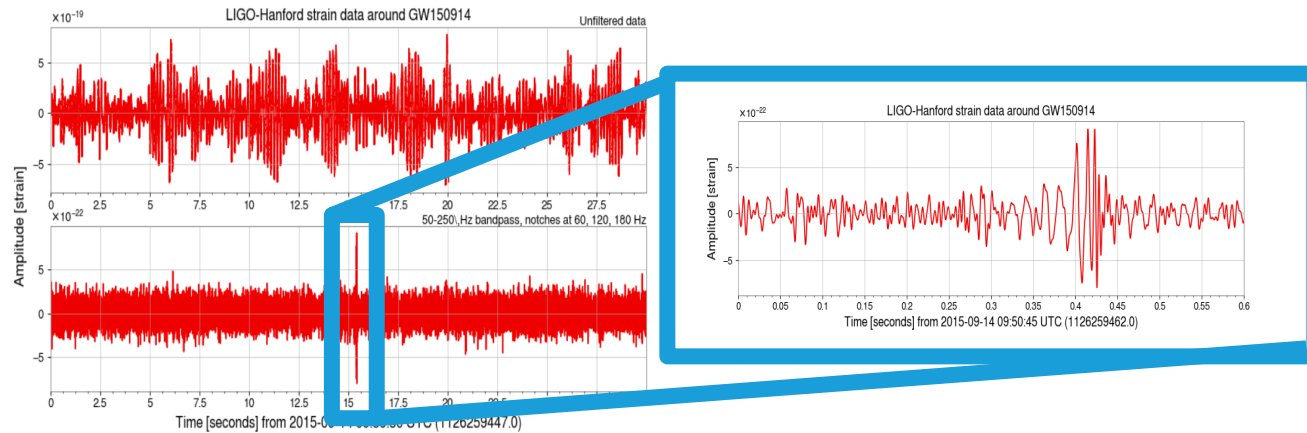
## LEEM van Sense Jan van der Molen



## Shot Noise metingen aan supergeleiders (Ruitenbeek, theorie: Beenakker)

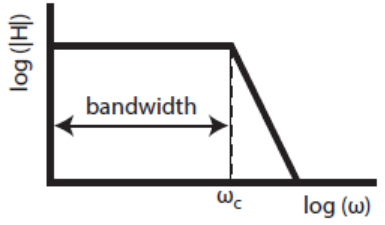
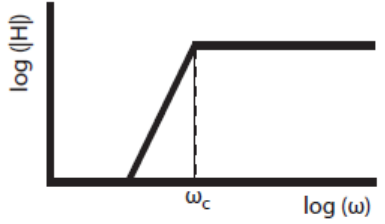
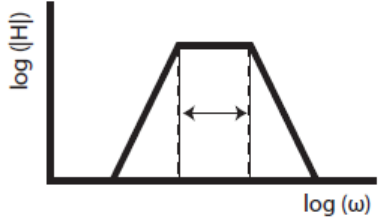



# Nog een voorbeeld: VIRGO gravitational waves



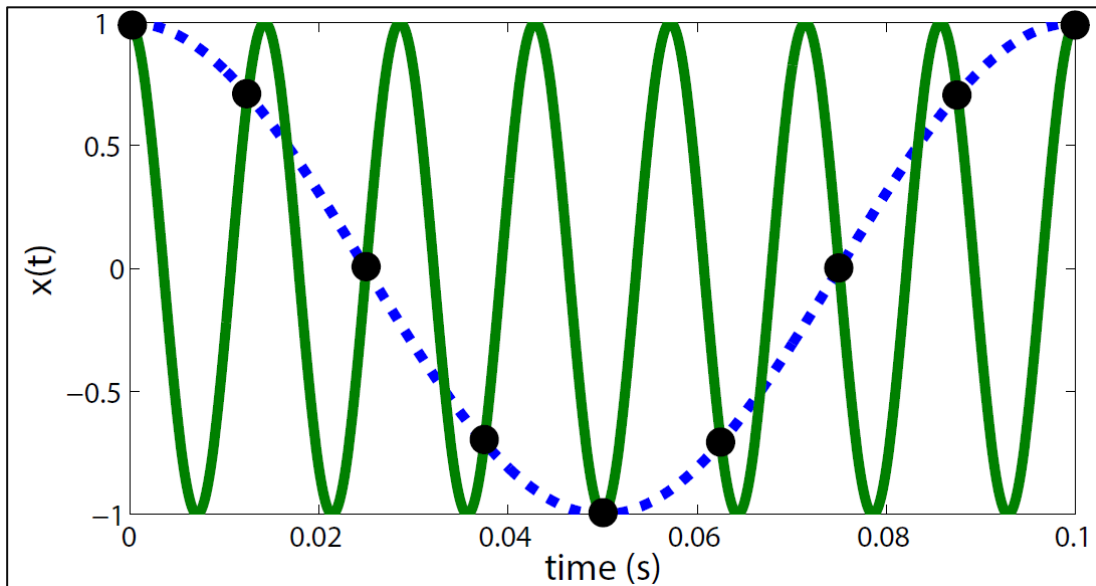
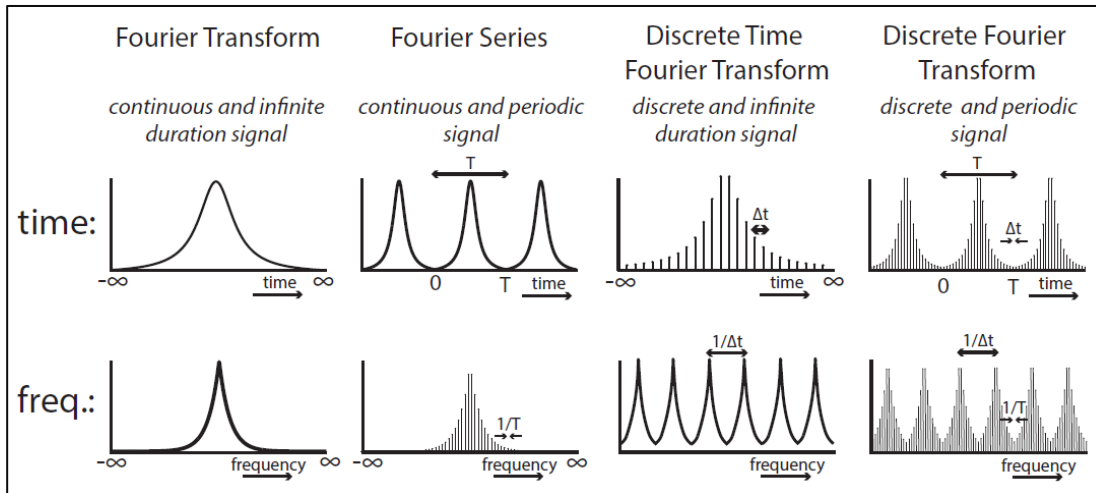


# Hoofdstuk 1: college 1 (LTI systemen & Elektrische circuits)

Filter	Bode magnitude plot
Low-pass filter	
High-pass filter	
Band-pass filter	
Band-stop filter	

1. Herhaling PE1
2. Filters
3. Coupled filters (loading of filters)
4. Transfer function
5. Impulse response function
6. Step response function

# Hoofdstuk 2: college 2 en 3 (Fouriertransformaties en signaalverwerking)



1. Herhaling PE1

2. Convolutie

3. Sampling:

1. Aliasing

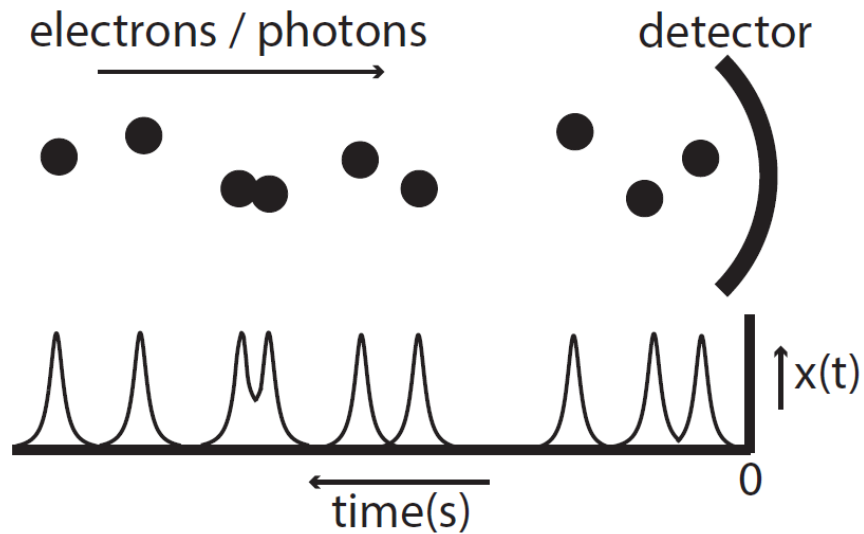
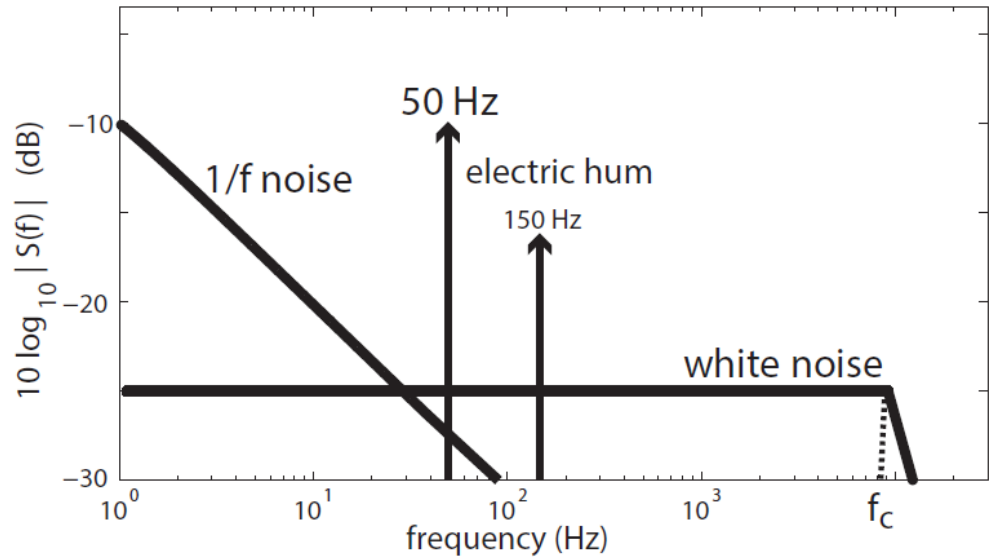
2. Windowing / spectral leakage

3. A/D conversie

4. Werkcollege: 2D FT

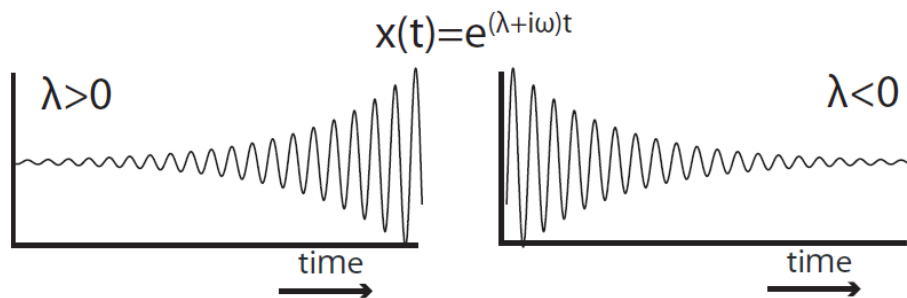
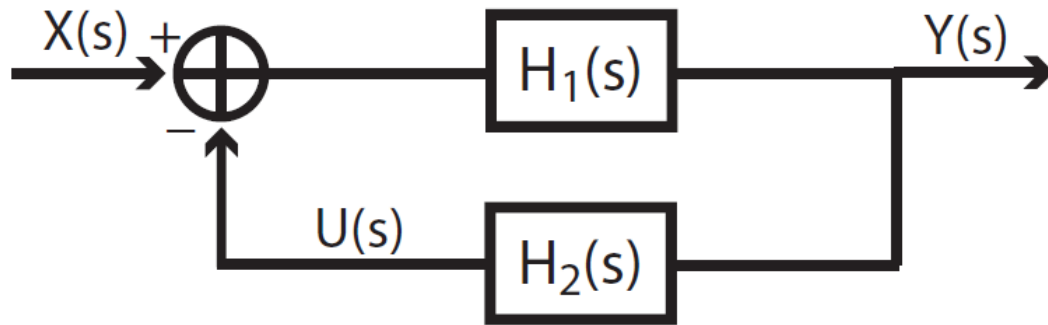
— *Let op: niet in reader*

# Hoofdstuk 3: college 4 en 5 (Stochastische signalen, Ruis)



1. Stochastische signalen
2. Thermische ruis
3. Shot noise (hagelruis)
4. Signaal-Ruis-Verhouding (SNR)

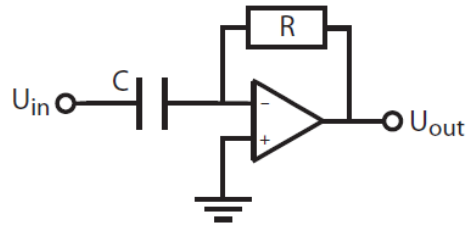
# Hoofdstuk 4: college 6 en 7 (Feedback)



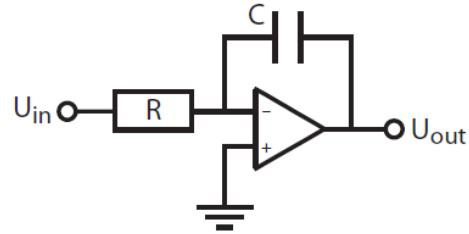
1. Laplace Transformatie
2. Overdrachtsfunctie positieve en negatieve feedback
3. (PID) feedback
4. Stabiliteitscriterium
  - Extra (niet in reader):  
Nyquist stabiliteitscriterium

# Hoofdstuk 5: college 8 en 9 (OpAmps)

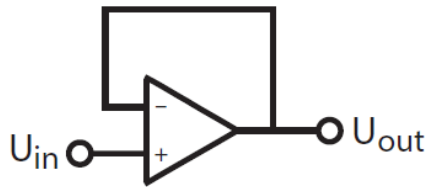
differentiator



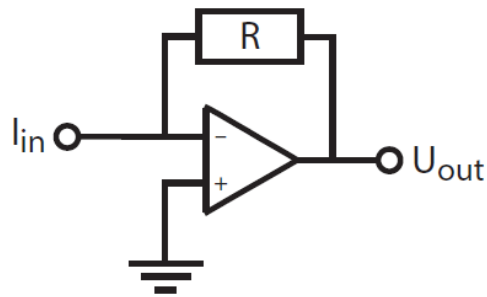
integrator



buffer amplifier



IV-converter



1. Hoe te rekenen aan OpAmps:
  - De Gouden Regels
2. Verschillende toepassingen
3. De niet perfecte OpAmp

# Obstakels? Feedback?



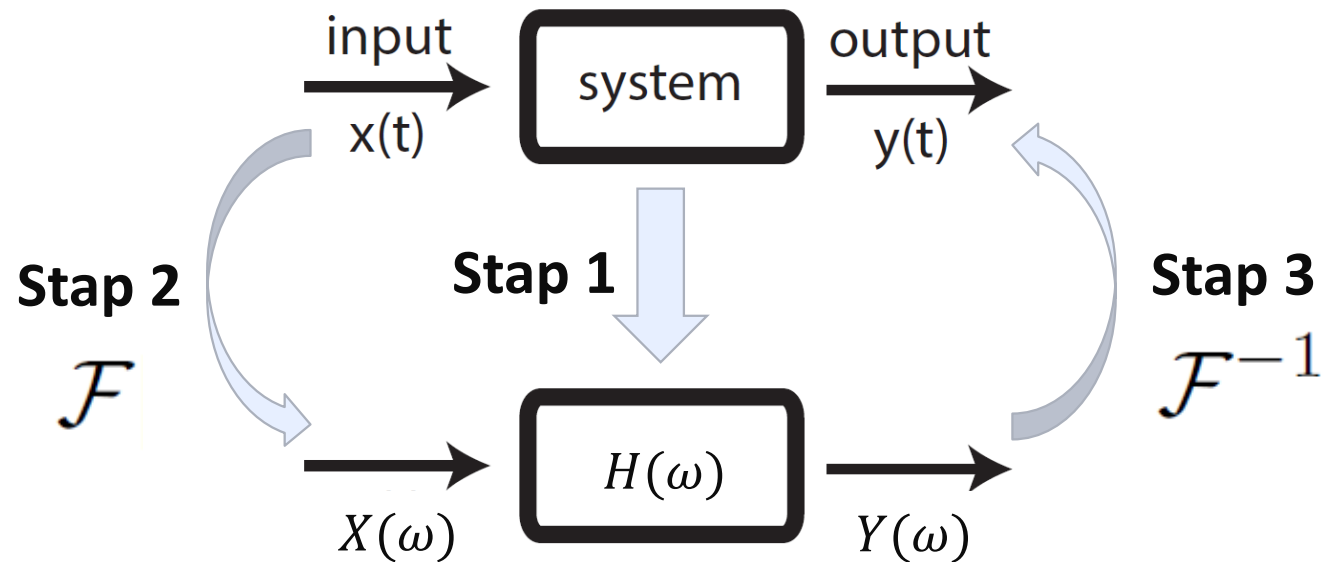
[hensen@physics.leidenuniv.nl](mailto:hensen@physics.leidenuniv.nl)



## Je kunt van mij verwachten:

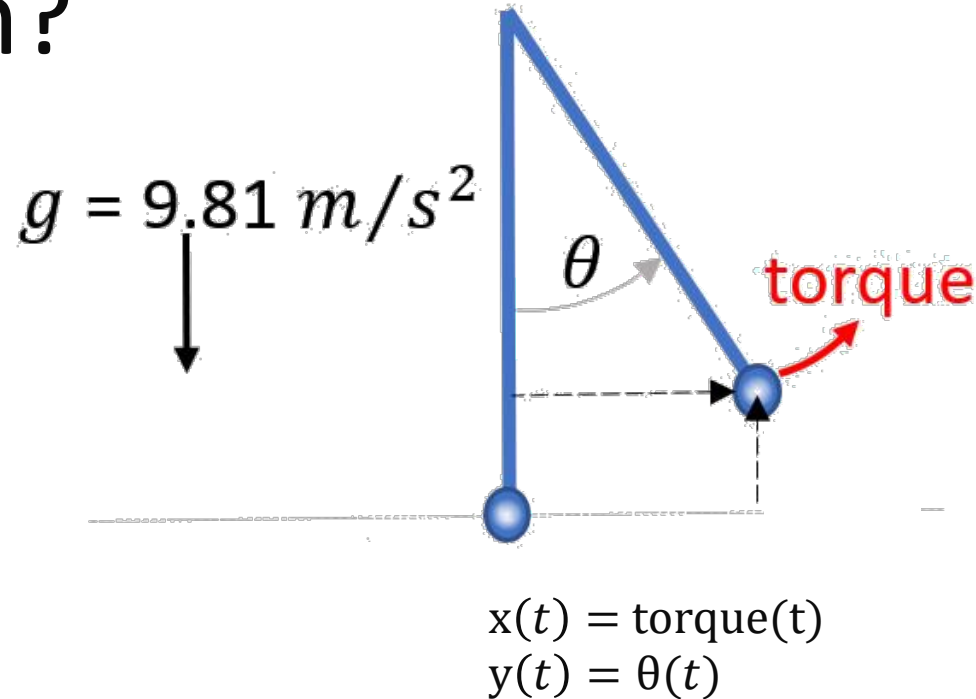
- Hulp bij vragen (mail)
- Open voor feedback
- Is er iets waardoor er om praktische redenen iets misgaat: We zoeken naar een oplossing
- Snel nagekeken werk waar mogelijk

# Physics Experiments 1: the power of working in the frequency domain



# Quizvraag

Is een aangedreven slinger  
een LTI systeem?

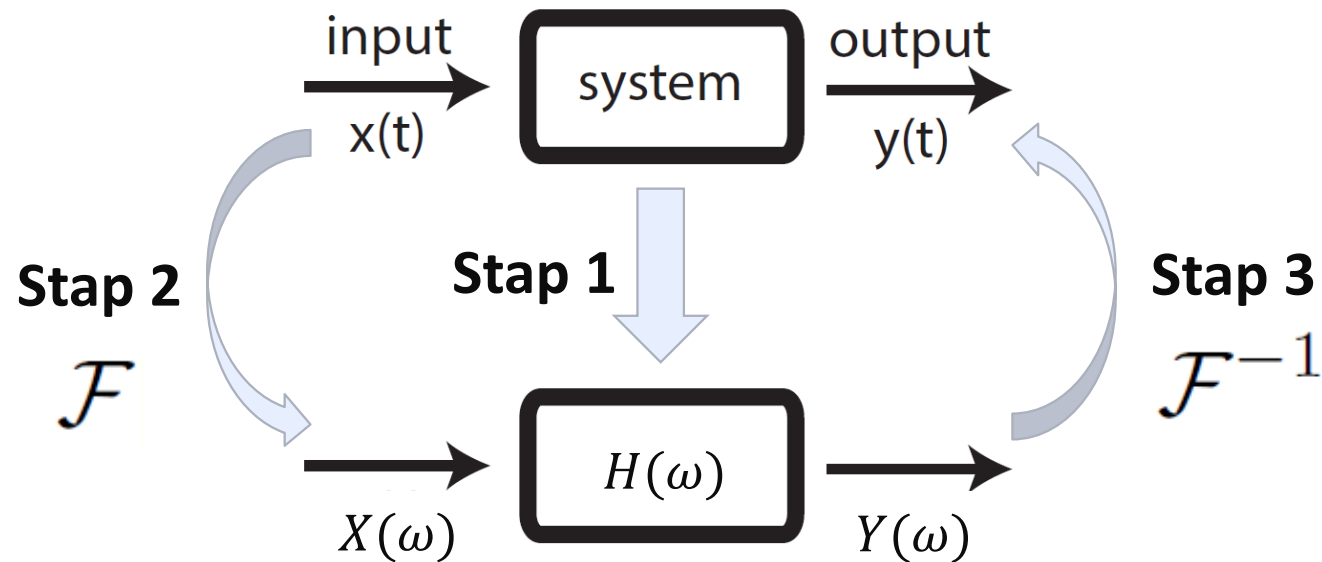


En  $y(t) = x(2t)$ ?





# Physics Experiments 1: the power of working in the frequency domain



Fourier transform

$$X(\omega) = \mathcal{F}[x(t)](\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-i\omega t} dt$$

$$x(t) = \mathcal{F}^{-1}[X(\omega)](t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega)e^{i\omega t} d\omega$$

some properties

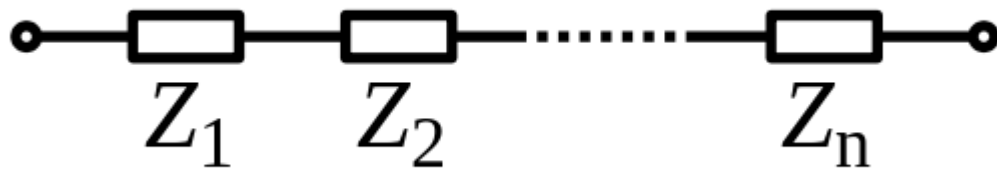
$$\mathcal{F}[ax(t) + by(t)] = aX(\omega) + bY(\omega)$$

$$\mathcal{F}\left[\frac{dx(t)}{dt}\right] = i\omega X(\omega)$$

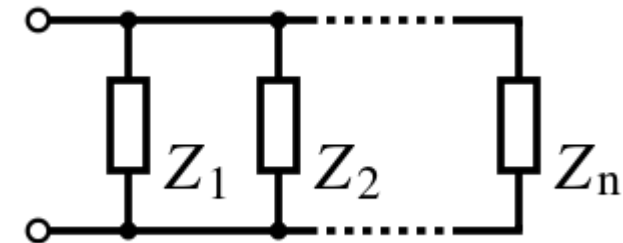
$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |X(\omega)|^2 d\omega$$

# Electrical impedances

Component	Differential equation	Impedance
Resistor	$u_R(t) = Ri_R(t)$	$R$
Capacitor	$u_C(t) = \frac{1}{C} \int i_C(t) dt$	$\frac{1}{i\omega C}$
Inductor	$u_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt}$	$i\omega L$



$$Z_{eq} = Z_1 + Z_2 + \dots + Z_n$$



$$\frac{1}{Z_{eq}} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \dots + \frac{1}{Z_n}$$

# Quizvraag

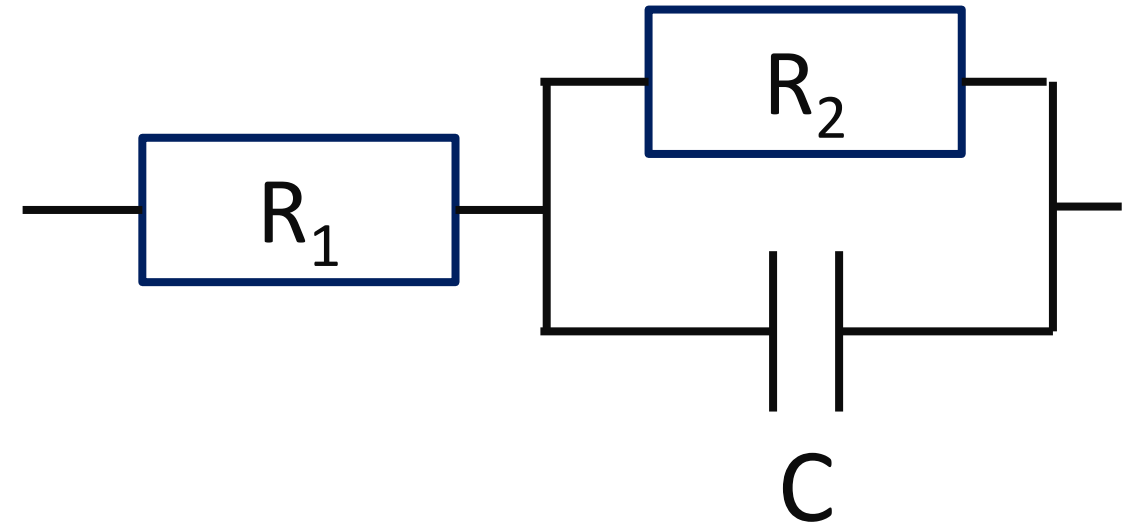
A resistor  $R_1$  is connected in series with a capacitor  $C$ . The capacitor  $C$  is connected in parallel with a second resistor  $R_2$ . What is the total impedance of this circuit?

A.  $R_1 + \frac{1}{R_2 + \frac{1}{i\omega C}}$

B.  $R_1 + \frac{1}{R_2} + i\omega C$

C.  $R_1 + \frac{1}{1/R_2 + i\omega C}$

D.  $R_1 + \frac{1}{R_2 + i\omega C}$



# Waarom filters koppelen?



Filter	Bode magnitude plot
Low-pass filter	
High-pass filter	
Band-pass filter	
Band-stop filter	

Waarom zou je  
meerdere filters aan  
elkaar willen  
koppelen?

# Breinbreker impulrespons

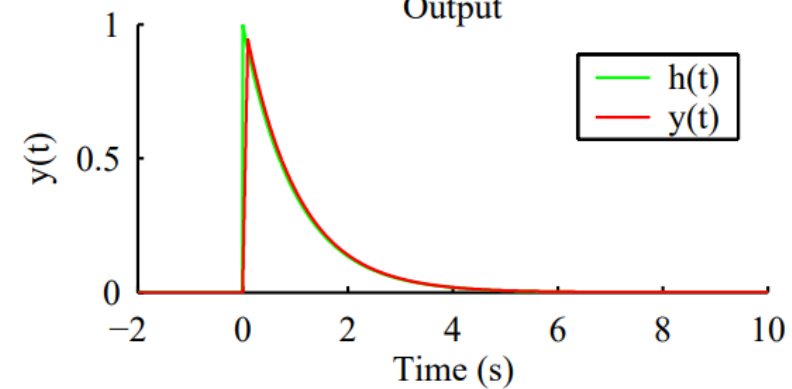
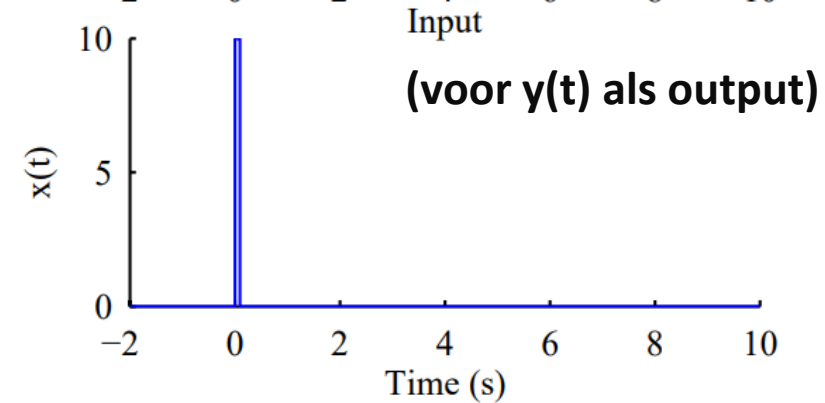
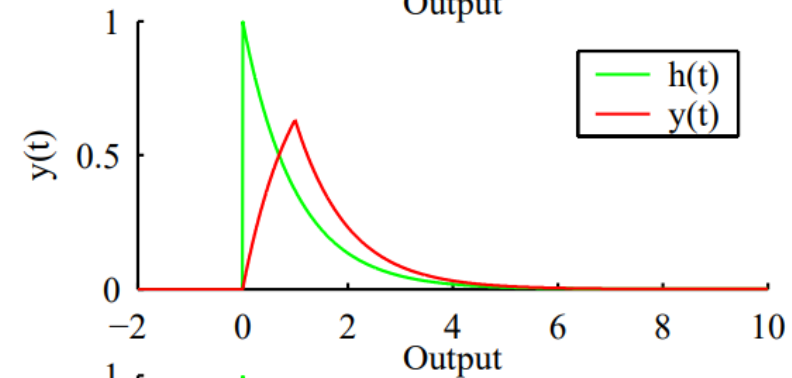
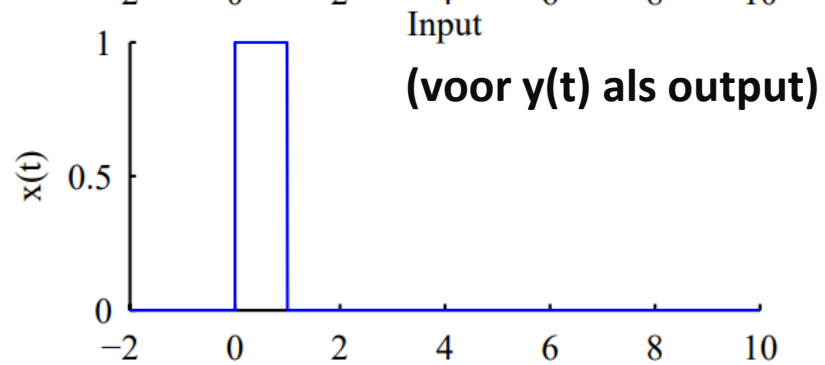
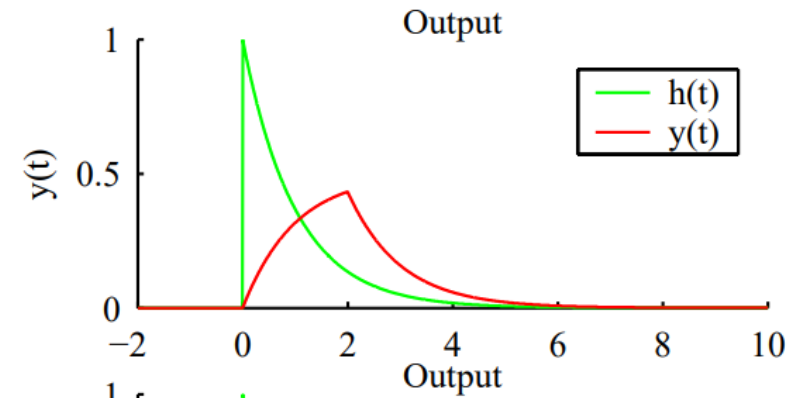
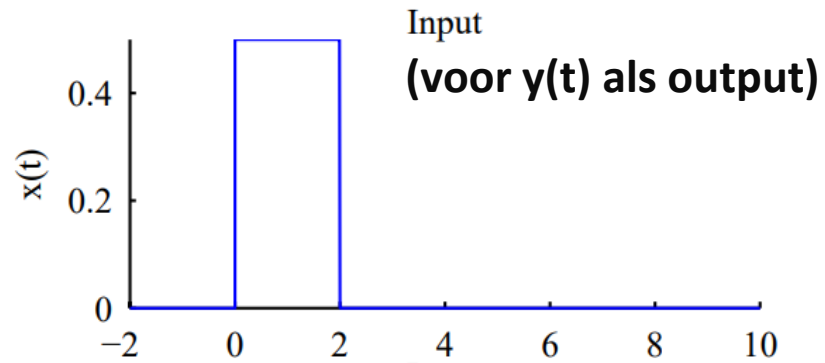


Wat is het voordeel van de impulsrespons  $h(t)$  meten i.p.v. de overdrachtsfunctie  $H(\omega)$ ?

Wat is het nadeel van de impulsrespons  $h(t)$  meten i.p.v. de overdrachtsfunctie  $H(\omega)$ ?

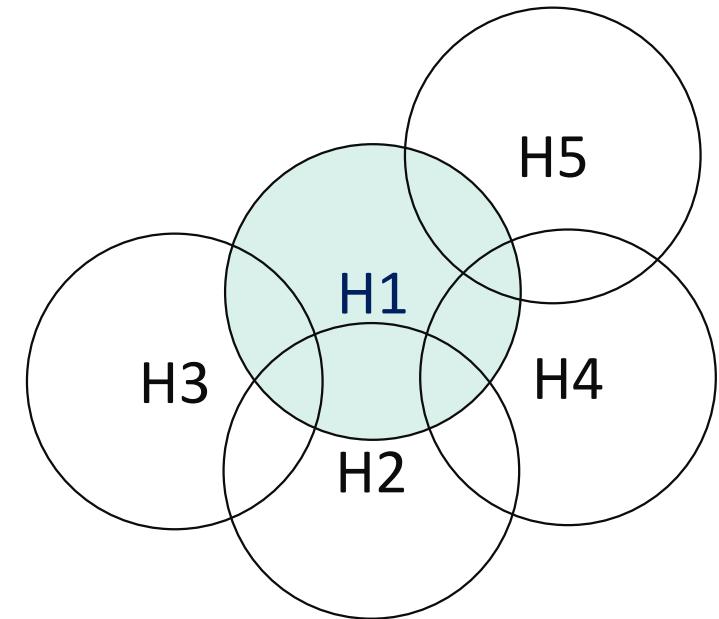


# Tijdschalen weer belangrijk



Einde college 1

- PE1 lang geleden? → Lees hoofdstuk 0
- Lees hoofdstuk 1 uit de reader
  - Niet behandeld hier:
    - Teken van bode plots en polaire plot (PE1)
    - De orde van een filter of systeem (belangrijk!)
- **Werkcollege maken**
  - Opgave 1 is even recap PE1
  - Opgave 2 en 3 gaan over dit college
  - Opgave 3 een ander LTI systeem
  - Opgave 4 verdiepend herhalend
    - LCR system, Q en FWHM



Niet bijhouden is dubbel werk



## Bodeplot generators & Fourier serie applet

<https://www.circuitlab.com/editor/#?id=vf52h5>

<https://www.falstad.com/fourier/>

<http://sim.okawa-denshi.jp/en/RLCtool.php>

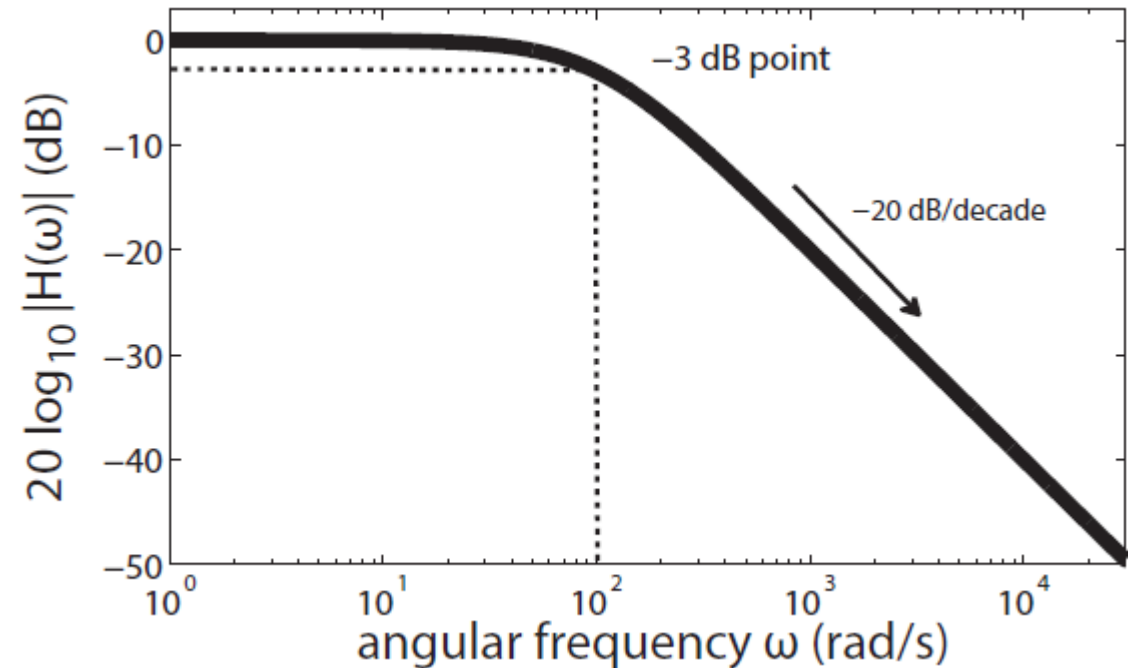


# Collegerekvraag



I have a **third order** low-pass filter. How many dB per decade does the amplitude of the transfer function decrease for high frequency signals?

Give your answer as a number, for example 20 if the amplitude decreases with 20 dB per decade.



## Question 1 (10 points):

Is the Fourier Transform a linear operation (a linear system)?

- A. Yes
- B. No

## Question 2 (10 points):

The Fourier Transform of the time derivative of  $x(t)$  is equal to  $\alpha X(\omega)$ , where  $X(\omega)$  is the Fourier Transform of  $x(t)$ , what is  $\alpha$ ?

- A.  $i\omega$
- B.  $\frac{1}{i\omega}$
- C.  $\frac{1}{2\pi}$
- D.  $2\pi$

Einde college 1